

NNCL451-350v1.0

Albert-László Barabási

# BEHÁLÓZVA

A hálózatok új tudománya  
Hogyan kapcsolódik minden egymáshoz,  
és mit jelent ez a tudományban, az üzleti  
és a mindennapi életben

Fordította Vicsek Mária  
MAGYAR KÖNYVKLUB

Az Axelero Internet szeretettel ajánlja a világháló iránt érdeklődők figyelmébe Albert-László Barabási Behálózva - a hálózatok új tudománya című könyvét.

A kötet kiadásának támogatásával az Axelero tisztelegni kíván mindazok előtt, akik inspirálják gondolkodásunkat, színesebbé, árnyaltabbá teszik a jövőről alkotott képünket – legyen szó technológiáról, kultúráról vagy üzletről.

Kiadja a Magyar Könyvklub,  
Budapest, 2003,  
az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók  
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja  
Felelős kiadó Révai Gábor, a Magyar Könyvklub igazgatója  
Irodalmi vezető Balázs Éva  
Szakmailag ellenőrizte Farkas Illés  
Műszaki vezető Mátay-Mayer Gergely  
A kiadványt Császár András tervezte

# **ELŐSZÓ**

## ***Átlátni a szitán***

„Látod-e azt, amit nézel, vagy már csak tudod: ott az van?” Ezt a bölcs kérdést akár minden egyes nap, amikor a számítógépet bekapcsoljuk és csatlakozunk a világhálóra, feltehetjük magunknak. Tudjuk-e azt, hogy minek vagyunk a része? Tudatában vagyunk-e annak, hogy amikor egyszerűen keresgélünk, letöltünk egy filmelőzetest vagy rendelünk egy pizzát - és különösen ha a munkánkat végezzük, amely az internethez köt minket -, egy végtelenül összetett, mégis igen egyszerű, könnyen felfogható elvekre épülő hálózat elemeivel operálunk, sőt az általunk kibocsátott jelek is a részeivé válnak.

„Számítógép regisztrálása a hálózaton” - ezzel a mondattal fejeződik be az internetre való csatlakozás menete hagyományos, betárcsázós kapcsolat esetén. Magyarországon minden második ember, akinek ez a mondat megjelenik a monitorján, az Axelero Internet ügyfele. Több tízezer felhasználónk kezdi úgy a napját, hogy csatlakozik a világhálóra - mondhatni, mit sem sejtve. Dehogynem. Tudják, tudjuk: az internet nem csak egy technológia, nem csak egy lehetőség - egy életforma.

Izgalmas és végtelenül dinamikus világban élünk, számtalan fontos választás előtt állunk, melyek egy részéről talán tudomásunk sincs. Az élet minden területét átható változásokon megyünk keresztül, melyek motorja az internet. Új formákat teremt a kapcsolattartásban, az ismeretszerzés, a munkavégzés és a szórakozás terén. Az Axelero küldetése az, hogy inspiráljon, és mindenkit hozzásegítsen ahhoz, hogy kihasználhassa az internet által minden percében átítatott kor nyújtotta lehetőségeket.

Az internet mára közmű lett - mégsem tudunk róla eleget. Ha pedig nem tudunk eleget, nem is bízhatunk benne úgy, ahogy azt tesszük a mindennapjainkat körülvevő más, hatalmas és bonyolult hálózatos rendszerekkel, legyen az akár a csatorna-, az út- vagy az elektromos hálózat, vagy éppen saját idegrendszerünk.

Ezért támogatjuk Albert-László Barabási könyvének magyar kiadását, ezért ajánljuk Önnek ezt az olvasmányt. Ha már internetezik, akkor élvezheti, hogy a mindennapjaiban jelen lévő hálózatról milyen újszerű módon beszél. Ha még nem, akkor megismerkedhet a behálózottság nagyszerű sodrásával. A sokszor még távolinak tűnő digitális világ, miközben azonos elvekre épül, kitágítja a lehetőségeinket. Ma már egyszerűen nem élhetünk a világháló nélkül.

Az Axelero Internet csapata

Szüleimnek

# Tartalom

AZ ELSŐ LÁNCSZEM: BEVEZETÉS

A MÁSODIK LÁNCSZEM: A VÉLETLENSZERŰ VILÁGEGYETEM

A HARMADIK LÁNCSZEM: HATLÉPÉSNI TÁVOLSÁG

A NEGYEDIK LÁNCSZEM: KIS VILÁGOK

AZ ÖTÖDIK LÁNCSZEM: KÖZÉPPONTOK ÉS ÖSSZEKÖTŐK

A HATODIK LÁNCSZEM: A 80/20-AS SZABÁLY

A HETEDIK LÁNCSZEM: A GAZDAG EGYRE GAZDAGABB

A NYOLCADIK LÁNCSZEM: EINSTEIN HAGYATÉKA

A KILENCEDIK LÁNCSZEM: AZ ACHILLES-SAROK

A TIZEDIK LÁNCSZEM: VÍRUSOK ÉS SZESZÉLYEK

A TIZENEGYEDIK LÁNCSZEM: AZ ÉBREDEZŐ INTERNET

A TIZENKETTEDIK LÁNCSZEM: A DARABOKRA TÖRT VILÁGHÁLÓ

A TIZENHARMADIK LÁNCSZEM: AZ ÉLET TÉRKÉPE

A TIZENNEGYEDIK LÁNCSZEM: HÁLÓZATI GAZDASÁG

AZ UTOLSÓ LÁNCSZEM: HÁLÓ, PÓK NÉLKÜL

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

# **AZ ELSŐ LÁNCSEM**

## **Bevezetés**

2000. február 7-e akár nagy nap is lehetett volna a Yahoo! számára. Az internetkeresőt a szokásos napi néhány millió felhasználó helyett milliárdok próbálták elérni. Ez a kirobbanó népszerűség a társaságot az internetes gazdaság legértékesebb cégei közé emelhette volna. Volt azonban egy probléma. Mindegyik felhasználó pontosan ugyanabban az időpontban érkezett, és egyikük sem a tőzsdeindex vagy a diós sütemény iránt érdeklődött. A számítógépek kódolt nyelvén mindannyian a következő üzenetet küldték: „Igen, hallottalak téged!” A helyi „fekete dobozok” szerint a Yahoo! nem mondott semmit. Mégis, a Yahoo! központjában, a kaliforniai Santa Clarában számítógépek százai csak azzal voltak elfoglalva, hogy ezeknek a sikoltozó szellemeknek válaszoljanak. Eközben a felhasználók milliói, akiket egy film címe vagy repülőgépjegy érdekelt volna, vártak. Én is köztük voltam. Természetesen fogalmam sem volt arról, hogy a Yahoo! eközben kétségbeesetten próbál tízmilliárd szellemet kiszolgálni. Három percig türelmesen vártam, aztán egy gyorsabban válaszoló keresőhöz fordultam. A következő napon a web „krémjét”, az Amazon.com, eBay, CNN.com, E\*Trade és Ex-cite társaságokat utolérte ugyanaz a varázslat: kénytelenek voltak szellemek milliárdjait kiszolgálni, akik ugyanazt a fölösleges kérdést küldték, amelyik megbénította a Yahoo!-t. A valódi vásárlók, vásárlásra készen, csillogó hitelkártyákkal, a forgalomtól kiszorulva várakozni kényszerültek.

Természetesen lehetetlen azt elérni, hogy több milliárd ember mind pontosan a nyugati partvidék zónaideje szerint 10.20-kor gépelje be a keresőjébe a yahoo.com címet. Egyszerűen nincs ennyi számítógép. A korai hírelemzések szerint a vezető kereskedelmi webszolgáltatók megbénítása egy csoport tapasztalt hacker műve lehetett. Mindenki egyetértett abban, hogy számítógépőrültek egy kis csoportját felvillanyozta az a kihívás, amit a bonyolult biztonsági rendszerek kijátszása jelentett, és iskolai, kutatólaboratóriumi és üzleti számítógépek százait kényszerítették arra, hogy zombiként ezt ismételték a Yahoo!-nak: „Igen, hallottalak téged!” Minden másodpercben hatalmas mennyiségű adattal árasztották el ezt a kiváló webhelyet, sokkal többel, mint amennyit egyáltalán képes kezelni. Az a támadás, amely tömeges szolgáltatásmegtagadást okozott a Yahoo!-nál, egy óriási publicitással járó nemzetközi vadászatot indított el a felelős hackerek megtalálására.

Meglepetésre a Federal Bureau of Investigation (FBI) rendkívüli nyomozati eljárása nem az előre várt számítógépes terrorszervezethez vezetett. Ehelyett az FBI egy kanadai tizenéves elővárosi otthonához jutott el. Egy internetes chatszoba lehallgatása közben figyeltek fel a nyomozók a tinire, amikor éppen új támadási célpontokra kért javaslatokat. Hetvenkedés közben csípték el.

Ez a MafiaBoy álnév mögött rejtőző tizenöt éves fiú sikeresen megbénította a világ legjobb számítógépes biztonsági szakértőivel rendelkező milliárd dolláros társaságait. Vajon ő volt korunk Dávidja, aki

a legszerényebb otthoni számítógépes csúzlival felfegyverkezve legyőzte az információs korszak hatalmas Góliátját? Utólag a szakértők egy dologban egyetértenek: a támadás nem egy zseni műve. Olyan eszközökkel hajtották végre, amelyek a hálózaton (különböző hacker webhelyeken) mindenki számára elérhetőek. MafiaBoy online bohóckodásaiból kiderül, hogy teljesen amatőr, széles és mély lábnyomai a rendőrséget egyenesen szülei ajtajához vezették. Alapjában véve tettei inkább Góliátra, mint Dávidra emlékeztetnek. Nem rendelkezett elég tudással ahhoz, hogy behatoljon az általa megtámadott bármelyik webhelyre, ezért ügyetlen és lassú észjárásával csak a könnyű célpontokat sikerült legyőznie, az egyetemek és kis társaságok sebezhető számítógépeit, amelyeket egyszerűen arra utasított, hogy bombázzák üzenetekkel a Yahoo!-t.

Képzeljük el a tizenöt éves fiút szobája ajtaja mögött, ahogy számítógépe fényében kéjes gyönyört lel a Yahoo!-ra elküldött, véget érni nem akaró „Igen, hallottalak téged!” üzenetekben. Ezt a mondatot saját maga is milliószor kiálthatta, mikor a mama vagy a papa vacsorázni hívta vagy a szemetet akarta vele kivetetni. A támadás sikeréhez nyers erő, nagy merészség és egészen kevés tapasztalat is elég volt. Éppen ez az, amire kíváncsiak vagyunk: ennek a tizenévesnek a lépései hogyan győzhették le az internetes gazdaság legnagyobb vállalatait? Ha egyetlen suhanc képes az interneten ekkora pusztítást véghezvinni, akkor mit érhetne el gyakorlott és jól képzett szakértők egy kis csapata? Mennyire vagyunk kiteve az ilyen támadásoknak?

## 1.

A korai keresztények csupán egy renegát zsidó szektának tekinthetők. A különc és problematikusnak tartott társaságot egyaránt üldözték a zsidó és római hatóságok. Nincs történelmi bizonyíték arra, hogy szellemi vezetőjüknek, a názáreti Jézusnak, valaha is szándékában állt volna a zsidókon kívül más közösségekre is hatni. Ezméi eléggé bonyolultak és vitatottak voltak még a zsidók számára is, és az előkelő rétegek megszólítása különösen reménytelennek tűnt. Kezdetben az őt követni kívánó nem zsidó vallásúaknak körül kellett metéltetniük magukat, engedelmeskedniük kellett a judaizmus korabeli törvényeinek, és kirekesztették őket a Templomból, a korai zsidó kereszténység szellemi központjából. Csak kevesen követték ezt az utat. Hiszen majdnem lehetetlen volt a kereszténység üzenetét az emberekhez eljuttatni. A korabeli szétszórt és röghöz kötött társadalomban a híreket és eszméket utazók terjesztették, a távolságok pedig nagyok voltak. Úgy látszott, hogy a kereszténység - sok más vallási mozgalomhoz hasonlóan - ismeretlenségre van kárhozthatva. Az esélytelenség ellenére, ma közel kétmilliárd ember vallja magát kereszténynek. Hogy történhetett ez? Hogyan lettek egy kis és lenézett zsidó szekta liberális eszméi a nyugati világ vezető vallásának alapjai?

Sokak szerint a kereszténység győzelmét annak az üzenetnek köszönheti, amelyet a ma názáreti Jézusként ismert történelmi személy kínált. Napjaink marketingszakértői ezt az üzenetet „fűlbemáshozónak” mondanák. Megérintette az embereket, és generációk adták tovább,

miközben más vallási mozgalmak felvirágoztak, majd el is tűntek. A kereszténység sikerét valójában egy ortodox és istenfélő zsidónak köszönheti, aki Jézussal soha nem találkozott. Héber neve Saul volt, de számunkra római nevén, Pálként ismertebb. Pál élete küldetésének a kereszténység megfékezését tekintette. Közösségről közösségre utazott a keresztényeket üldözve, mert azok Jézust, akit a hatóságok istenkáromlóként elítéltek, Istennel egyenlőként imádták. Pál korbácsolást, kiátkozást és kiközösítést is használt, hogy fenntartsa a hagyományokat, és rákényszerítse a tévelygőket a zsidó törvényeknek való engedelmeskedésre. Ám a történelmi beszámolók szerint ez az ádáz keresztényüldöző harmincnégy éves korában egy hirtelen változáson ment keresztül. Ő lett az új hit legszervenvedélyesebb támogatója, és ezzel lehetővé tette egy kis zsidó szekta számára, hogy a következő kétezer évben a nyugati világ domináns vallásává váljon.

Hogyan járhattak sikerrel Pál erőfeszítései? Felismerte, hogy a kereszténység akkor terjedhet a judaizmuson túl, ha a kereszténnyé válás nagy akadályait megszüntetik. A körülmetélést és a szigorú étkezési előírásokat enyhíteni kell. Ezt az üzenetet elvitte Jeruzsálembe Jézus eredeti tanítványaihoz, és megbízást kapott arra, hogy folytassa a térítést anélkül, hogy megkövetelné a körülmetélést.

De Pál megértette, hogy mindez még nem elég: a tanítást terjeszteni kell. Jól ismerte az első századi civilizált világot Rómától Jeruzsálemig behálózó emberi kapcsolatrendszer-hálózatot, és nekilátott, hogy ahány embert csak képes, elérjen, és az új hitre térítsen. Közel 10 000 mérföldet járt be életének következő tizenkét évében. Azonban nem véletlenszerűen bolyongott; felvette a kapcsolatot a kor legnagyobb közösségeivel, azokkal a népekkel és településekkel, ahol az új vallás a leghatékonyabban képes volt csírázni és terjedni. Ő volt a kereszténységnek az első és messze legjobb „eladója”, aki a hit téziseit és az ismeretségi hálózatokat egyaránt hatékonyan használta. Neki vagy Jézusnak, vagy talán a tanításnak köszönhető a kereszténység sikere? Megtörténhet-e ez ismét?

## 2.

Pál és MafiaBoy között óriási a különbség: MafiaBoy tettei a rombolásra irányultak. Pál, kezdeti szándékai ellenére, a korai keresztény közösségek között hídépítő szerepet játszott. Kettőjükben azonban van valami közös: mindketten a hálózat mesterei voltak. Bár egyikük sem gondolt erre ebben a megközelítésben, de sikerük kulcsa annak az összetett hálózatnak a létezése volt, amely tetteikhez hatékony közeget biztosított. MafiaBoy a számítógépek hálózatát használta. A harmadik évezred elején az internet a leggyorsabb és leghatékonyabb eszköz a legtöbb ember elérésére. Pál az első századbeli szociális és vallási kapcsolatok mestere, az egyetlen hálózaté, amely a modern kor kezdetén hordozhatta és terjeszthette a hitet. Egyikük sem fogta fel teljesen azokat az erőket, amelyek tetteiket segítették. Közel kétezer évvel Pál után most kezdjük megérteni, miben rejlett Pál és MafiaBoy sikere. Tudjuk, hogy a válasz egyaránt múlik azoknak a hálózatoknak a



topológiáján és szerkezetén, amelyeket felhasználtak, valamint az ő navigálási képességeiken.

Pál és MafiaBoy azért érték el céljukat, mert mindannyian össze vagyunk kapcsolva. Biológiai létezésünk, társadalmi viszonyaink, a gazdaság és a vallási hagyományok az egymáshoz kapcsoltság lenyűgöző történetét alkotják. Ahogy a nagy argentin író, Jorge Luis Borges mondja, „minden kapcsolódik mindenhez”.

### 3.

„Ott sárkányok lakoznak!” - így jelölték az ősi térképkészítők a rémítő ismeretlen területeket. Ahogy a kalandvágó felfedezők a Föld összes helyére eljutottak, ezek a szörny jelű foltok fokozatosan eltűntek. Viszont a szellemi térképünkön még mindig sok a sárkánnyal fertőzött terület azzal kapcsolatban, hogy hogyan illeszkednek egymáshoz a világ különböző részei, az egy sejtbe zárt mikroszkopikus univerzumtól az internet határtalan világáig. Jó hír, hogy az utóbbi időben a kutatók megtanulták feltérképezni a kapcsolódásokat. Térképeik új fényben mutatják be hálóhoz hasonló világunkat, és olyan meglepetéseket és kihívásokat találtak, amelyekre néhány évvel ezelőtt még gondolni sem lehetett. Az internet részletes térképei megmutatták, hogy a hackerek milyen kárt tehetnek benne. A Szilícium-völgyben működő vállalatok tulajdonosok és szakmák szerinti kapcsolatainak térképén végigkövethető a hatalom és pénz útja. Az egyes életközösségeken belül a fajok közötti kölcsönhatást bemutató térképek segítségével rádöbbenhetünk az emberiség környezetromboló hatására. Egy sejtben belül az együttműködő gének térképei bepillantást engednek abba, hogyan működik a rák. De a valódi meglepetés akkor ér bennünket, ha ezeket a térképeket egymás mellé helyezzük. Hasonlóan ahhoz, ahogy a különböző emberek csontváza majdnem megkülönböztethetetlen, rájöttünk, hogy ezek a különböző térképek egy közös tervrajzot követnek. Friss és lélegzetelállító felfedezések sorozata arra a felismerésre kényszerít bennünket, hogy minden minket körül vevő összetett hálózat szerkezetét és fejlődését meglepően egyszerű és messzire mutató természeti törvények irányítják.

### 4.

Láttak már olyan gyereket, aki darabokra szedi kedvenc játékát? Látták aztán a kicsit sírni, miután felismerte, hogy nem képes a darabokat újra összerakni? Íme egy titok, amiből soha nem lesz címlapsztori: szétszedtük az univerzumot, és fogalmunk sincs róla, hogyan rakjuk össze. Miután az előző évszázadban dollárbilliókat költöttünk a kutatásban a természet szétszedésére, csak most ismerjük be, hogy fogalmunk sincs arról, hogyan tovább - kivéve, hogy még apróbb darabokra szedjük.

Sok huszadik századi tudományos kutatás hajtóereje volt az egyszerűsítés. A természet megértéséhez először az összetevőit kell megfejtenünk. A feltételezés az, hogy ha egyszer megértjük a részeket, akkor könnyű lesz az egészet felfognunk. „Oszd meg, és uralkodj!”;

avagy „az ördög a részletekben van”. Ezért évtizedeken keresztül arra kényszerültünk, hogy a világot alkotóelemein keresztül lássuk. Arra tanítottak bennünket, hogy az atomok és a kölcsönhatások tanulmányozása segítségével értsük meg az univerzumot, az életet pedig a molekulákon keresztül; és arra, hogy az összetett emberi viselkedést egy-egy gén irányítja, a különböző vallások és az aktuális örületek eredetének pedig a prófétákat tekintjük.

Közel vagyunk ahhoz, hogy majdnem mindent tudjunk, amit a részekről tudni lehet. A természet egészének megértésétől azonban ugyanolyan messze vagyunk, mint bármikor korábban. Az újraösszerakás tényleg sokkal nehezebb, mint azt a tudósok gondolták. Az ok egyszerű. Az egyszerűsítést erőltetve beleütközünk a komplexitás kemény falába. Megtanultuk, hogy a természet nem egy jól megtervezett összerakós játék, amely csak egyféleképpen rakható össze. A komplex rendszerekben a részek olyan sokféleképp illeszthetők össze, hogy az összes lehetőséget csak évmilliárdok alatt próbálhatnánk végig. A természet évmilliók óta mégis méltón és pontosan illeszti össze a darabokat. Mindezt pedig úgy teszi, hogy kihasználja az önszerveződés mindent irányító törvényeit, amelyek eredete még mindig rejtély számunkra.

Manapság egyre inkább felismerjük, hogy semmi nem történik elszigetelten. A legtöbb esemény és jelenség része egy komplex, univerzális kirakójátéknak, amelynek sok-sok darabja egymással kapcsolatban és kölcsönhatásban áll, egymást befolyásolja. Elkezdtük belátni, hogy egy kis világban élünk, amelyben minden minden mással össze van kapcsolva. Egy most születő forradalomnak vagyunk a tanúi, melynek során a különböző tudományágak tudósai felfedezik, hogy a komplexitásnak szigorú szerkezete van.

Elkezdtük megérteni a hálózatok fontosságát.

Az életünket meghatározó internet miatt, a hálózat szó napjainkban már úton-útfélen feltűnik, szerepel vállalatok és népszerű folyóiratok nevében. Szeptember 11-én tanúi voltunk a terroristahálózatok halálos erejének, és ezt követően hozzá kellett szoknunk a szó egy újabb jelentéséhez. Kevés ember ismeri fel azonban, hogy a gyorsan fejlődő hálózatok tudománya olyan jelenségeket tár fel, amelyek sokkal izgalmasabbak és váratlanabbak, mint amit a hálózat szó köznapi használata valaha jelentett. Ezeknek a felfedezéseknek egy része még mindig olyan új, hogy sok kulcsfontosságú eredmény a tudományos közösségben csupán publikálatlan kéziratként terjed. A körülöttünk lévő, szorosan összefüggő világ egy új arcát mutatják meg, és jelzik, hogy a hálózatok sokkal inkább meghatározóak lesznek az új században, mint amennyire az emberek többsége ma erre felkészült. Ezek a kéziratok vetik fel azokat az alapvető kérdéseket, amelyek a következő korszakban a világról alkotott nézeteinket alakítják majd.

Ennek a könyvnek célja csupán az, hogy az olvasót rávegye a hálózatokban való gondolkodásra. Arról szól, hogy hogyan keletkeznek a hálózatok, milyenek, és hogyan fejlődnek. Bemutatja a természetet, a társadalmat és az üzleti életet a hálózatok szemszögéből, és új keretet ad számos kérdés megértéséhez a webes demokráciától az internet sebezhetőségéig és a „halálos” vírusok terjedéséig.

A hálózatok mindenütt jelen vannak. Csak a szemünket kell nyitva tartanunk, hogy észrevegyük őket. Ahogy az olvasó a könyvben egyik láncszemről a másikra halad előre, megtanulja a társadalmat komplex ismeretségi hálózatként szemlélni, és megismeri annak a nagyszerű világnak a kicsinységét, amelyben élünk. Az olvasó meg fogja érteni, hogyan és miért járt sikerrel Pál, és hogy a nyilvánvaló különbségek ellenére mennyire hasonló volt az akkori társadalmi környezet a maihoz. Megismerkedhet azokkal a kihívásokkal, amelyekkel az orvosok szembesülnek, amikor egyetlen molekulára vagy génre összpontosítva megkísérelnek egy betegséget meggyógyítani, és figyelmen kívül hagyják az élő anyag összetettségét és szoros összefüggéseit. Emlékeztetjük majd az olvasót arra, hogy MafiaBoy nem az egyetlen, aki a hálózatokat támadja. Elkezdi értékelni, hogy az internet - melynek létrejöttét gyakran teljesen az embernek tulajdonítják - hasonlóvá vált az élő szervezetekhez vagy az élő rendszerekhez. Mindez meggyőzően mutatja az alaptörvények erejét, amelyek az összes hálózatot szabályozzák. Az olvasó megértheti, hogy a terrorizmus felbukkanását szintén a hálózatok kialakulásának törvényei irányítják, és azt is, hogyan használják ki ezek a gyilkos hálózatok a természetes hálózatok alapvető robusztusságát. Rácsodálkozhat olyan látszólag különböző rendszerek közötti meglepő hasonlóságokra, mint a gazdaság, a sejt, az internet, és felhasználhatja az egyiket a másik megértéséhez. Ez egy sok meglepetést okozó utazás lesz, amely, remélem, rábírja az olvasót arra, hogy eldobja az egyszerűsítés szemellenzőjét, és láncszemről láncszemre haladva megismerje a következő tudományos forradalmat: a hálózatok új tudományát.

# A MÁSODIK LÁNCSZEM

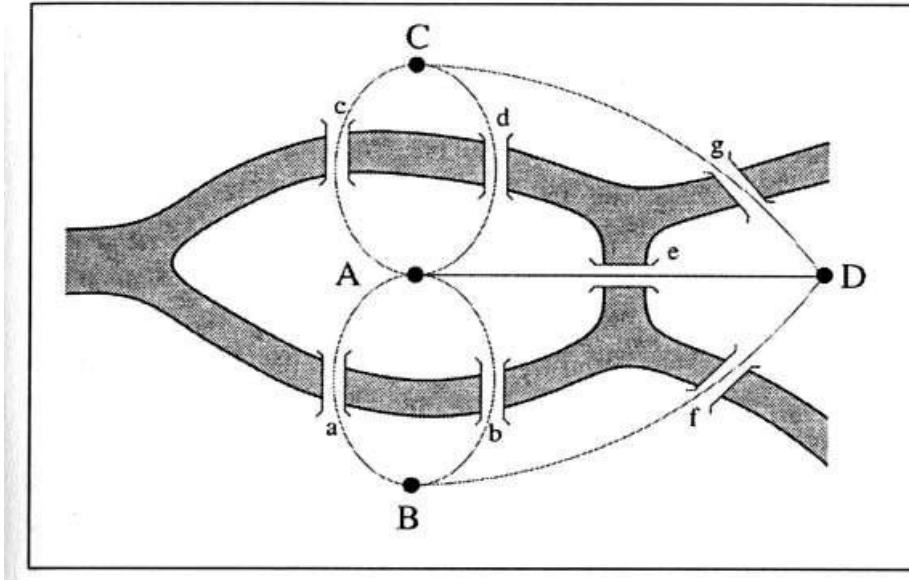
## *A véletlenszerű világegyetem*

1783.szeptember 18-án Szentpéterváron Leonhard Euler napja ugyanúgy kezdődött, mint máskor. Matematikaórárt tartott egyik unokájának, majd elkezdett a léghajók repülésével kapcsolatban egy számítást. Éppen három hónappal korábban, Lyontól délre a Montgolfier testvérek egy hatalmas léghajót bocsátottak fel, amely majdnem kétszáz méter magasságig emelkedett fel, és körülbelül egy mérfölddel arrébb biztonságosan földet ért. Euler a léghajó mozgásának mechanikáján dolgozott, amikor a Montgolfier testvérek XVI. Lajos előtt Párizsban egy birkát készültek felvinni a levegőbe. A repülés még aznap, szeptember 19-én lezajlott. Euler azonban soha nem hallott róla. Ebéd után asszisztensével az akkoriban felfedezett Uránusz bolygó pályájának kiszámításán dolgozott. A bolygó különös pályáját leíró, általa bevezetett egyenletek évtizedek múlva majd a Plútó bolygó felfedezéséhez vezetnek. Euler nem lehetett tanúja ennek a felfedezésnek sem. Délután öt óra tájban agyvérzést kapott, és azt suttogta, „meghalok”, mielőtt elveszítette eszméletét. Azon az estén meghalt, bevégezve minden idők legtermékenyebb matematikai karrierjét.

Euler svájci születésű matematikusként karrierjét Berlinben és Szentpéterváron töltötte, és különösen nagy hatást gyakorolt a matematika minden területére, a fizikára és a mérnöki tudományokra. Nemcsak felfedezéseinek fontossága volt páratlan, hanem pusztán mennyiségük is lenyűgöző. Az Opera Omnia, Euler még nem teljes összegyűjtött munkáinak jegyzete, jelenleg több mint hetvenhárom kötetből áll, amelyek mindegyike hatszáz oldalas. Euler életének utolsó tizenhét éve azonban, amely 1766-os szentpétervári visszatérésétől hetvenhat éves korában bekövetkezett haláláig tartott, eléggé viharos volt. A sok személyes tragédia ellenére műveinek közel felét ezekben az években írta. Ezek közé tartozik a Hold mozgását leíró, hétszázhetvenöt oldalas értekezése, egy nagy hatású algebrakönyv, valamint az integrálszámítás háromkötetes kifejtése, amelyet úgy fejezett be, hogy közben átlagban heti egy matematikai cikket jelentetett meg a szentpétervári akadémia lapjában. A meglepő ebben az, hogy ez idő alatt alig olvasott, vagy írt le akár egyetlen sort is. 1766-os szentpétervári visszatérése után hamarosan részlegesen elveszítette látását, és egy 1771-ben végzett sikertelen hályog-műtét következtében teljesen vak maradt. A tételek oldalainak ezreit mind fejből diktálta.

Három évtizeddel korábban, még jó látással, Euler írt egy rövid cikket egy szórakoztató problémáról, amely a szentpétervári otthonától nem messze található Königsbergből származik. Königsberg a tizennyolcadik század elején Kelet-Poroszország egy virágzó városa volt, és nem sejtette még azt a szomorú és háború tépázta sorsot, amely a második világháború egyik legádázabb csatájának színhelyeként rá várt. A korabeli rézkarcok egy, a Pregel partjain elterülő, gyorsan fejlődő várost ábrázolnak, amelyben serény hajók flottája és a velük folytatott kereskedelem kényelmes életet biztosított a helyi kereskedőknek és családjaiknak. Az egészséges gazdaság lehetővé tette a város elöljárói

számára, hogy nem kevesebb, mint hét híd építsenek a folyón keresztül. Ezek közül a legtöbb a város egyes részeit az elegáns Kneiphof-szigettel kötötte össze, amely a Pregel két ága közé ékelődött. Két másik híd a folyó két ágát keresztezte (2.1 ábra). A békében és jólétben élő boldog königsbergiek fejtörőkkel szórakoztak. Az egyik például ez volt: „Átsétálhatunk-e a hét hídon úgy, hogy közben egyikken se menjünk át kétszer?” Senki nem tudott ilyen útvonalat találni, mígnem 1875-ben építettek egy új híd.



**2.1 ábra. A königsbergi hidak.** Königsberg elrendezése 1875 előtt a Kneiphof-szigettel (A) és a Pregel folyó két ága közötti D földterülettel. A königsbergi probléma megoldása azt jelentette, hogy a város körül olyan útvonalat találjunk, ami egy személytől minden egyes hídon csak egyszeri átkelést igényelne. 1736-ban Leonhard Euler létrehozta a gráfelméletet azáltal, hogy a négy földterület mindegyikét pontokkal (A-tól D-ig) és minden egyes híd pedig egy éllel (a-tól g-ig) helyettesített, amellyel egy négy pontból és hét élből álló gráfot kapott. Aztán bebizonyította, hogy a königsbergi gráfon nem létezik olyan útvonal, amelyik minden élt csak egyszer metsz.

1736-ban, majdnem százötven évvel az új híd megnyitása előtt Euler egzakt matematikai bizonyítást adott arra, hogy az akkor meglévő hét hídon át ilyen útvonal nem létezik. Azon túl, hogy megoldotta a königsbergi problémát, rövid cikkében tudtán kívül is útjára indította a matematika egy csodálatosan gazdag ágát, a gráfelméletet. Ma a hálózatokról való gondolkodásunk alapja a gráfelmélet. Az Eulert követő évszázadok alatt a gráfelmélet fejlődéséhez a legnagyobb matematikusok járultak hozzá. Mielőtt a hálózatok ajtajának világát kitárnánk, pillantsunk bele röviden abba a gondolatmenetbe, amely Eulert az első gráfok bevezetésére indította.

Euler bizonyítása egyszerű és elegáns, könnyen megértheti az is, aki matematikailag nem képzett. Viszont mégsem a bizonyítás vonult be a történelembe, hanem inkább a probléma megoldásához felhasznált közbenső lépés. Euler nagyszerű meglátása abban rejlett, hogy a

königsbergi hidakat gráfoknak tekintette: olyan pontoknak, amelyeket élek kapcsolnak össze. Ehhez a folyó által egymástól elválasztott négy földterületnek megfeleltetett négy pontot, és ezeket A, B, C és D betűkkel jelölte. Aztán a hidakat éleknek nevezte el, és vonalakkal kötötte össze azokat a földdarabokat, amelyek között híd volt. Így egy gráfot kapott, amelynek pontjai a földdarabok voltak, és élei a hidak.

## 1.

Euler bizonyítása arról, hogy Königsbergben nincsen mind a hét hídon csak egyszer áthaladó útvonal, egy egyszerű megfigyelésen alapult. Minden páratlan számú éllel rendelkező pont vagy kezdeti vagy végpontja kell legyen az útvonalnak. Minden hídon áthalad egy folytonos útvonal, amelynek csak egy kezdő- és egy végpontja lehet. Ezért ilyen útvonal nem létezhet olyan gráfon, amelynek több mint két páratlan számú éllel rendelkező pontja van. Mivel a königsbergi gráfnak négy ilyen pontja volt, ezért nem is találhatott volna senki a feltételeknek megfelelő útvonalat.

Számunkra Euler bizonyításának legfontosabb oldala az, hogy az útvonal létezése nem a mi leleményességünkön múlik. Ez a gráf egy belső tulajdonsága. A königsbergi hidak korabeli elhelyezése esetén, függetlenül attól, hogy milyen leleményesek vagyunk, a kívánt útvonalat nem találhatjuk meg. A königsbergiek végül egyetértettek Eulerrel, feladták a reménytelen keresést, és 1875-ben a B és C terület között új hidat építettek, és ezzel megnövelték e két pont éleinek számát. Most már csak két pont (A és D) maradt páratlan számú éllel, és egyszerű volt a kívánt útvonalat megtalálni. Lehet, hogy ennek az útvonalnak a létrehozása volt a híd felépítésének rejtett indítéka?

Visszapillantva, Euler nem szándékos üzenete nagyon egyszerű. A gráfok és hálózatok tulajdonságai a felépítésükben rejlenek, és segítenek vagy hátráltatnak minket abban, hogy az adott hálózat segítségével valamit végrehajtsunk. Több mint két évszázadon keresztül a königsbergi gráf szerkezete nem engedte, hogy a polgárok kávéházi feladványukat megoldják. De ha egy él hozzáadásával megváltoztatjuk a gráf felépítését, ez a korlátozás hirtelen megszűnik.

Euler eredménye sokféleképpen szimbolizálja e könyv üzenetét. A minket körülvevő összetett világ megértésének kulcsa a gráfok vagy hálózatok felépítése és szerkezete. A csak kevés pontra vagy élre ható, a topológiában végrehajtott kis változások rejtett ajtókat tárhatnak ki, és ezek nyomán új lehetőségek keletkezhetnek.

A gráfelmélet Euler után olyan matematikai óriások hozzájárulásával lendült fel, mint Cauchy, Hamilton, Cayley, Kirchhoff és Pólya. Ők fedeztek fel majdnem mindent, ami napjainkban az olyan nagy, rendezett gráfokkal kapcsolatban ismert, mint amilyen az atomokból kialakuló kristályrács vagy a méhkaptárakban a méhek által készített hatszögletű rács. A huszadik század közepéig a gráfelmélet célja egyszerű volt. A különböző gráfok tulajdonságait kívánta feltárni és katalogizálni. A híres problémák közé tartozott, hogy megtaláljuk a menekülési útvonalat egy útvesztőből vagy labirintusból; ezt először

1873-ban oldották meg. Ilyen volt a sakktáblán annak a lépéssorozatnak a megtalálása, amivel a ló minden mezőt egyszer érint, és visszatér kiindulópontjába. Volt néhány nehéz probléma is, amely évszázadokon keresztül megoldatlan maradt.

Kétszáz évnek kellett eltelnie Euler gondolatébresztő munkája óta, mielőtt a matematikusok áttértek a különféle gráfok tulajdonságainak tanulmányozására arra a lényeges kérdésre, hogy hogyan jönnek létre a gráfok vagy általánosabban: a hálózatok. Valóban, hogyan alakul ki egy valódi hálózat? Milyen törvények irányítják megjelenésüket és szerkezetüket? Ezek a kérdések és az első válaszok 1950-ig vártak magukra, amikor két magyar matematikus forradalmasította a gráfelméletet.

## 2.

Az 1920-as évek végének Budapestjén egy furcsa mozgású, tizenhét éves ifjú vágta az utcákat, és megállt egy elegáns cipőbolt előtt, ahol mérték után készített cipőket árultak. Furcsa formájú lábával, amelyre normális cipő soha nem illett volna, valóban jó hasznát vette volna egy cipésznek. Látogatásának oka azonban nem egy új cipő volt. Bekopogtatott a bolt ajtaján, majd belépett, és nem törődve az eladónővel a pultnál, odament a bolt hátsó részében lévő tizennégy éves fiúhoz. Ez a viselkedés akkor is épp olyan furcsának tűnt, mint amilyenek ma tünne.

- Mondj egy négyjegyű számot! - mondta.

- 2532 - jött a tágra nyitott szemű fiú válasza, ahogy rámeredt a furcsa alakra. Az idősebb fiú azonban nem hagyta őt túl sokáig bámulni.

- A négyzete  $6\ 441\ 024$  - folytatta. - Elnézést, öregszem, és nem tudom megmondani a köbét. Hány bizonyítását ismered a Pitagorasztételnek?

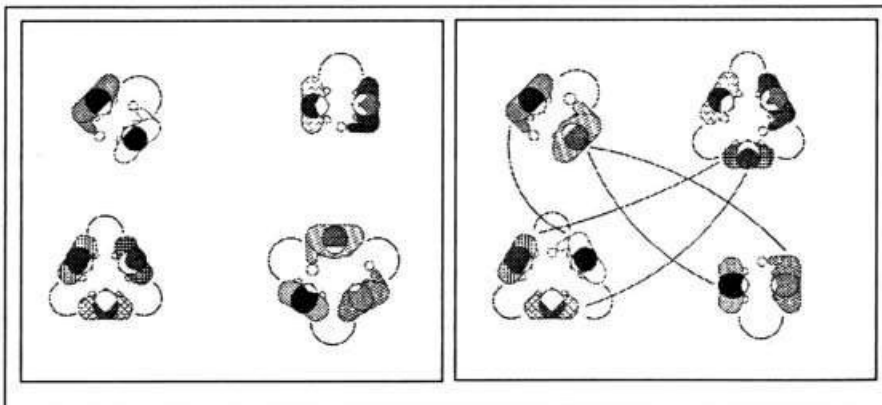
- Egyet - válaszolta a fiatalabb.

- Én harminchetet tudok - folytatta anélkül, hogy levegőt vett volna. - Tudtad, hogy egy egyenes pontjainak halmaza nem megszámlálható? - Miután az éles eszű fiú megmutatta Cantor bizonyítását, és befejezte a cipőboltban a dolgát, így szólt: - Sietek - és így is tett, sarkon fordult, és kivágatott a boltból.

Erdős Pál továbbvágott, és a huszadik század legfontosabb zsenije és leghíresebb különce lett. 1996-ban bekövetkezett haláláig ezeröttszáznál is több matematikai cikket írt. Ez az Euler óta páratlan életmű tartalmazza egy másik magyar matematikussal, Rényi Alfréddal közösen írt nyolc cikkét. Ez a nyolc cikk a történelem folyamán először tette fel a legalapvetőbb kérdést gazdagon összekötött világunkról: milyen módon jönnek létre a hálózatok? Megoldásuk lefektette a véletlen hálózatok elméletének alapjait. Ez az elegáns elmélet olyan mélyen meghatározta gondolkodásunkat a hálózatokról, hogy még ma is nehezen tudunk tőle elszakadni.

## 3.

Válassz száz embert, akik közül semelyik kettő nem ismeri egymást, és hívd meg őket koktélpartira. Ha megkínárod ezeket az idegeneket borral és sajttal, rögtön beszélgetni kezdenek, hiszen a találkozás és mások megismerése olyan alapvető emberi vágy, ami mindig összehozza az embereket. Hamarosan harminc-negyven, egyenként két vagy három emberből álló csoport jön létre. Ezután említsd meg az egyik vendégnek, hogy a címkézetlen sötétzöld üvegben lévő vörösbor egy ritka, húszéves, kiváló minőségű portói; sokkal jobb, mint a vörös címkés. De kérd meg ezt a vendéget, hogy csak ismerőseivel ossza meg ezt az információt. Tudod, hogy a drága portóid eléggé biztonságban van, mert barátodnak csak két vagy három emberrel volt ideje a szobában találkozni. A vendégek azonban elkerülhetetlenül elunják magukat, ha túl hosszú ideig ugyanazzal az emberrel beszélgetnek, és továbbmennek, hogy egy másik csoporthoz csatlakozzanak. Egy külső megfigyelő semmi különöset nem venne észre. Mégis láthatatlan személyes kapcsolatok vannak azok között, akik korábban találkoztak, de most különböző csoporthoz tartoznak. Emiatt szövevényes utak kezdik összekötni azokat az embereket is, akik eddig még nem találkoztak. Például, Mari ugyan még nem találkozott Jánossal, de mindketten találkoztak Mikivel, és így Jánostól Mariig Mikin keresztül vezet egy útvonal. Ha János tudott a borról, valószínűleg most már Mari is tud róla, mivel hallhatott róla Mikitől, akinek János beszélt róla. Ahogy telik az idő, a vendégeket egyre növekvő mértékben láthatatlan kapcsolatok kötik össze, az ismerősök egy finom hálója alakul ki, amely a vendégek nagy részét magában foglalja. A drága bor egyre inkább veszélybe kerül, ahogy híre a beavatottak kis csoportjától egyre több beszélgetőcsoporthoz jut el (2.2 ábra).



**2.2 ábra. A parti.** *Egy tíz vendégből álló pártin, ahol senki nem ismerte a másikat korábban, ismeretségi kapcsolatok alakulnak ki, ahogy a vendégek kis csoportokban elkezdnek egymással fecsegni. Először a csoportok egymástól elkülönülnek (bal oldali ábra). Bár létezik azok között ismeretségi kapcsolat (folytonos vonal jelöli), akik egy csoportban vannak, a csoporton kívül még mindenki idegen. Ahogy múlik az idő (jobb oldali ábra), három vendég különböző csoportokhoz megy át, és egy óriáscsoport jön létre. Bár nem mindenki ismer mindenkít, most már egyetlen ismeretségi hálózat van, amely magában*



*foglalja az összes vendéget. Ahogy követjük az ismeretségi kapcsolatokat, tetszőleges két vendég között most van útvonal.*

Feltéve, hogy minden személy továbbadja az információt minden új ismerősének, elér-e a parti végére a kiváló portói hírneve minden vendéghez? Biztosak lehetünk abban, hogy ha mindenki ismerné egymást, akkor mind a címkézetlen üvegből öntögetnék a kiválóbb bort. Ha azonban minden találkozás akár csak tíz percig tartana, akkor a kilencvenkilenc másik emberrel ez nagyjából tizenhat órát venne igénybe. A koktélpártik ritkán tartanak ilyen hosszú ideig. Ezért érezheted úgy, hogy a barátodnak elárulhatod a titkot, és jó esélyed van arra, hogy a koktélparti végére is marad még a borból.

Erdős Pál és Rényi Alfréd mert másképpen gondolkodni. „A matematikus egy olyan gép, amelyik kávéból tételeket gyárt” - szokta Erdős mondani Rényit idézve. Az egyik különösen szerencsés csésze kávé egy sokat idézett tétellé változott. Ha minden ember legalább egy másik vendéggel megismerkedik, akkor hamarosan mindenki a félretett portóit issza majd. Erdős és Rényi szerint harminc perc alatt kialakulna egy olyan láthatatlan ismeretségi hálózat, amely az összes vendéget magában foglalja. Könnyen előfordulhat, hogy néhány perccel azután, hogy a jó borról hallunk, már csak egy üres üveget billentünk tátongó poharunk fölé.

#### 4.

A vendégek, akikkel az iménti koktélparti során találkoztunk, részét alkotják egy olyan problémának, amely a matematika Euler által felfedezett ágához, a gráfelmélethez tartozik. A vendégek a gráf csúcspontjai, és minden találkozás egy kapcsolatot hoz létre, így keletkezik az ismeretségi hálózat (egy gráf): pontok éllel összekötve. A telefonvonalakkal összekötött számítógépek, testünk molekulái biokémiai reakciókkal összekapcsolva, cégek és vevők, akiket a kereskedelem köt egymáshoz, az axonokon keresztül kapcsolódó idegsejtek, hidakkal összekötött szigetek, mind példák a gráfokra. Mindegy, hogy pontosan mit jelölnek a pontok és a közöttük lévő kapcsolatok, a matematikus számára ugyanazt az állatot alkotják: egy gráfot vagy más néven hálózatot.

Elegáns megoldásnak tűnhet, de minden hálót gráfokra leegyszerűsíteni elég félelmetes kihívást jelent. Miközben a társadalom, az internet, egy sejt vagy az agy mind ábrázolható gráfokkal, mindegyikük nagyon különbözik a többitől. Nehéz sok közös vonást elképzelnünk az emberi társadalom és egy sejt között; az előbbiben barátokat és ismerősöket szerzünk véletlen találkozások és tudatos elhatározások egyvelege által, az utóbbiban pedig a kémia és fizika érzelmektől mentes törvényei irányítják a molekulák közti összes reakciót. Kell, hogy legyen nyilvánvaló különbség a szabályok között, amelyek a természetben előforduló különböző hálózatokban a kapcsolatok elhelyezését irányítják. A sok különböző rendszer leírásának egy modellbe foglalása első ránézésre leküzdhetetlen kihívásnak tűnik.

Viszont minden tudós végső célja, hogy a nagyon összetett jelenségekre a lehető legegyszerűbb magyarázatot megtalálja. Erdős és Rényi elfogadta ezt a kihívást, és elegáns matematikai megoldást ajánlott az összetett gráfok közös keretben történő tárgyalására. Mivel a különböző rendszerek eltérő szabályokat követnek saját hálózatuk kialakításakor, Erdős és Rényi szándékosan figyelmen kívül hagyta a különbségeket, és előálltak a legegyszerűbb megoldással, ami a természet számára lehetséges: véletlenszerűen kötötték össze a pontokat. Úgy döntöttek, hogy a hálózat létrehozásának legegyszerűbb módja az, ha kockadobással döntenek. Válassz ki két pontot, és ha hatost dobasz, akkor helyezz el egy élt közöttük. Bármilyen más dobás esetén ne kösd össze a két pontot, hanem válassz egy másik párt, és kezd előlről. Erdős és Rényi ezért a gráfokat és az általuk ábrázolt világot alapvetően véletlennek látta.

„Van egy régi vita - szerette Erdős mondani - arról, hogy mi hozzuk-e létre a matematikát, vagy csak felfedezzük. Más szóval, ott rejtőzik-e valahol már az igazság, még ha mi nem is ismerjük azt?” Erdősnek volt egyértelmű válasza erre a kérdésre. A matematikai igazságok rajta vannak az abszolút igazságok listáján, és mi csak felfedezzük őket. A véletlen gráfok elmélete olyan elegáns és egyszerű, hogy számára az örök igazságok közé tartozónak látszott. Ma már tudjuk, hogy a véletlen hálózatok kis szerepet játszottak univerzumunk kialakulásában. A természet ehelyett néhány alaptörvényt vett igénybe, amelyeket a következő fejezetekben fogunk bemutatni. Erdős maga alkotott matematikai igazságokat, és a véletlen gráfok elméletének kidolgozásával egy lehetséges látásmódot világunkról. Nem ismerte kellőképpen az emberi agyat és a társadalmat kialakító természeti törvényeket, és legjobb megoldási javaslata az volt, hogy könnyelműen azt feltételezte, Isten szeret kockázni. Princetonban dolgozó barátja, Albert Einstein az ellenkezőjéről volt meggyőződve: „Isten nem rulettezik a világegyetemmel.”

## 5.

Térjünk vissza a koktélpartihoz, és alkalmazzuk a véletlen gráfok elméletét. Induljunk ki sok elszigetelt pontból. Aztán véletlen módon a pontokhoz adjunk hozzá éleket, jelezve a vendégek közötti véletlen találkozásokat. Ha csak kevés élt adunk hozzá, akkor az egyetlen következmény az lesz, hogy néhány pont párt kap. Ha folytatjuk az élek hozzátevését, elkerülhetetlenül összekapcsolunk majd egymással néhányat ezek közül a párok közül, és csoportokat alakítunk ki a különböző pontokból. De ha már annyi élt adunk hozzá, hogy minden pontra átlagosan egy él jut, akkor megtörténik a csoda. Egyetlen hatalmas csoport (óriáscsoport) jelenik meg. Azaz, a legtöbb pont egy olyan csoport része, amelybe tetszőleges pontból elindulva és az élek mentén navigálva, bármelyik másikba eljutunk. Ez az a pillanat, amikor a drága bor veszélybe kerül, mivel a pletyka elér mindenkit, aki az óriáscsoporthoz tartozik. A matematikusok ezt a jelenséget az óriáskomponens megjelenésének nevezik, amely tartalmazza a pontok jelentős részét. A fizikusok perkolációnak hívják, és azt mondják, hogy

éppen tanúi lettünk egy fázisátalakulásnak, olyannak, mint amikor a víz megfagy. A szociológusok azt fogják mondani, hogy egy közösség alakult ki. Bár a különböző tudományágak különböző elnevezéseket használnak, abban mindnyájan egyetértenek, hogy ha egy hálózatban véletlen módon választunk ki és kötünk össze pontpárokat, akkor valami különleges történik. A hálózat kritikus számú él elhelyezése után drasztikusan megváltozik. A változás előtt rengeteg kicsi, elszigetelt pontcsoportot látunk, emberek különálló csoportjait, akik a csoportokon belül kommunikálnak. A változás után pedig egy óriáscsoportunk lesz, amelynek majdnem mindenki része.

## 6.

Mindegyikünk egy nagy csoport része, a világméretű ismeretségi hálónak, amelyből senki nem marad ki. Nem ismerünk mindenkit a földön, de az garantált, hogy bármelyik kettőnk között az embereknek e hálójában létezik elérési út. Hasonlóképpen van útvonal agyunk tetszőleges két neuronja között, a világ bármelyik két cége között, testünk bármelyik két vegyi összetevője között. Semmi nincs kizárva az életnek ebből a szorosan összefüggő hálójából. Erdős Pál és Rényi Alfréd megmondta, miért: pontonként csak egyetlen élre van szükség, hogy összekapcsolva maradjunk. Személyenként egy ismerős, legalább egy összeköttetés agyunk minden egyes neuronjától egy másik neuronig, testünk mindegyik vegyi összetevőjének részvétele legalább egy kémiai reakcióban, kereskedés legalább egy vállalattal az üzleti világban. Egy a küszöbérték. Ha a pontoknak átlagban egynél kevesebb kapcsolata van, akkor hálózatunk kicsi, egymással nem kommunikáló csoportokra esik szét. Ha pontonként egynél több a kapcsolat, akkor ez a veszély nem fenyeget.

A természet újból és újból többszörösen túllépi a pontonkénti minimum egy kapcsolatot. A szociológusok úgy becsülik, hogy név szerint 200-5000 embert ismerünk. Egy átlag-neuron több tucat másikkal áll kapcsolatban, néhányuk ezrekkal. Minden vállalat szükségszerűen eladók és vevők százaival van összeköttetésben; a legnagyobbak kapcsolatok millióival rendelkeznek. Testünkben a legtöbb molekula jóval több, mint egy kémiai reakcióban vesz részt, néhány, mint a víz is, több százban. A valódi hálózatok így nem csupán össze vannak kapcsolva, de jóval túllépik az egyes küszöböt. A véletlen gráfok elmélete szerint, ahogy az egy pontra jutó él szám a kritikus egy fölé ér, az óriáscsoportból kimaradó pontok száma exponenciálisan csökken. Azaz, minél több él adunk hozzá, annál nehezebb lesz elszigetelt pontot találnunk. A természet nem kockáztatja, hogy a küszöbhez közel maradjon. Messze túllépi azt. Következésképpen a körülöttünk lévő hálózatok nem egyszerűen csak hálók. Ezek sűrű hálózatok, amelyekből semmi nem menekülhet, és amelyekben belül minden pont elérhető. Emiatt ritka általában az embereknek a társadalomtól teljesen elkülönült szigete, és ezért tudjuk a testünket alkotó molekulákat egyetlen sejtterékben elhelyezni. Emiatt érte el Pál apostol üzenete azokat az embereket, akikkel soha nem találkozott, és ezért sikerült MafiaBoynak a

címlapokra kerülnie. A kapcsolatokon keresztül tetteik könnyen hatottak milliókra.

## 7.

Óriási esemény volt a gráfelméletben, amikor Erdős és Rényi felfedezte azt a nagyon különleges pontot, ahol a fázis- vagy perkolációs átalakulás bekövetkezik, és egy óriáscsoport bukkan fel. Nemcsak azért, mert ez azt a hihetetlen előrejelzést adta, hogy fejenként csak egy ismerősre van szükség egy társadalom kialakulásához, hanem főként azért, mert Erdős és Rényi előtt a gráfelmélet nem foglalkozott koktélpártikkal, ismeretségi hálózatokkal vagy véletlen gráfokkal. Majdnem kizárólag szabályos gráfokra koncentráltak, amelyeknek a szerkezetével kapcsolatban nem merült fel félreérthetőség. Amikor azonban olyan összetett rendszerekről van szó, mint az internet vagy az élő sejt, a szabályos gráfok inkább kivételesek, mint gyakoriak.

Erdős és Rényi először ismerte fel, hogy a valódi gráfok, a szociális hálózatoktól a telefonvonalakig, nem szépek és szabályosak. Reménytelenül bonyolultak. Miután rádöbbenek, hogy a valódi hálózatok szerkezete milyen bonyolult, a leíráshoz feltételezték, hogy véletlen hálózatokról van szó

Visszapillantva nem meglepő, hogy ez a furcsa matematikus páros volt az, amelyik a véletlenszerűség bevezetésével a feje tetejére állította a matematika egy elismert ágát. A szerencse és a véletlen nagy szerepet játszott életükben. Bár Rényi tizenhét évvel fiatalabb volt Erdősnél, a szüleik közötti barátság révén még Budapestről ismerték egymást. Amikor 1948-ban Amszterdamban találkoztak, és elkezdtek együtt dolgozni, mindkettőjük mögött viharos évek álltak. Rényi a numerus clausus törvények miatt - amelyek korlátozták az egyetemre felvehető zsidók számát - egy hajógyárban dolgozott. Miután megnyert egy matematika és egy görög nyelvi tanulmányi versenyt, 1939-ben engedélyezték felvételét az egyetemre. Matematikai tanulmányainak befejezése után hamarosan behívták munkaszolgálatra, ahonnan valahogyan megszökött.

Erdős és kollégái, akik ismerték Rényi háború alatti ellenállási tevékenységét, mélyen csodálták és tisztelték őt. Rényi merészen nyilasegyenruhát vett fel, hogy barátainak segítsen kimenekülni a koncentrációs táborokból. Egy történet szerint Rényi nyilas katonának öltözve bement a budapesti gettóba, és sikerült szüleit onnan kihoznia. Évekig élt hamis papírokkal a nácik által ellenőrzött Budapesten. Csak azok tudták a tetteihez szükséges bátorságát igazán értékelni, akik jól ismerték a náci rémuralmat. Érthető, hogy Rényit mindez a háború végéig komolyan akadályozta abban, hogy a matematikára koncentráljon; ekkor 1946-ban Leningrádba utazott tanulmányai folytatására. Itt kreativitása csodákat művelt. Gyenge orosz nyelvtudása ellenére nemcsak megtanulta és rekordidő alatt magáévá tette a számelméletet, de a számelmélet közismerten nehéz problémájával, a Goldbach-sejtéssel kapcsolatban néhány alapvető tételt be is bizonyított, így amikor két évvel később Amszterdamban Erdőssel találkozott, többé

már nemcsak ígéretes ifjú matematikus és családi barát volt, hanem nemzetközi elismertségű tudós.

Erdős addigra már kialakította a rá jellemző utazó matematikus életmódot. Feltűnt egy-egy kollégája ajtajában, és kijelentette: „elmém nyitott”, a matematikai igazság fáradhatatlan kereséséhez így szerzett társakat. Egyetlen állandó állásra kapott ajánlatot, Indiana államból, a South Bendben található Notre Dame Egyetemtől. Arnold Ross, a matematika tanszék akkori vezetője vendégprofesszori állást ajánlott Erdősnek nagyon nemes lelkű feltételekkel. Akkor távozhat, amikor neki megfelel, hiszen az asszisztense folytatni tudja az előadásokat, amikor ő nincs ott.

A Notre Dame akkor még egy katolikus művészeti főiskola volt, nem az a neves egyetem, amivé évtizedek múlva vált. Mindamellett Erdősnek nyugodt és kényelmes munkakörnyezetet ajánlott, és lehetőséget a pap kollégákkal való gyakori beszélgetésekre. Erdős ezeket az univerzummal és az istenséggel kapcsolatos sajátos látásmódja miatt különösen élvezte. Amikor egyszer megkérdezték az ott töltött időről, visszafogottan megjegyezte, „túl sok a pluszjel”, amellyel az egyetem területén található számos keresztre utalt. Mikor végül a Notre Dame állandó állást ajánlott fel Erdősnek, hasonlóan kényelmes feltételekkel, ő udvariasan visszautasította. Valószínűleg túl sok lett volna elviselnie, hogy az életét jellemző véletlenszerűséget és váratlanságot elveszítse.

## 8.

Erdős és Rényi amszterdami találkozása egy szoros barátság és együttműködés kezdete lett, amely Rényi 1970-ben, negyvenkilenc éves korában bekövetkezett korai haláláig több mint harminc közös cikket eredményezett. E publikációk között van a gráfelmélet nyolc legendás cikke. Az elsőben, amelyet több mint egy évtizeddel az amszterdami találkozó után publikáltak, először foglalkoztak azzal a fontos kérdéssel, hogy hogyan alakulnak ki a gráfok. Az a megközelítés, ahogyan ők a gráfelméleti problémák kezelésére a véletlent felhasználják, akkor válik igazán világossá, ha megnézzük, hány éllel rendelkezik a gráf vagy hálózat egy-egy pontja. A szabályos gráfok abban kivételesek, hogy minden egyes ponthoz pontosan ugyanannyi él csatlakozik. Valóban, a merőleges egyenesekből álló kétdimenziós háló egy egyszerű négyzetrácsot alkot, minden pontjában pontosan négy éllel, a méhsejtek hatszögletű rácsában pedig minden pont három másikkal van összekötve.

Az ilyen szabályosság nyilvánvalóan hiányzik a véletlen gráfoknál. A véletlen hálózati modell alap gondolata a teljes egyenlőség. Az éleket teljesen véletlenszerűen helyezünk el, és így az összes pontnak azonos az esélye arra, hogy megkapjon egy élt, pont úgy, mint Las Vegasban, ahol feltehetőleg mindnyájunknak egyforma az esélye a főnyeremény megnyerésére. Persze ennek ellenére a legtöbb játékos társunk szegényebben hagyja el az asztalt, mint mikor leült. Hasonlóképpen, ha véletlenszerűen helyezünk el a gráfban az éleket, akkor egyes pontokhoz több él tartozik majd. Néhányuknak meg pechjük is lehet, és nem kapnak semmit egy ideig. Erdős és Rényi véletlen világa

egyidejűleg lehet tisztességtelen és nagylelkű. Valakiből szegényt, másokból gazdagot csinál. Viszont az Erdős-Rényi-elmélet hosszú távú előrejelzése szerint ez csupán látszat. Ha a hálózat nagy, akkor az élek teljesen véletlenszerű elhelyezése ellenére majdnem minden ponthoz nagyjából azonos számú elfog tartozni.

A jelenség jól szemléltethető úgy, hogy a koktélparti után megkérdezzük minden vendéget, hogy hány ismeretséget kötött. Miután mindenki elment, egy hisztogramot<sup>1</sup> rajzolhatunk úgy, hogy ábrázoljuk, hány vendégnek lett egy, kettő vagy pontosan  $k$  új ismerőse. Erdős és Rényi véletlen modelljére ennek a hisztogramnak az alakját 1982-ben Erdős egyik tanítványa, Bollobás Béla vezette be, és bizonyította be egzakt matematikai eszközökkel. Ő ma a memphisi egyetem és az angliai Trinity College professzora. Eredménye azt mutatja meg, hogy a hisztogram Poisson-eloszlást követ, amelynek néhány különleges tulajdonsága e könyvben gyakran felbukkan majd. A Poisson-eloszlásnak van egy kiemelkedő csúcsa, ami azt jelzi, hogy a pontok többségéhez ugyanannyi él csatlakozik, mint az átlagos csúcshoz. A csúcs két oldalán az eloszlás gyorsan csökken, jelezve, hogy az átlagtól való jelentős eltérések különlegesen ritkák.

<sup>1</sup> Előfordulási gyakorisági grafikont (a szaklektor).

Vetítsük vissza ezt a hatmilliárd emberből álló társadalomra. Ha igaz a Poisson-eloszlás, akkor a többségünknek nagyjából azonos számú barátja és ismerőse van, és exponenciálisan ritkán találunk olyan embert, akinek az átlagnál lényegesen több vagy kevesebb barátja és ismerőse van. Ezért a véletlen gráfelmélet előrejelzése szerint, ha véletlenszerűen jelöljük ki a szociális kapcsolatokat, akkor egy rendkívül demokratikus társadalomhoz jutunk el, ahol mindegyikünk átlagos, és nagyon kevesen térnek el ettől a nagyon szociális vagy teljesen aszociális típus irányába. Egy nagyon egységes szerkezetű hálózatot kapunk, amelyben az átlagos esetek a leggyakoribbak.

Erdős és Rényi véletlenszerű világegyetemét az átlagok dominálják. A modell szerint a legtöbb embernek nagyjából azonos számú ismerőse van, a legtöbb neuron közel azonos számú másik neuronnal kapcsolódik, a legtöbb vállalat nagyjából azonos számú másik vállalattal kereskedik, a legtöbb weboldalt körülbelül ugyanannyian látogatják. Ahogy a természet vakon dobálja a kapcsolatokat széjjel, hosszú távon egyetlen pont sem lesz kitéüntetett vagy kihagyott.

## 9.

A hálózatokra vonatkozó tudományos gondolkodás 1959-es bevezetése óta meghatározó Erdős és Rényi véletlen hálózatokról szóló elmélete. Többszörös szemléletváltást hozott, ami tudatosan vagy nem, de bevésődött mindenkinek a gondolkodásába, aki hálózatokkal foglalkozik. Egyenlőségjelet tett a komplexitás és a véletlen közé. Ha egy hálózat túl bonyolult volt ahhoz, hogy egyszerű feltételekkel leírják, akkor ez arra ösztönözte a kutatókat, hogy véletlen hálózatnak tekintsek. Több mint valószínű, hogy a társadalom, egy sejt, a távközlési hálózatok

és a gazdaság egyaránt eléggé komplex, hogy jól illeszkedjen ebbe a képbe.

De mégis, valami gyanús ezzel a véletlenszerű világegyetemmel, ahol minden pont egyenlő. Meg tudtam volna-e írni ezt a könyvet, ha a testem molekulái úgy döntöttek volna, hogy teljesen véletlenszerűen lépnek egymással reakcióba? Lennének-e nemzetek, államok, iskolák és templomok vagy bármilyen más szociális rendre utaló jelenség, ha az emberek teljesen véletlen módon működnének egymással együtt? Létezne-e gazdaság, ha a vállalatok vevőiket teljesen véletlenszerűen választanák meg, és helyettesítenék eladóikat kockák millióival? Többségünk úgy érzi, hogy a világ, amiben élünk, nem véletlenszerű, és hogy a komplex rendszerek mögött valamilyen rendnek kell lennie.

Akkor miért választotta volna két ilyen páratlan elme, mint Erdős és Rényi azt, hogy a hálózatok kialakulása egy teljesen véletlen folyamat? A válasz egyszerű. Soha nem próbálták megalkotni a hálózatok kialakulásának általános elméletét. A véletlen hálózatok matematikai szépsége sokkal jobban izgatta őket, mint az, hogy képes-e modelljük hűen megragadni a bennünket körülvevő természet hálóját. A biztonság kedvéért 1959-es korszakalkotó cikkükben megjegyezték, hogy a gráfok keletkezése felfogható bizonyos kommunikációs hálózatok (vasút-, út- vagy elektromos hálózati rendszerek stb.) kialakulásának nagyon leegyszerűsített modelljeként. A valódi világba történt rövid kiruccanásuk ellenére ezen a területen munkájukat inkább a probléma matematikai mélységeire vonatkozó óriási kíváncsiságuk motiválta, mint a lehetséges alkalmazások.

Erdős lenne az első, aki egyetértene velünk abban, hogy a valódi hálózatoknak kell legyen szervező elve, amelyik megkülönbözteti őket az általuk 1959-ben bevezetett véletlen hálózatoktól. De az ő számára ez nem lenne érdekes. A véletlenszerűséget feltételezve egy új világra nyitott ablakot, amelynek matematikai szépsége és következetessége a gráfelmélet későbbi munkái mögötti hajtóerőt adta.

Egészen a közelmúltig csak egyetlen módszerünk volt arra, hogy világunkat leírjuk, így a hálózatmodellezésben a véletlen hálózatok domináltak gondolkodásunkat. Az összetett valódi hálózatokat alapvetően véletlenszerűnek tekintettük.

Erdős tartja a rekordot abban, hogy érdekes problémákat talál ki, és gondoskodik róla, hogy valaki megoldja. Bár soha nem volt annál a néhány ruhánál több tulajdona, mint ami belefért egy kis bőr kényelmébe, amivel mindig utazott, mégis gyakran ajánlott fel az általa érdekesnek talált problémák megoldásáért vagy bizonyításáért pénzjutalmat. Öt dollárt, ha a problémát egyszerűnek gondolta, ötszáz dollárt pedig az igazán nehezekért. És valóban boldogan fizetett, ha a bizonyítást valaki benyújtotta. Nem számított, ha gyakran az egyszáz dolláros probléma nehezebbnek bizonyult az ötszáz dollárosnál. A szerencsés matematikusok, akik megkapták a jutalmak egyikét, soha nem vették fel a csekkért járó készpénzt. A csekket többségük bekereteztette. A jutalom a század egyedülálló zsenijétől származó különleges elismerés volt, semmi pénz nem ért volna fel a díj szellemi értékével.

Kövessük Erdős példáját, és tegyünk fel egy kérdést, amit ő soha nem vizsgált. Milyenek a valódi hálózatok? A probléma ilyen pontatlan

felvetésével soha nem lett volna elégedett. Ez így túl tág. Lehet, hogy egyértelmű válasz nem is adható rá. Könnyen lehet, hogy soha nem találunk precíz bizonyítást hozzá. Ilyen formában valószínűleg nincs is benne a Könyvben, ami Erdős számára a jó matematikai bizonyítások és tételek gyűjteménye. Lehet, hogy ez a kérdés nem nyerte volna el Erdős tetszését, de a következő fejezetekben meg fogjuk látni, hogy a matematika világán kívül milyen óriási előrelépést jelent.



# A HARMADIK LÁNCSZEM

## *Hatlépésnyi távolság*

1912-ben, éppen mikor Erdős Anna felfedezte, hogy harmadik gyermekével, Pállal, várandós, Budapest utcái a legjobb magyar és nemzetközi írók költeményeinek és prózáinak új gyűjteményétől voltak hangosak. Az első kiadás elfogyott, mielőtt az irodalomkritikusok egyáltalán hozzájutottak volna, és a második kiadás is eltűnőfélben volt, mire az első komoly recenziók megjelentek róla az ország napilapjaiban. Addigra Erdős Anna bement a kórházba, és megszülte Pált. A kórházból hazamenve pedig megtudta, hogy két idősebb lánya a Budapesten végigszárguló skarlátjárvány áldozata lett. A városban történt sok személyes tragédia ellenére az új irodalmi jelenség iránti lelkesedés nem csökkent. A könyv népszerűségének eredete abban az apró tényben rejlett, hogy az összes vers és elbeszélés hamisítvány volt. Karinthy Frigyes *Így írtok ti* című művében, a huszonöt éves, gyakorlatilag ismeretlen költő és író feltalálta azt, amit ő irodalmi karikatúrának nevezett. A kötet versek és elbeszélések gyűjteménye, amelyekről úgy tűnik, hogy világnagyságok írták. Ha ismerjük a szerzőt, akkor a stílusára könnyen ráismerhetünk. Minden darab ügyes paródia, és olyan, mint a görbe tükör: az utánczóit szerző felismerhető, de az arányok mások. Karinthy vitriolos és megsemmisítő humorát a néhai nagyságokra és közeli barátokra azonos könnyedséggel alkalmazta. Humora gyakran gyilkos. A legegésebben parodizált szerzőket csak az ő művéből ismerjük, az eredeti művek elvesztek az irodalmi ízlés és történelem engesztelhetetlen süllyesztőjében.

Az *Így írtok ti* az egyik legolvasottabb magyar nyelvű könyv, amely Karinthyi egy csapásra híres emberré tette. Soha többé nem kellett a buszmegállóban a buszra várnia, akárhol is volt, egyszerűen intett, és a sofőrök széles mosollyal megálltak neki.

Többnyire a Budapest szívében található Central kávéház értékes üvegablakai mögött írt. A közelben a járókelők gyakran furcsa táncot lejtettek. Amikor elsétáltak az ablak mellett, hirtelen megálltak, és az ablakon át megnézték a dolgozó író, mintha egy új akvárium egzotikus lakója lenne.

Majdnem két évtizeddel az *Így írtok ti* után, 1929-ben, körülbelül abban az időben, mikor a tizenhét éves Erdős a Central kávéháztól néhány utcányira lévő cipőboltban a Pitagorasz-tételről tartott előadást, megjelent Karinthy negyvenhatodik könyve, az ötvenkét elbeszélésből álló *Minden másképpen van* kötet. Addigra már a magyar irodalom elismert géniusza volt. Még mindig „a Könyvet” várta azonban tőle mindenki, amiben megmutatná önmagát, és biztosítaná helyét az irodalom halhatatlanjai között. A kritikusok nyíltan hangoztatták aggodalmukat, hogy Karinthy kivételes tehetségét a gyors pénzt hozó elbeszélések írásával könnyen bezsebelhető aprópénzre váltja. Karinthynek hihetetlenül rendezetlen és kaotikus élete a kávéházak és zaklatott, hangos otthona között telt, és nem sikerült a régóta várt kötetet megírnia. Az elbeszéléskötet csúfosan megbukott, és hamarosan az ismeretlenségbe süllyedt. Azóta sem jelentették meg. Végiglátogattam

Budapest legtöbb könyvesboltját és antikváriumát, de nyomát sem találtam. Viszont volt benne egy történet, a *Láncszemek*, amely figyelmet érdemel.

„Annak bizonyításául, hogy a Földgolyó lakossága sokkal közelebb van egymáshoz, mindenféle tekintetben, mint ahogy valaha is volt, próbát ajánlott fel a társaság egyik tagja. Tessék egy akármilyen meghatározható egyént kijelölni a Föld másfél milliárd lakója közül, bármelyik pontján a Földnek - ő fogadást ajánl, hogy legföljebb öt más egyéneken keresztül, kik közül az egyik neki személyes ismerőse, kapcsolatot tud létesíteni az illetővel, csupa közvetlen ismeretség alapon" - írja Karinthy a *Láncszemek*ben. Valóban, Karinthy képzeletbeli személye azonnal összekapcsolja magát egy Nobel-díjassal. Megjegyzi, hogy a díjazottnak ismernie kellett Gusztáv svéd királyt, aki a Nobel-díjakat átadja, aki viszont lelkes teniszjátékos, és időnként azzal a teniszbajnokkal játszik, aki Karinthy szereplőjének jó barátja. Miután észreveszi, hogy híres emberekhez könnyű kapcsolatot találni, Karinthy szereplője nehezebb feladatot tűz ki magának, és megpróbál kapcsolatot találni egy Ford-gyári munkás és saját maga között. „A munkás ismeri műhelyfőnökét, műhelyfőnöke magát Fordot, Ford jobban van a Hearst-lapok vezérigazgatójával, a Hearst-lapok vezérigazgatójával tavaly alaposan összeismerkedett Pásztor Árpád úr, aki nemcsak ismerősöm, de tudtommal kitűnő barátom - csak egy szavamba kerül, hogy sürgönyözzön a vezérigazgatónak, hogy szóljon Fordnak, hogy Ford szóljon a műhelyfőnöknek, hogy az a szögecselő munkás sürgősen szögecseljen nekem össze egy autót, éppen szükségem lenne rá." Bár ezekkel az elbeszélésekkel senki nem törődött, Karinthy 1929-es ösztönös megérzése, hogy az emberek legfeljebb öt kapcsolaton keresztül összekapcsolhatók, az első nyomtatásban megjelent változata annak a fogalomnak, amit ma „six degrees of separation - hatlépcsnyi távolság" néven ismerünk.

## 1.

A hatlépcsnyi távolság létét majd három évtizeddel később, 1967-ben újra felfedezte Stanley Milgram harvardi professzor, aki ezt a fogalmat az összekapcsoltságunkról szóló sokat ünnepeelt, alapvető tanulmányában írta le. Meglepő, hogy Milgramnak e tárgyról szóló első cikke pont úgy szól, mintha csak Karinthy *Láncszemek*-ét írták volna át szociológus hallgatóság számára.

Milgram a kísérleti pszichológia talán legkreatívabb alkalmazója, és legjobban azokról a sokat vitatott kísérleteiről ismert, amelyekben a személyes lelkiismeret és a hatalomnak való engedelmesség közötti konfliktust teszi próbára. De érdeklődése szerteágazó volt, és hamarosan az ismeretségi hálózatok szerkezete kezdte foglalkoztatni. A Harvardon és a MIT-en a hatvanas évek második felében erről a témáról gyakran esett szó a szociológusok között.

Milgram célja az volt, hogy megtalálja az USA-ban tetszőleges két ember között a „távolságot". A kísérlet központi kérdése az volt, hogy hány ismeretségi kapcsolaton keresztül lenne összeköthető két véletlen

módon kiválasztott személy? Az induláshoz először kiválasztott két célszemélyt, egy teológus hallgató feleségét a Massachusetts állambeli Sharon-ban, és egy tőzsdeügynököt Bostonban. A vizsgálat kezdőpontjainak a Kansas államban lévő Wichita, és a Nebraskában található Omaha települést szemelte ki azért, mert „Cambridge-ből úgy tűnt, hogy ezek a városok lent vannak a térképről, valahol a Nagy Síkságon vagy másfelé”. Nem volt általánosan elfogadott elképzelés arról, hogy hány ismeretségi kapcsolaton keresztül köthetőek össze egymástól ilyen távol élő emberek. 1969-ben maga Milgram hangsúlyozta, hogy „amikor egy okos embert megkérdeztem, mit gondol, hány lépés kellene, ő azt felelte, hogy száz vagy több közbeeső személyre lenne szükség, hogy Nebraskából Sharonig eljussunk”.

Milgram kísérlete abból állt, hogy Wichita és Omaha véletlen módon kiválasztott lakóinak levelet küldött azzal a kéréssel, hogy vegyenek részt az amerikai társadalom ismeretségi kapcsolatainak vizsgálatában. A levél tartalmazta a kutatás célját, az egyik célszemély fényképét, nevét, címét és még néhány információt róla, valamint egy négy pontból álló útmutatót:

### **HOGYAN VEGYÜNK RÉSZT EBBEN A VIZSGÁLATBAN?**

1. ADJA HOZZÁ A NEVÉT A LAP ALJÁN LÉVŐ LISTÁHOZ, hogy a következő címzett, tudja, kitől jött a levél.
2. TÉPJE LE A LEVELEZŐLAPOT. TÖLTSE KI, ÉS KÜLDJE VISSZA A HARVARD EGYETEMRE. Bélyeg nem kell. A levelezőlap nagyon fontos. Ennek segítségével tudjuk követni a nyomtatvány útját, amint az a célszemély felé halad.
3. HA SZEMÉLYESEN ISMERI A CÉLSZEMÉLYT, AKKOR KÖZVETLENÜL NEKI KÜLDJE EZT A NYOMTATVÁNYT. Ezt csak akkor tegye, ha már találkozott a célszeméllyel, és tegeződnek.
4. HA NEM ISMERI A CÉLSZEMÉLYT SZEMÉLYESEN, AKKOR NE PRÓBÁLJON VELE KÖZVETLENÜL KAPCSOLATBA LÉPNI. HELYETTE POSTÁZZA A NYOMTATVÁNYT (A LEVELEZŐLAPOKAT ÉS MINDENT) EGY OLYAN SZEMÉLYES ISMERŐSÉNEK, AKI VALÓSZÍNŰBB, HOGY ISMERI A CÉLSZEMÉLYT. Elküldheti az anyagot egy barátnak, rokonnak vagy ismerősnek, de csak olyannak, akivel tegeződnek.

Milgramnek volt egy komoly aggodalma. Eléri-e a célt a levelek bármelyike? Ha a szükséges lépések száma valóban száz körüli, ahogy barátja becsülte, akkor valószínűleg a kísérlet sikertelen lesz, mivel egy ilyen hosszú láncon belül mindig akad valaki, aki nem akar együttműködni. Éppen ezért volt kellemes meglepetés, mikor néhány napon belül az első levél megérkezett, és csak két lépésre volt szüksége! Ez a valaha regisztrált legrövidebb útvonal volt. Végül a százhatvan levélből negyvenkettő megérkezett, néhányhoz majd egy

tucat közvetítő kellett. Ezek a befejezett láncok lehetővé tették Milgram számára, hogy meghatározza a levél célba juttatásához szükséges emberek számát. Azt találta, hogy átlagosan 5,5 közvetítő személyre volt szükség. Ez valóban nagyon kis szám, véletlenül meglepően közel van Karinthy javaslatához. Kerekítsük ezt fel hatra, és megkapjuk a híres hatlépésnyi távolságot.

Thomas Blass szociálpszichológus, aki az utóbbi tizenöt évben nagy alapossággal kutatta Stanley Milgram életét és munkáját, felhívta a figyelmemet arra, hogy Milgram soha nem használta a hatlépésnyi távolság kifejezést. John Guare-tól ered az elnevezés, aki 1991-es briliáns színdarabjának adta ezt a címet. Egy különösen sikeres évad után a Broadwayen, a darabból azonos című film készült. A színműben Ousa (akit Stockard Channing játszott a filmben) szoros összekapcsoltságunkon tűnődve ezt mondja a lányának: „Ezen a bolygón mindenki csak hatemberrnyi távolságra van a többiektől. Hatlépésnyi távolság. Lehet az kettőnk és tőlünk mérve bárki más e bolygón. Az Egyesült Államok elnöke. Egy velencei gondolás... Nem csak a híres emberek. Bárki lehet. Egy bennszülött az őserdőben. Valaki a Tűzföldön. Egy eszkimó. Bárkihez e bolygón hat emberen keresztül vezető út kapcsol. Ez egy mély gondolat... Minden egyes ember egy újabb ajtó, amely másféle világokba nyílik.”

Milgram vizsgálata az Egyesült Államokra korlátozódott, összekapcsolva a távoli Wichitában és Omahában élő embereket a bostonival. Guare Ousája számára azonban a hat lépés az egész világra alkalmazható, így egy mítosz született. Miután több ember nézi a filmeket, mint ahányan szociológiai cikkeket olvasnak, a köznapi gondolkodásban Guare verziója terjedt el.

A hatlépésnyi távolság cseles, mert azt sugallja, hogy társadalmunk hatalmas mérete ellenére könnyen bejárható, ha követjük az embereket összekötő ismeretségi kapcsolatokat: a hatmilliárd pontból álló hálózatban, amelyben bármely tetszőleges pontpár átlagosan hatlépésnyi távolságra van egymástól. Talán meglepődhetnénk azon, hogy tetszőleges két ember között egyáltalán van útvonal. Ám az előző fejezetben láttuk, hogy az összekapcsoltsághoz nagyon kevés szükséges, személyenként egy ismeretségnél csak egy picivel több. Mivel mindnyájunknak egynél sokkal több kapcsolata van, mind része vagyunk a társadalomnak nevezett hatalmas hálózatnak.

Stanley Milgram ráébresztett bennünket arra a tényre, hogy mi nemcsak össze vagyunk kapcsolva, de egy olyan világban élünk, amelyben bárki csak néhány kézfogásnyira van bárki mástól. Azaz, egy kis világban élünk. Világunk azért kicsi, mert a társadalom nagyon sűrű háló. Sokkal több barátunk van, mint az összekapcsoltsághoz szükséges kritikus egy. Vajon a hat lépés valami emberekre jellemző egyedi dolog, és azzal az emberi igénnyel kapcsolatos, hogy szeretünk kapcsolatokat létesíteni? Vagy más típusú hálózatok is hasonlóan néznek ki? Ezekre a kérdésekre a válaszok csupán néhány éve kezdtek megfogalmazódni. Már tudjuk, hogy az ismeretségi hálózatok nem az egyedüli kis világok.

„Tegyük fel, hogy az összes, számítógépen tárolt információt összekapcsoljuk... A legjobb információkat a CERN és bolygónk minden számítógépéről elérhetném, és bárki más is. Egyetlen globális információtér lenne.” Ez volt Tini Berners-Lee álma 1980-ban, amikor programozóként dolgozott a Nukleáris Kutatások Európai Szervezeténél, francia rövidítésű nevén a CERN-nél, a svájci Genfben. Álma valóra váltásához programot írt, amely lehetővé tette, hogy a számítógépek megosszák információikat, azaz egymáshoz kapcsolódjanak. A linkek felfedezésével Berners-Lee kiszabadította a szellemet egy olyan palackból, amelynek létezéséről korábban nem tudtunk. Kevesebb mint tíz év alatt a szellem a világhálavá alakult át, és létrejött a World Wide Web, amely az emberek által valaha épített hálózatok egyik legnagyobbika. A www egy virtuális hálózat, amelynek pontjai a weblapok, amelyeken minden megtalálható: hírek, filmek, pletykák, térképek, képek, receptek, életrajzok és könyvek. Ha valami leírható, lefényképezhető, akkor valószínűleg már van a weben egy pont, ami azt valamilyen formában tartalmazza.

A web hatalma a linkekben rejlik: mindegyik link egy web-cím, idegen nevén uniform resource locator (URL), amely egy egérekattintással lehetővé teszi számunkra az egyik lapról másikra történő átlépést. Szörfölhetünk, megtalálhatunk és összekapcsolhatunk információkat. Ezek a linkek egyetlen egérekattintással összefonják a különálló dokumentumok gyűjteményét, és egy hatalmas hálózattá alakítják őket. Ezek az öltések tartják össze modern információs társadalmunk szövetét. Ha eltávolítjuk a kapcsolatokat, a linkeket, akkor a szellem látványosan eltűnik. Óriási, elérhetetlen adatbázisokat hagy hátra, összekapcsolt világunk modem romjait.

Mekkora is ma a web? Hány webdokumentum és -kapcsolat van? Nemrég még senki nem tudta biztosan, hiszen nincs egyetlen olyan szervezet sem, amely követné a pontok és linkek megjelenését. 1998-ban a princetoni NEC Kutatóintézetben dolgozó Steve Lawrence és Lee Giles volt az a két kutató, aki vállalkozott erre a páratlan feladatra. Méréseik szerint 1999-ben a web közel egymilliárd dokumentumból állt. Nem is rossz egy alig egy évtizeddel korábban született virtuális társadalom számára. Ha figyelembe vesszük, hogy a web az emberi társadalomnál sokkal gyorsabban növekszik, akkor elképzelhető, hogy mire ez a könyv megjelenik, több webdokumentum lesz, mint ahány ember él a Földön.

A lényeges kérdés azonban nem a web mérete, hanem a távolság két dokumentum között. Hány kattintással juthatunk el egy omahai gimnazista honlapjáról egy bostoni tőzsdeügynök honlapjára? Az egymilliárd pont ellenére lehet-e a web egy „kis világ”? A válasz erre a kérdésre senkinek sem közömbös, aki a hálón szörföl. Ha a weblapok több ezer kattintásra vannak egymástól, akkor keresőprogram nélkül reménytelen bármilyen dokumentum megtalálása. Ha azt találnánk, hogy a web nem egy kis világ, ez azt jelentené, hogy a társadalom és az elektronikus világháló mögötti hálózatok alapvetően különbözőek. Ha ez az eset állna fenn, akkor ahhoz, hogy a hálózatokat teljesen megértsük, meg kellene értenünk, miért és hogyan jön létre ez a különbség. Ezért 1998 végén Albert Réka doktorandusz és Hawoong Jeong doktorált

munkatársam - mindketten a Notre Dame Egyetem fizika tanszékén működő kutatócsoportom tagjaiként - nekiláttak, hogy a web mögötti világ méretét megértsék.

Első célunk az volt, hogy elkészítsük a háló térképét, lényegében egy leltárt, amely az összes weboldalt és kapcsolatot tartalmazza. Az információ, amit egy ilyen térkép tartalmazna, valóban páratlan lenne. Ha a társadalomról akarnánk hasonló térképet készíteni, ez magában foglalná minden egyes személy szakmai és személyes érdeklődését, és feltérképezne mindenkit, akit ismer. Ehhez képest Milgram kísérlete ügyetlen és elavult lenne, hiszen másodpercek alatt megtalálhatnánk vele a legrövidebb útvonalat bármelyik két ember között a világon. Egy ilyen eszköz nélkülözhetetlen lenne mindenki számára, a politikusoktól a kereskedőkön át a járványtani specialistákig. Természetesen ilyen keresőprogramot lehetetlen készíteni, mivel legalább egy emberéletnyi időbe telne, míg a Földön élő hatmilliárd embert barátainkról és ismerőseikről kifaggatnánk. A hálóval kapcsolatban az a varázslatos, hogy a társadalomtól eltérően a kapcsolatokon keresztül pillanatok alatt bárhova eljuthatunk rajta. Csak néhány kattintásra van szükség.

A jelenlegi társadalmunktól eltérően a web digitális. Ez lehetővé teszi, hogy olyan programot írjunk, amely tetszőleges dokumentumot letölt, megtalálja a rajta lévő összes linket, végiglátogatja azokat, letölti a dokumentumokat, amelyekre mutatnak, és ezt folytatja mindaddig, amíg a weben lévő összes oldalt le nem töltöttük. Ha egy ilyen programot szabadjára engedünk, akkor elméletileg megkaphatjuk vele a web térképét. A számítógépek világában az ilyen szoftvert „crawlernek”, „robotnak” vagy „tipegőnek” nevezik, mert emberi beavatkozás nélkül lépked végig a weben. A nagy keresőknél, mint az AltaVista vagy a Google, számítógépek ezrein rengeteg robot dolgozik, és állandóan új dokumentumokat keresgél a weben. Kis kutatócsoportunk nyilvánvalóan nem tudott ilyen óriásokkal versenyezni. Ezért Jeong elkészített egy olyan robotot, amivel szerényebb célt értünk el. Először feltérképeztük vele az nd.edu tartományt<sup>2</sup>, a Notre Dame Egyetem nagyjából 300 ezer weblapját, ahol hihetetlen tarka egyvelegben a filozófia kurzus oldalaitól az ír zene rajongóinak lapjáig mindenféle oldal megtalálható. Azonban mi nem az oldalak tartalmával törődtünk. Bennünket csak a linkek érdekelték, amelyek megmondták, hogyan jutunk el egyik lapról a másikra. Egy ilyen térképpel a kezünkben már meg tudtuk mérni az egyetemen belül bármelyik két oldal távolságát.

<sup>2</sup> Az Interneten a számítógépeket címükkel szokás azonosítani. Minden cím egy szám, és a címeket csoportokba szokás sorolni. Egy ilyen csoport neve domain, magyarul címtartomány (a szaklektor).

Akárcsak Milgram, akinek egyes levelei a célszemélyt két lépésben elérték, míg máshol csak tizenegyben, mi is nagy eltéréseket találtunk a webdokumentumok közötti távolságokban. A diákjaimnak például van linkje az én honlapomra, így ők egy kattintásra vannak tőlem. Azonban az én weboldalamtól egy filozófia szakos hallgató honlapjáig gyakran húsz kattintás is kellett. Viszont az volt a meglepő, hogy összességében véve ezek az útvonalak mégsem voltak olyan hosszúak, mint azt a web mérete sugallná. A mérések szerint az oldalak átlag tizenegy kattintásnyira voltak egymástól. Guare címét felhasználva azt mondhatjuk, hogy a Notre Dame-on tizenegy lépésnyi a távolság.

Az egyetemünk címtartománya, az nd.edu domain azonban a World Wide Web egy pici részét képezi csak. A teljes web 1999-ben legalább háromezerszer nagyobb volt. Vajon ez azt jelenti-e, hogy a World Wide Web bármely két véletlen módon kiválasztott pontja között a távolság háromezerszer akkora lesz, mint a méréseink szerinti tizenegy kattintás? Valóban pontosan 33 ezer kattintással jutnánk el a weben egy oldalról egy másikra? Ahhoz, hogy a kérdésre válaszolhassunk, szükségünk volt a teljes web térképére. A probléma az volt, hogy ez senkinek nem volt meg. Még a szüntelenül működő legnagyobb keresők is, amelyek számítógépek ezrei segítségével nézik át a webet, a web teljes méretének csak 15 százalékát képesek lefedni. Meg tudjuk-e határozni a teljes weben a távolságot ilyen térkép nélkül? A válasz: igen. De ehhez egy, a statisztikus mechanikában általánosan használt módszert kellett alkalmaznunk. A statisztikus mechanika a fizikának az a területe, amely az előre nem jelezhető összetevőket és folyamatokat tartalmazó véletlen rendszerekkel foglalkozik.

Megközelítésünknek volt egy egyszerű feltételezése. Ha a web túl nagy ahhoz, hogy ráférjen a számítógépünkre, akkor sok kisebb részét kell tanulmányoznunk, ami elfér rajta. Például kiválasztottuk a webnek egy ezer pontból álló kis részét, és ezen a kis mintán kiszámoltuk tetszőleges két pont között a távolságot. A következő lépésben vettünk egy valamivel nagyobb darabot tízezer ponttal, és ismét kiszámítottuk a távolságot. Megismételtük ezt a legnagyobb olyan rendszerre, amelyet számítógépünk még képes volt kezelni, és kerestük a tendenciát a pontok közötti távolságokban. Az eredmények azt mutatták, hogy a pontok közötti átlagos távolság a dokumentumok számánál sokkal lassabban nő, és egy nagyon egyszerű és reprodukálható kifejezéssel<sup>3</sup> adható meg.

<sup>3</sup> Azt találtuk, hogy a távolság arányos a hálózatban lévő csomópontok számának logaritmusával. Azaz, ha  $d$ -vel jelöljük a web  $N$  oldala között két oldal átlagos távolságát, akkor ezt a távolságot leírja a  $d = 0,35 + 2 \log N$  egyenlet, ahol  $\log N$  jelöli  $N$  tízes alapú logaritmusát.

Ennek segítségével megjósolhatjuk a teljes weben a távolságot, ha ismerjük a dokumentumok számát. Ezt a számot adta meg a NEC csoport. Ők úgy becsülték, hogy 1998 vége körül a web nyilvános oldalainak száma nyolcszázmillió körül lehetett, így az általunk talált kifejezés szerint a web átmérője 18,59 (közel 19) volt. Ahogy Guare mondhatta volna, tizenkilenc lépésnyi távolság. Bár szörfölés közben néha nem így látjuk, a valóságban a web mégis egy kis világ. Egy tetszőleges dokumentum bármelyik másiktól tizenkilenc kattintásra van.

### 3.

Összevetve Milgram hat lépését a web tizenkilenc lépésével, már gyaníthatjuk, hogy a megfigyelt rövid távolságok mögött valamilyen nagyon alapvető elv lehet. Több, mint az embereknek az a vágya, hogy az egész földkerekséget behálózzák kapcsolataikkal. Ezt a gyanút megerősítették a későbbi felfedezések: kiderült, hogy a kis távolságok megtalálhatók majd mindegyik olyan hálózatban, amelyet a kutatók eddig megvizsgáltak. A táplálékláncban található fajok tényleg átlagosan kétkapcsolatnyira lévőknek tűnnek egymástól, a sejtekben a molekulák

pedig általában három kémiai reakciónyi távolságban vannak egymástól. A tudomány különböző területein dolgozó kutatókat négy vagy hat közös szerzőségi kapcsolat választja el. A *Caenorhabditis elegans* féreg idegsejtjeit tizennégy szinapszis választja el. Valójában úgy tűnik, hogy a web tartja az abszolút rekordot a maga tizenkilenc fokozatával, mivel az összes többi, eddig vizsgált hálózat kettő és tizennégy közötti távolságot mutat.

A tizenkilenc fokozat nagyon eltérőnek tűnhet a hattól. De ez csupán a látszat. Az a fontos, hogy a pontok százmillióból és milliárdjaiból álló hatalmas hálózat összeomlik, és a pontjai számánál lényegesen rövidebb benne a távolság. Társadalmunkban, amely egy hatmilliárd pontból álló hálózat, a távolság hat. A weben, ahol közel egymilliárd pont van, tizenkilenc a távolság. Az interneten, a routerek százazereiből álló hálózaton, a távolság tíz. Ebből a nézőpontból a hat és a tizenkilenc közötti különbség elhanyagolható.

Természetesen felmerül a kérdés, hogy miért van ez így. Hogyan képesek a hálózatok mind rövid útvonal elérésére, annak ellenére, hogy pontok milliárdjaiból állnak? A válasz ezeknek a hálózatoknak az erős összekapcsoltságából következik. Az előző fejezetben láttuk, hogy az óriáscsoport kialakulásához a véletlen hálózatokban pontonként csak egyetlen kapcsolat szükséges. A kérdés az, hogy mi történik akkor, ha - amint az a valódi hálózatokban történni szokott - egy ponthoz ennél sokkal több kapcsolat tartozik? A kritikus értéknél, amikor az átlagos összekapcsoltság közel van a pontonkénti egyhez, a pontok közötti távolság elég nagy lehet. Ha azonban több kapcsolatot veszünk, a pontok közötti távolság hirtelen csökken. Vegyünk egy hálózatot, amelyben egy pontnak átlagosan  $k$  kapcsolata van. Ez azt jelenti, hogy egy tipikus pontból egy lépéssel  $k$  másik pontot érhetünk el. Kétpontnyi távolságra  $k^2$  pont lesz, és nagyjából  $k^d$  pont található pontosan  $d$  kapcsolatnyira. Ezért ha  $k$  nagy, akkor az elért pontok száma nagyon nagy lehet, még kis  $d$  értékek esetén is. Néhány lépésen belül az összes pontot elérhetjük. Ez megmagyarázza, hogy a legtöbb hálózatban miért olyan rövid az átlagos távolság.

Ezeket az érveket könnyen matematikai képletté alakíthatjuk, amely a véletlen hálózatokban a pontok számának függvényében megadja a távolságot<sup>4</sup>. A kis távolság eredete a képletben szereplő logaritmikus tag. Valóban még egy nagyon nagy szám logaritmus is elég kicsi. Az egymilliárd tízes alapú logaritmus is csak kilenc. Ha például két hálózatunk van, és mindkettőben pontonként átlag tíz kapcsolat, de az egyik százszor nagyobb a másikonál, akkor a nagyobb hálózatban a távolság csak két fokozattal lesz magasabb, mint a kisebbé. A logaritmus zsugorítja össze az óriáshálózatokat, és kis világokat hoz létre körülöttünk.

<sup>4</sup> Ha a hálózatban  $N$  csomópont van, akkor  $k^d$  nem lépheti túl  $N$ -et. Így felhasználva, hogy  $k^d=N$ , a véletlen hálózatok esetében jól működő, egyszerű képletet nyerünk, amely megmondja, hogy az átlagos távolság  $a = \log N / \log k$  lesz.

## 4.

Karinthy, az egyik legszórakozottabb ember kortársai közül, hírhedt volt arról, hogy az előre megbeszélte találkozókra elfeledkezett.



Kosztolányi Dezső, Karinthy közeli barátja és irodalmi riválisa, egyszer megjegyezte: „Rohannom kell, mert Karinthy megígérte, hogy meglátogat bennünket, amit valószínűleg elfelejt, és valóban el fog jönni.” Érdekes módon, a hatfokozatúság Karinthyhoz igen hasonló. Elfelejtették, majd átfogalmazva ismét feltűnik, és a tudományos ismeretterjesztő újságírásban és szövegekben is újra felfedezik. Fogalmam sincs, ki fedezte fel eredetileg a hat fokozat, a hat lépés elvét. Az általam ismert legkorábbi írásos beszámoló Karinthytól származik. De hogy került hozzá? Ő maga találta ki? Páratlan elméje, valamint a váratlan és szokatlan ötletek iránti lelkesedése alapján ez nem kizárt. Valószínűleg soha nem tudjuk meg a választ. De érdekes elgondolkodni azon, ami ezután történt.

Karinthy elbeszélése 1929-ben jelent meg, ekkor a szintén Budapesten élő Erdős tizenhét éves volt. Minthogy Karinthynek még a sikertelen könyvei is irodalmi események voltak, elképzelhető, hogy Erdős olvasta vagy hallott a Láncszemek elbeszéléséről, amelyben Karinthy felteszi, hogy az összes ember a földön öt ismerősön keresztül összekapcsolható. Hasonló sejtésünk lehetne Rényi Alfréddal kapcsolatban is, aki, bár csak kilencéves volt, amikor a Láncszemek megjelent, különösen vonzódott az irodalomhoz. Ismert róla, hogy számos író barátja volt, többek között Karinthy fia, Ferenc, aki maga is ismert író volt.

1959-ben Erdős összefogott Rényivel, hogy a véletlen hálózatokról szóló nyolc híres cikküket megírják. A cikkekben szerepelt a hálózat átmérőjét a pontok száma segítségével meghatározó kifejezés. Ha bármelyiküket érdekelte volna, könnyen meg tudták volna mutatni, hogy Karinthy intuíciója jól működött. A gigantikus méretű ismeretségi hálózatok is egészen kis világokká zsugorodnak, hiszen mindannyiunknak rengeteg ismerőse van. Erdős és Rényi soha nem említették cikkeikben ezt az alkalmazást. Azt már nem tudhatjuk, hogy játszottak-e ezzel az ötlettel a tételek és bizonyítások közötti szünetekben. De a kapcsolatok még nem érnek itt véget. Stanley Milgram az 5,5 lépésnyi távolságot felfedező kísérleteit 1967-ben publikálta, négy évtizeddel Karinthy ötlépéses írása után, és majd egy évtizeddel azután, hogy Erdős és Rényi bevezette a véletlen hálózatok elméletét. Valószínűleg nem hallott a gráfelmélet hálózatokkal kapcsolatos eredményeiről, és Erdőst és Rényit sem ismerte soha. Azt tudjuk, hogy a MIT-en dolgozó Ithel de Sole Pool és az IBM-es Manfréd Kochen munkája hatott rá. Ők a kis világ problémára vonatkozó kézírataikat kollégáik között évtizedeken keresztül terjesztették, de nem publikálták azokat, mert úgy érezték, „soha nem sikerült megragadniuk a probléma lényegét”. Merő véletlen, hogy Milgram egy magyar apa és egy román anya gyermeke, akik az Egyesült Államokba emigráltak, és Bronxban telepedtek le. Lehet, hogy édesapja vagy az őket gyakran meglátogató nagybácsi legalább anecdota szinten ismerték Karinthy ötlépéses távolságát? Előfordulhat-e, hogy érdeklődése azokból a történetekből származik, amelyeket gyermekként véletlenül hallhatott? Ez ismét olyasvalami, amit soha nem fogunk megtudni, de bizonyára érdekes útvonalat sugall a hat lépés ötletének fejlődéséhez.

## 5.

A hat/tizenkilenc lépés távolság kifejezés nagyon megtévesztő, mert azt sugallja, hogy egy kis világban könnyű megtalálnunk a dolgokat. Ennél távolabb nem is járhatnánk az igazságtól! Nemcsak a kívánt személy vagy dokumentum van tőlünk hat/tizenkilenc lépésnyi távolságra, de ennyire van az összes ember és dokumentum is. Más szóval, a hat vagy tíz vagy tizenkilenc lehet nagyon kis szám, vagy nagyon nagy, attól függően, hogy mit akartunk csinálni. Mivel a teljes hálózaton  $k$  átlaga hét, ezért ha az első oldalról csak hét kapcsolatot követhetünk, kétkattintásnyira negyvenkilenc oldal lesz, háromkattintásnyira háromszáznegyvenhárom és így tovább. Mire elérjük a tőlünk tizenkilenc kattintásnyi távolságra lévő pontokat, elméletileg megnézhetünk  $10^{16}$  oldalt, tízmilliószor többet, mint a weben lévő összes oldal száma. Ennek az ellentmondásnak egyszerű feloldása az, hogy a kapcsolatok közül néhány olyan pontra fog mutatni, amit korábban már láttunk, így ezek nem új kapcsolatok. De még akkor is, ha csak egy másodpercig tart, míg egy oldalt leellenőrözünk, még mindig háromszázmillió év alatt tudnánk elérni az összes, tőlünk tizenkilenc kattintásnyira lévő oldalt. Persze a zavarba ejtő bőség ellenére néha nagyon gyorsan megtalálunk egy oldalt, még kereső nélkül is.

A trükk természetesen az, hogy nem az összes kapcsolatot követjük. Inkább vezérfonalakat használunk. Valóban, ha Picassóval kapcsolatos információt keresünk, és az adott weblapon háromféle választással szembesülünk, hajlamosabbak vagyunk inkább a modern művészeti linket követni, mint a híres birkózóét vagy a béka szerelmi életére utalót. A kapcsolatokat értelmezzük, és így elkerüljük az összes, tizenkilenc kattintáson belüli oldal ellenőrzését, és a kívánt oldalra néhány kattintással rálelünk. Miközben ez a módszer látszik a leghatékonyabbnak, mégis ritkán sikerül vele a legrövidebb útvonalat megtalálni. Valójában könnyen meglehet, hogy a birkózó, akinek a weblapját kihagytuk, azzal ellensúlyozza a róla kialakított „kemény fickó” képet, hogy van egy linkje a legjobb Picasso-oldalra. A legtöbb Picassót kereső ember azonban nem törődne a birkózó linkjével, és végül egy hosszabb útvonalon keresztül érne el a kívánt oldalt. A számítógépnek nincs ízlése vagy előítélete (még), és azonos izgalommal rágja át magát a birkózó, a modern művészet és a béka szerelmi életének lapjain, gyakorlatiasan követve mindhárom kapcsolatot. Azzal, hogy kipróbálja a lehetséges összes ösvényt a közbeeső lapok tartalmától függetlenül, elkerülhetetlenül rátalál a legrövidebbre. Picasso megtalálása a weben rávilágít a hatlépésnyi távolság alapvető problémájára. Milgram módszere túlbecsülte a két ember közötti legrövidebb távolságot az Egyesült Államokban. A hat lépés igazából egy felső határ. Tetszőleges két ember között roppant nagyszámú és nagyon eltérő hosszúságú útvonal létezik. Jó példa erre, ha valaki eltéved egy óriási labirintusban, ahol csak a közvetlenül előtte lévő folyosókat és ajtókat látja. Még akkor is, ha van iránytűje, és tudja, hogy a kijárat észak felé van, azt mégis reménytelenül nehezen és hosszú idő alatt tudja csak elérni. Az útvesztő térképével kezében öt perc alatt kiérhet. Hasonlóan, Milgram levelei a legrövidebb útvonalat követték volna Omaha és Boston között, ha

minden résztvevőnek a rendelkezésére állt volna egy térkép, ami tartalmazza az összes amerikai ismeretségi kapcsolatát. Mivel ilyen térképük nem volt, ők az üzenetet annak küldték el, akiről úgy gondolták, hogy valószínűleg a helyes irányba küldi majd tovább. Például, ha azt szeretnék, hogy bemutassanak az Egyesült Államok elnökének, megpróbálnánk egy olyan embert találni, aki ismeri az elnököt. Valószínűleg a szenátorunknál vagy képviselőnkél kötnénk ki. Mivel azonban többségünk nincs tegező viszonyban a szenátorával, megpróbálnánk valaki olyat találni, aki jóban van vele, és hajlandó lenne egy találkozót közvetíteni az elnökkel. Ehhez legalább három kézfogás kell. Időközben pedig lehetséges, hogy nem jöttünk rá arra, hogy a néhány nappal ezelőtti fogadáson mellettünk ülő úr egy iskolába járt az elnökkel, így a valóságban két kézfogásnyira vagyunk az elnöktől. Hasonlóképpen, a Milgram kísérletében rögzített útvonalak mindig hosszabbak, mint a lehetséges legrövidebb, így a valódi társadalmi távolságokat nyilvánvalóan túlbecsülték. Ez rövidebb kell legyen hatnál, még talán Karinthy ötjénél is. Nem áll rendelkezésünkre egy társadalmi kereső, így soha nem tudhatjuk meg a valódi számot teljes bizonyossággal.

## 6.

A hatlépcsényi távolság modern társadalmunk terméke; annak eredménye, hogy ragaszkodunk az egymással való kapcsolattartáshoz. Ezt elősegíti az a viszonylag új keletű képességünk, hogy nagy távolságokon keresztül tudunk kommunikálni, gyakran ezer mérföldeknél is többet áthidalva. A globális falu, amely életünk természetes közegévé vált, egy új létforma az emberek számára. A legtöbb amerikai elődeinek megszakadt kapcsolatuk azokkal, akiket előző hazájukban hátrahagytak. A prériek tehéncsordái mellől vagy a Szikláshegység aranybányáiból nem tudták elemi a tőlük óceánok és kontinensek által elválasztott szeretteiket. Nem voltak postai levelezőlapok, telefonhívások. Az akkori szövevényes társadalmi hálózatokban nehéz volt a költözéskor felbomlott kapcsolatokat sokáig életben tartani. Mindez a huszadik században megváltozott: a levelezés, a telefon és később a légi közlekedés lebontotta az akadályokat, és összezsugorította a fizikai távolságokat. A ma Amerikába bevándorlók megtehetik, hogy fenntartják a kapcsolatot azokkal az emberekkel, akiket hátrahagytak. Képesek vagyunk rá, és tartjuk is a kapcsolatot. Én sem veszítem szem elől rokonaimat és barátaimat, legyenek akár Koreában vagy Kelet-Európában. A világ mérete csökkent a huszadik században, ez már visszafordíthatatlan. A folyamat napjainkban is tart, és újabb robbanásszerű lendületet kap, amint az internet elér a világ minden csücskébe. Bár tizenkilenc kattintásnyira vagyunk mindenkitől a weben, barátainktól csak egy kattintásra. Lehet, hogy mióta utoljára találkoztunk, három várossal és öt munkahellyel arrébb vannak már. Nem számít, hol vannak, általában megtalálhatjuk őket az interneten, amikor csak akarjuk. A világ zsugorodik, mert azok a kapcsolatok, amelyek háromszáz évvel ezelőtt megszűntek volna, ma élők maradnak, és könnyen feléleszthetők. Egy ember sokkal több kapcsolatot képes

ápolni, és ettől csökken a távolság. Milgram hatra becsülte. Karinthy ötre. Napjainkban közelebb járhatunk a háromhoz.

A „kis világ” tulajdonság gyakori a hálózatok körében. A rövid távolság nem társadalmunk rejtélye vagy a web különleges ismertetőjele. A körülöttünk lévő legtöbb hálózat kis távolságokat tartalmaz. A hálózatok szerkezete olyan, hogy hihetetlenül könnyen - néhány lépésben - rengeteg weboldalt és barátot elérhetek. Ezek a kis világok eléggé különböznek az euklideszi világtól, amelyhez hozzászoktunk, és amelyben a távolságokat mérföldekben mérik. Az a képességünk, hogy az embereket elérjük, egyre kevésbé függ a köztünk lévő fizikai távolságtól. Amikor távoli utazásainkon tökéletesen ismeretlen emberekkel közös ismerősöket fedezünk fel, ismét rá kell döbbenünk, hogy az ismeretségi hálózaton keresztül gyakran közelebb vagyunk bolygónk másik felén élő emberekhez, mint a szomszédainkhoz. Ebben a nem-euklideszi világban bolyongva intuíciónk újból és újból becsaphat bennünket, és be kell látnunk, hogy egy új geometriával van dolgunk, amelyet alaposan meg kell tanulnunk, hogy megértsük a minket körülvevő világot.

# A NEGYEDIK LÁNCSZEM

## *Kis világok*

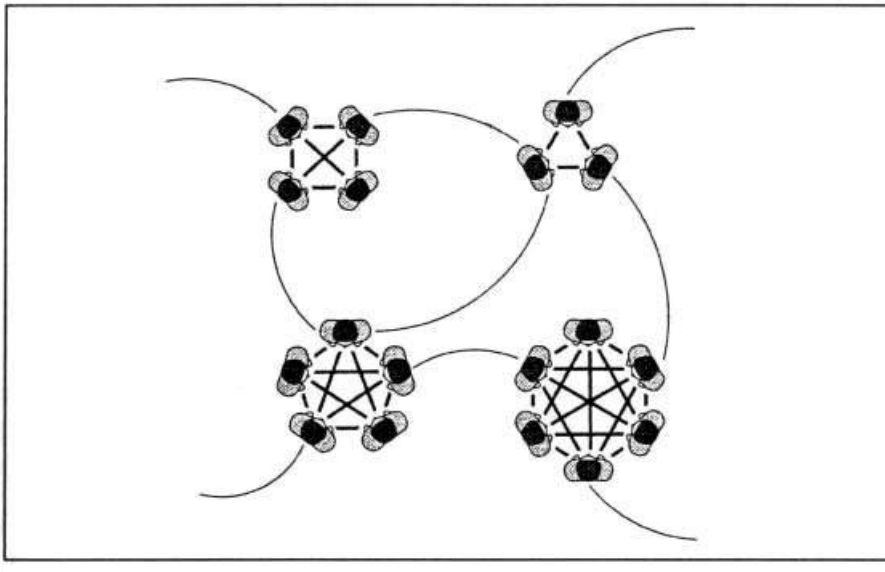
Amikor Mark Granovetter legelső munkáját publikálásra benyújtotta, még doktorandusz diák volt a Harvardon, de a kéziratával kapcsolatban nagy reményeket táplált. Történt mindez a hatvanas évek végén, a Harvardon; a megfelelő helyen a megfelelő időben. A hálózatok éppen ekkortájt árasztották el a szociológiát, a Harvard és a MIT az új eszmék melegágya volt. Harold White-nak, a hálózati nézőpont úttörőjének előadássorozata Granovettert már doktori tanulmányai kezdetén bevezette az ismeretségi hálózatok elméletébe. Az új eszmék termékeny talajra hullottak. Doktori értekezésében egy olyan kérdéssel foglalkozott, ami előbb vagy utóbb minden doktoranduszt utolér: hogyan szereznek az emberek állást. Életrajzának csiszolgotása és az állásbörzék látogatása helyett Granovetter átkelt a Charles folyón a Newton nevű városba. Massachusetts államnak ez a városa manapság Boston gazdag elővárosa, a késő hatvanas években viszont munkások laktak itt. Vezetők és szakmunkások tucatjaival készített interjúi alapján azt próbálta kideríteni, hogyan „hálózatoznak” az emberek: hogyan használják fel ismeretségi kapcsolataikat, amikor állást keresnek. Megkérdezte tőlük, ki segített nekik jelenlegi állásukat megtalálni. Mindig ugyanazt a választ kapta. Nem egy barát, csak egy ismerős. Ez Granovettert arra a bevezető kémia-előadásra emlékeztette, amelyben a diákok megtanulják, hogy a gyenge hidrogénkötések tartják össze a hatalmas vízmolekulát. Ez a kép elsőéves kora óta megmaradt az emlékezetében, és ez ihlette első kutatói cikkét, amely a gyöngye szociális kapcsolatok fontosságáról szól. 1969 augusztusában küldte be az American Sociological Review-nak. Decemberben azt a választ kapta, hogy a kéziratot két anonim bíráló elutasította. Az egyik szerint „rögtön megszámlálhatatlanul sok indok jut az ember eszébe”, ami a kézirat publikálása ellen szól. Granovetter szörnyen elbátortalanodott, és három évig nem nyúlt a kéziratához. 1972-ben benyújtotta a kézirat rövidített változatát egy másik folyóirathoz, az American Journal of Sociologyhoz. Ekkor már nagyobb szerencséje volt. A cikket végül 1973-ban publikálták, négy évvel első beküldése után. Ma Granovetter cikke, „A gyenge kapcsolatok ereje”, a valaha írott szociológiai cikkek közül az egyik legnagyobb hatású. Az egyik legtöbbet idézett is, megtalálható az 1986-os Current Contents kötetben a legtöbbet hivatkozottak listáján (Citation Classic).

„A gyenge kapcsolatok ereje” című cikkében Granovetter valami olyat javasolt, ami először abszurdnak hangzik. Amikor állást keresünk, vagy híreket, egy új étterem beindítása vagy a legújabb divat elterjesztése a cél, akkor a gyenge kapcsolatok sokkal fontosabbak, mint a dédelgetett, erős barátságok. Megfogalmazása szerint az - általa Egónak nevezett - átlagember körül az ismeretségi hálózat szerkezete eléggé általános. „Egónak vannak közeli barátai, akik nagyrészt egymást is ismerik. Ők együtt a teljes ismeretségi hálózat egy szorosan összekötött részét alkotják. De van Egónak néhány olyan ismerőse is, akik közül kevés ismeri a többit. Ezen ismerősök mindegyike azonban

valószínűleg rendelkezik saját barátokkal: része egy szorosan összekötött baráti körnek, amely Ego baráti körétől különböző."

Granovetter érvelése mögött egy olyan társadalom képe rejtőzik, amelyik nagyon eltér az Erdős és Rényi által leírt véletlen világegyetemétől. Szerinte a társadalom kapcsolatokban gazdag kis csoportokra - zárt baráti körökre - tagolódik, amelyekben mindenki ismeri egymást. Néhány külső kapcsolat köti össze ezeket a csoportokat, és e kapcsolatok miatt nem szigetelődnek el a csoportok a világ többi részétől. Ha Granovetter leírása helyes, akkor a társadalmunkat leíró hálózatnak nagyon sajátos a szerkezete. Sok teljes gráfot találhatunk benne: pici csoportokat, amelyek minden egyes pontja az adott csoporton belüli összes ponttal össze van kötve (4.1 ábra). Ezeket a teljes gráfokat a gyenge kapcsolatok kötik össze, amelyek közül bármelyik két, különböző baráti körhöz tartozó ember ismeretségét jelöli.

A gyenge kapcsolatok döntő szerepet játszanak a külső világgal való kommunikációs képességünkben. Gyakran előfordul, hogy a közeli barátok kevés segítséget tudnak nyújtani az álláskeresésben. Ők velünk azonos körökben mozognak, és elkerülhetetlenül ugyanazokhoz az információkhoz jutnak hozzá. Az információszerzéshez gyenge kapcsolatainkat kell felhasználnunk. A felmérés igazolta az elméletet.



**4.1 ábra. Az erős és gyenge kapcsolatok.** Mark Granovetter társadalmi modelljében közeli barátaink gyakran egymásnak is közeli barátai. Az ilyen csoportokból álló társadalom kis, szoros összeköttetésben lévő baráti körökből áll, akiket erős kapcsolatok kötnék össze; az erős kapcsolatokat a vastag vonal jelöli. A vékony vonallal jelzett gyenge kapcsolatok a kis baráti köröknek azokat a tagjait kötik össze ismerőseikkel, akiknek erős kapcsolataik vannak saját barátaikkal. A gyenge kapcsolatok fontos szerepet játszanak számos társadalmi tevékenységben, a pletyka terjedésétől az állászerzésig.

A vezetők gyenge kapcsolatokon keresztül gyakrabban (az esetek 27,8 százalékában) hallanak álláslehetőségről, mint a szorosakon (16,7

százalék). A gyenge kapcsolatok vagy ismerősök a mi külső világba vezető hídjaink. Ők azok, akik különböző helyekre járnak, és eltérő forrásokból szerzik be az információikat, mint a közvetlen barátaink.

Egy véletlen hálózatban nem létezne baráti kör, hiszen a többi ponthoz véletlenszerűen kapcsolódunk. Az Erdős-Rényi-féle világ társadalmában annak a valószínűsége, hogy a két legjobb barátom egymást ismeri, pontosan annyi, mint hogy egy ausztráliai foltozóvarga legjobb barátja egy afrikai törzsfőnök. Társadalmunk azonban nem így néz ki. A legtöbb esetben két jó barát ismeri egymás többi barátját. Gyakran mennek egy helyre vendégségbe, ugyanabba a kiskocsmába járnak, és ugyanazokat a filmeket nézik meg. Minél erősebb a kapcsolat két ember között, annál nagyobb lesz az átfedés a baráti körük közt is. Bár Granovetternek gyenge kapcsolatok melletti érvelése első látásra meghökkentőnek és ellentmondásosnak tűnik, mégis egy egyszerű igazságot fogalmaz meg kapcsolataink szerveződéséről. Granovetter társadalma - a teljesen összekötött csoportok töredezett hálója - a gyenge kapcsolatokon keresztül kommunikál, és ez mindennapi tapasztalataink szerint sokkal igazabb, mint az Erdős és Rényi által ajánlott teljesen véletlen kép. A társadalmi szerkezet teljes megértéséhez a véletlen hálózatok elméletét kell összeegyeztetnünk a Granovetter által felvázolt, csoportokból álló világgal. Majdnem három évtizedig tartott, mire ez sikerült. Meglepő, hogy a megoldás ötletét nem a szociológia és nem is a gráfelmélet adta.

## 1.

A Central kávéházzal szemben, néhány lépésnyire Karinthy kedvenc ablakától, egy kis ajtón és szűk pincelépcsőn keresztül ereszkedhetünk le Budapest egyik elit stúdiószínházába. Találóaan Kamrának nevezik, mivel a színpadon körülbelül csak tíz színész fér el, és a nézőtér is csak száz hely van. Előadásaikra a jegyeket elkapkodják azok, akik ismerik Budapest virágzó színházi életét.

Az utolsó előadáson, amit a Kamrában láttam, a függöny is hiányzott, hogy több hely legyen, eltűntették, és a nézők rá voltak kényszerítve, hogy maguk találják el pontosan, mikor van a darabnak vége. De ezt nehéz is lett volna eltéveszteni, mert valóságos tapsvihár tört ki körülöttem, ami visszaverődött a kis föld alatti pince fekete falairól, és felerősödött. A kaotikus mennydörgés pillanatok alatt ütemes vastapssá alakult. Tenyerünk pontosan ugyanabban a pillanatban csattant össze; valami titokzatos erő egyesítette kezünket, hogy ütemesen tapsoljunk, mintha egy láthatatlan karmester pálcáját követnénk. Amikor a színészek meghajoltak, és eltűntek a színpad mögött, majd újra megjelentek, a ritmikus tapsolás felerősödött. A vastaps néha szétesett, lendületet és erőt gyűjtött, aztán néhány másodperccel később teljes erővel visszatért.

A vastaps nemcsak a kicsi budapesti Kamra sajátossága. Színházi előadások, koncertek vagy sportesemények után Kelet-Európában rendszeresen előfordul, és néha a világ más pontjain is hallható. Spontán módon (külső beavatkozás nélkül) jön létre, például 1999-ben a Madison Square Gardenben a hallgatóság önkéntelen összehangolta

tapsolását Wayne Gretzky, a legendás hokijátékos tiszteletére; Gretzky a New York Rangers csapatától ekkor vonult vissza. A vastaps spontán, titokzatos és csodálatos példa az önszerveződésre, amelynek szigorú törvényeit fizikusok és matematikusok elmélyülten kutatják. A szentjánosbogarak bizonyos fajai szintén ezeknek a törvényeknek engedelmeskednek. Délnyugat-Ázsiában szentjánosbogarak milliói gyűlnek össze a magas mangrovefák körül, szabályos időközönként villantanak. Aztán hirtelen az összes bogár elkezd fluoreszkáló potrohát pontosan ugyanabban a pillanatban ki- és bekapcsolni, és a fáklya alakú fa átváltozik egy hatalmas, pulzáló és mérföldekről látható lámpássá. A természetet áthatja a szinkronizálás iránti megfoghatatlan vágy. Tudjuk, hogy a szívben ez irányítja a pacemaker- (ritmusszabályozó) sejtek ezreinek kisülését, és ez hangolja össze a hosszú ideig együtt lakó nők menstruációs ciklusát.

Az 1990-es évek közepén Duncan Watts a Cornell Egyetemen alkalmazott matematikai doktori dolgozatán dolgozott, és azt a feladatot kapta, hogy vizsgáljon meg egy különös problémát: hogyan szinkronizálják a tücskök ciripelésüket. A hím tücskök hangos ciripeléssel hívogatják a nőstényeket. A tücskök az emberek nagy részétől eltérően nem szeretik a reflektorfényt, gondosan figyelnek a körülöttük lévő többi tücsökre, úgy szabályozzák ciripelésüket, hogy szomszédaikkal egyenrangú ellenfelek legyenek. Ha sok tücsök van együtt, akkor a hangzavarból egy szimfónia jön létre, amit párás nyári éjeken gyakran élvezhetünk a hátsó teraszon.

Watts nem olyan könyvmoly matematikus, mint amit vártunk. Vág az esze, és rendelkezik azzal a ritka képességgel, hogy megálljon, hátralépjön kettőt, és eltöprengjen a munkáján, majd megváltoztassa az irányt, ha kell. A tücsökkutatás pedig átalakította őt: a társadalmi hálózatokkal foglalkozó diákká és végül szociológussá. Ez utóbbi lépés 2000-ben kapott hivatalos formát, amikor Wattsnak a Columbia Egyetem szociológia tanszékén professzori állást ajánlottak fel.

Miközben azzal küzdött, hogy megértse, hogyan szinkronizálódnak a tücskök, Watts maga is meghökkent, mikor rábukkant a hatlépésnyi távolság elvére, amit egy rövid beszélgetés során apja ültetett el fejében. Az emberek mindig gondolkodnak olyan dolgokról, mint a hatlépésnyi távolság, de ilyen kávéházi eszmefuttatások ritkán eredményeznek komoly kutatást. Watts azt gondolta, hogy a tücskök szinkronizálódásának teljes megértéséhez arra kellene rájönnie, hogy ők hogyan figyelnek oda egymásra. Figyeli-e minden tücsök az összes többi ciripelését? Vagy talán kiválasztanak egy kedvencet, és csak azzal az eggyel próbálnak szinkronba kerülni? Milyen annak a hálózatnak a szerkezete, amelyből megtudhatjuk, hogy hogyan befolyásolják egymást a tücskök vagy az emberek? Watts egyre többet gondolkodott a hálózatokon, és egyre kevesebbet a tücskökön, végül doktori témavezetőjéhez, Steven Strogatzhoz fordult tanácsért. Strogatz, a Cornell alkalmazott matematikaprofesszora, a káosz és szinkronizáció kiemelkedő kutatója, nem arról ismert, hogy elvetné a szokatlan ötleteket. Hamarosan már ismeretlen területen jártak, és a hálózatok vizsgálatában túllépték az Erdős és Rényi által kijelölt határokat.



Watts egy egyszerű kérdéssel kezdte utazását a hálózatok világában: Mi annak a valószínűsége, hogy két barátom ismeri egymást? Az imént láttuk, hogy a véletlen hálózatok elméletében erre a kérdésre van egyértelmű válasz. Mivel a pontok véletlenszerűen vannak összekötve, a két legjobb barátomnak ugyanannyi az esélye arra, hogy ismerik egymást, mint egy velencei gondolásnak és egy eszkimó halásznak. Nyilvánvaló - Granovetter huszonöt évvel korábban már megmutatta -, hogy a társadalom nem így működik. Mindannyian csoportoknak vagyunk részei, amelyekben mindenki ismer mindenki mást. Így két legjobb barátom óhatatlanul ismerni fogja egymást. Ahhoz, hogy a társadalom csoportos felépítését egy matematikus vagy egy fizikus számára elfogadható módon bizonyítsuk, tudnunk kell mérni a csoportok jelenlétét. Erre a célra Watts és Strogatz bevezette a csoporterősségi együtthatót. Tegyük fel, hogy az olvasónak négy jó barátja van. Ha ők egymással is mind barátok, akkor összeköthetjük őket egy-egy vonallal, és így összesen hat baráti kapcsolatot kapunk. De könnyen előfordulhat, hogy valamelyik két barátunk egymásnak nem barátja. Ilyenkor a baráti kapcsolatok tényleges száma hatnál kevesebb, mondjuk, négy. Ebben az esetben baráti körünk csoporterősségi együtthatója 0,66. Ezt úgy kapjuk, hogy a barátaink közötti tényleges kapcsolatok számát (négyet) elosztjuk annyival, amennyi akkor lenne, ha mindenki mindenkinek barátja volna (azaz hattal).

A csoporterősségi együttható megmutatja, hogy az olvasó baráti köre milyen szorosan kapcsolódik össze. Az egyhez közeli érték azt jelenti, hogy minden barátja jó barátja a többinek. Másrészt, ha a csoporterősségi együttható nulla, akkor ön az egyetlen személy, aki a baráti körét együtt tartja, hiszen úgy tűnik, hogy ők nem élvezik egymás társaságát. Granovetter forradalmi elképzelése szerint a társadalom sok sűrűn összekapcsolt csoportból áll, amelyeket gyenge kapcsolatok kötnek össze egymással. Egy ilyen sűrűn összekapcsolt hálózat csoporterősségi együtthatója nagy kell legyen. Ha kvantitatív bizonyítékot akarunk kapni arra, hogy a társadalom valóban tele van ilyen csoportokkal, meg kellene mérnünk a Földön az összes ember csoporterősségi együtthatóját. Mivel nincs olyan térképünk, amiről leolvashatnánk, hogy ki kivel van összekapcsolva, és kik barátai egymásnak, ez lehetetlen feladat. Szerencsére azonban az emberek egy különleges csoportja rendszeresen publikálja ismeretségi kapcsolatait. Ezért ebben a szokatlan csoportban megkereshetjük a csoporterősség szintjét.

## 2.

Napjainkban Erdős Pál nem csupán számtalan tétele és bizonyítása miatt híres, de egy általa ihletett fogalom, az Erdős-szám miatt is. Erdős több mint ezerötyszáz cikket publikált ötszázhetven társszerzővel. Páratlan dicsőség a társszerzői közé tartozni. Még az is nagy dolog, ha valaki csak kétkapcsolatnyira van tőle. A matematikusok, hogy követni tudják Erdőstől mért távolságukat, bevezették az Erdős-számot. Erdősnek nulla az Erdős-száma. Azoknak, akik írtak vele cikket, az

Erdős-száma egy. Akik Erdős egyik társszerzőjével írtak cikket, azok Erdős-száma kettő és így tovább. Az alacsony Erdős-szám olyan nagy dicsőség, hogy néhányan azt gyanítják, hogy Erdős 1996-ban bekövetkezett halála után egyesek a társszerzőségi kapcsolatokat hamisítják azért, hogy a saját Erdős-számukat csökkentsék, így aztán nem véletlen, hogy a világ matematikusai a mai napig reszketnek az izgalomtól, hogy a matematikai univerzumnak ettől a különc középpontjától a távolságukat kiderítsék. Keresésük megkönnyítésére Jerry Grossman, az Oakland Egyetem (Rochester, Michigan) matematikaprofesszora részletes weboldalt tart fenn, amelyen összegyűjti a matematikusok ezreinek Erdős-számát, így minden publikációval rendelkező matematikus kiszámíthatja a sajátját.

Úgy tűnik, hogy a legtöbb matematikusnak elég kicsi az Erdős-száma, Erdőstől jellemzően 2-5 lépésnyire vannak. Erdős hatása azonban túlnyúlik közvetlen területén. A közgazdászok, fizikusok és számítástudománnyal foglalkozó kutatók szintén könnyen összekapcsolhatók vele. Einstein Erdős-száma kettő. Paul Samuelsoné, a Nobel-díjas közgazdászé öt. James D. Watsonnak, a kettős spirál társszervezőjének nyolc, Noam Chomskynak, a híres nyelvésznek négy az Erdős-száma. Még William H. (Bill) Gatesnek is, aki a Microsoft alapítója, és akinek a nevéhez kevés tudományos publikáció fűződik, négy az Erdős-száma. Az én Erdős-számom is négy: Erdős írt egy cikket Joseph E. Gillisszel, akinek tizenhét társszerzője között szerepelt az a George H. Weiss, aki dolgozott H. Eugene Stanleyvel, az én doktori témavezetőmmel, akivel társszerzője voltam egy könyvnek és több mint egy tucat tudományos cikknek.

Magának az Erdős-számnak a létezése mutatja, hogy a tudományos közösség sűrűn összekapcsolt hálózatot alkot, amelyben minden kutató össze van kötve a többivel a közösen írt cikkeken keresztül. Az Erdős-szám kicsisége jelzi, hogy a tudománynak ez a hálója valóban kis világ. Mivel ritka, hogy egy publikáció szerzői nem ismerik egymást, ezért a társszerzőség erős ismeretségi kapcsolatot jelez. Következésképpen a tudomány hálója (Web of Science) a világméretű ismeretségi hálózatunk egy kicsinyített mása, azzal a speciális vonással, hogy a benne lévő kapcsolatokat rendszeresen közzéteszik. Sőt, hogy egy adott témára vonatkozó cikket a kutatók megtalálhassanak, minden tudományos publikációt számítógépes adatbázisokban tárolnak. Ez pedig automatikusan létrehozza a kutatók közötti szociális és szakmai kapcsolatok részletes digitális könyvelését, amit felhasználhatunk az együttműködési hálózat szerkezetének tanulmányozására.

Éppen ezt tettük néhányan 2000 tavaszán. Vicsek Tamás, kiváló kutató, aki a budapesti Eötvös Loránd Tudományegyetem biológiai fizika tanszékének vezetője, az 1999/2000-es akadémiai év alatt a biológiai fizikára koncentráló egyéves programot szervezett a budapesti Institute of Advanced Study-ban, amely a Dunára néző, elbűvölő, középkori budai Várban található. Néda Zoltán romániai fizikus is a résztvevők között volt, és magával hozta Ravasz Erzsébetet, aki akkor a diplomamunkása volt. A csapathoz csatlakozott Schubert András, a Magyar Tudományos Akadémián dolgozó szociometriai szakértő, akinek kutatási célokra hozzáférése volt nagy társszerzői adatbázisokhoz.

Vicsek Tamás, Ravasz Erzsébet, Néda Zoltán, Schubert András és Hawoong Jeong együttműködése során összekapcsoltuk a matematikusokat az 1991 és 1998 között publikált cikkeiken keresztül, és új módon rendeztük el a több mint 200 ezer társszerzői kapcsolattal összekötött, 70 975 matematikusból álló, erősen összefüggő hálózatot. Ha a matematikusok véletlenszerűen választottak volna társszerzőt, akkor az Erdős-Rényi-elmélet szerint a létrejövő véletlen hálózat csoportterősségi együtthatója nagyon kicsi, közelítőleg  $10^{-5}$ . Méréseink azonban azt jelezték, hogy a valódi társszerzői hálózat csoportterősségi együtthatója tízezerszer nagyobb ennél, ami azt bizonyítja, hogy a matematikusok nem véletlenszerűen választják meg társszerzőiket. Egy csoportokban gazdag hálózatot alkotnak, ami hasonló a Granovetter által a társadalomra alkalmazott hálózathoz.

Tudtunkon kívül, Mark Newman, a Santa Fe Institute fizikusa, szintén a kutatók együttműködési gráfját vizsgálta - többek között fizikusokét, orvosokét és számítástudománnyal foglalkozókat -, és hasonló kérdéseket vetett fel, mint amik bennünket érdekeltek. Newman, akinek szakmai tapasztalata a véletlen rendszerektől az ökológiai rendszerekben történő fajkihalásokig terjed, felismerte, hogy számítógépesített világunk tálcán kínálja a lehetőséget, hogy végre megértsük a hálózatokat. Mielőtt az együttműködési hálózatokkal foglalkozott, már több cikket írt a kis világokról, amelyek ma már klasszikusok közé tartoznak. Miközben számítógépünk épp az első friss eredményeket dobta ki, ő feltette az együttműködésekéről szóló első cikket az internetre. Newman cikke bebizonyította, hogy a tudomány mindennapjai sűrűn összekapcsolt csoportokban zajlanak, amelyeket véletlen gyenge kapcsolatok kötnek össze. Munkája - a miénkkel összekapcsolva - új kvantitatív bizonyítékul szolgált valamire, amit mindig is éreztünk, de korábban mégis borzalmasan nehéz volt megmérni a számítógépek nélkül: a társadalmi rendszerekben valóban jelen van a csoportképződés.

### 3.

A társadalomban megfigyelhető csoportképződés intuitívan is megérthető. Az emberekkel együtt születik a vágy, hogy bandákat és csoportokat alakítsanak, amelyek családiasságot, biztonságot és meghittséget nyújtanak. De az ismeretségi hálózat valamelyik tulajdonsága csak akkor érdekes a kutatók számára, ha az a természetben található többi hálózatról is valami általánosat fed fel. Watts és Strogatz legfontosabb felfedezése ezért az, hogy a csoportképződés nem tűnik el, ha az ismeretségi hálózatokat elhagyjuk.

Az emberi intelligenciát a központi idegrendszer sejhálózatának méretével és bonyolultságával szokás összekapcsolni, de a kiejthetetlen nevű Caenorhabditis elegans, becenevén C. elegans, élő bizonyíték arra, hogy milyen messze eljuthat valaki akár háromszázkét idegsejttel. Két-három hetes élettartama ellenére ez az egy milliméteres féreg fényes karriert futott be, mióta 1962-ben Sydney Brenner, a kaliforniai Berkeley Molecular Sciences Institute neves molekuláris biológusa

„kísérleti nyúlnak" választotta a molekuláris biológia számára. Azóta cikkek ezreiben szerepelt, világszerte laboratóriumok százaiban tenyésztették, és számos weboldalt szenteltek neki.

Bár genomja<sup>5</sup> kevésbé tér el az emberétől, a *C. elegans* egyike a legegyszerűbb többsejtű szervezeteknek. Ráadásul a kutatóknak sikerült feltérképezni az idegrendszerének pontos huzalozását: a kapott térkép részletesen megmutatja, hogy melyik idegsejt (neuron) melyik másikkal van kapcsolatban. Ezt az ideghálózati ábrát tanulmányozva, Watts és Strogatz arra jött rá, hogy ez a pici háló alig különbözik a teljes társadalomtól: erős csoportképződést mutat; valójában olyan erőset, hogy egy idegsejt szomszédai ötször nagyobb valószínűséggel vannak összekapcsolva, mint a véletlen hálózatok esetén lennének. A kutatók ugyanezt a mintázatot figyelték meg, amikor az Egyesült Államok nyugati részének elektromos hálózatát vizsgálták: itt a pontok generátorok és transzformátorok, amiket a vezetékek kötnek össze. Ez az elektromos hálózat szintén szokatlanul nagyfokú csoportképződést mutat. Akárcsak a hollywoodi színészek együttműködési hálózata. Ezt a hálózatot a következő fejezetben tárgyaljuk részletesen.

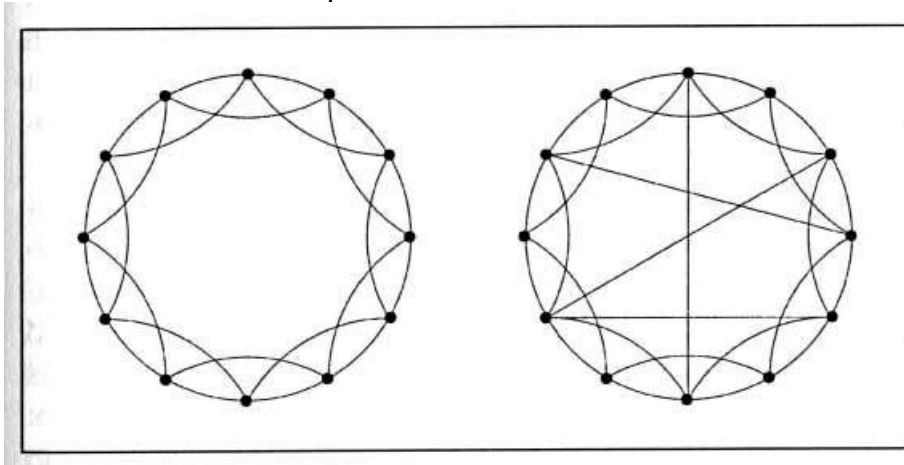
<sup>5</sup> Minden élőlény a benne található genetikai információ - más szóval: genom - felhasználásával építi fel testét (a szaklektor).

Watts és Strogatz váratlan felfedezése nagy érdeklődést ébresztett a csoportképződéssel kapcsolatban. Ennek köszönhetően a tudományos közösség utólag sok hálózatot alaposan megvizsgált. Ma már tudjuk, hogy a csoportképződés jelen van a weben. Észrevettük magukban a vezetékekben is, amelyek a számítógépeket az internethez kötik; a közgazdászok kimutatták abban a hálózatban, amelyik leírja a vállalatok összekapcsolódását a közös tulajdonon keresztül; az ökológusok látják a táplálékláncban, amely mennyiségileg kifejezi, hogy az ökológiai rendszereken belül a fajok egymást hogyan táplálják. A sejtbiológusok pedig rájöttek, hogy ez jellemzi a sejten belül a molekulák törékeny hálózatát. Miután a csoportképződésről kiderült, hogy mindenütt előfordul, rövid időn belül a társadalom speciális jellemzőjéből a komplex hálózatok általános tulajdonságává lépett elő, és az első komoly kihívást jelentette azzal a nézettel szemben, hogy a valódi hálózatok alapvetően véletlenszerűek.

## 4.

A legtöbb valódi hálózatban jelen van a csoportképződés. Watts és Strogatz a *Nature* című folyóiratban 1988-ban megjelent publikációjában a csoportképződés leírására az Erdős-Rényi-féle véletlen hálózattól eltérő modellt javasolt. Az általuk javasolt modell először egyeztetette össze a csoportképződést a véletlen gráfok teljesen vaktában huzalozott szerkezetével. Úgy képzelték, hogy az emberek kör mentén laknak (4.2 ábra), és a körön mindenki ismeri a közvetlen szomszédjait. Ebben az egyszerű modellben minden pontnak pontosan négy szomszédja van, és a négy szomszéd között három él található. Tehát ennek a hálózatnak magas a csoporterősségi együttthatója. Ki is számolhatjuk, hogy ha mind a négy szomszéd össze lenne kapcsolva egymással,

akkor hat él lenne köztük. Mivel csak három van, a csoporterősségi együttható  $3/6$  vagy  $0,5$ , ami közel van a matematikusok kapcsolatai esetében talált  $0,56$ -hoz. Azt, hogy ez valóban jelentős csoportképződést jelent, beláthatjuk, ha veszünk egy olyan véletlen hálózatot, amelyben egy átlagos pontnak még mindig négy szomszédja van, ezt a négy szomszédot az összes többi pont közül véletlenszerűen választjuk ki. A négy szomszédom közötti élek száma most a hálózat méretétől függ. Ha tizenkét pontom van, amennyi az ábrán, akkor a csoporterősségi együttható  $0,33$ . Egymilliárd pont esetén azonban ez már igen kicsi szám: négy osztva egymilliárral! Nyilvánvaló, hogy a  $0,5$ -ös csoporterősségi együttható, amit az új modell megjósol, óriási ezekhez az értékekhez képest.



**4.2 ábra. Egy kicsi és csoportokból álló világ.** *Duncan Watts és Steven Strogatz a nagyfokú csoportképződésre hajlamos hálózatok modellezését egy körön elhelyezett pontokkal kezdte, ahol minden egyes csomópont a közvetlen és a legközelebbi szomszédjával van összekötve (balra). Ahhoz, hogy ebből kis világ legyen, néhány új kapcsolatot adtak hozzá, amelyek véletlenszerűen kiválasztott pontokat kötnek össze (jobbra). Ezek a hosszú távú kapcsolatok lényeges utakat tesznek lehetővé a távoli pontok között, amellyel drasztikusan lerövidítik az összes pont közötti átlagos távolságot.*

Viszont nagy árat kell fizetnünk azért, amit a csoportokban gazdag modell kínál. Kis világunk eltűnt. Az ábrán mutatott modell társadalomban csak a közvetlen és a másodsomszédok lesznek közel hozzám. Ahhoz, hogy elérjek valakit, aki a kör túlsó oldalán van, szó szerint körbe kell mennem, és útközben számtalan kezdet kell megráznom. Könnyű leellenőrizni, hogy a legrövidebb út a fenti és lenti pont között legalább három él hosszúságú. Ez nem hangzik túl soknak, de ha lett volna türelmem (és helyem) hatmilliárd pontot berajzolni ugyanazon gyűrű mentén, és mindegyiket összekötni a szomszédjával és a másodsomszédjával, akkor a legrövidebb útvonal a kör ellentétes oldalára több mint egymilliárd kézfogást igényelne! Így a körön lévő társadalom nem csupán csoportokban gazdag lenne, de egyben egy hatalmas világ is volna.

A valóságban mindannyiunknak vannak kapcsolatai a világ távoli helyein élő emberekkel. Mindannyiunknak van olyan barátja, aki nem a

szomszédban lakik. Ha egy Ausztráliában élő személyhez akarok útvonalat találni, nem fogok házanként lépkedni, mivel előbb-utóbb elérnék a Csendes-óceánig. Ehelyett eszembe jut, hogy a középiskolai legjobb barátom néhány éve Sydneybe költözött, így csupán annyit kell tennem, hogy találok egy kapcsolatot ausztráliai célpontomhoz azon az egyre sűrűbb baráti hálón keresztül, amelyet most hoz létre barátom maga körül. Napjaink társadalmának valóság-hű modelljéből nem hiányozhatnak a távoli kapcsolatok. A fent leírt modellben ezt könnyen elérhetjük, ha néhány élt hozzáadunk a kör véletlenszerűen kiválasztott pontjaihoz. Azaz, kiválasztunk két tetszőleges pontot a kör mentén, és összekapcsoljuk őket egy új éllel. Ez a lépés a kiválasztott pontok közötti távolságot egyre csökkenti, és a közvetlen szomszédok is sokkal közelebb kerülnek egymáshoz. Ha sok ilyen véletlen élt adok hozzá a hálózathoz, akkor az összes pontot nagyon közel vihetem egymáshoz.

Watts és Strogatz meglepő felfedezése az, hogy már néhány élt hozzáadása is elég a pontok közötti átlagos távolság drasztikus csökkentéséhez. Ez a néhány élt nem fogja lényegesen megváltoztatni a csoporterősségi együtthatót. Mégis az általuk kialakított hosszú hidaknak köszönhetően, amelyek gyakran a kör ellenkező oldalán lévő pontokat kötik össze, a távolság az összes pont között látványosan csökken. A modell jelentősen csökkenteni tudja a távolságot, miközben a csoporterősségi együtthatót gyakorlatilag nem változtatja; mindez azt jelzi, hogy megtehetjük, hogy a barátaink kiválasztásakor a faluban maradunk, ha a népesség kis részének van néhány távoli kapcsolata. Ez az egyszerű modell rávilágít arra, hogy a hatlépésnyi távolság abból a tényből ered, hogy néhány embernek vannak olyan barátai és rokonai, akik már nem a szomszédjukban élnek. Ezek a távoli kapcsolatok rövid útvonalakat kínálnak a világ nagyon távoli területein élő emberekhez. Az óriási hálózatoknak nem kell véletlen kapcsolatokkal tele lenniük, hogy a kis világ jellegzetességeit megfigyelhessük rajtuk. Elég néhány ilyen kapcsolat.

## 5.

Watts és Strogatz csoportképződésről szóló publikációja, amely két évvel Erdős halála után jelent meg, hatalmas érdeklődést váltott ki a fizikusok és a matematikusok körében egyaránt. Először is ez öntötte képletbe Granovetter elképzelését, és olyan modellt kínált, amely nem mutat jelentős csoportképződést. Másodszor kivételes szerepet játszott abban, hogy a szociológián belül sokat vizsgált kérdésre, a kis világ problémára, felhívta a fizikus- és matematikusközösség figyelmét. Egy kis ideig úgy tűnt, hogy Watts és Strogatz sokkal általánosabb, a csoportképződést elősegítő modellje helyettesíteni fogja Erdős és Rényi véletlen univerzumát. Könnyen megértettük azt az egyszerű modellt, amelyben a jól ismert rendezett kis csoportok közt elzárva távoli kapcsolatok találhatóak, és mindez ragyogó magyarázatot adott a körülöttünk lévő kis világokra. A modell elegáns kompromisszumot ajánlott Erdős és Rényi teljesen véletlen világa - egy kis világ, amely szétrombolja a baráti köröket - és a szabályos rács között, amelyben erős a csoportképződés, de a pontok távol vannak egymástól.

Ma már értjük, hogy a Watts-Strogatz-modell nem összeegyeztethetetlen az Erdős-Rényi-féle világgéppel. Azért a biztonság kedvéért tartalmaz csoportokat, hiszen egy szabályos rácsból indulunk ki. Ennek alapvető gondolkodásmódja sokban közvetlen folytatása az Erdős-Rényi-féle elképzelésnek. Igazából a kör mentén való kezdeti elhelyezéstől eltekintve a pontokat teljesen véletlen módon kötjük össze egymással. Emiatt mindkét modell egy olyan társadalmat fest le, amelyben mindenki egyenlő, és a kapcsolatokat kockadobások irányítják.

Amikor Watts és Strogatz korszakalkotó cikke 1998-ban megjelent, kutatócsoportom főként a World Wide Webre koncentrált, és a komplex hálózatok szerkezetét próbálta megérteni. Eltartott egy jó ideig, mire teljesen megértettük a cikk fontos üzenetét, és értékeltük az új modellnek azt az erősségét, hogy az Erdős-Rényi-féle világnézetet összekapcsolja Granovetter csoportokból felépülő társadalmával. Mire ezt megemésztettük, rögtön egy nagy problémával találtuk szembe magunkat. Pici robotunk egy olyan hálózattal tért vissza a világhálóról, amely drámaian különbözött mind az Erdős-Rényi-, mind pedig a Watts-Strogatz-modell jóslataitól. Ahogy azt a következő fejezetben majd látni fogjuk, hozott nekünk jó néhány középpontot: kiugróan nagyszámú kapcsolatokkal rendelkező pontokat. Az volt a probléma, hogy Erdős és Rényi egyenlőségre törekvő modelljében az ilyen csomópontok rendkívül ritkák, így nyilvánvaló volt, hogy a modell nem tud magyarázatot adni arra, amit robotunk talált. A Watts-Strogatz-modell sem szerepelt sokkal jobban: ez a modell sem engedi meg, hogy egy pontnak lényegesen több kapcsolata legyen, mint amennyi az átlagos pontnak van. Nyilvánvaló volt, hogy valami fontos hiányzik mindkét modelltől, és ez hátráltat minket abban, hogy a webhez hasonló világunkat megismerjük. Az adatok arra buzdítottak, hogy tovább keressük a valódi hálózatok jobb leírását, és rákényszerültünk, hogy a véletlen világnézetet teljes egészében eldobjuk. Követtük ezt az utat, és az események nagyon váratlan fordulatot vettek. Fel kellett adnunk majdnem mindent, amit a hálózatokról addig tanultunk.

# **AZ ÖTÖDIK LÁNCSZEM**

## ***Középpontok és összekötők***

Malcolm Gladwell, a The New Yorker magazin állandó szerzője, a The Tipping Point című, nemrégiben megjelent könyvében, leír egy egyszerű tesztet, amivel mérhetjük, mennyire vagyunk szociálisak. Egy kétszáznegyvennyolc vezetőknévből álló listát állított össze a manhattani telefonkönyv alapján, és kéri, hogy adjunk magunknak egy pontot, ha bárki olyan nevűt ismerünk, aki a listán szerepel. A többszörös találatok szintén számítanak: ha három Jones nevű embert ismerünk, ami az egyik név a listán, három pontot kapunk. A City College of Manhattan többségében frissen bevándorolt, korai húszas éveiben járó főiskolásai között körbevándorló listán a találatok átlaga huszonegy volt. Más szóval ők jellemzően körülbelül huszonegy olyan embert ismernek, akiknek vezetékneve ugyanaz, mint valakié a listán. A többségében fehér, magasan képzett, tudományos területen dolgozók véletlen módon kiválasztott csoportjában a találatok száma harminckilenc körül volt, majdnem kétszerese a főiskolai diákokénak. Ez nem volt nagyon meglepő. Viszont ami Gladwell figyelmét megragadta, az a kapott eredmények változatossága volt. A főiskolásoknál a találatok száma kettő és kilencvenöt közé esett. A véletlen mintában az alsó küszöb kilenc volt, a felső száztizennyolc. Még a nagyjából homogén, azonos korú, műveltségű és jövedelmű emberek között is óriási különbségek voltak: a legalacsonyabb eredmény tizenhat, a legmagasabb pedig száznyolc volt. Gladwell összesen négyszáz embert vizsgált, és mindegyik társadalmi csoportban talált néhány embert, aki magas eredményt ért el. Következtetése elkerülhetetlen volt: „Az élet minden területén elszórtan van egy maroknyi ember, akiknek igazán különleges adottságaik vannak ahhoz, hogy barátokat és ismerősöket szerezzenek. Ők az összekötők.”

Az összekötők rendkívül fontos összetevői társadalmunk szövetének. Ők a trendek és divatok elindítói, ők hozzák tető alá a fontos üzleteket, és ők terjesztik el a különböző örületeket, vagy segítenek beindítani egy éttermet. Ők a társadalom összetartói, akiknek a segítségével a különböző népcsoportok, az eltérő származású és műveltségű emberek lassan szót értenek egymással. Az összekötőket észrevéve Gladwell azt gondolta, hogy ez valami speciálisan emberekre jellemző dolog. Valójában tudtán kívül valami sokkal fontosabbra bukkant, egy olyan jelenségre, amely már jóval a The Tipping Point megjelenése előtt fejtörést okozott kutatócsoportomnak. Az összekötők - a rendhagyóan sok kapcsolattal rendelkező pontok - jelen vannak a gazdaságtól a sejtig terjedő nagyon különböző komplex rendszerekben. A tény, hogy az összekötők a legtöbb hálózatban meghatározóak, különösen érdekes a kutatók számára olyan, egymástól eltérő távoli tudományágakban is, mint a biológia, a számítástechnika vagy az ökológia. Felfedezésük a feje tetejére állított mindent, amiről úgy gondoltuk, hogy a hálózatokról tudunk.

A csoportképződés mutatott rá az Erdős-Rényi-féle véletlen világszemlélet első hibájára. Wattsnak és Strogatznak az előző



fejezetben tárgyalt egyszerű modellje egy időre megmentette a véletlen világot, összebékítette a baráti kört a hatlépésnyi távolsággal. Az összekötők a végső csapást jelentik mindkét modellre. Ha ezeknek a pontoknak a magas fokú összekapcsoltságát indokolni akarjuk, egyszer és mindenkorra sutba kell dobunk a véletlen világszemléletet.

## 1.

A világháló a teljes szólásszabadságot testesíti meg. Egyesek megsértődhetnek tőle, mások szerethetik, de egy weboldal tartalmát nehéz cenzúrázni. Ha egyszer feltesznek valamit a hálóra, akkor az emberek százmilliói számára elérhető. A vélemény kinyilvánításának ez a kivételes szabadsága és a megjelenési költségek zuhanásszerű csökkenése együtt a webet a demokrácia tökéletes fórumává teszi, ahol bárkinek a hangja azonos eséllyel jut el hozzánk. Legalábbis ezt állítják az alkotmányjogászok és a csillogó üzleti magazinok. Ha a web véletlen hálózat lenne, igazuk is volna. De nem az. A webet feltérképező munkánk legérdekesebb eredménye az, hogy a demokrácia, a tisztességesség és az egyenlődségi teljesen hiányoznak a hálón. Megtudtuk, hogy a web topológiája olyan, hogy a milliárdnyi meglévő dokumentum közül csupán egy maroknyit vehetünk észre.

Ha a webről van szó, akkor többé nem az a kulcskérdés, hogy az olvasó nézetei megjelenhetnek-e. Megjelenhetnek. Amint megjelentek, azonnal elérhetőek lesznek a világon bárki számára, akinek internetkapcsolata van. Az egymilliárd oldal dzsungelével szembeállítva a kérdés inkább az, hogyha ha ön kitesz a webre valamilyen információt, észreveszi-e azt bárki?

Ahhoz, hogy az ön oldalát elolvassák, az oldalnak láthatónak kell lennie. Ez az igazság regényírókra és kutatókra egyaránt érvényes. A weben való láthatóság mértéke a linkek száma. Minél több bejövő link mutat az ön oldalára, annál jobban látható. Ha a weben lévő összes dokumentumról lenne mutató az ön oldalához, akkor nagyon rövid idő alatt mindenki megismerné az ön mondanivalóját. Az átlagos weboldaltól azonban csak öt és hét közötti mutató indul, amelyek mindegyike az egymilliárd meglévő weboldal egyikére mutat. Ezért annak az esélye, hogy egy átlagos dokumentum tartalmaz mutatót az ön weboldalára, közel nulla.

Ez a következtetés tökéletesen alkalmazható az én honlapomra, a [www.nd.edu/~alb](http://www.nd.edu/~alb) oldalra. Az AltaVista szerint körülbelül negyven más oldalról vezet mutató az oldalamra. Ez igazán sok, ha figyelembe vesszük, milyen speciális a tartalma. Ha azonban arra gondolunk, hogy közel egymilliárd oldalból választhatunk, akkor annak a valószínűsége, hogy ön felfedezi az én honlapomat, nagyjából negyven az egymilliárdhoz. Azaz, ha ön véletlenszerűen barangol a weben, és látogatása minden egyes honlapon csak tíz másodpercig tart, akkor tíz évig barangolhat éjjel-nappal, mire rábukkan egy, az én honlapomra mutató linkre.

Az emberek érdeklődése, értékrendszere, hite és ízlése nagyon eltérő. A honlapunkon lévő linkek ezt a sokféleséget tükrözik. A térképen keresztül-kasul helyezük el linkjeinket az afrikai törzsi művészet

oldalaitól az elektronikus kereskedelmi portálokig. Tekintve, hogy egymilliárdnál is több pontból választhatunk, a kialakuló kapcsolódási mintázat várhatóan eléggé véletlenszerű lesz majd. Az ilyen véletlen linkelés azt feltételezné, hogy az Erdős-Rényi-modell a meghatározó. Egy véletlen világháló az egyenlősdi tökéletes megtestesítője lenne, mivel az Erdős-Rényi-elmélet garantálja, hogy ebben a hálózatban minden pont nagyon hasonlít a másakra, s így mindegyikük nagyjából azonos számú kapcsolattal rendelkezik.

Méréseink azonban ellentmondtak ezeknek a várakozásoknak. A robotunk által összeállított térkép alapján állíthatjuk, hogy a web szerkezete közel sem egyenletes. A Notre Dame Egyetem tartományának 325 ezer oldalából megvizsgált 270 ezer, vagyis az összes oldal 82 százaléka három vagy kevesebb bejövő linkkel rendelkezett. Egy egész kis részükre, körülbelül negyvenkét oldalra azonban több ezer más oldalról hivatkoznak, és mindegyiknek több ezer bejövő linkje volt. Egy 203 millió oldalnyi mintán végzett későbbi mérésorozat még szélesebb spektrumot tárt fel: az oldalak döntő többsége (90 százaléka) tíz vagy kevesebb beérkező mutatóval rendelkezik, miközben néhányra, körülbelül háromra, közel egymillió másik oldalon hivatkoznak.

Ahogy a társadalomban a néhány összekötő szokatlanul nagyszámú embert ismer, úgy itt is azt találtuk, hogy a világháló felépítését néhány sok kapcsolattal rendelkező pont, a középpontok uralják. Ezek a középpontok, mint a Yahoo! vagy az Amazon.com különösen jól láthatók - akárhol is járunk, mindenhol feltűnik egy link, ami rájuk mutat. A web mögötti hálózatban ez a néhány, magas összekapcsoltságú pont tartja össze a sok népszerűtlen vagy ritkán észrevett, kevés linkkel rendelkező pontot.

A középpontok a legerősebb érvek az egyenlősdi-re épülő világháló utópisztikus látomásával szemben. Igen, mindnyájunknak joga van feltenni a webre bármit, amit akarunk. De ki fogja észrevenni? Ha a világháló véletlen hálózat volna, akkor mindegyikünknek ugyanakkora esélye lenne, hogy lássák és hallják. Valamilyen kollektív módon létrehozzuk a középpontokat, azokat az oldalakat, amelyekre mindenki hivatkozik. Ezeket nagyon könnyű megtalálni, bárhol is vagyunk a weben. Ezekkel a középpontokkal összehasonlítva a web maradék része láthatatlan. Azok az oldalak, amelyekre csak egy vagy két másik oldal hivatkozik, gyakorlatilag nem léteznek. Majdnem lehetetlen megtalálni őket. Még a keresők is hátrányosan megkülönböztetik és kihagyják őket, miközben a háló legizgalmasabb új oldalain végigmennek.

## 2.

Azon az éjjelen éppen Kevin Bacon *The Air Up There* (Afrika csúcsai) című filmjét sugározta a televízió, amikor Craig Fass, Brian Turtle és Mike Ginelly, a pennsylvániai Readingben lévő Albright College diákjai felfedeztek valamit. Hirtelen az jutott az eszükbe, hogy Bacon

olyan sok filmben játszott, hogy Hollywood tetszőleges színészeivel összekapcsolható. 1994 januárjában izgatott levelet küldtek a Jon Stewart Show-nak, amely az egyetemi hallgatóság körében népszerű, hírességeket bemutató, beszélgetős műsor. „Háromunkat egy cél vezérel, A Jon Stewart Show hallgatóságának, mi több, az egész világnak be akarjuk bizonyítani, hogy Bacon az Isten.” Nagy meglepetésükre tizenöt percnyi hírnév megadatott számukra. Meghívták őket a Jon Stewart Show-ba Kevin Baconnal együtt, és a hallgatóságot azzal bűvölték el, hogy képesek voltak Bacont összekapcsolni bármelyik színésszel, akinek a nevét hozzájuk vágták. De azért valahol mégis reménytelenül nagyot tévedtek. Bacon semmivel nincs közelebb Hollywood középpontjához, mint az univerzuméhoz.

A három diák zsenialitása, ha nevezhetjük annak, abban a megfigyelésükben rejlett, hogy mindegyik hollywoodi színész átlagosan két-három linken keresztül összekapcsolható Kevin Baconnal. Például Tom Cruise csak egy lépésre van Bacontól, mert együtt játszottak az A Few Good Men (Egy becsületbeli ügy) című filmben. Az Erdős-szám analógiát felhasználva Tom Cruise Bacon-száma egy. Mike Myersé kettő, mert össze van kapcsolva Robert Wagnerrel a The Spy Who Shagged Me (Kicsikém) című filmen keresztül. Wagner Bacon-száma egy, hála a Wild Thingsnek (Vad vágyak). De még olyan történelmi alakok is, mint Charlie Chaplin, összekapcsolhatók Baconnal: Chaplin Barry Nortonnal játszott együtt a Monsieur Verdoux-ban, aki Robert Wagnerrel játszott a What Price Glory-ban, aki, mint azt már tudjuk, egy linkre van Bacontól, így Charlie Chaplinnek három a Bacon-száma. S hogy tovább bonyolítsuk a történetet, Erdős Pál Bacon-száma négy, az N Is a Number (Az N egy szám) című, róla készült dokumentumfilmnek köszönhetően, amelyben saját magát játssza. A szereposztásban benne volt Gene Patterson, aki önmagát játszotta, és aki később kapott egy kisebb szerepet a Box of Moonlight (Holdfény szelence) című filmben; ezen keresztül szerezte meg harmas Bacon-számát. És mivel az N Is a Number-ben szerepelt a gráfelmélet művelőinek krémje, sok matematikusnak nemcsak az Erdős-, de a Bacon-száma is kicsi.

A Kevin Bacon-játék megmaradt volna egy közönséges filmes kérdezz-feleleknek, ha két számítástudománnyal foglalkozó diák nem nézte volna a Stewart Show-t. Glen Wasson és Brett Tjaden, a virginiai egyetem diákjai azonnal felismerték, hogy a tetszőleges két színész közötti távolság meghatározása számítástudományi feladat, ha valaki hozzáférhet az összes színész és a valaha leforgatott összes film adatbázisához. Ekkoriban már működött az Internet Movie Database vagy IMDb.com, a mániákus filmrajongók kincsestára, amely több információt kínál a színészekről és filmekről, mint amennyire bárkinek valaha is szüksége lehet. Wasson és Tjaden néhány heti programozással összerakta a The Oracle of Bacon weboldalt, amely a játék verhetetlen mestere lett. Ha tetszőleges két színész nevét begépeljük, akkor ezredmásodpercek alatt megadja a kettőjük közötti legrövidebb útvonalat, és kilistázza a színészek és filmek láncolatát, amelyeken keresztül kapcsolódnak. Nagyon rövid időn belül a weboldal napi húszezer látogatót számlált, és ezzel 1997-ben bekerült a Time által kiválasztott tíz legnépszerűbb oldal közé. Amikor 2001. augusztus

26-án utoljára arra jártam, egyedül aznap már tizenháromezer látogatója volt az oldalnak.

### 3.

A Kevin Bacon-játékot azért játszhatjuk, mert Hollywood egy sűrűn összekapcsolt hálózatot alkot, amelyben a pontok a színészek, és őket azok a filmek kötik össze, amelyekben szerepeltek, így azok, akik több filmben játszottak, gyorsabban szereznek kapcsolatokat. Mivel mindegyik színész átlagosan huszonhét kapcsolattal rendelkezik, sokkal többel, mint egy kapcsolat, ami ahhoz szükséges, hogy teljesen összefüggő legyen a hálózat, a hatlépésnyi távolság elkerülhetetlen. Minden színész átlagosan három lépésben összekapcsolható egy tetszőleges másik színésszel. Ennek ellenére, ahogy azt kutatócsoportunk a színészhálózat elemzésekor észrevette, az átlagok itt nem alkalmazhatók. A színészek 41 százalékának tíznél kevesebb linkje van. Ezek azok a kevésbé ismert színészek, akiknek a neve akkor tűnik fel a mozivászonon, mikor már kijöttünk a moziból. A színészek egy egészen kis részének azonban jóval több kapcsolata van tíznél. John Carradine termékeny karrierje alatt négyezer linket gyűjtött be más színészekhez, Robert Mitchum pedig 2905 kollégával szerepelt együtt filmes évtizedei alatt. Ezek a kivételesen sok kapcsolattal rendelkező színészek Hollywood középpontjai. Távolítsuk el néhányukat, és hirtelen drasztikusan meghosszabbodik az út Bacon és majdnem bármelyik színész között.

Először is, ha egy kicsit átgondoljuk a kérdést, azt mondhatnánk, hogy azok a színészek, akik a legtöbb filmben játszottak, egyúttal legyenek a legtöbb kapcsolattal rendelkezők is, és Hollywoodban bárki máshoz ők kapcsolódnak a legkevesebb kapcsolaton keresztül. Ez átlagosan igaz: minél több filmben játszik egy színész, annál rövidebb lesz a távolsága társaitól. Másrészt, a legtöbb filmben szereplő színészek listája nem adja meg a legtöbb kapcsolattal rendelkező színészeket, és a lista más meglepetésekkel is szolgál. A Hawoong Jeong által összegyűjtött első tíz listája a következő (zárójelben a filmek száma, amelyekben a színész játszott): Mel Blanc (759), Tom Byron (679), Marc Wallace (535), Ron Jeremy (500), Peter North (491), T. T. Boy (449), Tom London (436), Randy West (425), Mike Horner (418), és Joey Silvera (410). Fogadni mernék, hogy a legtöbb olvasó számára ezek a nevek éppen olyan ismeretlenek, mint nekünk voltak, amikor először a listára néztünk. Lehet, hogy ismerik Mel Blancet, sok népszerű rajzfilmfigura híres hangját, olyanokét, mint Bugs Bunny, Woody Woodpecker, Daffy Duck, Porky Pig, Tweety Pie és Sylvester. Az ötven felettiek pedig esetleg látták Tom Londont - talán a legtermékenyebb western-filmszínészt -, amint a számtalan sheriff, farmer vagy szolgáló valamelyikét alakította. A listán szereplő többi színész azonban kifogott rajtunk. Végül, némi kutatás után, rájuk lertünk. Mindegyikük pornófilmsztár.

Ez a lista mutatja talán a legélesebben, hogy amikor hálózatokról van szó, akkor nem mindig a méret számít. Annak ellenére, hogy a pornósztárok a filmek számában csúcstartók, még csak a közelében

sincsenek Hollywood középpontjának. Mivel a hálózatok csoportokból épülnek fel, ezért azok a pontok is játszhatnak központi szerepet egy adott szubkultúrában vagy szűk műfajban, amelyek csak a csoportjukon belüli kapcsolatokkal rendelkeznek. Ám a külső világgal való kapcsolatok nélkül elég távol lehetnek a más csoportban található pontoktól. Ezért nagyon nehéz egy csak pornófilmekben szereplő színészt - aki csak pornósztárokkal van összekapcsolva - összekötni egy Martin Scorsese- vagy Andrej Tarkovszkij-film szereplőivel. Ők egyszerűen két teljesen különböző világban mozognak. A hálózatokban az igazán központi szerep azoknak a pontoknak jut, amelyek egyidejűleg sok nagy csoportban benne vannak. Ők azok a színészek, akik nagyon különböző műfajokban jelentőset alkottak pályafutásuk alatt. Ezek azok a honlapok, amelyek nemcsak a modern művészetre hivatkoznak, hanem bármi másra is, ami az embereket érdekli. Ezek azok az emberek, akik rendszeresen kapcsolatba kerülnek a különböző területeken aktív és eltérő társadalmi helyzetű emberekkel. Ők a matematika Erdősei, akiket nem lehet beskatulyázni, akik a tudomány sok részterületén egyforma könnyedséggel vizsgálódnak. Ők a hálózatok Leonardo da Vincije, akik egyaránt otthon vannak a művészetekben és a tudományban.

Természetesen Bacon egy vezető hollywoodi színész. Több mint negyvenhat filmben játszott, és ezernyolcszáznál is több kapcsolatot gyűjtött össze. Az ő átlagos távolsága bárki mástól Hollywoodban 2,79 - azaz a legtöbb színész legfeljebb háromlépésnyire van tőle. Ez az oka annak, hogy néhányan olyan jók a Kevin Bacon-játékban, és könnyen összekötik őt tetszőleges más színésszel. Valóban Bacon a legjobb kapcsolatokkal rendelkező színész? Mikor Hawoong Jeong elkészítette a legjobb kapcsolatokkal rendelkezők ezres listáját, Hollywood valódi középpontjaiét, eltartott egy ideig, míg Bacon megtaláltuk rajta. Az első helyen Rod Steiger állt 2,53-as átlagos távolsággal bárki mástól. Donald Pleasence követte 2,54-gyel. Martin Sheen, Christopher Lee, Robert Mitchum és Charlton Heston volt a következő négy helyezett, mindegyikük 2,57-nél kisebb távolsággal. Nevek százait olvastuk el, és oldalak tucatjait néztük át anélkül, hogy Baconnak nyomát láttuk volna. Végül a lista vége felé fedeztük fel, a nyolcszázhetvenhatodik helyen.

Miért játszuk akkor a Kevin Bacon-játékot? Bacon ismertsége egy korábbi véletlenül alapszik, és a Stewart Show által biztosított nyilvánosságnak köszönhető. Minden színész háromlépésnyire van a színészek többségétől. Bacon semmiképpen nem különleges. Nemcsak messze van attól, hogy az univerzum középpontja legyen, de valójában távol van Hollywood középpontjától is.

#### 4.

Egy véletlenszerű univerzum nem támogatja az összekötőket. Ha a társadalom véletlen volna, akkor a Gladwell által felmért szerény, négyszáz emberből álló mintában - amelyben egy embernek átlagosan harminckilenc szociális kapcsolata volt -, a legszociálisabb embernek is sokkal kevesebb ismerőse lenne, mint a csúcstartó száztizennyolcas szám. Ha a web véletlen hálózat lenne, akkor annak a valószínűsége,

hogy egy oldal ötszáz bejövő linkkel rendelkezik,  $10^{-99}$  volna, azaz gyakorlatilag nulla, ami azt jelenti, hogy egy véletlen módon összekötött világhálón nem lehetnek középpontok. Azonban a legfrissebb webfelmérés, amely a teljes hálónak kevesebb mint egyötödét fedte le, négyszáz ilyen oldal talált, és egyet kétmilliónál is több bejövő linkkel. Arra, hogy egy véletlen hálózatban egy ilyen pontot találjunk, kisebb az esélyünk, mint az, hogy az univerzumban megeljük egy adott atomot. Ha Hollywood véletlen hálózatot alkot, akkor Rod Steiger nem létezik, mivel annak a valószínűsége, hogy egy ilyen sok kapcsolattal rendelkező színész létezzon,  $10^{-120}$  körüli. Ez annyira kicsi szám, hogy még hasonlatot is nehéz rá találnunk. Ezek a hihetetlenül kis számok magyarázzák igazán azt a meglepetést, ami akkor ért minket, mikor először bukkantunk rá a középpontokra a hálón és Hollywoodban. E korai próbálkozásaink során a valódi hálózatok szerkezetét akartuk megérteni, de semmi nem készített fel minket az összekötőkkel való találkozásra, hiszen az Erdős-Rényi- és a Watts-Strogatz-modell is tagadja az ilyen pontokat. Egyszerűen nem lett volna szabad létezniük.

Az a felfedezés, hogy a weben néhány középpont ragadja magához a linkek többségét, sok területen őrlött hajszát indított el a középpontok után. Az eredmények meglepőek: rájöttünk, hogy Hollywood, a web és a társadalom egyáltalán nem különlegesek. Például a sejtben is felbukkannak középpontok, ami a molekulák kémiai reakciók által összekötött hálózata. Néhány molekula, mint a víz vagy az adenzin-trifoszfát (ATP), a sejt Rod Steigersei, amelyek nagyszámú reakcióban vesznek részt. Az interneten - a számítógépeket világszerte összekötő fizikai vonalak hálózatában - néhány középponté a főszerep, és ezek a pontok garantálják, hogy a meghibásodások az internéiben kevés kárt tehetnek. Erdős a matematika világának egyik fontos középpontja, hiszen ötszázhet olyan matematikus van, akinek az Erdős-száma egy. Egy, az AT&T által végzett felmérés szerint a kezdeményezett és fogadott hívásoknak egy kiemelkedően magas hányada csupán néhány telefonszámhoz köthető. Bár azoknak, akik egy tizenévesssel élnek egy fedél alatt, néha kétségeik lehetnek e telefonközpontok hollétéről, az igazság az, hogy a valódi bűnösök valószínűleg a telefonos értékesítők és a vevőszolgálatok számai. A középpontok a kutatók által eddig vizsgált szinte összes nagy hálózatban megjelennek. Mindenütt jelen vannak: univerzális építőkövei komplex, összekapcsolt világunknak.

## 5.

A középpontokra mostanában kivételes figyelem irányul. Az összekötők hatalmát ünnepelte Emanuel Rosen a *The Anatomy of Buzz* (A lelkesedés anatómiája) című könyvében, amelyben több fejezet szentel a társadalmi középpontok kategorizálásának, valamint a hírek és agresszív reklámok terjesztésében játszott szerepüknek. Az Egyesült Államok négyévente új szociális középpontot iktat hivatalba: az elnököt. Valóban, Franklin Delano Roosevelttől előjegyzési füzetében 22 ezer név volt, ami korának egyik legnagyobb társadalmi középpontjává tette.

Három neves biológus mostanában azt állította a *Nature* című, nagy presztízzsel bíró tudományos hetilapban, hogy egy bizonyos molekula, a

p53 fehérje egy középponthez hasonló, és ez a rák számos formája mögötti molekuláris folyamatok megértésének a kulcsa. Az ökológusok úgy gondolják, hogy a tápláléklánc középpontjaiban lévő fajok az ökológiai rendszerek alappillérei, és kiemelt szerepűek az ökológiai rendszerek stabilitásának fenntartásában.

A középpontok rászolgáltak a figyelemre. A középpontok különlegesek. Ők uralják az összes hálózat szerkezetét, amelyben jelen vannak, ők érik el, hogy azok kis világnak látsszanak. Gondoljunk csak bele, a szokatlanul nagyszámú linkkel rendelkező csomópontok - a középpontok - a rendszer bármely két pontja között rövid utakat létesítenek. Tehát igaz, hogy két, a Földön véletlenszerűen kiválasztott ember között a távolság hat, de a távolság egy tetszőleges ember és egy összekötő között gyakran csak egy vagy kettő. Hasonlóan, miközben két oldal a világhálón tizenkilenc kattintásra van egymástól, a yahoo.com óriási középpont, ami a legtöbb weboldaltól két vagy három kattintással elérhető. A középpontok szempontjából a web valójában pici.

Az a nézet, hogy a hálózatok véletlen jellegűek, Erdős és Rényi hatása miatt évtizedekig tartotta magát, ám mostanában mind több területen kérdőjelezzik meg. A Witts-Strogatz-modell a csoportképződésre egyszerű magyarázatot kínált, és összeházasította a véletlen hálózatokat a csoportképződéssel. A középpontok egy újabb kihívást jelentenek. A korábban látott modellek egyikével sem tudjuk megmagyarázni őket. Ezért a középpontok rákényszerítettek bennünket a hálózatokkal kapcsolatos tudásunk átértékelésére, és három alapvető kérdést vetnek fel. Hogyan keletkeznek a középpontok? Várhatóan mennyi lesz belőlük egy adott hálózatban? Miért nem képesek az eddigi modellek megmagyarázni őket?

Az utóbbi két évben e kérdések többségét megválaszoltuk. Valóban azt találtuk, hogy összekapcsolt univerzumunkban a középpontok nem véletlenül bukkannak föl, hanem szigorú matematikai törvények szerint, amelyek mindenütt jelen vannak és érvényesek. Mindez arra készítet bennünket, hogy a hálózatokról az eddigiektől nagyon eltérő módon gondolkodjunk. Ezeknek a törvényeknek a felfedezése és megmagyarázása kalandos utazás volt, amelynek során többet tudtunk meg komplex, összefüggő világunkról, mint amennyi az azt megelőző száz évben ismert volt.

# **A HATODIK LÁNCSEM**

## ***A 80/20-as szabály***

Az 1900-as évek elején Vilfredo Pareto, a tekintélyes olasz közgazdász Genfben tartott előadást egy közgazdaságtani konferencián, s eközben ismételten és hangosan félbeszakította befolyásos kollégája, Gustav von Schmoller. Von Schmoller, aki a berlini egyetemen lévő trónusáról irányította a német tudományos világot, leereszkedő stílusban folyton ezt kiabálta be: „De léteznek-e törvények a közgazdaságtanban?”

Pareto főúri neveltetése ellenére nem sokat adott a külső megjelenésre, állítólag a Trattato di Sociologia Generale című monumentális munkájának megírásakor egy pár cipője és egy öltönye volt. Így könnyű volt számára a következő napon koldussá változni, és von Schmollert az utcán megszólítani.

- Elnézést, uram, meg tudná nekem mondani, hogy hol találok egy olyan éttermet, ahol ingyen lehet enni? – fordult hozzá Pareto.

- De kedves uram, ilyen éttermek nincsenek. Viszont itt a sarkon van egy hely, ahol jó ételt kaphat olcsón – válaszolta von Schmoller.

- Na ugye, hogy vannak a közgazdaságtanban törvények! - mondta erre Pareto, és diadalittasan felnevetett.

Pareto két évtizeden át vasúti mérnökként dolgozott, ám érdeklődése később a közgazdaságtan felé fordult. Nagy hatással volt rá a newtoni fizika matematikai szépsége, ezért életének hátralévő részét annak az álmának szentelte, hogy a közgazdaságtanból egzakt tudományt faragjon, amelyet olyan általános és átfogó törvények kormányoznak, mint Isaac Newton Principiájának fizikai törvényei. Fáradhatatlan keresésének gyümölcse, a háromkötetes Trattato mindmáig ihlet és értelmezés forrása a közgazdászok és szociológusok számára egyaránt.

Pareto tudományos munkáin kívül leginkább egy megfigyelése kapcsán ismert. Lelkes kertészként észrevette, hogy a borsó betakarításakor a szemek 80 százalékát a borsóhüvelyek 20 százalékában találta. A gazdasági egyenlőtlenségek gondos megfigyelőjeként az sem kerülte el a figyelmét, hogy az olasz termőföld 80 százalékát a lakosság 20 százaléka birtokolta. Újabban a 80/20-as szabályként is ismert Pareto-törvény vagy Pareto-szabály a vállalatvezetés Murphy-törvényévé vált: a profit 80 százalékát az alkalmazottak 20 százaléka termeli meg, a döntések 80 százaléka a megbeszélések idejének 20 százaléka alatt születik meg és így tovább. Kiderült, hogy ez a szabály az élet sok területén érvényes. Például a bűnözők 20 százaléka követi el a bűncselekmények 80 százalékát.

A 80/20-as szabály sok különböző formában, de mindig ugyanazt a jelenséget írja le: a legtöbb esetben erőfeszítéseinknek nagyjából négyötöde kárba vész. Hadd tegyek hozzá én is a fentiekhez néhány példát, amelyek a 80/20-as szabályhoz igen közeliek. A hálón a hiperhivatkozások (linkek) 80 százaléka a weblapoknak csupán 15 százalékára mutat, a tudományos közleményekben megjelenő hivatkozások 80 százaléka a kutatóknak csak 38 százalékára



vonatkozik, a hollywoodi kapcsolatok 80 százaléka a színészek 30 százalékához tartozik. Bár nagyon csábító lenne elfogadnunk, hogy a 80/20-as szabály majd mindenre alkalmazható, de ez túlzás volna. A valóságban az összes olyan rendszer, amely Pareto törvényének megfelelően viselkedik, egy kicsit speciális: ezeket a rendszereket ugyanaz a tulajdonság különbözteti meg az összes többi rendszertől, amely a komplex hálózatok megértésében is kulcsszerepet játszik.

## 1.

Amikor Hawoong Jeong elkezdte a webet feltérképező kis robotunk építését, naiv elképzeléseink voltak arról, hogy hogyan néz majd ki a webet létrehozó hálózat. Erdős és Rényi felismerései alapján azt vártuk, hogy a weblapok véletlenszerűen kapcsolódnak egymáshoz. Ahogy azt a 2. fejezetben tárgyaltuk, az Erdős-Rényi-modell szerint egy weblap kapcsolatainak száma csúcsos eloszlást kell hogy kövessen, azaz a legtöbb dokumentum egyformán népszerű. Viszont a robotunk által feltérképezett hálózatnak volt sok, kevés linkkel rendelkező pontja is, és néhány középpontja, amelyekhez rendkívül nagyszámú link tartozott. A legnagyobb meglepetés akkor ért bennünket, mikor megpróbáltuk a pontok kapcsolatainak számát elemző hisztogramot az úgynevezett „log-log ábrán”<sup>6</sup> értelmezni. Az elemzésből megtudtuk, hogy a csúcsok (weblapok) kapcsolatainak számára kapott egyes értékek - egy kapcsolat, két kapcsolat, három kapcsolat stb. - pontosan olyan gyakorisággal fordulnak elő, mint amit a hatványfüggvény nevű matematikai kifejezés ír le.

<sup>6</sup> Ez azt jelenti, hogy a grafikon vízszintes és függőleges tengelyén egyaránt nem az 1, 2, 3... számok vannak egymástól egyenlő távolságra felmérve, hanem az 1, 10, 100, 1000... számok (a szaklektor).

Ha ön nem fizikus vagy matematikus, akkor valószínűleg még soha nem hallott a hatványfüggvényekről. Ez azért is előfordulhat, mert a természetben a legtöbb mennyiség a haranggörbe segítségével jellemezhető; a haranggörbe egy olyan eloszlás, amely nagyon hasonló a véletlen hálózatoknál talált csúcsos eloszláshoz. Például ha összes férfi ismerősünk magasságát megmérjük, és hisztogramot készítünk belőle úgy, hogy megszámloljuk, hányan vannak közöttük százhusz, százötven vagy százkilencven centiméter magasak, azt fogjuk látni, hogy a mintánkban szereplő emberek többségének magassága százötven és száznyolcvan centiméter közötti. Ezen értékek körül hisztogramunknak egy csúcsa lenne. Ha szabadidőnkben nem kosárlabda-játékosokkal mászkálunk, akkor mintánkban tényleg nagyon kevés két méternél magasabb ember lesz. Ugyanez igaz a másik irányba is: egy méternél alacsonyabb egyének elég ritkán fordulnak elő. Mivel a természetben a legtöbb mennyiség - az intelligenciahányadosunktól a gázban lévő molekulák sebességéig - ilyen csúcsos eloszlást követ, sok ember számára ismerősek ezek a mindenütt előforduló haranggörbék.

Az utóbbi néhány évtizedben a kutatók felismerték, hogy a természet néha olyan mennyiségeket hoz létre, amelyek a haranggörbe helyett hatványfüggvény alapján rendeződnek. A hatványfüggvények

nagyon különböznek a haranggörbétől. Először is a hatványfüggvény szerinti eloszlásoknak nincsen csúcsa. A hatványfüggvényt követő hisztogram inkább egy folytonosan csökkenő görbe. Arra utal, hogy sok kis esemény és kevés nagy esemény egyidejűleg létezik. Ha egy képzeletbeli bolygó lakóinak magassága hatványfüggvény szerinti lenne, akkor az ottani teremtmények többsége egész alacsony volna. De senkit nem lepne meg, ha néha az utcán egy háromezer méter magas óriást látna sétálgatni. Azaz hatmilliárd lakosból legalább egy 2,4 kilométernél is magasabb volna. Tehát a hatványfüggvénynek nem csupán a sok kis esemény sajátossága, hanem az is, hogy a számos apró esemény mellett van néhány nagyon nagy. Ezek a különösen nagy események a haranggörbe esetén nem létezhetnek.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Megjegyezzük, hogy a hatványfüggvény és haranggörbe között fontos kvalitatív eltérés van az eloszlás „farok” részén. A haranggörbék farka exponenciálisan csökkenő, ami sokkal gyorsabb csökkenés, mint a hatványfüggvény esetén. Az exponenciális viselkedésű farkok felelős azért, hogy nem alakulnak ki középpontok. Ezzel szemben a hatványfüggvények sokkal lassabban csökkennek, így lehetővé teszik olyan „ritka események” létezését, mint a középpontok.

Minden hatványfüggvényt egyetlen kitevő jellemez, amelyből megtudhatjuk például azt, hogy hány nagyon népszerű weblap van a kevésbé népszerűekhez viszonyítva. A hálózatok esetén a hatványfüggvény a csúcsok kapcsolatainak számát (más szóval: a csúcsok fokszámát) leíró eloszlásra érvényes, ezért a kitevőt gyakran fokszámkitevőnek nevezik. Méréseink szerint a weblapokra beérkező linkek eloszlása hatványfüggvényt követ, aminek a kitevője egyedi és jól meghatározható: kettőhöz közeli érték. Hasonló hatványfüggvény - kettőnél valamivel nagyobb fokszámkitevővel<sup>8</sup> - jellemezte a weboldalokról kimenő linkek számát is.

<sup>8</sup> Ebből következik, hogy a pontosan  $k$  darab bejövő linkkel rendelkező weboldalak száma  $N(k) \sim k^{-\gamma}$  alakú, ahol a  $\gamma$  paraméter a fokszámkitevő.

A log-log ábrán az egyenes vonal meredeksége azt mutatja, hogy a fokszám kitevő 2,1 körüli érték. Amikor megszámloltuk, hány kimenő link volt a világháló adott oldalán, azonos mintázatot figyeltünk meg. A log-log ábra megmutatta, hogy a pontosan  $k$  darab kimenő linkkel rendelkező oldalak száma  $N(k) \sim k^{-\gamma}$  szerint változik, ahol  $\gamma = 2,5$ .

Kis robotunk meggyőző bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy a weblapok létrehozói valami mágikus úton együttműködnek a véletlen univerzumot meghiúsító komplex világháló kialakulásában. Együttműködésük nyomán a fokszámeloszlás a véletlenszerű univerzumot szimbolizáló haranggörbe helyett elkerülhetetlenül egy nagyon speciális eloszlást vesz föl, és a web egy hatványfüggvénnyel leírható hálózattá alakul. Viszont a robotnak sem sikerült megválaszolni a legégetőbb kérdésünket. Mi a világhálónak az a speciális tulajdonsága, amittől a korábbi precíz jóslatok ellenére sem alkot véletlenszerű hálózatot?

Ekkor ismertük fel azt, hogy a problémát másképpen is megközelíthetjük. Elképzelhető, hogy ugyanolyan egyszerű törvények jellemzik a többi komplex hálózatot is, és azokra csak azért nem találtunk rá, mert korábban nem is kerestük őket? Ez a kérdésfelvetés már sokkal gyümölcsözőbbnek bizonyult. Hiszen amikor néhány hónappal később a Hollywoodot felépítő színészhálózatot elemeztük, kiderítettük, hogy az is ugyanezt a matematikai összefüggést követi: azoknak a színészeknek a száma, akik pontosan  $k$  másik színészhez kapcsolódnak, hatványfüggvény szerint csökken. Később rájöttünk, hogy

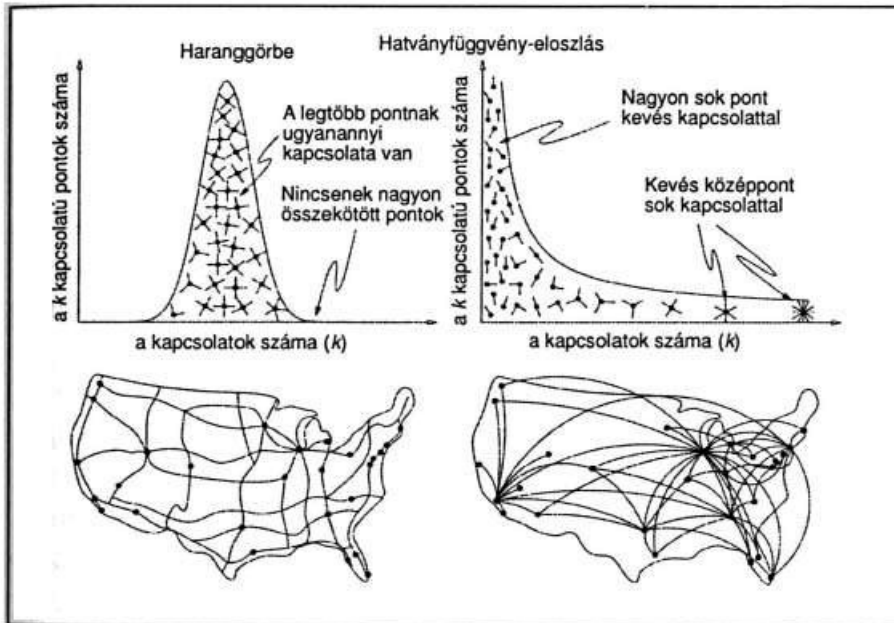
Erdős és kollégái az együttműködési hálózatukat szintén ilyen összefüggés szerint alakították ki. A sejteken belüli hálózat is felkerült a listánkra, miután megértettük, hogy a pontosan  $k$  másik molekulával kölcsönhatásban lévő molekulák száma hatványfüggvényt követve csökken. Ekkoriban bukkantunk rá Sid Rednemek, a bostoni egyetem fizikaprofesszorának cikkére is, aki úgy találta, hogy a fizikai folyóiratokban lévő hivatkozások eloszlása is hatványfüggvény szerinti. Ha a hivatkozásokat egy olyan hálózat éleinek tekintjük, amelyben a publikációk a pontok, akkor Redner eredményéből arra következtethetünk, hogy az idézettségi hálóra is érvényes a hatványfüggvény-eloszlás. Összefoglalva, számos nagy hálózatban, amit mi vagy más kutatók meg tudtak vizsgálni, egy meglepően egyszerű és egységes mintázat jelent meg: a pontosan  $k$  linkkel rendelkező pontok száma egy hatványfüggvényt követ. A fokszámkievő minden esetben egyedi, és a legtöbb rendszerben kettő és három közé esik.

## 2.

A véletlen hálózatok és a hatványfüggvény-eloszlással leírható hálózatok közötti erőteljes külső és szerkezeti különbségek a legjobban úgy szemléltethetők, ha összehasonlítjuk az Egyesült Államok közötti térképét egy légi közlekedési térképpel. A közúti térképen a városok a pontok, és az őket összekötő utak a kapcsolatok. Ez egy eléggé egyenletes hálózat: minden nagyobb város legalább egy helyen kapcsolódik az autópályák rendszeréhez, és nincsenek olyan városok, amelyek autópályák százaihoz kapcsolódnának, így a legtöbb pont hasonló, és nagyjából azonos számú kapcsolata van. Amint azt a 2. fejezetben láttuk, az egységesség a csúcsos eloszlású véletlen hálózatok tulajdonsága.

A repülési útvonalak térképe jelentősen eltér az utak térképétől. Ebben a hálózatban a pontok a repülőterek, amelyeket közvetlen járatok kötnek össze. Ha megvizsgáljuk a térképeket, amelyeket a repülőgépek üléseinek hátuljába betett reptéri magazinokban találunk, akkor képtelenség nem észrevenni egy-két középpontot, olyanokat, mint Chicago, Dallas, Denver, Atlanta és New York, ahonnan járatok indulnak majdnem minden amerikai repülőterre. Ezeknek a repülőtereknek a többsége kicsi, olyan pontok, amelyeket legfeljebb néhány link kapcsol össze egy vagy több központtal, így a közúti térképekkel ellentétben, ahol a pontok többsége egyenrangú, a légi útvonalak térképén néhány középpont kis repülőterek százait köti össze (6.1 ábra). Hasonló egyenletlenség jellemzi a hatványfüggvény-eloszlást. A hatványfüggvények azt a tényt fogalmazzák meg matematikailag, hogy a valódi hálózatokban a pontok többségének csak néhány kapcsolata van, és ez a számtalan kis pont együtt létezik néhány nagy középponttal, olyan pontokkal, amelyekhez szokatlanul sok kapcsolat tartozik. Az a néhány link, amely a kisebb pontokat egymáshoz kapcsolja, nem elég ahhoz, hogy biztosítsa a hálózat teljes összefüggőségét. Ezt a feladatot

látják el a viszonylag ritka középpontok, amelyek a valódi hálózatokat megóvják a széteséstől.



**6.1 ábra. Véletlen és skálafüggetlen hálózatok.** A véletlen hálózatok fokszámeloszlása egy haranggörbét követ, amelyből az látható, hogy a legtöbb pontnak ugyanannyi kapcsolata van, és nem léteznek nagyon nagy számú kapcsolattal bíró pontok (balra fenn), így a véletlen hálózat hasonlít egy országos úthálózatra, amelyben a pontok a városok, és a kapcsolatok a köztük lévő fő országutak. A legtöbb várost valóban nagyjából azonos számú autópálya szolgálja ki (alul balra). Ezzel ellentétben egy skálafüggetlen hálózat hatványfüggvény szerinti fokszámeloszlása azt jelzi előre, hogy a legtöbb pontnak csak kevés kapcsolata van, amelyet néhány, sok összeköttetéssel rendelkező középpont tan össze (jobbra fenn). Vizuálisan ez nagyon hasonló a légiforgalmi rendszerhez, amelyben sok kicsi repülőteret néhány fő középponton át lehet összekötni (alul jobbra).

A véletlen hálózatokban a fokszámeloszlás csúcsa azt mutatja, hogy a pontok nagy részének ugyanannyi kapcsolata van, és az átlagtól eltérő pontok rendkívül ritkák. Ezért a véletlen hálózatban a pontok fokszámának van egy jellemző nagysága, egy skálája, amelyet a fokszámeloszlási grafikon csúcsa határoz meg, és amelyet egy átlagos pont segítségével képzelhetünk el. Ezzel szemben a hatványfüggvény esetében az eloszlás csúcsának hiánya arra utal, hogy a valódi hálózatokban nincsen tipikus pont. A pontok folytonos hierarchiáját figyelhetjük meg, amely a kevés középponttól a sok kicsi pontig terjed. A legnagyobb középpontot két vagy három, valamivel kisebb középpont követi szorosan, majd egy tucat még kisebb következik és így tovább, végül elérkezünk a sok kis pontig.

A hatványfüggvény szerinti eloszlás tehát arra kényszerít bennünket, hogy teljesen lemondjunk a skála vagy a jellemző pont fogalmáról. A

folytonos hierarchiában nincs egyetlen olyan pont sem, amit kiválaszthatnánk, és kijelenthetnénk, hogy arra az összes pont eléggé hasonlít. Ezekben a hálózatokban nincsen belső skála. Ezért kezdte csoportom skálafüggetlen hálózatként említeni a hatványfüggvény-eloszlású hálózatokat. Miután kiderült, hogy a természetben a legtöbb komplex hálózatra érvényes a hatványfüggvény-eloszlás, a skálafüggetlen hálózatok elnevezés gyorsan elterjedt a legtöbb olyan területen, ahol komplex hálózatok fordulnak elő.

Amikor 1999-ben felfedeztük a mindenütt megtalálható középpontok hierarchiáját és az azokat kísérő hatványfüggvényeket, még egyik hálózatelmélet sem adott ezekre magyarázatot. Leginkább egyszerűen csak vakvéletlennek tekintették ezeket az eredményeket. Az Erdős-Rényi-féle véletlen hálózat-elmélet, valamint annak Watts és Strogatz által kidolgozott, csoportképződést elősegítő kiterjesztése azt bizonygatta, hogy a  $k$  darab kapcsolattal rendelkező pontok számának  $k$  növelésével exponenciálisan csökkennie kell, azaz sokkal gyorsabban, mint ahogy azt a hatványfüggvény megjósolja. Mindkét elmélet szigorú matematikai nyelven azt fogalmazta meg, hogy középpontok nem léteznek.

A hatványfüggvények meglepő felfedezése a világhálón arra kényszerített bennünket, hogy elismerjük a középpontok létezését. A lassan csökkenő hatványfüggvény szerint haladó eloszlás természetes módon összeegyeztethető az ilyen, sok kapcsolattal rendelkező különleges pontokkal. Azt jósolja, hogy minden skálafüggetlen hálózatban lesz néhány nagy középpont, amely a hálózat szerkezete szempontjából kulcsfontosságú. Miután bebizonyosodott, hogy az egyes területek jelentős hálózatainak nagy része - a világhálótól a sejten belüli hálózatiig - skálafüggetlen, elfogadottá vált a középpontok létezése. Felismertük, hogy ezek a pontok befolyásolják a szerkezeti stabilitást, a dinamikus viselkedést, a változatlan tulajdonságokat és a valódi hálózatok hibákkal és támadásokkal szembeni tűrőképességét. Ezek a pontok a bizonyítékai a hálózatok fejlődését irányító alapvető szervezőelveknek.

### 3.

Pareto soha nem használta a 80/20-as kifejezést, közgazdászok találták ki később, amikor a megfigyeléseivel dolgoztak. Pareto a tizenkilencedik század végén vette észre, hogy a természetben és a gazdaságban néhány mennyiség a mindenütt jelen lévő haranggörbe helyett hatványfüggvényt követ. Legünnepeltebb felfedezése az volt, hogy a jövedelmek hatványfüggvény-eloszlásúak, tehát a pénz többségét néhány nagyon gazdag egyén keresi, míg a lakosság nagy része csak kis összegeket kap. Pareto eredménye azt jelenti, hogy a pénznek nagyjából 80 százalékát a lakoságnak csupán 20 százaléka birtokolja. Ez az egyenlőtlenség még napjainkban - egy évszázaddal Pareto felfedezése után - is létezik.

Nem egyértelmű, hogy mikor használták először a 80/20-as elnevezést. Miközben fizikusok és matematikusok közömbösen hatványfüggvényről beszélnek, a 80/20-as elv áthatja a tömegsajtót és

az üzleti irodalmat. De minden alkalommal, amikor a 80/20-as szabály igazán alkalmazható, jó esélyünk van arra, hogy a jelenség mögött egy hatványfüggvény van. A hatványfüggvények matematikai alakban fogalmazzák meg azt a megfigyelést, hogy néhány jelentős esemény felelős a cselekmény meghatározó részéért.

A hatványfüggvények ritkán jelennek meg olyan rendszerekben, amelyeket teljesen a véletlen irányít. A fizikusok körében régóta ismert, hogy a hatványfüggvények az esetek többségében a rendezetlenségből a rend felé történő átmenetet jelzik. Tehát a világhálón észrevett hatványfüggvények elsőként mutatták meg precíz matematikai nyelven, hogy a valódi hálózatok egyáltalán nem véletlen jellegűek. A komplex hálózatok ettől kezdve végre olyan nyelven szóltak hozzánk, amit az önszerveződéssel és komplexitással foglalkozó kutatók képesek voltak megérteni. A rendről és a kialakuló viselkedésről beszéltek. Csak gondosan kellett rájuk figyelniük.

Úgy tűnhet, hogy a felfedezés, mely szerint a hálózatok egy egyszerű hatványfüggvényt követnek, csak néhány matematikust vagy fizikust hozhat lázba. Ám a hatványfüggvények megtalálhatók a huszadik század második felének legmeglepőbb szemléletbeli előrelépéseinek gyökerénél: felbukkannak a káosz, a fraktálok és a fázisátalakulások területén. A hálózatokban való megjelenésük nemcsak korábban nem sejtett kapcsolatok létezését jelezte más természeti jelenségekkel, de a hálózatokat a komplex rendszerek általános megértése miatt is jelentőssé tette. Az a tény, hogy a világháló, Hollywood, a kutatók, a sejt és sok más komplex rendszer mindegyike hatványfüggvény szerint viselkedik, lehetővé tette számunkra, hogy Pareto kifejezését felhasználjuk, és először állítsuk azt, hogy a komplex hálózatok mögött valószínűleg léteznek törvények.

## 4.

Nagy O betűs fejével és két H betűből álló nagy fülével a vízmolekula és jele, a  $H_2O$  mindnyájunknak ismerős. Mérete és belső szerkezete a legapróbb részletekig ismert. Mindez nem túl meglepő: a víz a legközönségesebb és leggyakrabban vizsgált vegyület a Földön. De a folyékony víz, amely egy pohárba összezsúfolt, egymáshoz tapadó molekulák milliárdjainak sokasága, mindmáig kihívást jelent számunkra.

A gázok egyszerűek: a molekulák az üres térben röpködnek, és csak akkor vesznek egymásról tudomást, ha összeütköznek egymással. A kristályok ennek a fordítottjai, de szintén viszonylag egyszerűek: a molekulák szorosan fogják egymás kezét, hogy tökéletesen merev rácsot hozzanak létre. A folyadékok azonban érzékeny egyensúlyt képeznek a két véglet között. A vízmolekulákat összetartó erők nem elég erősek, hogy merev rendbe kényszerítsék őket. A rend és káosz közötti csapdában a vízmolekulák fenséges táncban vesznek részt. Néhány molekula összeáll, kis és rendezett csoportot alkot, együtt mozog, majd pillanatokkal később szétválik, másokhoz csatlakozik, és újabb csoportokat hoz létre.

Egy pohár víz lehűtése nem változtatja meg lényegesen ezt a fenséges vízi táncot. Csak méltóságtelegebbé - nehézkesebbé és

lassúbbá - teszi a molekulák mozgását. Nulla fokon azonban különleges dolog történik. A vízmolekulák hirtelen tökéletesen rendezett jégkristályt alkotnak, mint ahogyan a bókászó katonák a tiszt parancsszavára felsorakoznak. Ám a katonák ezt a gyakorlatot több százszor elpróbálják, és komoly erőfeszítésükbe kerül, mire az alakzatban pontos helyüket megtanulják. Viszont a vízmolekulák lehet, hogy korábban soha nem tapasztalták meg a jégállapotot. Ők valamilyen természetfeletti készítetésnek engedelmessé válnak, amelynek hatására vándorló életstílusukat merevre, rendezettre cserélik. A jég - a hideg és a tökéletes rend gyakori jelképe - spontán módon keletkezik.

A fázisátalakulás egyik legismertebb példája, amikor a vízi tánc átalakul egy szilárd, hideg, kristályos renddé. A fizikusok az 1960-as évek előtt évtizedeken át próbálták megérteni ezt a jelenséget. A fázisátalakulások gyakoriak a különböző anyagokban, és a víz megfagyásától lényegesen eltérőek is lehetnek a tulajdonságaik. Például a ferromágneses fém minden egyes atomja rendelkezik egy mágneses momentummal (spin), amelyet szokás az atomot átszűrő kis nyílal is jelezni. Magas hőmérsékleten az atomok spinjei véletlenszerűen különböző irányokba mutatnak. Viszont ha egy bizonyos kritikus hőmérsékletre lehűtjük az anyagot, akkor az összes atom pontosan ugyanabba az irányba állítja be a spinjét, és mágneset hoz létre.

A folyadék megfagyása és a mágnes létrejötte egyaránt a rendezetlenből rendezettbe történő átalakulás. A kristályos jég tökéletes rendjéhez képest a folyékony víz tényleg eléggé rendezetlen. A víz a fagypontnál csodálatos módon feladja rendezetlen állapotát, és helyette a nagy szimmetriájú és rendezettségű állapotot választja. Hasonlóképpen a ferromágneses fémek véletlenszerű irányba mutató spinjei a kaotikus rendezetlenség állapotában leledzenek. Majd miután egy kritikus hőmérséklet alá hűtjük őket, varázslatos módon magas rendezettségű közös irányt vesznek fel. Az ilyen hirtelen átalakulások jelenthetik a természettudóst és a filozófust egyaránt érdeklő alapkérdés kulcsát: Hogyan működik a természet, hogyan jön létre a rend a rendezetlenségből?

## 5.

A mágnes rendezett és rendezetlen állapotai az anyag különböző termodinamikai állapotainak felelnek meg. Amikor a rendszer pontosan az átalakulási pontban van, választania kell e két fázis között, ahogyan a hegymászó választ a csúcson, hogy melyik oldalon ereszkedjen le a hegyről. Még nem tudja, hogy merre menjen, és ilyenkor a rendszer gyakran oda-vissza változik, és a tétovázás egyre gyakoribb a kritikus pont közelében.

Ezek a tétovázások kísérletileg mérhető következményekkel járnak. A kritikus pont közelében a rend és rendezetlenség elemei keverednek ugyanazon az anyagon belül, ami azt jelzi, hogy a rendszer a csúcson mindkét oldalát felderíti. A fémekben az átalakulási hőmérséklet közelében az atomok csoportokba rendeződnek, és ezeken belül a spinek azonos irányba mutatnak. Ahogy a fém egyre közelebb kerül a kritikus

ponthoz, úgy lesznek mind nagyobbak ezek a rendezett mágnességű csoportok. Az 1960-as években a fizikusok egyre több olyan kísérleti bizonyítékot gyűjtöttek össze, ami azt jelezte, hogy a kritikus pontok környezetében néhány kulcsfontosságú mennyiség hatványfüggvény szerinti eloszlást követ. Például a korrelációs hosszt - azt a távolságot, amelyen át az atomok egymással kommunikálnak - gyakran használják a csoportok méretének hozzávetőleges leírására. A mérések azt mutatták, hogy a kritikus pont közelében a korrelációs hossz egy olyan hatványfüggvénnyel jellemezhető, amelynek jellegzetes kitevője van. Minél közelebb ér a fém a fázisátalakulási hőmérsékletéhez, annál nagyobb távolságban fognak a spinek egymásról tudni. A mágnes ereje, amelyet az azonos irányba mutató spinek hányada határoz meg, a kritikus hőmérséklet környezetében szintén hatványfüggvény szerint viselkedik, aminek az előbbtől különböző kritikus kitevője van.

Miközben a fizikusok gondosan vizsgálták, hogyan jön létre a különböző rendszerekben a rend a rendezetlenségből, egyre több, a fázisátalakulás közben érvényesülő hatványfüggvényt fedeztek fel. Ugyanezek a hatványfüggvények bukkannak fel, amikor a folyadék hő hatására gázzá alakul át, vagy amikor egy ólomdarabka szupravezetővé válik elegendő hűtés hatására. A rend-rendezetlenség átalakulás kezdett meglepően egységes matematikai arculatot nyerni. A probléma az volt, hogy senki nem tudta, miért. Miért veszítik el sajátosságaikat bizonyos kritikus pontnál a folyadékok, mágnesek, szupravezetők, és kezdenek el azonos hatványfüggvények szerint viselkedni? Mi van az ilyen eltérő rendszerek nagyfokú hasonlósága mögött? És mi köze van mindehhez a hatványfüggvényeknek?

## 6.

A rendezetlenségből rendbe való átalakulás megértése felé az első nagy áttörés 1965 karácsonyán következett be. Leó Kadanoff, a University of Illinois át Urbana-Champaign fizikusának támadt egy hirtelen ötlete: a kritikus pont közelében az atomokat ne tekintsük különállóknak. Az anyagot ehelyett inkább olyan csoportok összességéeként kell vizsgálnunk, amelyekben belül az atomok összhangban vannak. Helyettesítsük tehát az atomokat olyan dobozokkal, amelyek mindegyikében minden atom azonosan viselkedik.

Eddigre a fázisátalakulásoknak szentelt sok óra, amely a témához vonzotta a legjobb és legtehetségesebb elméleti fizikusokat, már kilenc különböző kritikus kitevő felfedezését eredményezte, amelyek mindegyike valamilyen, a kritikus pont közelében felbukkanó hatványfüggvényhez kapcsolható. Kadanoff ötlete vonzó képi modellt kínált, amelyet fel lehetett használni arra, hogy pontos matematikai összefüggéseket találjanak ezeknek a kitevőknek zsúfolt állatkertjében. Kadanoff megmutatta, hogy a rendezetlenből rendezetté alakulás leírásához szükségtelen kilenc kitevőt használni, mert bármelyik kettő segítségével kifejezhető. Ő nem tudott róla, de néhány más kutató vele azonos időben ugyanerre a következtetésre jutott. Ben Widom, a Cornell Egyetem fizikai kémikusa, illetve A. Z. Patasinszkij és V. L. Pokrovszkij



szovjet fizikusok más módszerrel hasonló skálázási összefüggéseket vezettek le. A kitevők közötti egyenlőtlenségek halmaza, amelyet Michael Fisher, a Cornell Egyetem fizikusa írt le, további ötleteket adott az állatkerten belüli rendteremtéshez.

Azonban valami még mindig hiányzott. Nem volt olyan elmélet, amely a két maradék kitevőt megadta volna, vagy megmagyarázta volna azt, hogy miért jelentek meg minden egyes alkalommal a hatványfüggvények, amikor komplex rendszerekben spontán módon rend alakult ki. Nem volt teljesen világos, hogy egyáltalán létezik-e ilyen, mindent magában foglaló elmélet. A korábbi eredmények szépsége és teljessége miatt mindenki azt remélte, hogy létezik. A fizikusközösségnek 1971 novemberéig kellett várnia a végleges válaszra. És azt érdekes módon egy olyan fizikus adta meg, akinek korábban nem sok munkája fűződött a fázisátalakulásokhoz vagy a kritikus jelenségekhez.

A hatvanas évek végén Kenneth Wilson a Cornell Egyetem fizika tanszékének gyengén muzsikáló adjunktusa volt. Mindenki tudta róla, hogy tehetséges, de publikációk formájában - ami a kutatásban a siker valódi mércéje - nem tudta megmutatni csillogó tehetségét. Odáig fajult a dolog, hogy már az állása is majdnem veszélybe került a Comellen. Az állandó állásokról döntő bizottság kényszerítette rá, hogy íróasztala fiókjából előhúzzon néhány kéziratot. Ezek közül kettő, amelyeket egyszerre, 1971. június 2-án küldött be, és még ugyanabban az évben megjelent a Physical Review B című lapban, az egész statisztikusfizikát a feje tetejére állította. Wilson ebben a két cikkben egy elegáns és mindent magában foglaló fázisátalakulási elméletet vázolt fel.

Wilson fogta a Kadanoff által kifejlesztett skálázási ötleteket, és összegyúrta belőlük a renormalizációnak nevezett hatalmas elméletet. Megközelítésének kiindulópontja a skála-invariancia volt: feltételezte, hogy a kritikus pont közelében a fizika törvényei azonos módon érvényesek egyetlen atomra és az egységesen viselkedő, azonos atomok millióit tartalmazó dobozokra. A skálainvariancia szigorú matematikai megalapozása segítségével elmélete ontotta magából a hatványfüggvényeket minden egyes alkalommal, amikor kritikus ponthoz közelített vele (ahhoz a helyhez, ahol a rendezetlenségből kialakul a rend). Wilson renormalizációs csoportja nem csupán szükségessé tette a hatványfüggvényeket, de elsőként volt képes a hiányzó két kitevő értékének jóslására is. Feltette a koronát a fázisátalakulások korábbi eredményeire, és ezzel az eredménnyel 1982-ben elnyerte a fizikai Nobel-díjat.

A természet általában gyűlöli a hatványfüggvényeket. Közönséges rendszerekben minden mennyiség haranggörbét követ, és a korrelációk az exponenciális lecsengés szabályának megfelelően gyorsan csökkennek. De mindez megváltozik, ha a rendszert fázisátalakulásra kényszerítjük. Ekkor megjelennek a hatványfüggvények, amelyekkel a természet semmi mással össze nem téveszthetően jelzi: a káosz távozik, és a helyébe lép a rend. A fázisátalakulások határozottan és világosan jelezték számunkra, hogy a rendezetlenségből a rendezettség felé vezető utat az önszerveződés hatalmas erői jelölik ki, és az út során lépten-nyomon hatványfüggvényekkel találkozunk. Megtudtuk, hogy a

hatványfüggvények nem csupán a rendszerek viselkedésének egy újabb jellemzési lehetőségét jelentik, hanem a komplex rendszerek önszerveződésének nyilvánvaló jelei.

A hatványfüggvényeknek ez a kivételes és mély jelentése talán megmagyarázza izgatottságunkat, mikor először bukkantunk rájuk a weben. Nem egyszerűen arról volt szó, hogy a hálózatok területén példa nélküli és váratlan volt megjelenésük. Sokkal inkább az volt fontos, hogy ez a lépés kiemelte a komplex hálózatokat a véletlenszerűség dzsungeléből, ahová Erdős és Rényi negyven évvel korábban helyezte őket. Ez a lépés az önszerveződés színes és elemzési módszerekben gazdag világának középpontjába állította a komplex hálózatokat. Miközben a pici keresőrobotunk által begyűjtött hatványfüggvényeken tűnődtünk, megpillanthattunk egy olyan új és korábban nem is gyanított rendet a hálózatokban, amelynek szépsége és összefüggésrendszere rendkívüli volt.

## 7.

A hatvanas évek végén és a hetvenes évek elején, amikor a fizikusok azt próbálták megérteni, hogyan működik a mágnes és miért fagy meg a víz, a megvilágosodás erejével hatott a skálázás és a renormalizációs csoport elméletének megjelenése. Megértették, hogy a kritikus pont közelében, éppen amikor a rendezetlenségből kialakul a rend, minden jelentős mennyiség egy kritikus kitevővel jellemezhető hatványfüggvényt követ. Mindegy, hogy a vizet figyeljük meg, amint folyadékból gázzá alakul, vagy a magmát, amikor sziklává szilárdul, a fémet mágnessé válásakor, vagy a kerámiát, miközben szupravezető lesz belőle; mindig ugyanazok a szabályok érvényesek, amelyekkel együtt járnak a titokzatos hatványfüggvények. Végre megértettük, hogy amikor megszületik a rend, a komplex rendszerek elvesztik egyedi jellemzőiket, és egységesen viselkednek: a különböző rendszerekben hasonló tulajdonságokat mutatnak.

A hatványfüggvények olyannyira általános érvényűek a rendezetlenből rendezettbe alakuló rendszerekben, hogy PhD-tanácsadóm, H. Eugene Stanley - aki a bostoni egyetemen dolgozik, és a fázisátalakulásokkal foglalkozó legaktívabb kutatócsoport vezetője - gyakran viccelődik azzal, hogy Bostonban csak log-log papír van. Stanley, aki a fázisátalakulások és az univerzalitás megértésére hatással bíró összes nagy felfedezésből kivette a részét, arra az ábrára utalt, amit a kutatók arra használnak, hogy a kísérleti adatokban a hatványfüggvények jelenlétéről meggyőződjenek. Ha hiszik, ha nem, a fizikusok, biológusok, ökológusok, anyagtudományi kutatók, matematikusok vagy akár közgazdászok tényleg bármit is vizsgáltak a nyolcvanas és kilencvenes években, ha az önszerveződés uralta a vizsgált folyamatot, akkor hatványfüggvényekkel és az univerzalitással találták magukat szemben. Úgy tűnik, hogy ez a hálózatok esetén sincs másként: a középpontok mögött egy igen precíz matematikai kifejezés, a hatványfüggvény bújjik meg.

De ez rögtön fel is veti a következő kérdést. Ha a hatványfüggvények azt jelzik, hogy egy rendszer éppen a káoszból a rend felé tart, akkor vajon milyen átalakulás megy végbe a komplex hálózatokban? Ha a hatványfüggvények a kritikus pont közelében jelennek meg, akkor mi hangolja a valódi hálózatokat saját kritikus pontjukra, és mi teszi lehetővé számukra a skálafüggetlen viselkedést? Miután a fizikusok feltárták a fázisátalakulásokat irányító mechanizmusokat, elkezdtek megérteni a kritikus jelenségeket. Napjainkban a precíz elméletek segítségével már nagy pontossággal kiszámolhatjuk a rend állapotába tartó rendszerek összes jellemző mennyiségét. De a robotunk adatai előtt a hálózatokban csak megfigyelni tudtuk a középpontokat. Ettől kezdve már tudtuk, hogy a középpontok a hatványfüggvények következményei - utóbbiak pedig az önszerveződés és a rend jelei. Semmi kétség sem lehet afelől, hogy ez egy fontos áttörés volt, ami után a hálózatokat kiemelhetjük a véletlen birodalmából. De a legfontosabb kérdések, amelyek a középpontok és hatványfüggvények keletkezéséért felelős mechanizmusokra vonatkoztak, még mindig válasz nélkül maradtak. Lehet, hogy a valódi hálózatok a rendezetlenből rendezetté alakulás folytonos állapotában vannak? Miért tűnnek fel a középpontok a színészeknél a világhálóig minden hálózatban? Miért a hatványfüggvények írják le ezeket a jelenségeket? Léteznek-e olyan alaptörvények, amelyek a hálózatokat arra kényszerítik, hogy ugyanazt az általános alakot és formát öltse? Hogyan szövi hálóját a természet?

# **A HETEDIK LÁNCSZEM**

## ***A gazdag egyre gazdagabb***

Portó - a portugál birodalom egykori kereskedelmi kikötője - ma elfeledett város benyomását kelti. Ott épült, ahol a lassan hömpölygő Douro folyó utat tör magának az Atlanti óceánhoz a tengerpartot védő meredek dombokon keresztül. Magán hordozza egy nyüzsgő középkori város jellegzetességeit, amelyet stratégiai szempontból a könnyen védhető szűk folyótorkolatnál helyeztek el. Folyóra néző pompás kastélyai és borkészítési hagyományai miatt azt várnánk, hogy a világ egyik leglátogatottabb városa legyen. De megbújik az Ibériai-félsziget északnyugati csücskében, ezért nem sok turista vállalkozik a kitérőre. Nyilván túl kevés rajongója van a különleges, testes portói bornak ahhoz, hogy álomszerű állapotából életre keltse ezt a nagyszerű középkori várost.

1999 nyarán látogattam el Portóba, röviddel azután, hogy diákjaimmal befejeztük a kéziratot a hatványfüggvények szerepéről a világhálón. A portói egyetem két fizikus professzora, Jose Mendes és Maria Santos „nemgyensúlyi és dinamikus rendszerekről” szervezett találkozásán vettem részt. 1999 nyarán nagyon kevés ember törte a fejét a hálózatokon, és a találkozón sem voltak ilyen témájú előadások. De nekem folyton a hálózatok jártak az eszemben. Magammal vittem az útra megoldatlan kérdéseinket: Miért vannak középpontok? Mi a hatványfüggvények oka?

Abban az időben a világháló volt az egyetlen olyan hálózat, amelyről matematikailag bebizonyították, hogy középpontjai vannak. Miközben a megértésével küszködtünk, egyedi vonásait kerestük. Ezzel párhuzamosan más létező hálózatok szerkezetéről is többet akartunk megtudni. Ezért mielőtt Portóba indultam, felvettem a kapcsolatot Duncan Wattsszal, aki volt olyan kedves, és rendelkezésünkre bocsátotta az USA nyugati elektromos hálózatának adatait és a C. elegáns topológiáját. Brett Tjaden, aki doktorandusz korában létrehozta a The Oracle Bacon weboldalt, ma pedig az Ohio University in Athens számítástechnikai docense, elküldte nekünk a hollywoodi színészek adatbázisát. Jay Brockman, a Notre Dame Egyetem számítástechnikai professzora egy emberi kéz által készített hálózat adatait adta meg, az IBM által gyártott számítógép-chip huzalozási rajzát. Mielőtt Európába indultam, Albert Réka doktorandusz diákkal megbeszéltük, hogy majd elemzi ezeket a hálózatokat. Június 14-én, egy héttel az indulásom után hosszú elektronikus üzenetet kaptam tőle, melyben beszámolt a folyamatban lévő munkák részleteiről. Az üzenet végén hozzátett egy mondatot, lezáró gondolatként: „Megnéztem a foksámeloszlásokat is, és majdnem mindegyik rendszerben (IBM, színészek, elektromos hálózat) az eloszlás »farka« hatványfüggvényt követ.”

Réka üzenete hirtelen világossá tette, hogy a web egyáltalán nem különleges. Ott ültem a konferenciateremben, és az előadásokra egyáltalán nem figyeltem: csak ennek a felfedezésnek a következményein bírtam gondolkodni. Ha két olyannyira különböző hálózat, mint a web és a hollywoodi színészközösség egyaránt

hatványfüggvényt követő viselkedést mutat, akkor ezért valamilyen univerzális törvény vagy mechanizmus kell legyen a felelős. Ha ilyen törvény létezik, akkor az minden hálózatra alkalmazható.

Az előadások közötti első szünetben elhatároztam, hogy elvonulok a közeli papnevelde csendes magányába, ahová a résztvevőket elszállásolták. Azonban nem jutottam messzire. A szobámhoz vezető tizenöt perces séta alatt eszembe jutott egy lehetséges magyarázat, olyan egyszerű és nyilvánvaló, hogy kételkedtem, igaz lehet-e. Azonnal visszatértem az egyetemre, hogy Rékának faxot küldjek, és megkérjem, hogy ellenőrizze le a számítógépen ötletemet. Néhány óra múlva megérkezett a válasz elektronikusan. Legnagyobb meglepetésemre az ötlet működött. Az az egyszerű jelenség, hogy a gazdag egyre gazdagabb lesz, jelen van a legtöbb hálózatban, és megmagyarázhatja a világhálón és Hollywoodban észrevett hatványfüggvényeket.

Portó után rövid időre visszatértem a Notre Dame-ra, mielőtt újabb egy hónapos útra indultam. Nyilvánvaló volt azonban, hogy nem várhatunk még egy hónapot az eredmények publikálásával. Hét napunk volt, hogy a cikket megírjuk. A Lisszabonból New Yorkig tartó repülés nyolc órája ideális lehetőségnek látszott az első vázlat megírásához. Ahogy a gép felszállt, elővettem a portói utazás előtt újonnan vásárolt laptopomat, és viharos gyorsasággal gépelni kezdtem. Éppen a bevezetés végén tartottam, mikor a légiutas-kísérő a mellettem ülő utas kólájának átadása közben hirtelen a pohár teljes tartalmát a billentyűzetemre öntötte. Összevissza betűk szálltostak a most már használhatatlan laptop képernyőjén. A cikket mégis befejeztem a gépen, elejétől végéig kézírással. Egy héttel később benyújtottuk a nagy tekintélyű Science folyóirathoz a kéziratot, majd tíz nap múlva elutasító választ kaptunk anélkül, hogy a kéziratot a bírálóknak kiküldték volna. A szerkesztők szerint ugyanis a kézirat nem felelt meg a lap által támasztott feltételnek: az adott munka újszerű és sokak számára érdekes kell hogy legyen. Addigra már Erdélyben tartózkodtam, ahol családomat és barátaimat látogattam meg a Kárpátok szívében. Csalódott voltam, de mélyen hittem abban, hogy a cikk fontos, ezért olyat tettem, amit azelőtt soha. Kétségbeesett kísérletként felhívtam azt a szerkesztőt, aki elutasította a cikket, hogy véleménye megváltoztatására bírjam. Nagy meglepetésemre sikerrel jártam.

## 1.

Az Erdős-Rényi-féle véletlen modell két egyszerű és gyakran figyelmen kívül hagyott feltételezésre épül. Az első: megszámloljuk a pontokat. Miután az összes pont kezdettől fogva rendelkezésre áll, feltesszük, hogy a pontok száma rögzített, és változatlan marad a hálózat létezése alatt. A második: feltételezzük, hogy az összes pont egyenrangú. Miután a pontokat nem tudjuk megkülönböztetni, véletlenszerűen kötjük őket össze egymással. Ezeket a feltételezéseket a hálózati kutatások negyven éve alatt senki nem kérdőjelezte meg. De a középpontok felfedezése - és az őket leíró hatványfüggvényeké - arra kényszerített bennünket, hogy mindkét feltételt elhagyjuk. A Science-hez benyújtott cikk volt az első lépés ezen az úton.

## 2.

Van egy dolog a világhálóval kapcsolatban, amivel mindenki egyetért: a web növekszik. Minden egyes napon új dokumentumokat adnak hozzá. Vannak, akik legújabb hobbijukat vagy érdeklődésüket részletezik; a vállalatok online termékeiket és szolgáltatásaikat mutatják be; a hatóságok pedig egyre inkább támaszkodnak a világhálóra, hogy segítségével eljuttassák az emberekhez az információkat. A felsőoktatásban a professzorok előadásai jegyzeteit teszik közzé; a nonprofit szervezetek megpróbálják elérni azokat, akiken szolgáltatásaik segíthetnek; a kereskedelmi célú társaságok ezrei pedig feltűnő oldalak tervezésével versenyeznek a pénzünkért. Egyes becslések szerint a weben tíz éven belül olyan, nagyjából egy exabyte (10<sup>18</sup>) nagyságrendű, sokféle formátumú, bolygónkon mindenfelé elosztott információ lesz található, aminek nagy része ma még nem ismert. Bár ennek a robbanásnak a sebessége valószínűleg fokozatosan csökkenni fog, hiszen az emberiség által összegyűjtött információk többsége online elérhető lesz, egyelőre még sincs jele a lassulásnak.

A ma már több mint egymilliárd elérhető dokumentumról nehéz elhinni, hogy a web egyetlen pontból keletkezett. De ez így volt. Alig egy évtizede csak egyetlen pontja volt, Tim Berners-Lee híres első weboldala. Ahogy a fizikusok és számítástechnikával foglalkozók elkezdték saját oldalukat létrehozni, az eredeti weboldalra fokozatosan egyre több link mutatott. Ez a néhány egyszerű dokumentum volt napjaink bolygónyi méretű, önszerveződő világhálójának elődje. Nyomasztó mérete és komplexitása ellenére a növekedés mindenütt folytatódik. Ez a bővülés éles ellentétben áll a könyvben eddig leírt hálózati modellekre vonatkozó feltétellel, mely szerint a hálózatban a pontok száma az időben állandó marad.

A hollywoodi hálózat szintén egy kis magból indult ki, azokból a színészekből, akik 1890-től az első némafilmekben szerepeltek. Az IMDb.com adatbázis szerint 1900-ban Hollywoodnak csak ötvenhárom színésze volt. A mozgófilmek iránti igény növekedésével ez a mag lassan kibővült, és minden egyes filmmel néhány új arc adódott hozzá. Hollywood első nagy felvirágzása 1908 és 1914 között következett be, amikor a szakmához csatlakozó színészek száma az ötvennél kevesebbről közel kétezerre nőtt egy év alatt. A második látványos fellendülés, amely az 1980-as években kezdődött, átalakította a filmkészítést a ma ismert hatalmas szórakoztatási iparággá. A némaszínészek kis csoportjaiból félmilliónál nagyobb, gigantikus hálózat nőtt ki, amely hallatlan sebességgel folytatja növekedését. 1998-ban egyetlen év alatt 13 209 olyan színész nevét adták hozzá az IMDb.com adatbázishoz, akik először tűntek fel a filmvászonon.

A sokféleség ellenére a legtöbb valódi hálózatnak van egy lényeges közös vonása: a növekedés. Bármelyik hálózatot is választjuk ki, egy dolog igaz lesz: néhány ponttal kezdődtek, aztán új pontok hozzáadásával növekedtek, míg fokozatosan elérték jelenlegi méretüket. A növekedés nyilvánvalóan rákényszerít bennünket arra, hogy

újrágondoljuk modellezési feltételeinket. Mind az Erdős-Rényi- és a Watts-Strogatz-modell feltételezte, hogy rögzített számú pontunk van, amelyek valamilyen okos módon össze vannak kötve. Ezért ezeknek a modelleknek a segítségével generált hálózatok statikusak, ami azt jelenti, hogy a pontok száma változatlan marad a hálózat élettartama alatt. Ezzel ellentétben a mi példánk azt sugallta, hogy helytelen a valódi hálózatokról statikusságot feltételezni. Be kell vezetnünk helyette hálózati modellünkbe a növekedést. Ez volt a kezdeti ösztönös megérzés, amelyhez akkor jutottunk el, mikor megpróbáltuk a középpontokat megmagyarázni. Ezzel megfosztottuk a véletlenszerű világegyetemet a legalapvetőbb neki tulajdonított sajátosságától - statikus jellegétől.

### 3.

Egy növekedő hálózatot modellezni viszonylag egyszerű dolog. Induljunk ki pontok egy kis csoportjából, és adjunk ehhez a csoporthoz szép sorban pontokat. Tegyük fel, hogy minden új ponthoz két él tartozik, így ha két ponttal kezdünk, akkor a harmadik pont mindkét előző ponthoz fog kapcsolódni. A negyedik pont a már meglévő három pont közül választhat. Hogyan válasszuk ki a korábbi három pont közül azt a kettőt, amelyikhez a negyediket hozzákapcsoljuk? Az egyszerűség kedvéért kövessük Erdős és Rényi útmutatását, a három pont közül véletlenszerűen válasszunk ki kettőt, és kössük össze az új pontot ezekkel. Ezt az eljárást folytathatjuk, ameddig csak akarjuk; minden alkalommal, amikor egy új pontot adunk a rendszerhez, az új pontot összekötjük két véletlenszerűen kiválasztott korábbi ponttal. A hálózatot, amit ezzel az egyszerű módszerrel létrehoztunk, nevezzük **A** modellnek. Az **A** modell az Erdős-Rényi-féle véletlenszerű hálózati modelltől csak abban tér el, hogy növekszik, ám ez a különbség jelentős. Annak ellenére, hogy az éleket véletlenszerűen és demokratikusan osztottuk ki, az **A** modell pontjai nem lesznek egymással egyenértékűek. Könnyen azonosítani tudjuk a győzteseket és veszteseket. Minden pontnak bármelyik pillanatban egyenlő az esélye arra, hogy kapcsolódjanak hozzá, és ez nyilvánvalóan a régebbi pontok számára jelent előnyt. Ha eltekintünk a ritkán előforduló statisztikai ingadozásoktól, akkor az **A** modellben valóban a legkorábbi pontok lesznek a leggazdagabbak, mivel ezek a pontok hosszabb ideig képesek gyűjteni a kapcsolatokat (éleket). A legszegényebb pont az utolsóként csatlakozó pont lesz, amelynek csak két éle van, hiszen senkinek nem volt még ideje, hogy kapcsolódjon hozzá. Az **A** modell volt egyik első próbálkozásunk arra, hogy megmagyarázzuk a világhálón és Hollywoodban általunk észrevett hatványfüggvényeket. A számítógépes szimulációk hamar meggyőztek bennünket arról, hogy ezzel a modellel még nem találtuk meg a választ. A fokszámeloszlás - az a függvény, amelyik megkülönbözteti a skálafüggetlen hálózatokat a véletlen modellektől - túl gyorsan csökkent: exponenciálisan. Igaz, hogy a korai pontok egyértelműen vezettek, az exponenciális alak mégis azt jelezte, hogy túl kicsik, és túl kevesen vannak. Ezért az **A** modellel nem sikerült magyarázatot adnunk a középpontokra és összekötőkre. Viszont ez a próbálkozás jól mutatta,

hogy csupán a növekedés nem elegendő arra, hogy a hatványfüggvények felbukkanását megmagyarázzuk.

#### 4.

Az 1999-es Super Bowl (amerikai futballbajnokság döntője) alatt számos SenkiNemlsmeri.com társaság - mint az OurBeginning.com, WebEx.com és az Epidemic Marketing - hirdetésenként kétmillió dollárt fizetett azért, hogy a Denver és St. Louis közötti párbajt követően az amerikaiak millióhoz eljuttassa a nevét. Ugyanebben az évben egyedül az E\*Trade 300 millió dollárt költött önmaga bemutatására. Az egyik legnépszerűbb internetes kereső, az AltaVista hirdetési költségvetése közel 100 millió dollár volt, és az America Online - az online világ Góliátja - sem maradt el ettől nagyon a maga 75 millió dolláros reklámköltségével. 1999-ben több mint 3,2 milliárdot költöttek a világhálón megjelenő reklámokra, ami körülbelül fele az azonos időszak alatt a - közel két évtizedes múlttal rendelkező - kábeltelevíziózásban hirdetésekre költött összegnek.

Mit kívántak ezek a vállalatok elérni? A válasz meglepő, de mégis egyszerű. A frissen indított és a piacra már bevezetett vállalatok is naponta milliókat áldoztak arra saját tőkéjükből és nehezen megszerzett pénzükből, hogy legyőzzék Erdős és Rényi véletlen világegyetemét. Tudták, hogy az emberek által a weben elhelyezett kapcsolatok nem véletlenszerű helyre mutatnak. Megpróbálták hasznot húzni abból, hogy az emberek nem véletlenszerűen helyezik el ezeket, és könyörögtek, hogy hozzájuk csatlakozzunk.

Tényleg, valójában hogyan határozzuk el, hogy melyik oldalra mutató linket helyezünk el a világhálón? A véletlen hálózati modellek szerint bármelyik ponthoz véletlenszerűen kapcsolódnánk. Ha azonban egy kicsit is belegondolunk, hogy hogyan választunk, akkor rájövünk, hogy ez nem így van. Például töméntelen sok weboldal tartalmaz hírgyűjteményre mutató linket. A Google segítségével elvégzett gyors keresés a news (hír) szóra körülbelül 109 millió találattal tér vissza. A Yahoo! kézi rendezésű katalógusából nyolcezer online újságból választhatunk. Hogyan választunk ki egyet? A véletlen-modell szerint a listából véletlenszerűen választunk. Nem hinném, hogy bárki valaha is ezt teszi. Többségünk inkább néhány nagyobb hírgyűjteményt ismer. Anélkül, hogy túl sokat gondolkodnánk a dolgon, ezek egyikére kapcsolódunk rá. A The New York Times régi olvasójaként számomra nem okoz fejtörést, hogy a nytimes.com-ot válasszam. Mások lehet, hogy a CNN.com-ot vagy az MSNBC.com-ot kedvelik. Azonban azok a weboldalak, amelyekre jobban szeretünk kattintani, általában nem közönséges pontok. Középpontok. Minél ismertebbek, annál több link mutat rájuk. Minél több kapcsolatot vonzanak, annál könnyebb őket a világhálón megtalálni és még jobban ismertté válnak. Végül mindnyájan önkéntelenül is részrehajlóak leszünk, és nagyobb valószínűséggel kapcsolódunk rá azokra a pontokra, amelyeket ismerünk, és amelyek elkerülhetetlenül a világháló több kapcsolattal rendelkező pontjai. Előnyben részesítjük a középpontokat.



A végső következtetés tehát az, hogy amikor elhatározzuk, hová linkeljünk a világhálón, akkor népszerűség alapján történő kapcsolási végzünk. Amikor két olyan oldal közül választunk, amelyek közül az egyiknek kétszer annyi linkje van, mint a másiknak, akkor körülbelül kétszer annyian kapcsolódunk rá a több linkkel rendelkező oldalra. Bár személyes választásaink eléggé kiszámíthatatlanok, csoportként mégis pontos mintát követünk.

A népszerűségi kapcsolódás Hollywoodban is alapvető. A producernek az a feladata, hogy nyereséges filmet készítsen; ő ismeri a sztárokat, akik aztán sikerre viszik a filmeket, így a szereposztást két egymással versengő tényező határozza meg: a színész és a szerep hogyan illik egymáshoz, illetve a színész népszerűsége. Mindkettő azonos mértékű részrehajlást visz bele a kiválasztási folyamatba. Azok a színészek, akiknek több kapcsolata van, nagyobb eséllyel jutnak új szerepekhez. S valóban, minél több filmet készített egy színész, annál valószínűbb, hogy ismét fel fog tűnni a szereposztó rendező radarján. Ez az oka annak, hogy a szerepre vágyakozó színészek óriási hátránnyal indulnak. Ez a 22-es csapdája, amit mindenki ismer Hollywoodban és rajta kívül. Ismertnek kell lenned ahhoz, hogy szerepet kapj, de jó szerepekre van szükséged, hogy ismert legyél.

A világháló és Hollywood arra készítetett bennünket, hogy elhagyjuk a véletlen hálózatok második fontos feltételét: demokratikus jellegüket. Az Erdős-Rényi- és a Watts-Strogatz-modellben nincs különbség a hálózatban a pontok között.

Így mindegyik pont egyenlő eséllyel jut kapcsolatokhoz. Az imént tárgyalt példák mást sugallnak. A valódi hálózatokban az összekapcsolódás soha nem véletlenszerű. Ehelyett a népszerűség a vonzóerő. A több kapcsolattal rendelkező weboldaloknak nagyobb az esélye, hogy ismét hozzájuk kapcsolódjanak, a sok kapcsolattal bíró színészek neve gyakrabban merül fel új szerepek kapcsán, a sokat idézett cikkeket valószínűbb, hogy ismét hivatkozzak, az összekötőknek több új barátjuk lesz. A hálózat fejlődését a népszerűségi kapcsolódás titokzatos és könyörtelen törvénye irányítja. E törvény hatásának tudható be, hogy önkéntelenül nagyobb arányban adunk hozzá kapcsolatokat azokhoz a pontokhoz, amelyeknek már nagyon sok kapcsolatuk van.

## 5.

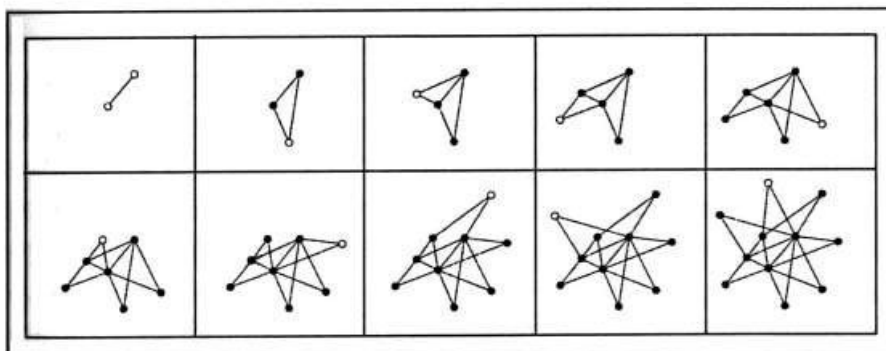
Ha összeillesztjük az imént leírtakat, akkor azt találjuk, hogy a valódi hálózatokat két törvény irányítja: a növekedés és a népszerűségi kapcsolódás. Minden hálózat egy kis magból indul és új pontok hozzáadásával bővül. Aztán amikor ezek az új pontok arról döntenek, hogy hová kapcsolódjanak, előnyben részesítik azokat a pontokat, amelyek több linkkel rendelkeznek. Ez a két törvény jelentős eltérést jelent a korábbi modellekhez képest, amelyek rögzített számú, egymással véletlenszerűen kapcsolódó pontot feltételeztek. De vajon elegendő-e ahhoz, hogy kielégítően megmagyarázzuk a valódi hálózatokban előforduló középpontokat és hatványfüggvényeket?

Ezt kívántuk megválaszolni az 1999-es Science-cikkünkben ajánlott modellel, amely mindkét törvényt tartalmazza. A modell nagyon egyszerű, mivel a növekedés és a népszerűségi kapcsolódás természetes módon vezet egy egyszerű algoritmushoz, ami két szabályból áll (7.1 ábra):

a) *Növekedés*: Adott időközönként egy új pontot adunk a hálózathoz. Ez a lépés hangsúlyozza azt a tényt, hogy a hálózatok pontonként bővülnek.

b) *Népszerűségi kapcsolódás*: Feltételezzük, hogy minden egyes pont két éllel kapcsolódik a már létező pontokhoz. Annak a valószínűsége, hogy az új pont a már meglévők közül egy adott pontot válasszon, arányos azzal, ahány kapcsolat tartozik az adott ponthoz. Azaz, ha választani kell két pont között, amelyek közül az egyiknek kétszer annyi kapcsolata van, mint a másiknak, akkor kétszer valószínűbb, hogy az új pont a több linkkel rendelkezőhöz fog kötődni.

Minden egyes alkalommal, amikor megismételjük az (a) és (b) lépést, egy új pontot adunk hozzá a hálózathoz. Tehát pontonként készítünk el egy folytonosan bővülő hálót (7.1 ábra). Ez a modell kombinálja a növekedést és a népszerűségi kapcsolódást, és ez volt az első sikeres kísérletünk a középpontok megmagyarázására. Réka számítógépes szimulációi hamarosan megmutatták, hogy ebből a modellből megkaphatóak a nehezen kezelhető hatványfüggvények. Ez volt az első olyan modell, amelyik a valódi hálózatokban a skálafüggetlen hatványfüggvényeket megmagyarázta, ezért hamarosan a skálafüggetlen modell néven vált ismertté.



**7.1 ábra. A skálafüggetlen hálózat születése.** A skálafüggetlen topológia a valódi hálózatok örökké terjeszkedő természetének természetes következménye. Két összekötött pontból indulunk (balra fenn), és minden egyes mezőben egy új pontot (amelyet üres kör jelöl) adunk hozzá a hálózathoz. Amikor elhatározzuk, hogy hová kapcsolódjunk, az új pontok előnyben részesítik a jobban összekötött pontokat. A növekedésnek és a népszerűsítő kapcsolódásnak

*közönhetően néhány sok kapcsolattal rendelkező középpont keletkezik.*

## 6.

Miért bukkannak fel a középpontok és hatványfüggvények a skálafüggetlen modellben? Először is vegyük észre, hogy a növekedés fontos szerepet játszik ebben. A hálózat növekedése azt jelenti, hogy a korábbi pontoknak több idejük van kapcsolatok szerzésére, mint a később jövőknek. Ha egy pont utolsóként érkezik, semelyik másik pontnak nincs lehetősége arra, hogy hozzá kapcsolódjon. Ha egy pont az első a hálózatban, az összes utána következőnek lehetősége nyílik rá, hogy kapcsolódjék hozzá, így a növekedés nyilvánvaló előnyt jelent a régebbi pontok számára, és ők lesznek a kapcsolatokban leginkább gazdag pontok. A korkülönbség azonban nem magyarázza meg teljesen a hatványfüggvényeket. A középpontok létrejöttéhez szükség van a második törvényre is, a népszerűségi kapcsolódásra. Mivel az új pontok jobban szeretnek kapcsolódni a már sok kapcsolattal rendelkező pontokhoz, ezért a korai, tehát sok kapcsolattal rendelkező pontokat gyakrabban fogják választani, és azok gyorsabban fognak nőni, mint fiatalabb és kevesebb linkkel rendelkező társaik. Ahogy egyre több pont érkezik, és folytatja a több kapcsolattal rendelkező pontokhoz való kapcsolódást, az első pontok elkerülhetetlenül elszakadnak a tömegtől, és nagyon nagy számú linket fognak begyűjteni. Középpontokká válnak. A népszerűségi kapcsolódás ilyen módon gerjeszti „a gazdag egyre gazdagabb” jelenséget, amely a későn érkezők kárára segít a több kapcsolattal rendelkező pontoknak, hogy aránytalanul nagyszámú linket csípjenek el.

Ez „a gazdag egyre gazdagabb” jelenség természetes módon elvezet a valódi hálózatokban megfigyelt hatványfüggvényekhez. Az általunk elvégzett számítógépes szimuláció is azt mutatta, hogy a pontosan  $k$  darab linkkel rendelkező pontok száma tetszőleges  $k$  esetén hatványfüggvényt követ. A fokszámkitevő pontos értéke, ami a hatványfüggvény szerinti eloszlást jellemzi, szintén nem volt többé rejtély. Ki tudtuk számolni analitikusan<sup>9</sup> egy matematikai eszköz segítségével, amit kontinuumelméletnek neveznek, és amelyet erre a célra fejlesztettünk ki. A népszerűségi kapcsolódásnak köszönhetően minden pont új pontokat vonz meglévő linkjei számával arányosan. Ennek az egyszerű megfigyelésnek a felhasználásával egy egyenletet tudtunk javasolni, amely megadja, hogy a hálózat bővülésével milyen ütemben tesznek szert a pontok új kapcsolatokra. A megoldás lehetővé tette, hogy analitikusan kiszámoljuk a fokszámeloszlást, és meggyőződhessünk arról, hogy az valóban hatványfüggvényt követ.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Azaz egzaktul (a szaklektor).

<sup>10</sup> A skálafüggetlen modell ugrás kitevője  $y = 3$ , azaz az ugráseloszlás  $P(k) \sim k^{-3}$

Megmagyarázhatta volna-e egyedül akár a növekedés, akár a népszerűségi kapcsolódás a hatványfüggvényeket? A számítógépes szimulációk és számítások meggyőztek bennünket arról, hogy mindkét feltételre szükség van a skálafüggetlen hálózat létrehozásához. A növekvő hálózat a népszerűségi kapcsolódás nélkül exponenciális

fokszámeloszlású, ami hasonlít a középpontokat tiltó haranggörbéhez. A növekedés elhagyása esetén pedig visszajutunk a statikus modellekhez, amelyek nem képesek hatványfüggvényt előállítani.

## 7.

A skálafüggetlen modellel célunk elég szerény volt: meg akartuk mutatni, hogy a növekedés és a népszerűségi kapcsolódás két egyszerű törvénye meg tudja oldani a középpontok és hatványfüggvények rejtélyét. Ezért kellemes meglepetés volt számunkra a modell nagy hatása a későbbi kutatásokra. Különösen azért, mert kezdettől fogva nyilvánvaló volt, hogy a valódi hálózatok topológiáját sok más olyan tényező is formálja, amelyet az egyszerűség és átláthatóság kedvéért elhanyagoltunk. Ezek közül az egyik legnyilvánvalóbb az a tény, hogy miközben a skálafüggetlen modellben minden kapcsolatot akkor hozunk létre, amikor új pontok csatlakoznak a hálózathoz, a legtöbb hálózatban új linkek önállóan is keletkezhetnek. Például amikor a weboldalamhoz hozzáteszem a nytimes.com címre mutató linket, két régi pont között egy belső kapcsolatot hozok létre. Hollywoodban a kapcsolatok 94 százaléka belső kapcsolat; ezek akkor jönnek létre, ha két ismert színész először dolgozik együtt. Szintén hiányzik a skálafüggetlen modellből, hogy sok hálózatban a pontok és kapcsolatok eltűnhetnek. A valóságban gyakran szűnnek meg weboldalak, és velük együtt linkek ezrei is eltűnnek. A kapcsolatok változhatnak, amikor elhatározzuk, hogy a CNN.com linkünket kicseréljük a nytimes.com linkre. Ezek és más, bizonyos hálózatokban gyakori jelenségek, amelyek hiányoznak a skálafüggetlen modellből, jó példák arra, hogy a valódi hálózatok fejlődése sokkal bonyolultabb, mint ahogy a skálafüggetlen modell azt jósolja. Ahhoz, hogy a bennünket körülvevő komplex világ hálózatait megértsük, egységes hálózatelméletbe kellene foglalnunk ezeket a mechanizmusokat, és meg kellene magyaráznunk a hálózat szerkezetére gyakorolt hatásukat.

Miután beküldtük a skálafüggetlen modellről szóló cikkünket, Albert Réka és én elkezdtük olyan folyamatok hatását vizsgálni, mint például a belső linkek kialakulása vagy a skálafüggetlen hálózatok szerkezetének változása. De többé már nem voltunk ebben egyedül. Egy hónappal a Science-beli cikkünk megjelenése után kiderült, hogy világszerte más kutatólaboratóriumokban is folyik hasonló munka. Luis Amaral - aki régi munkatársam és jelenleg a bostoni egyetem kutatója - a skálafüggetlen modell általánosításán dolgozott, belefoglalta az öregedést, vagyis annak a lehetőségét, hogy nyugállományba vonulásuk után a színészek abbahagyják a linkek szerzését. Amaral, aki Gene Stanleyvel és két diákkal, Antonio Scalával és Mark Barthélémyvel dolgozott együtt, bebizonyította, hogy ha a pontoknak nem sikerül bizonyos kor elérése után több kapcsolatot szerezni, akkor a középpontok mérete korlátos lesz, így a nagy középpontok kevésbé lesznek gyakoriak, mint azt a hatványfüggvény megjósolja. Ezzel egy időben Jose Mendes és Sergei Dorogovtsev tőlük függetlenül hasonló problémákon dolgozott Portóban. Ők hamarosan publikálták a skálafüggetlen hálózatokról szóló, igen fontos cikksorozatuk első cikkét. Mendesék feltételezték, hogy a pontok

az idő múlásával lassan elvesztik azt a képességüket, hogy linkeket vonzzanak. Mendes és Dorogovtsev bebizonyította, hogy a fokozatos öregedés nem teszi tönkre a hatványfüggvényeket, csak megváltoztatja a középpontok számát, és emiatt a fokszámkitevő is változik. Paul Krapivsky és Sid Redner - szintén a bostoni egyetemről - a mexikói Francois Leyvrazzal együttműködve általánosították a népszerűsítő kapcsolódást úgy, hogy egy adott ponthoz történő kapcsolódás nem egyszerűen arányos legyen a ponthoz tartozó linkek számával, hanem valamilyen bonyolultabb függvény szerint változzék. Azt állapították meg, hogy az ilyen hatások elrontják a hálózatot jellemző hatványfüggvényt.

Ezek voltak az elsők a számos egymást követő eredmény közül, amelyeket a skálafüggetlen modellt és különböző általánosításait részletesen megvizsgáló fizikusok, matematikusok, számítástechnikai kutatók, szociológusok és biológusok kaptak. Erőfeszítéseiknek köszönhető, hogy jelenleg a hálózatok növekedésének és fejlődésének egy olyan, gazdag és ellentmondásoktól mentes elmélete áll rendelkezésünkre, amely pár évvel ezelőtt még elképzelhetetlen volt. Értjük, hogy a belső kapcsolatokat, azok változtatását, a pontok és kapcsolatok eltávolítását, az öregedést, a nemlineáris hatásokat és más, a hálózat topológiáját befolyásoló folyamatokat belefoglalhatjuk a fejlődő hálózatok bámulatos elméleti felépítésébe, amelynek a legegyszerűbb skálafüggetlen modell. Ezek a folyamatok átalakítják a hálózatok növekedésének és fejlődésének módját, és elkerülhetetlenül megváltoztatják a középpontok számát és méretét. De a legtöbb esetben, amikor a növekedés és a népszerűségi kapcsolódás egyidejűleg van jelen, középpontok és hatványfüggvények is megjelennek. A komplex hálózatokban a skálafüggetlen szerkezet nem kivételesnek, hanem inkább általánosnak számít, és megmagyarázza, hogy miért találkozunk vele oly sok helyen a legtöbb valódi rendszerben.

## 8.

A növekedő hálózatok elmélete, amely az elmúlt három év alatt alakult ki, egyértelmű útmutatást ad a hálózatmodellezés számára. Azzal, hogy a hálózatokat dinamikus rendszereknek tekinti, amelyek folytonosan változnak az időben, a skálafüggetlen modell új modellezési filozófiát testesít meg. A klasszikus statikus modellek az Erdős-Rényi páros óta a rögzített számú pontot és kapcsolatot megpróbálták egyszerűen úgy elrendezni, hogy a kapott hálózat összhangban legyen a modellezett hálózattal. Ez a folyamat a rajzoláshoz hasonló. Egy Ferrari elé leültetünk valakit, és azt a feladatot adjuk neki, hogy rajzoljon egy olyan képet, amelynek alapján bárki felismerheti a kocsit. Azonban az élethű ábrázolással még mindig nem kerülünk közelebb annak a folyamatnak a megértéséhez, amely mindenekelőtt magát az autót létrehozta. Ehhez tudnunk kell, hogy hogyan építhetünk egy pontosan olyan autót, mint az eredeti. Éppen ezt a célt kívánják megvalósítani a különböző hálózati modellek. Megragadják, hogy a hálózatot hogyan rakták össze, megismétlik azokat a lépéseket, amelyeket a természet követett, amikor különböző bonyolult rendszereit létrehozta. Ha a hálózat

összerakását helyesen modellezzük, akkor a végső hálózat nagyon közel kell legyen a valósághoz. Tehát a céljaink megváltoztak: a topológia leírása helyett azokat a mechanizmusokat akarjuk megérteni, amelyek a hálózat fejlődését alakítják.

Ez a nézőpontváltás a hálózatok nyelvezetében is drámai változást idézett elő. A klasszikus modellek statikus természete észrevétlen maradt egészen addig, amíg rá nem kényszerültünk a növekedés beillesztésére. Hasonlóképpen a véletlenszerűség addig nem okozott problémát, amíg a hatványfüggvények nem követelték meg tőlünk, hogy bevezessük a népszerűségi kapcsolódást. Miután megértettük, hogy a szerkezet és a hálózat kialakulása szétválaszthatatlanok, már nehéz volt a visszaút a statikus modellekhez, amelyek évtizedekig meghatározták gondolkodásunkat. Ezek a gondolati váltások sok, egymással ellentétben álló párost hoztak létre: szembeállították a statikus modellt a növekvővel, a véletlent a skálafüggetlennel, a szerkezetet a kialakulással.

Az előző fejezet végén fontos kérdéshez értünk el: A hatványfüggvények jelenlétéből következik-e, hogy a valódi hálózatok a rendezetlenből rendezetté történő fázisátalakulás eredményei? Egyszerű válaszra jutottunk: a hálózatok nem a véletlen és a rendezett állapot közötti úton találhatóak. Nem is a véletlenszerűség és a káosz határmezsgyéjén találhatóak. A skálafüggetlen topológia inkább azoknak a szervező elveknek a bizonyítéka, amelyek a hálózat kialakulásának minden szakaszában működnek. Kevés a rejtély itt, mivel a növekedés és a népszerűségi kapcsolódás képes a természetben látott hálózatok alapvető vonásait megmagyarázni. Nem számít, milyen nagy és bonyolult egy hálózat, mert amíg a növekedés és a népszerűségi kapcsolódás jelen van, addig ezek fenntartják a középpontok által dominált skálafüggetlen topológiát.

A skálafüggetlen modell megmaradhatott volna egy érdekes tudományos kísérletnek, ha nem követte volna néhány más felfedezés. Ezek közül a legfontosabb annak a felismerése volt, hogy a legtöbb tudományos és gyakorlati jelentőségű összetett hálózat skálafüggetlen. A világháló adatai elég nagyok és részletesek voltak ahhoz, hogy meggyőzzenek bennünket arról, hogy a hatványfüggvények képesek a valódi hálózatokat leírni. Ez a felismerés a felfedezések lavináját indította el, amely a mai napig folytatódik. Hollywoodhoz hasonlóan a sejten belüli anyagcsere-hálózat, az idézettség hálózatok, a gazdasági hálók és a nyelv<sup>11</sup> mögött lévő hálózat is csatlakozott a listához, és így hirtelen a skálafüggetlen topológia eredete sok tudományterület számára fontossá vált. A hálózatok kialakulását vezérlő két törvény, amelyet a skálafüggetlen modellbe beépítettünk, jó kezdőpontot kínált ezeknek a különböző rendszereknek a feltárására.

<sup>11</sup> A nyelv skálafüggetlen természetét különböző kutatócsoportok kimutatták. Ebben a hálózatban a pontok a szavak, a kapcsolatok pedig a szövegre jellemző közös előfordulásokat vagy szemantikai összefüggéseket (szinonimákat, antonimákat) képviselnek.

Fontos, hogy a hatványfüggvények elfogadottá tették a középpontokat, és később a skálafüggetlen modell révén a valódi hálózatokban látott hatványfüggvények egy matematikailag alátámasztott fogalmi előrelépés részei lettek. A növekedő hálózatok

bonyolult elmélete lehetővé teszi, hogy pontosan megjósoljuk a skálázási kitevőket és a hálózat dinamikáját. Ennek az elméletnek a segítségével eljutottunk bonyolult, összefüggő világunk megértésének új szintjére, és közelebb kerültünk a komplexitás szerkezetének megértéséhez, mint valaha.

De a skálafüggetlen modell új kérdéseket vetett fel. Ezek közül az egyik igen gyakran előkerült: Hogyan boldogulnak a későn jövők egy olyan világban, amelyben csak a gazdag lesz egyre gazdagabb? A válasz keresése egy igen váratlan terepre vezetett: a huszadik század kezdetére, a kvantummechanika megszületéséhez.

# A NYOLCADIK LÁNCSZEM

## *Einstein hagyatéka*

Ha az olvasó szakmája révén nem számítógépekkel és internetes keresőkkel foglalkozik, és nem követte nagy figyelemmel a dot.com társaságok vagyonának alakulását, akkor valószínűleg soha nem hallott az Inktomi cégről, amely a világháló legnépszerűbb webhelye, a Yahoo! mögötti internetkeresőt üzemeltette. A közhit ellenére a Yahoo!, az America Online, a Microsoft és sok más neves cég nem maga végzi a keresést. Ehelyett egy olyan óriási adatbázisra fizetnek elő, mint az Inktomi, amely a World Wide Web egyik legnagyobb raktára. Mivel az Inktomi úgy döntött, hogy saját portált nem hoz létre, vásárlóival ellentétben neve soha nem volt ismert, és ritkán került a címlapokra. Ez 2000 júniusa folyamán hirtelen megváltozott, amikor a sajtó észrevette, hogy a vállalat tőzsdei értéke 2,8 milliárd dollárt esett egy éjszaka alatt. Mi volt az ok? A Yahoo! lecserélte internetkeresőjét - az Inktomi céget - egy két évvel korábban indult újonc vállalatra, a Google-ra.

Larry Page, aki a Stanfordinál a diploma megszerzése előtt kimaradt, később a Google társalapítója lett. 2000 márciusában találkoztam vele, amikor még kevés ember hallott internetkeresőjéről. San Franciscóban az Internet Archives által támogatott konferencián voltunk mindketten előadók. Az esemény különböző emberek sokszínű keverékét vonzotta: számítástechnikai kutatókat, fizikusokat, matematikusokat, könyvtárosokat, ügyvédeket és egy maroknyi dot.com milliomost egyesített az újonnan kialakuló online világegyetem iránti vonzerő. Larry Page rövid előadást tartott internetkeresőjéről, és a terem közepére kitett egy doboz pólót, amely a Google emblémáját hirdette: „I'm Feeling Lucky” (Jó napom van). Miután hazamentem, felpróbáltam a sajátom. Rámentem a Google oldalára, és rövid idő alatt rabja lettem. Nem lepett meg, hogy a Yahoo! is kért belőle.

## **1.**

A Google felkeltette a kíváncsiságomat, mert felrúgta a skálafüggetlen modellnek azt az alapvető előrejelzését, hogy az elsőként érkezőnek előnye van. A skálafüggetlen modellben a legtöbb kapcsolattal azok a pontok rendelkeznek, amelyek elsőként tűntek fel. Nekik volt a legtöbb idejük a linkek begyűjtésére, és arra, hogy középponttá alakuljanak. A Google, amelyet csak 1997-ben indítottak, későn indult a világhálón. Az olyan népszerű internetkeresők, mint az AltaVista vagy az Inktomi, már jóval a Google érkezése előtt uralták a piacot, így a Google a versenyben nyilvánvalóan csak egy hátrébb lévő rajtkockából indulhatott. Ám kevesebb mint három év alatt a Google lett a legnagyobb csomópont és a legnépszerűbb internetkereső.

Természetesen az üzleti világ története tele van újszerű terméket gyártó vállalatok történetével, amelyeket aztán egy későbbi, még sikeresebb vetélytárs kiszorított. A számítógépipar híres példája az Apple, amelynek zseniális kézisámítógépe, a Newton teljesen



feledésbe merült a nála később indult Palm miatt. Ha a termékeket egy bonyolult üzleti hálózat pontjainak és a vásárlókat kapcsolatoknak tekintjük, akkor azt mondhatjuk, hogy az Apple linkjei rövid időn belül átkerültek a Palmhoz.

A repülőgépipar is kínál egy kevésbé ismert példát. A sugárhajtású utasszállító repülőgépet nem a Boeing találta fel: a dicsőség a brit De Havilland vállalaté, amelyik az első sugárhajtású gépet, a Cometet 1949-ben kezdte árulni. A Comet 450 mérföldes óránkénti sebességével az európai és amerikai légitársaságokat is meghódította. Azonban nem túl sokáig uralta a piacot. Egy évvel bevezetésük után a De Havilland gépei elkezdtek lezuhanni a levegőből, a fedélzetükön lévő összes utas meghalt. A fémek különbözően használódnak el a sugárhajtású gépeken a nagy sebesség és magasság miatt. A Boeing első sugárhajtású gépe tervezésekor figyelembe vette a De Havilland cég tragikus tévedését, és öt évvel a Comet gép első repülése után bevezette a Boeing 707-et, amely hamarosan átvette a De Havilland piacát. Ma - négy évtizeddel később - a Boeing döbbenetesen figyel, amint egy harmadik vállalat, a European Airbus megtámadja világméretű fölényét, és példátlan sebességgel szorítja lefelé piaci részesedését.

Úgy tűnik, hogy az „új fiú”-hatás jelen van a legtöbb hálózatban. Viszont a skálafüggetlen modellben nincsenek ilyen sikeres későn jövők, mert ott - hasonlóan a korábban tárgyalt többi modellhez - minden pont egyforma. Jegyezzük meg, hogy a skálafüggetlen modell különbséget tesz a pontok között az általuk begyűjtött kapcsolatok számának alapján, ami a hálózatba való belépésük idejének függvénye. De a legtöbb bonyolult rendszerben minden pontnak van egy egyedi tulajdonsága is, amely akkor is nyilvánvaló, ha nem ismerjük az adott pont kapcsolatainak a számát. A weboldalak, vállalatok és a színészek belső tulajdonságai befolyásolják, hogy milyen sebességgel gyűjtnek be linkeket egy piaci versenyen alapuló környezetben. Egyesek nagyon későn jelennek meg, és mégis rövid idő alatt elragadják az összes linket. Másoknak sikerül hamar elindulni, de mégsem lesznek igazán sikeresek, mert az előnyüket nem tudják felhasználni arra, hogy középponttá váljanak. Ha figyelembe akarjuk venni a legtöbb hálózatban folyó ádáz küzdelmet, el kell ismernünk, hogy minden pont különböző.

## 2.

Néhány ember ismeri annak a trükkjét, hogy minden véletlen találkozásból tartós ismeretségi kapcsolatot alakítson ki. Bizonyos vállalatok minden vásárlójukat kitartó partnerükké teszik. Egyes weboldalak magukhoz láncolják látogatóikat. Mi a közös a társadalom, az üzlet és a világháló e pontjaiban? Nyilvánvaló, hogy mindegyik rendelkezik egy olyan belső tulajdonsággal, amely a többiek elé helyezi. Bár távol vagyunk attól, hogy a siker általános titkát megfejtsük, meg tudjuk vizsgálni azt a folyamatot, ami a győzteseket elválasztja a vesztesektől: a komplex rendszerekben való versenyzést.

A verseny szempontjából minden pontnak van alkalmassága. Ez az a képességünk, aminek segítségével a környezetünkben lévőkhöz képest több barátot szerezhethetünk; vagy egy vállalat jártassága a

vásárlók elcsábításában és megtartásában más vállalatokhoz képest; egy színész adottsága, hogy a többi, babérra vágyó színészhez viszonyítva őt szeressék, és rá emlékezzenek; a weboldalnak az a képessége, hogy a figyelmünkért versengő más oldalak milliárdjai közül naponta hozzá térjünk vissza. Ezzel mérhető egy pontnak az a képessége, amellyel a verseny során az élvonalban marad. Az alkalmasságnak az emberek esetén genetikai gyökerei lehetnek; a vállalatoknál a termék és a gazdálkodás minőségével lehet kapcsolatos, a színészeknek a tehetsége befolyásolhatja, míg egy webhelynek a tartalma.

A hálózat minden pontjához rendelhetünk egy alkalmasságot, amely a kapcsolatokért való versenyzési képességét jelenti. Például az én weboldalam alkalmassága lehetne 0,00001, míg a Google-é 0,2. Ezeknek a számoknak a konkrét értéke lényegtelen; viszont az arányuk jól tükrözi, hogy egymáshoz viszonyítva hány látogatót vagyunk képesek az oldalunkra csábítani. Valóban könnyen lehet, hogy az átlagember közel húszszorosul hasznosabbnak találja a Google-t, mint az én weboldalamat.

Az alkalmasság bevezetése nem szünteti meg a növekedést és a népszerűségi kapcsolódást, a hálózat kialakulását irányító két mechanizmust. Az viszont változik, hogy a verseny során mit tekintünk vonzónak. A skálafüggetlen modellben feltételeztük, hogy a pont vonzását egyedül a kapcsolatainak száma határozza meg. A verseny során az alkalmasság szintén szerepet játszik: a nagyobb alkalmassággal rendelkező pontokhoz a többiek gyakrabban kapcsolódnak. Egyszerűen bevezethetjük az alkalmasság fogalmát a skálafüggetlen modellbe, ha feltesszük, hogy az előnyben részesítő kapcsolódást a pont alkalmasságának és a kapcsolatok számának szorzata határozza meg. Minden új pont az alkalmasságból és az összekapcsoltságból számolt szorzatok<sup>12</sup> összehasonlításával dönt arról, hogy hová kapcsolódjon az összes elérhető pont közül, és nagyobb valószínűséggel kapcsolódik azokhoz, amelyeknek nagyobb ez a szorzatuk, tehát vonzóbbak. Két, azonos számú linkkel rendelkező pont közül a nagyobb alkalmassággal rendelkező gyűjt be gyorsabban kapcsolatokat. Ha azonban két pontnak azonos az alkalmassága, akkor még mindig a régebbinek van előnye.

<sup>12</sup> A skálafüggetlen modellben annak a valószínűsége, hogy egy új pont egy  $k$  kapcsolattal rendelkező másik ponthoz kapcsolódik  $k/\sum_i k_i$  lesz. Az alkalmassági modellben minden pont egy további jellemzővel, az  $\eta$  alkalmassággal is rendelkezik. Annak a valószínűsége, hogy egy  $k$  kapcsolattal és  $\eta$  alkalmassággal rendelkező ponthoz kapcsolódjunk,  $k\eta/\sum_i k_i\eta_i$ . Mindkét kifejezésben az összeg, amelyet a hálózatban jelen lévő összes pont szerint veszünk, normálja a valószínűségi eloszlást.

Ez az egyszerű alkalmassági modell - amely magában foglalja a versenyt és a növekedést - volt az első kísérletünk arra, hogy a Google sikerét megmagyarázzuk. Gyors javítás volt, amely lehetővé tette, hogy a pontok között különbséget tegyünk, és esélyt adjunk a későn jövőknek. Hamarosan kiderült, hogy az alkalmasság ennél sokkal több következménnyel jár. Gyors javításunk váratlan ablakot tárt ki, és a jelenségek gazdag családját ismerhettük meg, amely teljesen láthatatlan egy egyenlőkből álló, alkalmasságmentes világegyetemben.

### 3.

Ginestra Bianconi elsőéves doktorandusz volt, és a doktori iskolának csupán néhány hónapja diákja, amikor megkértem, hogy az alkalmassági modell tulajdonságait vizsgálja meg. Reméltem, hogy megértjük, hogyan változott majdnem egy éjszaka alatt a Google középponttá. A Rómában született és nevelkedett Bianconit a fizika iránti szokatlan szenvedélye és igen alapos statisztikai mechanika tudása hozta kutatócsoportunkba. Az alkalmassági modell viszonylag érdekes, de matematikailag nem túlságosan nagy kihívást jelentő és biztonságos feladatnak tűnt egy új diák számára. Bianconi gyorsan megmutatta, mekkorát tévedtem ebben. Először is a feladat matematikailag messze nem rutin jellegű volt. Másodsor: kiderült, hogy sokkal érdekesebb, mint gondoltam. A komplex hálózatok mély és meglepő tulajdonságainak megszámlálhatatlan rétege került napvilágra, amelyek jelentősen gazdagították a hálózat felépítésének és fejlődésének megértését.

Bianconi számításai először azt a gyanúkat erősítették meg, hogy az alkalmasság jelenlétében nem szükségszerű, hogy a korán érkező legyen a győztes. Sokkal inkább igaz, hogy az alkalmasság kezében van a karmesteri pálca, amellyel a középpontokat felemeli vagy eltörli. A skálafüggetlen modell szerint a hálózatban a pontok kapcsolatainak száma az idő négyzetgyökével arányosan nő. Az alkalmassági modell ettől lényegesen eltérő viselkedést jósol. Nem változtat azon, hogy a pontok a linkeket egy  $t^\beta$  hatványfüggvénynek megfelelően gyűjtik. De a  $\beta$  (béta) dinamikus kitevő, amelyik azt méri, hogy milyen gyorsan szerez egy pont új kapcsolatokat, már minden egyes pontra különböző. A  $\beta$  kitevő arányos a pont alkalmasságával: egy, a többi pontnál kétszer alkalmasabb pont gyorsabban gyűjt be linkeket, mert a dinamikus kitevője kétszer olyan nagy. Ezért az a sebesség, amellyel a pont kapcsolatokat szerez, többé nem a pont korától függ. Függetlenül attól, hogy egy pont mikor csatlakozik a hálózathoz, egy magas alkalmassággal rendelkező pont hamarosan leahagyja az összes, kevésbé alkalmas pontot. A Google erre a legjobb bizonyíték: egy későn jövő, aki nagyszerű keresőtechnológiával versenytársainál gyorsabban gyűjtött linkeket, és végül túlszárnyalta mindet. Nem a kor számít.

A skálafüggetlen modell mögötti dinamikus kép hasonlít egy zsúfolt egysávos országútra, amelyen minden kocsinak az előtte lévő autót kell követnie. Elkerülhetetlenül a pályára elsőként belépő autó lesz a győztes, a kor legyőzi a sebességet. Az alkalmassági modellben, ahol a pontok különböző alkalmasságúak és különböző sebességgel gyűjtik a kapcsolatokat, a versenyzésre sokkal több lehetőség van. Ez egy széles, többsávos országúton folyó versenyre hasonlít, amelyben különféle gyártmányú és márkájú autók versenyeznek. Az autók egymás után szállnak be a versenybe, a motorháztető alatt mindegyikben különböző motor van, és a kormány mögött különböző tehetségű vezetők. Elkerülhetetlen, hogy a versenyautók lekörözzék a mikrobuszokat és a sportjárműveket.

Az alkalmassági modell, amely bevezette a versenyt a bonyolult hálózatokba, új kérdéseket vetett fel. A skálafüggetlen modellben

megfigyelt hatványfüggvény abból a tényből eredt, hogy minden pont ugyanazt a dinamikus szabályt követi a kapcsolatok megszerzésében; egy hálózatban, ahol bizonyos pontok kapcsolatai lassan nőnek, míg mások nagyon gyorsan gyűjtik a linkeket, ez a gondos egyensúly jelentősen felborul. Jelen lesznek-e a hatványfüggvények egy ilyen verseny esetén - alkalmazhatóak-e az alkalmassági modellre? Továbbra is skálafüggetlenek lesznek-e a verseny által irányított hálózatok? Vagy a linkekért folyó ádáz küzdelem tönkreteszi a rend jeleit, amelyet feltártunk? Megpróbáltuk megérteni, hogyan alakítja a verseny a hálózat topológiáját, s eközben meglepő kerülőútra jutottunk: időben visszajutottunk a kvantumelmélet három óriásához, Bose-hoz, Einsteinhez és Planckhoz.

#### 4.

1924 júniusában Albert Einstein egy levelet és egy rövid angol nyelvű kéziratot kapott Dakkából egy ismeretlen indiai fizikustól, Satyendranath Bose-tól. Einstein nem tudott róla, de a kéziratot nem sokkal korábban a londoni Philosophical Magazine of the Royal Society elutasította. Einsteinnek annyira megtetszett a kézirat, hogy félretette saját munkáját, és lefordította németre, majd közbenjárt, hogy a Zeitschrift für Physik folyóirat közölje. Még egy dicsérő megjegyzést is hozzátett: „Véleményem szerint a Planck-képlet Bose-féle levezetése fontos előrelépést jelent. A módszer az ideális gáz kvantumelméletét is megadja, ahogy azt máshol részletesen kidolgozom majd.” Mitől jött izgalomba a már Nobel-díjas Einstein annyira, hogy elkezdjen egy ismeretlen fizikus publikálatlan kéziratán alapuló új problémán dolgozni? Ahhoz hogy ezt teljesen megérthessük, vissza kell mennünk még két évtizedet. A tizenkilencedik század fordulóján a német fizikus, Max Planck meg akart oldani egy, a fizikus közösség számára fontos problémát: hogyan bocsátanak ki fényt és hőt a tárgyak? Két, egymással versengő elmélet létezett erre, mindegyik érvényes volt a kísérleti adatok egy részére, de nem az összesre. Korábban a két elmélet összeegyeztetésére irányuló próbálkozások eredménytelenek voltak. 1900-ban Planck volt az első, akinek sikerült az összes kísérletre tökéletesen illeszkedő kifejezést találni, amelyet ma Planck-képletnek neveznek. Nagy árat fizetett azonban, mert be kellett vezetnie egy ad hoc (önkényes, nem indokolható) feltételt, mely szerint a fény és hő kis csomagokban, diszkrét kvantumokban kerül kibocsátásra. Ez az ötlete figyelmen kívül hagyta azt a korabeli nézetet, hogy a fény és az elektromágneses sugárzás hullám, és nem elkülönülő részecskékből áll. Einstein az elsők között volt, aki komolyan vette Planck hipotézisét. Felhasználta azt a feltevést, hogy a fény tényleg parányi, fotonoknak nevezett részecskékből áll, és megjósolta a fotoelektromos hatást, amelynek felfedezéséért 1922-ben Nobel-díjjal tüntették ki. Planck a kvantumhipotéziséért 1919-ben Nobel-díjat kapott - Einstein jelölte őt a díjra.

1924-ben a fényre vonatkozó kvantumhipotézis még mindig problémás volt: nem létezett a Planck-képlet kvantummechanikai levezetése. Miközben ez a fizikushallgatóknak ma már egyszerű

probléma, abban az időben minden levezetésére irányuló kísérlet sikertelen volt, mígnem Bose egy merész megoldást javasolt.

Mit súghatott Bose Dakkából, ami a fizika két titánja, Einstein és Planck számára ismeretlen volt? A tizenkilencedik században a fizikusok azt hitték, hogy az atomok megkülönböztethetők és külön-külön megszámolhatóak. Gondoljunk a szerencsekerékben ugráló számozott golyókra, amelyeket a győztes lottószámok húzásánál használnak. Ha kivesszünk egy golyót a forgódobból, akkor a lottózók milliói pontosan fogják tudni, hogy melyiket választottuk ki, hiszen a golyókra számok vannak festve. De az a képességünk, hogy bizonyos, atomoknál kisebb részecskék között különbséget tegyünk, csupán illúzió, amelyet a mindennapi életből veszünk át - ezt állította Bose. A fényrészecskék igazából egyformák, számozatlanok és tökéletesen megkülönböztethetetlenek. Bose megmutatta, hogy ha a statisztikus mechanikát és a termodinamikát úgy módosítjuk, hogy bevezetjük azt a tényt, hogy bizonyos, atomoknál kisebb részecskék valóban egyformák, akkor a Planck-törvény könnyen levezethető.

Bose cikke még mindig a kiadónál volt, amikor Einstein megjelent a porosz akadémia előtt, hogy bemutassa saját eredményeit, amelyeknek azt a címet adta, hogy Quantum Theory of Single-Atom Gases, azaz az egyatomos gázok kvantumelmélete, amelyben Bose módszerét gázmolekulákra terjesztette ki. Hat hónap múlva készen volt egy másik publikációja, a Second Treatise (Második értekezés). Ezekben a cikkekben Einstein megjósolta azt a nagyon különös jelenséget, amelyet ma Bose-Einstein-kondenzációnak neveznek.

Szobahőmérsékleten egy gáz atomjai különböző sebességgel rohannak egymásba. Egyesek gyorsak, mások lassúak. A fizika nyelvén egyesek nagy energiával rendelkeznek, mások kicsivel. Ha a gázt lehűtjük, akkor összes atomja lelassul. Ahhoz, hogy az atomokat megállítsuk, a gázt egy elérhetetlen hőmérsékletre, az abszolút nulla fokra kellene lehűtenünk. Einstein azt jósolta meg, hogy ha eléggé lehűtenek egy olyan gázt, amely egymástól megkülönböztethetetlen atomokból áll, akkor a részecskék jelentős része beáll a legalacsonyabb energiaszintre. Azaz az atomok az abszolút nulla fok felett, egy kritikus hőmérsékleten beaknyszeríthetők a legalacsonyabb energiájú állapotba. Amikor a részecskék elérik ezt az állapotot, akkor az anyag egy új állapotát hozzák létre, amelyet Bose-Einstein-kondenzátumnak neveznek.

Einstein 1925-ös jóslatát nagy szkepticizmussal fogadták. Még a galaxisok közti tér leghidegebb pontjai is túl melegek a Bose-kondenzáció létrejöttéhez. A kívánt hőmérséklet elérésének lehetetlensége - a legtöbb atom estén egy Kelvin-fok milliomod része - az előrejelzést kis fizikai jelentőségűvé és megkérdőjelezhető érvényűvé tette. Habár rövid időre a szuperfolyékony héliumtól a szupravezetőkön át különböző rendszerekben sikerült elcsípni, Einstein jóslata hetven éven át bizonyíték nélkül maradt. Aztán 1995-ben a Colorado államban lévő Boulderben az Egyesült Államok Mérésügyi Hivatalának egy csoportja, amelyet Eric A. Cornell és Carl E. Weiman vezetett, rubídiumatomokat hűtött le olyan alacsony hőmérsékletre, hogy Bose-Einstein-kondenzátumot alkossanak.

Cornell és Weiman felfedezésének nagyságát csak hat évvel később, 2001-ben jutalmazták fizikai Nobel-díjjal. Felfedezésük nem csupán a legapróbb részletekig igazolta Einstein előrejelzését; de az atomfizikában is forradalmat idézett elő. Ma már értjük, hogy Einstein felfedezése a gázokon túl is alkalmazható. A részecskék legalacsonyabb energiaszinthez történő kondenzációjával párhuzamos események sok olyan kvantumrendszerben is jelen vannak, amelyek kevés hasonlóságot mutatnak egy valódi gázzal. A Bose-Einstein-kondenzáció az elméleti fizikusok eszköztárának bevált része lett, amely olyan különböző jelenségek megértését is segíti, mint a csillagok kialakulása és a szupravezetés. Ehhez az eszköztárhoz fordult Bianconi, amikor megpróbálta az alkalmassági modell viselkedését megérteni.

## 5.

A világhálón nincsenek atomoknál kisebb részecskék, és a hálózatoknak „energiaszintjei” sincsenek, legalábbis a szó fizikusi értelmében. Akkor miért beszélünk a Bose-Einstein-kondenzációról? Ezt kérdeztem Ginestra Bianconitól 2000 egyik vasárnap délutánján, amikor rövid időre beugrottam az egyetemre néhány cikkért. Miközben már mentem el, ő nagyon izgatottan mondta, hogy valami olyat talált, ami érdekes lehet. „Most nincs időm - muszáj volt ezt válaszolnom, mert négyéves fiam az autóban várt rám. - Majd hétfőn találkozunk.” Bose-Einstein-kondenzáció? Ki hallott valaha is a kvantummechanikán kívül kondenzátumról? Neki az alkalmassági modellen kellett volna dolgoznia, amelyet a klasszikus fizika jól ismert törvényei irányítanak. Mi a csoda köze lenne a kvantummechanikának a webhez vagy az ismeretségi hálózatokhoz? Így morfondíroztam magamban a Notre Dame-tól Chicagóig tartó kétórás autótút alatt. Ám hétfőn meglepetés várt benn.

Egy egyszerű matematikai átalakítással<sup>13</sup> Bianconi az alkalmasságot az energiával helyettesítette, és az alkalmassági modell minden pontjához egy energiaszintet rendelt hozzá. A számítások hirtelen nem is gyanított értelmet nyertek: emlékeztetni kezdtek azokra, amelyekkel nyolcvan évvel korábban Einstein találkozott, amikor felfedezte a kondenzátumot.

<sup>13</sup> A transzformáció során minden  $\eta$  alkalmassága ponthoz az  $\varepsilon = (-1/\beta) \log \eta$  képlettel megadott energiaszintet kellett hozzárendeljük, ahol  $\beta$  a Bose-Einstein-kondenzációban az inverz hőmérséklet szerepét játszó paraméter.

Ez lehetett véletlen, következmények nélküli egyezés is. Azonban tényleg létezett egy precíz matematikai leképezés az alkalmassági modell és egy Bose-gáz között. A leképezés szerint a hálózat minden egyes pontja egy energiaszintnek felel meg a Bose-gázban. Minél nagyobb a pont alkalmassága, annál kisebb a neki megfelelő energiaszint. A hálózat linkjeiből lettek a gázban lévő részecskék, amelyekhez egy adott energiaszintet rendeltünk. Egy új részecske hozzáadása a hálózathoz ugyanolyan, mintha új energiaszintet adnánk a Bose-gázhoz; és az új link pedig ugyanaz, mintha új Bose-részecskéket injektálnánk a gázba. A leképezés szerint a komplex

hálózatok olyanok, mint egy óriás kvantumgáz, a kapcsolatok pedig úgy viselkednek mint az atomoknál kisebb részecskék.

A hálózatok és a Bose-gázok közötti egyezés nagyon váratlan volt. Elvégre a Bose-gáz a kvantummechanika egyedi teremtménye. Az atomoknál kisebb részecskék fizikájának sajátos törvényei irányítják, és olyan, a józan észnek ellentmondó jelenségek sorát teszik lehetővé, amelyeknek a makroszkopikus világban nincsen megfelelője. Ezek a törvények nagyon különböznek azoktól, amelyek eddig a hálózatokkal kapcsolatban ebben a könyvben előfordultak. Például az internet pontjai és linkjei makroszkopikus objektumok, routerek és kábelek, amelyeket megérinthetünk, és elvághatunk, ha akarunk. Senki nem hinné komolyan, hogy ezeket a kvantummechanika irányítaná. A hálózatokat évtizedeken keresztül mégis olyan geometriai objektumoknak tekintettük, amelyek szigorúan a matematika birodalmába tartoznak. Az a felfedezés, hogy a valódi hálózatok gyorsan fejlődő dinamikus rendszerek, a komplex hálózatok elméletének tanulmányozását többek közt a fizikusok karjaiba taszította. Lehetséges, hogy egy másik gondolkodásmódbeli váltás is vár ránk. Bianconi leképezése meggyőzően mutatta azt, hogy a viselkedésüket irányító törvények szempontjából a hálózatok és egy Bose-gáz azonosak. A bonyolult hálózatok vonásai a mikro- és makrovilágot hidalják át, olyan meglepő következményekkel, mint magának a hídnak a létezése.

A leképezés legfontosabb jóslata, hogy bizonyos hálózatokban Bose-Einstein-kondenzáció megy végbe. Ennek a jóslatnak a következményeit anélkül is megérthetjük, hogy bármit tudnánk a kvantummechanikáról: bizonyos hálózatokban a győztes egyszerűen mindent visz. Ahogy a Bose-Einstein-kondenzátumban minden részecske a legalacsonyabb energiaszintre áll be, és a többi energiaszint kiürül, úgy egyes hálózatokban a legalkalmasabb pont elvileg magához ragadhatja az összes linket, és lehet, hogy a többi pontnak semmit sem hagy. A győztes mindent visz.

## 6.

Minden hálózatnak megvan a saját alkalmassági eloszlása, amiből megtudhatjuk, hogy mennyire hasonló vagy különböző pontok vannak a hálózatban. Azokban a hálózatokban, ahol a pontok többségének hasonló az alkalmassága, az eloszlás egy keskeny csúccsal rendelkező haranggörbe. Más hálózatokban a pontok alkalmassági tartománya széles, és néhány pontnak sokkal nagyobb az alkalmassága, mint a többié. Például könnyen előfordulhat, hogy a Google több tízezerszer is érdekesebb minden hálón barangoló számára, mint egy tetszőleges személyes honlap. Az évtizedekkel korábban a kvantumgázok leírására kifejlesztett matematikai eszközökkel valóban arra jutottunk, hogy a pontok és a kapcsolatok természetétől függetlenül, a hálózat viselkedését és topológiáját alkalmassági eloszlásának alakja határozza meg. Bár a webtől Hollywoodig az alkalmasság eloszlása minden egyes rendszerben különböző, Bianconi számolása azt mutatta, hogy a topológia szempontjából minden hálózat két lehetséges kategória egyikébe tartozik. A legtöbb hálózatban a verseny nem gyakorol jól

észrevehető hatást a hálózat topológiájára. Egyes hálózatokban azonban a győztes viszi el az összes linket, ami a Bose-Einstein-kondenzáció nyilvánvaló jele.

Az első kategóriába tartozik az összes olyan hálózat, amelyben az ádáz verseny ellenére a skálafüggetlen topológia megmarad. Ezeknek a hálózatoknak a viselkedésére „a gazdag egyre gazdagabb” elv jellemző, ami azt jelenti, hogy a legalkalmasabb pontból lesz elkerülhetetlenül a legnagyobb középpont. A győztes előnye azonban soha nem jelentős. A legnagyobb középpontot szorosan követik a kisebbek, amelyeknek majdnem annyi linkje van, mint a legnagyobb alkalmassággal rendelkező pontnak. Tetszőleges pillanatban létezik a pontoknak egy hierarchiája, amelyben a fokszámoszlás hatványfüggvény szerinti. A legtöbb összetett hálózatban a hatványfüggvények és a kapcsolatokért folyó harc nem zárják ki egymást, hanem békésen megférnek egymás mellett.

A második kategóriába tartozó hálózatokban a győztes mindent visz, ami azt jelenti, hogy a legnagyobb alkalmassággal rendelkező pont magához ragadja az összes linket, és nagyon keveset hagy a többi pontnak. Az ilyen hálózatok csillagszerkezetűek, és minden pontjuk egy középponthez kapcsolódik. Az ilyen kerékszerkezetű hálózatban egy középponthez küllőszerűen csatlakoznak a linkek, és nagy szakadék tátong a magányos középpont és az összes többi csúcs között, így „a győztes mindent visz” hálózat nagyon különbözik a korábban megismert skálafüggetlen hálózattól, ahol a középpontok közt hierarchia van, és a méreteloszlás hatványfüggvényt követ. „A győztes mindent visz” hálózat nem skálafüggetlen, hanem egyetlen középpont és sok kis pont van benne. Ez nagyon fontos különbség. Valójában a Google gyors felemelkedése nem „a győztes mindent visz” jelenséget szemlélteti; csupán azt mutatja, hogy az „alkalmas” gazdag lesz.

Szögezzük le, a Google az egyik legalkalmasabb középpont. De soha nem sikerült az összes linket megszereznie, és csillaggá válnia. A reflektorfényt megosztja néhány ponttal, amelyek kapcsolatainak száma az övéhez hasonló. Amikor a győztes visz mindent, nincs hely vetélytárs számára.

Van-e olyan létező hálózat, amelyben tényleg megfigyelhető a „győztes mindent visz” viselkedés? Ma már meg tudjuk mondani előre, hogy egy adott hálózat a „gazdag egyre gazdagabb” vagy a „győztes mindent visz” sémát fogja követni, ha rápillantunk az alkalmassági eloszlására. Az alkalmasság azonban mégis nehezen megfogható mennyiség marad, mivel még csak most fejlesztik azokat az eszközöket, amelyekkel az egyes pontok alkalmasságát pontosan megmérhetnénk. De a „győztes mindent visz” viselkedés, ha jelen van, olyan egyedi és nyilvánvaló hatású a hálózat szerkezetén, hogy nehéz nem észrevenni. Szétrombolja a skálafüggetlen topológiát jellemző középpontok hierarchiáját, és egy csillag alakú hálózattá változtatja, amelyben egyetlen pont magához vonzza az összes linket. Van egy olyan hálózat, amelyben biztosak lehetünk egy pontban, amely hasonlít a Bose-Einstein-kondenzátumra. Ezt a pontot Microsoftnak hívják.



Bill Gates és Paul Allen együttműködésének legismertebb terméke minden kétséget kizáróan a Microsoft Windows. Leírni sem tudjuk, milyen nagy hatással van számítógépek által uralt világunkra. A Windows egy világnézeti megosztottság kezdetét jelentette: vagy szereti, vagy gyűlöli valaki a Windowst. Nincs köztes állapot. Azonban függetlenül attól, hogy valaki melyik táborhoz tartozik, a legvalószínűbb, hogy használja. Annak ellenére, hogy a Windows mindenütt megtalálható, mégsem ez Bill Gates legfontosabb felfedezése. A Gates-Allen páros működésében messze a legnagyobb hatású rész a szoftver eladásának ötlete volt. Ez korábban elképzelhetetlen volt. Míg a számítógép egy fizikai egység, a szoftver csak információ, soha véget nem érő nullák és egyesek láncolata egy lemezen vagy CD-ROM-on. A legkülönösebb mind közül az operációs rendszer, amely semmi mást nem csinál, mint más nullák és egyesek láncolatát működteti, és egy nélkülözhető hidat alkot a különböző alkalmazások és a hardver között. Ezért kezdetben a Microsoft üzleti tervét mindenki támadta. A hackerek gyűlöltek, mert úgy gondolták, hogy az információnak és a programoknak ingyenesnek kell lenniük bárki számára. Az üzletemberek szörnyülködtek, mikor megtudták, hogy egy ilyen könnyen másolható dolgot próbálnak eladni.

Ahogy azt mindenki tudja, a Windows elterjedt, annak ellenére, hogy a Microsoft nem az első jelentkező volt ezen a területen. Amikor a Windows első változata megjelent, úgy nézett ki, mint az Apple forradalmian új operációs rendszerének rosszul sikerült koppintása. Az Apple azonban mereven ragaszkodott hardverének monopóliumához, miközben a PC szabad utat adott az összes számítógépgyártónak. Ezért a PC-k lettek számítógépek uralta világunkban az uralkodók, és a hullám hátára vette Bill Gatest és az ő Windowsát.

Gondoljunk az operációs rendszerekre mint linkekért, azaz felhasználókért versengő pontokra. Minden egyes alkalommal, amikor egy felhasználó számítógépén installálja a Windowst, egy kapcsolat adódik hozzá a Microsofthoz. A skálafüggetlen modell azt jósolná, hogy a legrégebbi operációs rendszernek kell a legnépszerűbbnek lennie. Ebben az esetben nekünk a primitív DOS-t kellene futtatnunk. A realisabb alkalmassági modellben az alkalmasabb operációs rendszer korától függetlenül megszerzi a vevőket a kevésbé alkalmas rendszertől.

Ha a skálafüggetlen hálózatok „az alkalmas gazdagodik” viselkedése érvényesülne a piacon, akkor kellene hogy létezzen az operációs rendszereknek egy hierarchiája, és a legnépszerűbbet szorosan követné néhány kevésbé népszerű versenyző. Ez a rangsor valóban jelen van a legtöbb iparágban. Vegyük például a számítógépgyártókat. 2000 második negyedében a világszerte eladott gépek alapján a Compaq piaci részesedése 13 százalék volt, amelyet szorosan követett a Dell 11 százalékkal. A Hewlett-Packard és az IBM részesedése egyaránt 7 százalék volt, a Fujitsu-Siemens az összes eladás 4 százalékát szerezte meg. Az eladások döntő része, 55 százaléka, más gyártóké volt, és ezek még kisebb részekre bontották a piacot. Mivel a legtöbb felmérés csak az öt legnagyobb számítógépgyártót adja meg, nehéz ellenőrizni, hogy vajon a piaci

részesedések valóban hatványfüggvényt követnek-e. De nem lennék meglepve, ha a válasz igen lenne. A szoros rangsor azt sugallja, hogy a számítógépgyártók leírhatóak „az alkalmas gazdagodik” állapottal, amelyben egyetlen pont sem uralja a piacot.

Az operációs rendszerek piacán azonban az ilyen egészséges verseny és hierarchia teljesen hiányzik. Igaz, hogy nem a Windows az egyetlen operációs rendszer. Minden Apple terméken továbbra is fut a Mac Operációs Rendszer, a Mac OS. A DOS, a Windows előfutára még ma is sok PC-n fut. A Linux mindenki számára ingyenes operációs rendszer, és a Microsoft egyetlen kihívója - piaci részesedése növekszik. A UNIX többségében sok számolást igénylő számítógépeken fut, amelyet kizárólag kutatók és hálózati mérnökök használnak. De mindezek az operációs rendszerek eltörpülnek a Windows árnyékában, amelynek különböző változatai a PC-k hihetetlen nagy részén - 86 százalékán - zümmögnek. A második legnépszerűbb operációs rendszer, az Apple Mac OS rendszere, csak a piac 5 százalékával rendelkezik. Ezt az ősi DOS követi szorosan 3,8 százalékkal, és utána a Linux következik 2,1 százalékkal. Minden más operációs rendszer - beleértve a UNIX-ot is - a piac kevesebb mint 1 százalékát birtokolja.

Lényegében véve a Microsoft visz mindent. Csomópontként nem egyszerűen egy kicsit nagyobb, mint a következő versenytárs. Vevőinek száma össze sem hasonlítható a többiekével. Mindnyájan végtelenül alkalmazkodó Bose-részecskeként viselkedünk, és a kényelem a Windows-felhasználókat arctalan tömeggé sűríti össze. Mikor új számítógépeket vásárolunk, és installáljuk a Windowst, gondosan tápláljuk és fenntartjuk a Microsoft körül kifejlődött kondenzátumot. Az operációs rendszerek piaca egy olyan hálózat klasszikus vonásait viseli, amelyben Bose-Einstein-kondenzáció ment végbe, és világosan szemlélteti a „győztes mindent visz” viselkedést. Miközben sok operációs rendszer a vevők figyelméért és piaci részesedésért verseng, a Microsoft befagyott a kondenzátumállapotba, egy csillagba, amely a vásárlói kapcsolatok döntő többségét birtokolja.

## 8.

A pontok mindig versenyeznek a kapcsolatokért, hiszen egy összekapcsolt világban a linkek jelentik a túlélést. A legtöbb esetben ez nyílt verseny, mint amikor a vállalatok a vevőkért versenyeznek, a színészek szereplési lehetőséget próbálnak szerezni vagy az emberek ismeretségi kapcsolatokért versenyeznek. Más rendszerekben a dinamika kifinomultabb. Például ha egy sejtben molekulák kapcsolatokat szereznek, abból a szervezet egésze profitál. De akár szeretjük, akár nem, mindnyájan egy bonyolult verseny részesei vagyunk. Amikor bizonyos pontokat kizárunk, másokat pedig leszavazunk, mindig vannak győztesek és vesztesek. A körülöttünk lévő hálózatok ennek a versenynek az ismérveit hordozzák a kapcsolatok és pontok rétegében.

Amíg a hálózatokat véletlenszerűeknek gondoltuk, statikus gráfként modelleztük őket. A skálafüggetlen modell mutatja ráébredésünket a valóságra: a hálózatok dinamikus rendszerek, amelyek új pontok és

kapcsolatok hozzáadásával állandóan változnak. Az alkalmassági modell lehetővé teszi, hogy versenyhelyzetben írjuk le a hálózatokat, amelyekben a pontok ádázul harcolnak a linkek megszerzéséért. A Bose-Einstein-kondenzátum most már megmagyarázza, hogyan nyílik lehetőség néhány győztes számára, hogy mindent elvigyen.

Eldobhatjuk-e a skálafüggetlen modellt az alkalmasság bevezetésével nyert előnyökért? Semmiképp. Azokban a hálózatokban, amelyek „az alkalmas gazdagodik” viselkedést mutatják, a verseny skálafüggetlen topológiához vezet. Az eddig vizsgált hálózatok - a web, az internet, a sejt, Hollywood és sok más valódi hálózat - ebbe a kategóriába tartoznak. A győztes megosztja a reflektorfényt a középpontok folytonos sorával.

A Bose-Einstein-kondenzáció persze felkínálja annak az elvi lehetőségét is, hogy bizonyos rendszerekben a győztes elviheti az összes linket. Amikor ez történik, akkor a skálafüggetlen topológia eltűnik. Eddig a valódi rendszerek között csak az operációs rendszerek piaca tűnik ilyennek, élén az uralkodó középponttal, a Microsofttal. Van-e még olyan rendszer, amelyik hasonló viselkedést mutat? Nagyon valószínű. Azért eltart még egy ideig, míg mindet megtaláljuk.

Az utóbbi néhány évben utunk hálózatos világegyetemünkről szóló új és lenyűgöző felfedezések felé vezetett. A hálózatok fejlődését irányító mechanizmusok felfedezése nyomán megértettük annak az eszköztárnak az egyetemességét, amelyet a természet használ, hogy létrehozza a bennünket körülvevő világot. Napjainkban a kutatók a sejtbiológiától az üzleti életig terjedő területeken kezdték el feltárni a felfedezett bonyolult topológia következményeit. Hogyan befolyásolják ezek a topológiai hatások a bonyolult rendszerek stabilitását? Hogyan terjednek a vírusok a valódi hálózatokban? Hogyan vezet a hibák sorozata végzetes problémákhoz? Bár sok minden maradt, amit a hálózatok szerkezetével és viselkedésével kapcsolatban még meg kell értenünk, mostanra elkezdtek a gyakorlatba átültetni az eddig elért szellemi áttöréseinket.

# A KILENCEDIK LÁNCSZEM

## *Az Achilles-sarok*

Denverben egy nyári délutánon a hőmérséklet negyven fok fölé emelkedett, és a hivatalnokok százai mind iszkoltak az irodaházakból autóikba, hogy a beépített légkondicionáló hűvös fuvallatánál fellélegezhessenek. Hosszú sorok alakultak ki üzemanyagért és jégkockáért, a közlekedési lámpákat kikapcsolták, a kórházak és a légi irányítók csak sürgősségi alapon működtek, és a liftekben rekedt emberek hiába nyomkodták a vészcsengőt. „Forróbb napokon egy modem irodaépület hihetetlen gyorsan inkubátorrá alakulhat át - mondta egy hivatalnok. - Nincs szellőzés, és nem lehet ablakot nyitni.”

Könnyen elfelejtjük, hogy mennyire függünk a modern technikától. Ahhoz, hogy valóban értékeljük, néha át kell élnünk egy-egy komolyabb kimaradást; olyant például, mint ami 1996 nyarán történt, amikor a Sziklás-hegység csúcsai és a Csendes óceán között leállt minden, ami árammal működik. A szakértők már régóta tartották az 1965-ös Nagy Északkeleti Áramszünet megismétlődésétől, amelynek során harmincmillió ember maradt elektromos áram nélkül tizenhárom órán keresztül. Az anyagi kár szempontjából a nyugati energiarendszer 1996-os meghibásodása sokkal súlyosabb volt. Sokan aggódnak amiatt, hogy az energiaipar jelenlegi fejlődési iránya miatt az ilyen kimaradások az eddigieknél jóval gyakoribbá fognak válni. Ráadásul a 2001-es kaliforniai energiaválság egyáltalán nem csillapította ezeket a félelmeket.

Az 1965-ös elektromos hálózat - a mai rendszerhez képest - sokkal kevésbé volt összekapcsolt. Maine állam azért élte túl az északkeleti áramszünetet, mert szigetként működött, amelynek csak gyenge kapcsolata volt New England többi, áram nélkül maradt részével. Am az eltelt évek során az amerikaiaknak az elektromos energiától való függése elhatalmasodott, és amint áramkimaradás történt, az emberek rögtön pánikba estek. Alan Weisman a Harper magazinban írt erről; az ő véleménye szerint az áramszolgáltatók megtanulták, hogy a stabilitásukat növelhetik és a költségeiket csökkenthetik, ha az eszközeiket megosztják, és vészhelyzetben kisegítik egymást. Ennek eredménye az lett, hogy a korábban elszigetelt rendszerek elkezdtek összekapcsolódni, és létrehozták a Föld legnagyobb, emberek által készített szerkezetét, amelyben annyi vezeték van, hogy azzal elérhetünk a Holdig és vissza.

## **1.**

A hibák és a leállások egyik legfontosabb jellemzője, hogy elrontanak mindent, amit az ember épített. Könnyen megeshet, hogy az ön autójának motorjában egyetlen alkatrész meghibásodik, és emiatt kénytelen autómentőt hívni. Ugyanígy az is előfordulhat, hogy a számítógépünk áramköreibe van egy apró huzalozási hiba, és emiatt az egész számítógépet ki kell dobnunk. A természetben található rendszerek azonban másmilyenek. Földünk eddigi (geológiai) élete során a fajok kihalási sebessége minden évben egy per egymillió volt.

Tehát ha a Földön élő fajok számát 3-100 millió közöttire becsüljük, akkor ez azt jelenti, hogy ebben az évben három és száz között lesz az eltűnő fajok száma. Ám úgy tűnik, hogy az ilyen természetes kihalások kevés kárt okoznak. Évmilliók alatt a földi élővilág megdöbbentően ellenállóvá vált a hibákkal és a meghibásodásokkal szemben, és még olyan drámai eseményeket is túlélte, mint a Yucatán-meteorit becsapódása, amely a dinoszauruszokkal együtt fajok tízezreit ölte meg. Az élővilág az ember által készített rendszerekhez képest sokkal jobban viseli a hibákat.

A legtöbb élő rendszer rendelkezik egy különleges képességgel: képes nagyon eltérő környezeti feltételek esetén is életben maradni. A belső hibák hatnak a viselkedésére, ám az alapvető életfunkcióit gyakran még igen erős belső hibák esetén is képes fenntartani. Az élő rendszereknek ez a tulajdonsága szöges ellentétben van azzal, amit az ember által tervezett rendszereknél tapasztalhatunk: egyetlen alkatrész hibája gyakran az egész rendszert megbénítja. Manapság a kutatók már a tudomány minden területén felismerték, hogy a természet által „tervezett” szerkezetek ellenállóak, és reménykedhetünk abban, hogy ezeket a felismeréseket idővel fel tudjuk használni az ember által készített szerkezetekben is. Ezért a hibatűrő képesség kérdését sok területen és egyre intenzívebben vizsgálják. A szó idegen megfelelője - a „robosztusság” - az antik világban erőt és hosszú életet szimbolizáló latin robus, azaz „tölgy” szóból ered.

A hibatűrő képesség főként a biológusokat érdekli; ők azt próbálják megérteni, hogy egy sejt gyakori belső hibák és rendkívüli külső körülmények esetén hogyan képes életben maradni és működni. A társadalomtudósokat és a közgazdászokat is foglalkoztatja a kérdés; ők arra keresnek választ, hogy az emberek által létrehozott szervezetek éhezés, háború, szociális és gazdaságpolitikai változások esetén mennyire stabilak. A hibatűrő képesség vizsgálatával kapcsolatban az ökológia és a környezettudomány területén világszerte ambiciózus programok indulnak, amelyeknek célja az, hogy az ipari fejlődés romboló hatása által fenyegetett élővilágot megőrizzük az eljövendő korok számára. Az egyre erősebben összekötött távközlési rendszerekben gyakori, hogy az összetevők működési hibái elkerülhetetlenek, mégis állandóan nagyfokú készülségi állapotot kell fenntartani; a szakértők szeme előtt ezen a területen is a hibatűrő képesség lebeg.

A legtöbb olyan rendszernek, amelynek a hibatűrő képessége erős, van egy közös tulajdonsága: működőképességüket egy bonyolult, szorosan összefüggő hálózat garantálja.

Egy sejt hibatűrő képessége a sejt bonyolult szabályozó- és anyagcsere-hálózatában van elrejtve; a társadalom alkalmazkodó képességének kulcsa a kapcsolatokkal átszőtt ismeretségi háló; a gazdasági stabilitást pénzügyi és szabályozó szervezetek tartják fenn; az élővilág túlélésének titka a fajok közötti kölcsönhatások aprólékosan kidolgozott hálózatában rejtőzik. Úgy tűnik, hogy a természet sokszoros összekapcsolásokkal törekszik a hibatűrő képesség elérésére. Szinte bárhová tekintünk, ugyanazzal a hálózati szerkezettel találkozunk. Ez a választás valószínűleg több mint véletlen egybeesés.

## 2.

1999 őszén a Defense Advanced Research Projects Agency (az Amerikai Egyesült Államok egyik, kutatásért felelős állami ügynöksége), vagy DARPA, pályázati felhívást tett közzé a hibatűrő hálózatok tanulmányozására. A felhívásban ez állt: „A program elsődlegesen azoknak az új hálózati technológiáknak a fejlesztését tűzi ki célul, amelyek a jövő hálózatai számára lehetővé teszik, hogy a támadások esetén épek maradjanak, és a hálózati szolgáltatásokat fenntartsák.” Néhány hónappal a világhálóval és skálafüggetlen hálózatokkal foglalkozó cikkünk megjelenése után az ezen a területen folyó kutatásainkhoz kerestem támogatást. A DARPA felhívása kitűnő lehetőségnek tűnt számunkra, mivel a program céljai egybeestek tervezett kutatási irányunkkal. Azt reméltük, hogy a skálafüggetlen hálózatok szerepet játszhatnak a hálózatok hibatűrési képességének megértésében. A november elsejei határidejű pályázat elkészülte után leültem Albert Rékával és Hawong Jeonggal, és javasoltam, hogy ne várjuk meg a DARPA választ, hanem kezdjük el dolgozni a pályázatban megfogalmazott kérdéseken. Egy hálózat csomópontjainak a meghibásodása a hálózatot könnyen széttördelheti elszigetelt, egymással nem kommunikáló részekre. Például ha a floridai Jacksonville és Lake City összes ki- és bevezető autópályáját lezárjuk, nemcsak ezeket a városokat szigetelnénk el egymástól, hanem az egész Floridai-félsziget elérhetetlenné válna az Egyesült Államok többi részéről autópályán keresztül. Ez a jelenség a részekre hullás, ami a meghibásodó hálózatok jól ismert tulajdonsága; a matematikusok és a fizikusok ezt a kérdést sokat tanulmányozták. Egy kicsit általánosabban úgy is megfogalmazhatjuk a kérdést, hogy mennyi idő alatt esik szét egy hálózat darabokra, ha egyszer véletlenszerűen elveszünk belőle pontokat? Mennyi routert kell elmozdítanunk az internetből, hogy elszigetelt számítógépekre töredezzon, amelyek nem tudnak egymással kommunikálni?

Nyilvánvaló, hogy minél több pontot veszünk ki, annál nagyobb lesz a valószínűsége annak, hogy a pontok jelentős csoportjait elszigeteljük a többi ponttól. Ám a véletlen hálózatok kutatásával töltött évtizedek tanulságai szerint a hálózat összeomlása nem fokozatos folyamat. Néhány pont eltávolítása alig befolyásolja a hálózat épségét. Mégis, ha az eltávolított pontok száma elér egy kritikus értéket, akkor a rendszer azonnal pici részekre esik szét, amelyek közt nincsen kapcsolat. A véletlen hálózatok meghibásodásai fordított fázisátalakulást mutatnak: létezik egy kritikus küszöbérték, amely alatt a rendszer alig szenved kárt. A küszöbérték felett azonban a hálózat egyszerűen szétesik.

2000 januárjában a DARPA-pályázaton felbuzdulva egy számítógépes kísérletsorozatot hajtottunk végre, hogy teszteljük, mennyire ellenálló az internet a routerek meghibásodására. Az akkoriban elérhető legjobb internettérképből kiindulva véletlenszerűen kiválasztott pontokat távolítottunk el a hálózatból. Egy kritikus pontot vártunk, ezért fokozatosan növeltük az eltávolított pontok számát, és arra a pillanatra vártunk, mikor az internet darabokra esik. Legnagyobb meglepetésünkre a hálózat nem akart szétesni. Az összes csomópont

80 százalékát el tudtuk távolítani, és a fennmaradó 20 százalék még mindig együtt maradt, és szorosan összekapcsolt fűrtöt alkotott. Ez a felfedezés megegyezett azzal az egyre inkább tudatosuló felismeréssel, hogy az internet a többi, ember által létrehozott hálózattól eltérően nagyfokú hibatűrő képességet mutat a router-meghibásodásokkal szemben. Egy, a michigani egyetem kutatói által, Ann Arbor városkájában végzett vizsgálat alapján az interneten egy adott pillanatban tényleg több száz router hibás. E gyakori és elkerülhetetlen műszaki hibák ellenére a felhasználók ritkán vesznek észre jelentős minőségromlást az internetes szolgáltatásokban.

Hamarosan nyilvánvaló lett, hogy nem az internet különleges tulajdonságának voltunk szemtanúi. A skálafüggetlen modell segítségével generált hálózatokon végrehajtott számítógépes szimulációk azt mutatták, hogy tetszőleges skálafüggetlen hálózatból véletlenszerűen eltávolítható a pontok jelentős része anélkül, hogy a hálózat széttöredezne. A skálafüggetlen hálózatok korábban nem sejtett hibatűrő képessége egy, a véletlen hálózatokétól eltérő tulajdonság. Mivel az internetről, a világhálóról, a sejről és az ismeretségi hálózatokról tudott, hogy skálafüggetlenek, ezek az eredmények azt jelzik, hogy a hibákkal kapcsolatban jól ismert ellenálló képességük topológiájuk belső tulajdonsága - jó tudni, ha az ember ezekre a hálózatokra van utalva.

### 3.

Mi ennek a meglepő topológiai hibatűrő képességnek a forrása? A skálafüggetlen hálózatok megkülönböztető vonása a középpontok létezése: ez az a néhány, rengeteg kapcsolattal rendelkező pont, amely a skálafüggetlen hálózatokat összetartja. A műszaki hibák azonban nem tesznek különbséget a pontok között, és a kevés szomszédal rendelkező pontoknál és a nagy középpontoknál is azonos valószínűséggel jelentkeznek. Ha egy zsákban 10 piros és 9990 fehér golyó van, és a zsákból becsukott szemmel kiválasztunk tíz golyót, akkor annak a valószínűsége, hogy csak fehér golyó lesz a kezünkben, kilencvenkilenc a százhoz. Ezért a hálózatban a meghibásodások egyenlő valószínűséggel hatnak minden pontra; a kis pontok nagyobb valószínűséggel romlanak el, mert sokkal több van belőlük.

A kis pontok a hálózat épségéhez kevéssel járulnak hozzá. Ha bezárok egy véletlenszerűen kiválasztott repülőteret, akkor a legvalószínűbb, hogy a számos kis hely egyikét zárom be, olyat, mint az indianai South Bendben található repülőtér. A hiányát máshol Amerikában alig fogják észrevenni: nélküle még utazhatunk New Yorkból Los Angelesbe vagy Santa Féből Detroitba. Csak az a néhány utas kerül kényelmetlen helyzetbe, aki South Bendből indulna, vagy oda érkezne. Még ha tíz vagy húsz kisebb repülőteret egyidejűleg lezárnak, ez akkor is csak a légi forgalom kis hányadát érinti jelentősen.

A skálafüggetlen hálózatokban a meghibásodások hasonlóképpen főleg a sok kis pontot fogják érinteni, így ezek a hálózatok hibák esetén nem esnek szét. Ha kitörlünk egy középpontot, önmagában még az sem lesz végzetes, mivel a több nagy középpont folytonos hierarchiája

biztosítani fogja a hálózat sérthetetlenségét. A topológiai hibatűrő képesség így a skálafüggetlen hálózatok szerkezeti egyenetlenségében gyökeredzik: a meghibásodások a kis pontokra aránytalanul erősen hatnak.

Számítógépes szimulációnk egy döntő kérdést megválaszolatlanul hagyott: vajon minden skálafüggetlen hálózat azonos fokú hibatűrést mutat? A válaszra nem kellett sokáig várnunk. A cikkünk megjelenése előtti héten e-mailt kaptam Shlomo Havlintól, az izraeli Ramat Ganban lévő Bar-Ilan Egyetem fizikaprofesszorától. Havlin az Israeli Physical Society (Izraeli Fizikai Társulat) elnöke is volt egy ideig, és a perkolációelmélet világhírű szakértőinek egyike. A perkolációelmélet a fizikának az az ága, amely a véletlen hálózatok vizsgálatához ma széles körben használt egyik eszköztárat kifejlesztette. Az Erdős és Rényi által kapott eredmények közül később többet - tőlük függetlenül - a perkolációt tanulmányozó fizikusok is felfedeztek.

Havlin gyorsan felismerte, hogy a skálafüggetlen hálózatoknak a meghibásodásokra egészen különleges módon kell reagálniuk. Diákjaival, Reuven Cohennel és Keren Erezzel, és korábbi diákjával, Daniel ben-Avrahammal, aki jelenleg a Clarkson Egyetem professzora, nekiláttak azt kiszámítani, hogy a pontok mekkora hányadát kell eltávolítani egy tetszőlegesen kiválasztott hálózatból - véletlenszerűből vagy skálafüggetlenből - ahhoz, hogy a hálózat darabokra essen szét. Számolásuk egyrészt igazolta azt a jól ismert eredményt, hogy kritikus számú pont eltávolítása után a véletlen hálózatok szétesnek. Másrészt arra jöttek rá, hogy a skálafüggetlen hálózatokban a kritikus küszöb eltűnik azokban az esetekben, amikor a fokszámkitevő kisebb háromnál vagy egyenlő azzal. Meglepő módon a számunkra érdekes hálózatok többsége - az internettől a sejtig - skálafüggetlen, és fokszámkitevője kisebb, mint három. Ezért ezek a hálózatok csak akkor esnek szét, ha az összes pontot eltávolítják - vagyis gyakorlatilag soha.

#### 4.

MafiaBoy - a Yahoo!, az eBay és az Amazon.com elleni támadásért felelős montreali kisdíákot - egy nappal a World Trade Centert és a Pentagont ért szeptember 11-i terrorista támadás után ítélték el. Az ítélet szerint nyolc hónapot ifjúsági büntetőintézetben kellett eltöltenie, és köteles volt kétszázötven dollárt jótékony célokra adományozni. Az ítélet meghozatala előtt Gilled Oullet bíró kijelentette, hogy „ez a támadás meggyengítette a teljes elektronikus távközlési rendszert”. De az ilyen és ehhez hasonló állítások ellenére MafiaBoy tette egyáltalán nem jelentett fenyegetést az internet működésére nézve. Miközben ideiglenesen elérhetetlenné tett néhány kiemelkedő webszolgáltatót, cselekedetei az infrastruktúrában soha nem okoztak kárt. Végiggondolni sem tudjuk, hogy ennek a támadásnak a következményeinél mennyivel veszélyesebb volt a két évvel korábbi, Operation Eligible Receiver fedőnevű akció.

1997 nyarán hírek kezdtek szállingózni a National Security Agency (NSA), a Nemzetbiztonsági Hivatal háborús játékaról. A játékot azért fejlesztették ki, hogy ellenőrizzék az Egyesült Államok elektronikus



infrastruktúrájának biztonságát. Az egymásnak ellentmondó hírek szerint az NSA valahonnan felvett huszonöt és ötven közötti számítógépes szakembert azzal a feladattal, hogy hajtsanak végre egy irányított támadást a nyilvánosan hozzáférhető rendszerek ellen, és állítsák le az elektromos hálózatot, a sürgősségi szolgálatokat és hasonlókat. A sokatmondó Eligible Receivernek (alkalmas vevőkészüléknek) elnevezett gyakorlat megmutatta, hogy elképzelhető, hogy nem túl rafinált bűnözők összehangolt támadást hajtsanak végre, amelyben csak a mindenki számára, elérhető eszközöket használják fel, ám mégis nagy pusztítást képesek véghezvinni, és teljesen romba dönthetik a katonai távközlést és más létfontosságú rendszereket is. A MafiaBoy által előidézett kimaradások legfeljebb bosszantóak voltak; a felhasználók számára lehetetlenné tette, hogy hozzáférjenek a legnépszerűbb hálózati oldalakhoz. Az Eligible Receiver támadása viszont megmutatta, hogy az Egyesült Államok gazdasági és biztonsági rendszereinek ütőerei ijesztő módon sebezhetőek. Az áldozatokat egyik támadás sem véletlenszerűen választotta ki. Ösztönösen a középpontok megtizedelését tűzték ki célul.

## 5.

Elkezdünk egy új kísérletsorozatot, amelyben egy cracker<sup>14</sup> tetteit utánoztuk, aki egymás után teríti le az internet legnagyobb középpontjait.

<sup>14</sup> Újabbán a cracker szót használják azoknak a személyeknek a megkülönböztetésére, akik szakértelmüket arra használják fel, hogy ártó szándékkal behatoljanak egy számítógépes rendszerbe, például azért, hogy a rendszer leálljon vagy hogy más kárt okozzanak. Ezzel ellentétben a hacker szó pozitív értelmű, és azokat a kiváló számítógépes jártassággal rendelkező személyeket jelenti, akik online világegyetemünk határait anélkül tesztelik, hogy kárt okoznának más számítógépekben vagy más felhasználókat akadályoznának.

Hasonlóan MafiaBoyhoz és azokhoz, akik az Eligible Receiver-gyakorlatban részt vettek, többé mi sem véletlenszerűen választottuk ki a pontokat, hanem a középpontokat vettük célba. Először eltávolítottuk a legnagyobb középpontot, aztán a következő legnagyobbat és így tovább. Támadásunk következményei nyilvánvalóak voltak. Az első középpont eltávolítása nem törte szét a rendszert, mert a többi középpont még képes volt arra, hogy összetartsa a hálózatot. Néhány középpont elmozdítása után azonban a rombolás hatása már jól látható volt. Csomópontok nagy csoportjai estek ki a hálózatból, és szakadtak le a fő fűrről. Ahogy egyre tovább haladtunk, és még több középpontot távolítottunk el, tanúi lehettünk a hálózat látványos összeomlásának. A kritikus pont, amely feltűnően hiányzott a meghibásodásokra vonatkozólag, hirtelen megjelent, amikor a hálózatot támadás érte. Néhány középpont eltávolítása az internetet apró, reménytelenül elszigetelt részekre törte.

Igaz, hogy Santa Fe és South Bend repülőtereinek egyidejű hiánya alig lenne észrevehető, Chicago O'Hare repülőtérének néhány órás lezárása viszont mindenütt a címlapra kerülne, és az ország teljes légi forgalmát befolyásolná. Ha valamilyen esemény miatt egyidejűleg lezárnák Atlanta, Chicago, Los Angeles és New York repülőtereit úgy,

hogy közben az összes többi repülőtér működne, az Egyesült Államok légi forgalma akkor is órákon belül megbénulna. Számítógépes szimulációink azt mutatták, hogy hasonló problémákkal szembesülünk az interneten is. Ha a crackerek sikeres támadást intéznének a legnagyobb középpontok ellen, óriási kárt okozhatnának. A problémát nem rosszul tervezett vagy hibás internetszabványok okozzák. A támadásokkal szembeni sérülékenység az összes skálafüggetlen hálózat belső tulajdonsága.

Ezt megerősítette, hogy csoportunk egy hasonlóan látványos összeomlást figyelt meg, amikor az élesztősejt fehérje-fehérje kölcsönhatásainak hálózatából eltávolítottuk azokat a fehérjéket, amelyek sok más fehérjével kölcsönhatásban állnak.

Ugyanezt az összeomlást tapasztalták az ökológusok, mikor a táplálékláncból kivették a sok kapcsolattal rendelkező pontokat. Ezt követően két másik cikk szerzői kidolgozták a megfigyeléseknek a részletes, matematikai leírását; az egyik cikket Havlin kutatócsoportja írta, a másikat pedig Duncan Callaway a Cornell Egyetemről, Mark Newman, Steven Strogatz és Duncan Watts közreműködésével. Bebizonyították, hogy amikor a pontok eltávolítását a legnagyobb pontokkal kezdik, akkor létezik egy kritikus pont, amely felett a hálózat szétesik. Ezért a skálafüggetlen hálózatok támadások esetén hasonlóan viselkednek, mint a véletlen hálózatok meghibásodások esetén. Van azonban egy lényeges különbség. A skálafüggetlen hálózatban nem kell sok pontot eltávolítanunk ahhoz, hogy elérjük a kritikus értéket. Ha működésképtelenné teszünk a középpontok közül néhányat, akkor a skálafüggetlen hálózat azonnal darabokra esik szét.

## 6.

Néhány nappal azután, hogy a bonyolult hálózatok hiba- és támadástűrő képességét leíró kéziratunkat beküldtük, a DARPA elutasította a pályázatunkat. Cikkünk azonban a Nature-ben gyorsan megjelent, és a folyóirat címlapjára került. Bár csalódottak voltunk a DARPA döntése miatt, nem hibáztathattuk őket. 2000 elején senki nem láthatta előre, hogy a skálafüggetlen hálózatok milyen fontos szerepet fognak játszani abban, hogy megértsük a támadások túlélését és a hibák elviselését. Akkoriban azt a tényt, hogy az internet skálafüggetlen hálózat, még csak kevés kutató ismerte, és a skálafüggetlenség következményeit bizony még nem tárták fel. Azóta már többtucatnyi kutatási program befejeződött, és csak ezek ismeretében kezdjük megérteni a korábbi felfedezések bonyolult következményeit.

Összegezve, ezek a felfedezések azt mutatják, hogy a skálafüggetlen hálózatokban a hibák nem tudnak kárt tenni. Ennek a példa nélküli rugalmasságnak az az ára, hogy a támadásokkal szemben viszont gyengék. A legtöbb kapcsolattal rendelkező pont eltávolítása gyorsan szétvagdálja ezeket a hálózatokat, és apró, egymástól elszigetelt darabokra töri szét. Tehát a skálafüggetlen hálózatoknak van egy, a szerkezetükből fakadó, korábban nem is sejtett Achilles-sarka,

amely a hibák elleni tűrőképességet egyesíti a támadásokkal szembeni sérülékenységgel.

A hibatűrő képesség és a sérülékenység párhuzamos jelenléte kulcsszerepet játszik a legtöbb bonyolult hálózatban. A szimulációk megmutatták, hogy a fehérjehálózat ellenáll a véletlen genetikai mutációk roncsoló hatásának. A sejtnek ebből a kulcsfontosságú hálózatából tényleg igen sok pontot eltávolíthatunk anélkül, hogy a sejt működőképességét veszély fenyegetné. Ha azonban egy gyógyszer vagy betegség kikapcsolja a legtöbb kapcsolattal rendelkező fehérjék előállításáért felelős géneket, akkor a sejt ezt nem fogja túlélni. A barcelonai Universitat Politecnica de Catalunya kutatóinak, Richard V. Solénak és Jose M. Montoyának táplálékláncokon végrehajtott szimulációi egy hasonló jelenséget mutattak meg: az élővilág növény- és állattársulásai a véletlenszerűen kiválasztott fajok eltűnését könnyedén túlélik. Ha azonban a kulcsfontosságú, tehát a legtöbb kapcsolattal rendelkező fajokat távolítjuk el, akkor a vizsgált ökológiai rendszer drámai módon összeomlik.

Egy sokat tanulmányozott példa a kaliforniai tengeri vidra. A vidrák a tizenkilencedik század folyamán eltűntek, mert a prémjük miatt intenzíven vadásztak rájuk. 1911-ben szövetségi hivatalnokok megtiltották ezeknek a szeretetre méltó állatoknak a további vadászatát, és ezt követően a vidrák meglepően gyorsan visszatértek. Mivel a vidrák tengeri sünökkel táplálkoznak, a tengeri sünök száma csökkenni kezdett. A kevesebb tengeri sün miatt a tengeri moszatok, a sünök kedvenc táplálékai, drámaian elszaporodtak. Ez megnövelte a halak számára a táplálékot, és megvédte a partot az eróziótól, így tehát egyetlen faj megvédése, amely egy középpont volt, gyökeresen megváltoztatta a part gazdasági életét és élővilágát. A korábban rák- és kagylóféléket árusító parti üzleteket most a bálnahús árasztja el.

Igaz, hogy a skálafüggetlen hálózatokon támadással sebet ejthetünk, viszont ehhez a legnagyobb pontokból kell néhányat egyidejűleg eltávolítani. Ez gyakran az összes pont 5 és 15 százalékának egyidejű eltávolítását igényli, így a crackereknek akár néhány száz internetroutert is meg kellene támadniuk és működésképtelenné kéne tenniük, ami elég időigényes lenne. Ennek alapján úgy tűnhet, hogy az Achilles-sarok ellenére az internet topológiája erős védelmet rejt magában a véletlen üzemzavarokkal és a rosszindulatú támadásokkal szemben. Ha mindezt közelebbről is megvizsgáljuk, akkor sajnos korántsem ez a helyzet. Ahogy a következőkben látni fogjuk, a támadások esetén a topológiai stabilitás által nyújtott biztonságérzet hamis.

## 7.

Bár az 1996-os áramszünettel kapcsolatos korai találgatásokban az ufóktól a terroristákig mindenféle okot előszedtek, végül kiderült, hogy nem egy szervezett támadás volt a hibák oka. Az elektromos vezetékek hő hatására kitágulnak. Túlhevülést okozhat a szokatlanul meleg időjárás, de a vezetékek akkor is könnyen felmelegedhetnek, ha túl sok

áram megy rajtuk keresztül. 1996. augusztus 10-én melegrekord dőlt meg, és 15 óra 42 perc 37 másodperckor Oregon államban az Allston-Keeler-vezeték annyira kitágult, hogy lelógva egy közeli fához ért. Egy hatalmas villanás után az 1300 MW-os vezeték tönkrement. Mivel az elektromosság nem tárolható, ezt az óriási mennyiségű áramot hirtelen a szomszédos vonalakra kellett áttenni. A váltás automatikusan ment végbe, és az áram átkerült a Cascade-hegységtől keletre lévő, alacsonyabb feszültségű, 115 és 230 kV-os vonalakra.

Ezeket a vezetékeket azonban nem arra tervezték, hogy hosszú ideig túl sok áramot szállítsanak. A megengedett hőmérsékletük 115 százalékára melegedtek, és felmondták a szolgálatot. Egy relé romlott el a 115 kV-os vezetéken, és az áramtöbblet túlmelegítette a túlterhelt Ross-Lessington-vonalat, és emiatt ez a vezeték szintén ráesett egy fára. Ettől a pillanattól kezdve a helyzet csak egyre rosszabb lett. A McNary-gátnál meghibásodott 13 generátor, ami áram- és feszültségingadozásokat okozott, és gyakorlatilag leválasztotta a hálózatról a Kalifornia és Oregon határához közeli North-South Pacific Intertie fővonalat. Emiatt a Western Interconnected Network egymástól elszigetelt darabokra esett szét, és a szétesés áramszünetet okozott 11 amerikai szövetségi államban és 2 kanadai tartományban.

Az 1996-os áramszünet tipikus példa arra, amit a kutatók gyakran lavinaszerű meghibásodásnak neveznek. Ha egy hálózat szállítórendszerként működik, akkor egy helyi hiba miatt a terhelés és a felelősség más pontokra tevődik át. Ha a többletterhelés elhanyagolható, akkor azt a rendszer többi része képes átvenni, és a hiba gyakorlatilag észrevétlen marad. Ha a többletterhelés túl nagy ahhoz, hogy a szomszédos pontok elszállítsák, azok vagy kidőlnek a sorból, vagy ismét továbbosztják a terhelést szomszédjaiknak. Mindkét esetben lavinaszerű eseménnyel van dolgunk; a lavina nagysága és hatása attól függ, hogy az elsőként kiesett pontok mennyire központi helyzetűek és mekkora a kapacitásuk.

A sorozatos meghibásodások nem csak az elektromos hálózatok sajátosságai. Egy nem működő router automatikusan arra készíti az internetprotokollokat, hogy kerüljék ki a hiányzó pontot, és más routerekhez küldjék adatcsomagjaikat. Ha az elromlott router nagy forgalmat bonyolít le, akkor a hiánya jelentős terhet ró szomszédjaira. A routerek nem romlanak el a túl nagy forgalom miatt. Egyszerűen egy sort hoznak létre, abba bekerülnek a csomagok, és ahány csomagot csak tudnak, feldolgoznak, a többit pedig eldobják. Ezért a routerekre küldött túl nagy forgalom támadást jelent: a router kénytelen lesz a csomagok kiszolgáltatását megtagadni, és a csomagoknak csak kis százaléka fog átjutni (ez az ún. DOS, azaz Denial Of Service attack). Mivel az elveszett csomagok küldője nem kap értesítést arról, hogy üzenete megérkezett, újból el fogja azt küldeni, és ezzel tovább fokozza a torlódást. Ezért néhány nagy csomópont eltávolítása az internetről könnyen ugyanolyan katasztrófális szétesést eredményezhet, mint amit az Oregonban kieső áramvezeték okozott az elektromos hálózatban.

A lavinaszerűen terjedő sorozatos hibák gyakori jelenségek a gazdasági életben. Sokak szerint az 1997-es kelet-ázsiai gazdasági válság annak tudható be, hogy a Nemzetközi Valutaalap (IMF) nyomást

gyakorolt Délkelet-Ázsia és a csendes-óceáni régió néhány központi bankjára (az esetet a 14. fejezetben tárgyaljuk majd részletesen). Az IMF nem engedte meg az államok központi pénzügyintézeteinek, hogy a bajba került bankoknak sürgősségi hitelt nyújtsanak. Emiatt viszont a központi bankok visszavonták a vállalatoknak nyújtott kölcsöneiket, és így az IMF (amely nyilvánvalóan a legnagyobb középpont) határozatával a bankok és vállalatok sorozatos csődjét okozta.

A lavinaszerű meghibásodások jól ismert jelenségek az élő szervezetekben is, de az egyes fajtársulásokat és a sejteket egyaránt érintik. Ahogy azt a tengeri vidra esetében már láttuk, bizonyos fajok eltávolítása az események olyan láncolatát indíthatja el, amely az adott élő rendszer jelentős átszerveződéséhez vezet. Hasonlóképpen egyetlen molekula koncentrációjában beállt hirtelen változás nyomán a sejt a bekövetkező változások miatt elpusztulhat.

Annak a valószínűsége, hogy egy helyi hiba megbénítja az egész rendszert, nyilvánvalóan sokkal nagyobb, ha a legtöbb kapcsolattal rendelkező pontokat zavarjuk meg. Ezt támasztja alá a Columbia Egyetem kutatójának, Duncan Wattsnak a felfedezése, aki egy matematikai modell segítségével a sorozatos meghibásodások általános vonásait próbálta feltárni. Watts az áramkimaradásokat kívánta elemezni, és néhány, azzal ellentétes irányú jelenséget: a könyvek, a filmek és lemezek lavinaszerűen növekvő népszerűségét, amely szintén hasonló matematikai eszközökkel írható le. Szimulációi azt mutatták, hogy a legtöbb lavina nem azonnal jön létre: sok-sok észrevétlen hiba akad, mielőtt bekövetkezik az összeomlás. Ám ha megkíséreljük az ilyen lavinák gyakoriságát csökkenteni, akkor ez azzal az elkerülhetetlen következménnyel jár, hogy kevesebb lavina jön ugyan létre, de azok sokkal rombolóbb hatásúak lesznek.

Az itt leírt előrelépések ellenére a sorozatos meghibásodásokkal kapcsolatos tudásunk eléggé korlátozott. A topológiai hibátűrő képesség a hálózatok szerkezeti vonása. Az egymást követő hibák létrejötte azonban a bonyolult rendszerek dinamikai tulajdonsága, és eléggé kevésbé vizsgált terület. Egyáltalán nem lennék meglepve, ha a tudomásomra jutna, hogy léteznek még fel nem derített törvények, amelyek a sorozatos hibák kialakulását irányítják. Az ilyen törvényeknek a felfedezése sok területen - az internétől a kereskedelemig - komoly következményekkel járna.

## 8.

A hibátűrés, amit ebben a fejezetben vizsgáltunk, nagyszerű dolog. Ha testünkben bizonyos vegyületek rosszul működnek - ami általában valamilyen kiütés vagy más kisebb kellemetlenség formájában jelentkezik -, akkor a hálózat hibátűrő képessége miatt az alapvető életfunkcióink még rendben működni tudnak. A hálózat hibátűrő képességével magyarázható az, hogy miért vesszük észre a router-hibákat olyan ritkán, és hogy miért nem vezet néhány faj eltűnése környezeti katasztrófához.

Ennek a topológiai hibatűrő képességnek az ára azonban a támadásokra való nagyfokú érzékenység. Bármilyen hálózatot szét tudunk rombolni úgy, ha kiiktatjuk a legtöbb kapcsolattal rendelkező csomópontokat, amelyek egymástól hierarchikusan függenek. Ez rossz hír az internet számára, hiszen lehetővé teszi a crackerek számára, hogy olyan stratégiát tervezzenek, amely kárt tehet a teljes infrastruktúrában. Rossz hír ez gazdasági rendszerünknek is, mert azt jelzi, hogy ha valaki a gazdaság mögötti hálózatokra összpontosít, akkor tud egy olyan stratégiát tervezni, amellyel a gazdaságot megbéníthatja. Az ebben a fejezetben leírt kutatási eredmények így arra a felismerésre ébresztettek rá bennünket, hogy a topológiát, a hibatűrő képességet és a sérülékenységet nem lehet egymástól teljesen elválasztani. Minden bonyolult rendszernek megvan a saját Achilles-sarka. Rájöttünk, hogy a topológia fontos, és ez megtanít bennünket arra, hogy jobban megbecsüljük a középpontokat. Ez az első lépés ahhoz, hogy megvédjük őket.

A 2001. szeptember 11-ei terroristatámadások a középpontok erejére és a hálózatok rugalmasságára egyaránt rámutattak. A célokat nyilvánvalóan nem véletlenszerűen választották ki: ezek voltak az Egyesült Államok gazdasági hatalmának és biztonságának legfelfűnőbb jelképei. A terroristák azért ezeket vették célba, mert a globális kapitalizmus középpontjainak a szétzúzását tűzték ki célul. A terroristák jóval nagyobb emberi tragédiát okoztak, mint amit az Egyesült Államok az ílmúlt két évtizedben átélt, viszont a legfontosabb céljukat nem sikerült elérniük: a hálózatot nem sikerült romba dönteni. Viszont elindították a meghibásodásoknak egy olyan lavináját, amely - miközben e sorokat írom - még mindig mozgásban van az egész világon. A World Trade Center ikertornyaitak eltűntetése után - az internettől az összekuszált gazdasági hálóiig - az összes hálózat életben maradt. Mindez élő bizonyítéka annak, hogy a központosított, emberi tervezés sebezhetősége és az önszerveződő hálózatok rugalmassága alapvetően különbözik.

Ha van tudományos tanulsága a szeptember 11-ei eseményeknek, akkor az az, hogy még mindig nagyon messze vagyunk attól, hogy tényleg megértsük a hibatűrő képesség és a sérülékenység együttes viselkedését. A kutatók nemrég fedezték fel a hibatűrő képesség alapelveit. Most már értjük azt a fontos szerepet, amit a hálózatok játszanak a rugalmasság biztosításában, és ez az áttörés visszafordíthatatlan változásokhoz vezetett. Ám a döntő lépést - hogy ezt a tudásunkat a gyakorlati tapasztalatok szintjén is hasznosítsuk - mindedig nem tudtuk megtenni. Senki sem tudta volna előre megjósolni, hogy a valóságban milyen lavinaszerű hibákat okozhatnak a terrortámadások. Mindenki rémülten figyelte az események alakulását, és ugyanazt a kérdést tette fel: mi lesz a következő? Mennyire vagyunk sérülékenyek? Szerencsére a meghibásodások és a támadások megértése azt jelzi, hogy a lavinaszerű hibák és a helyi összeomlások a tudomány eszközeivel megközelíthetőek. Ezeknek a problémáknak a megértése így csak azon múlik, hogy a helyes kérdésre összpontosítsuk erőforrásainkat. A szeptember 11-ei események ráirányították a

figyelmet a hibatűrő képesség és a támadásokkal szembeni védekezés kutatásának fontosságára.

# A TIZEDIK LÁNCSEM

## *Vírusok és szeszélyek*

Gaetan Dugas-nak mindene megvolt, amit csak kívánhatott, és ő tudta ezt. Rengeteg ruhája London és Párizs legdivatosabb boltjaiból, jó felépítésű, de nem túl izmos teste kiemelte a tömegből akármelyik klubban. Csak meg kellett szólalnia lebilincselő kanadai francia akcentusával, és mindenkit el tudott csábítani, akit csak akart. „Én vagyok a legszebb” - szokta volt mondani, és a barátai egyetértettek vele. Ennek ellenére egy ideje kerülte a népszerű diszkókat és éjszakai mulatókat. Inkább a Bay Area fürdőinek párás ablakait és nehéz levegőjét részesítette előnyben. Nárcisztikus tökéletessége ellenére Dugas egyre jobban kedvelte a sötétebb házakat, melyek csak keveset fedtek fel vonzó testi tulajdonságaiból. Legjobban a hosszú előcsarnokok homályos öltözőiben érezte jól magát. 1982-ben egy este épp elhagyta az egyik öltözőt: felkapcsolta a villanyt, lassan megfordult, hogy megnézze azt a férfit, akivel csak néhány perce találkozott először, majd rögtön szeretkezett is vele. A férfi arcán lévő kiütésekre és vörösös dudorokra mutatott. „Melegrákom van - mondta a férfi. - Meg fogok halni, akárcsak te.”

Dugas-t, a francia-kanadai légitársaság egykori légikísérőjét gyakran nevezik az AIDS-járvány nulladik betegének. Ez nem azért van így, mert ő volt az első beteg, akit AIDS-szel diagnosztizáltak, hanem mert az 1982 áprilisáig diagnosztizált kétszáznegyvennyolc beteg közül legalább negyven létesített szexuális kapcsolatot vele vagy olyasvalakivel, aki vele volt együtt. Egy homoszexuális férfiak közötti összetett szexuális hálózat középpontjában állt, amely Észak- és Dél-Amerika keleti és nyugati partjai között, San Francisco, New York, Florida és Los Angeles felett ívelt át.

Központi szerepe egyáltalán nem mellékes. Dugas egyike volt az első homoszexuálisoknak Észak-Amerikában, akiket Kaposi-szarkómával diagnosztizáltak. 1983-ra egyre világosabbá vált, hogy a betegség, amit Dugas és több száz másik homoszexuális férfi elkapott, ugyanabból a forrásból ered, és ismét Dugas volt az első betegek egyike, akinek ezt elmondták. De ő továbbra is erősködött, hogy csak bőrrákja van. Mivel a rák nem ragályos, éveken keresztül nem volt hajlandó bevallani magának, hogy bármilyen veszélyt jelenthet szexuális partnerei számára. Mivel büszke volt szépségére és szexuális hódításaira, egészségügyi dolgozókkal később bizalmasan közölte szexuális szokásainak intim részleteit. Kétszázötvenre becsülte évenkénti szexuális partnerei számát. Noha vannak, akik akár húszezerre is becsülik partnereinek számát, annyi bizonyos, hogy melegklubokban és fürdőkben promiszkuitással töltött évtizede alatt legalább 2500 emberrel létesített szexuális kapcsolatot.

Nem világos, vajon Dugas hozta-e az AIDS-et Észak-Amerikába. Gyakran utazott Franciaországba, ahol a legkorábbi eseteket felfedezték, de már soha sem fogjuk biztosan megtudni, hogy ott vagy az Egyesült Államokban fertőződött-e meg. Annyit tudunk, hogy a legkorábbi észak-amerikai esetek közül sok kapcsolódik hozzá, ezzel a



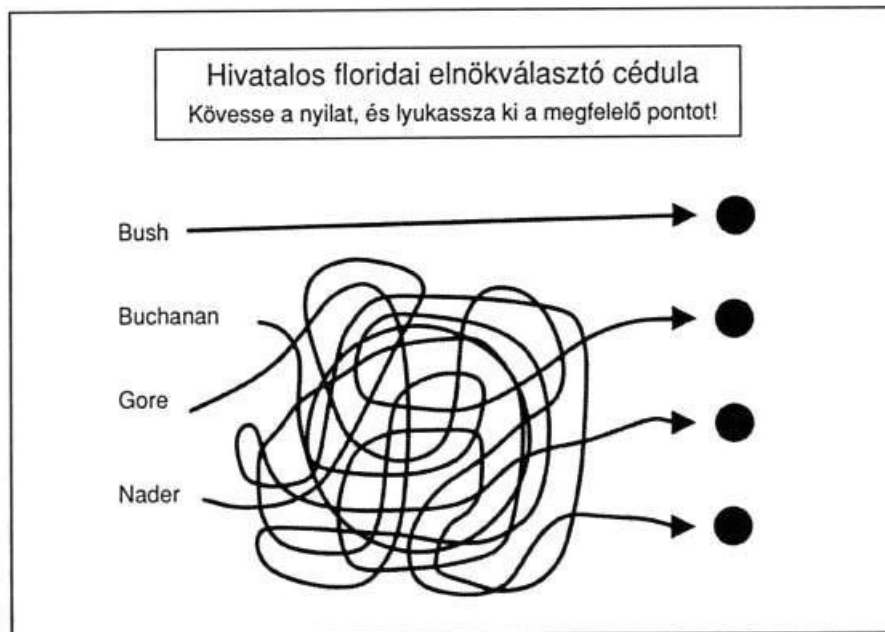
majdnem húszmillió ember életét követelő járvány kiindulópontjai közé helyezve őt.

Dugas fontos szerepet játszott abban, hogy az AIDS-járvány néhány éven belül a homályos és ritka „melegrák” kategóriából az észak-amerikai egészségügy súlyos problémájává nőtte ki magát. Ő a klasszikus járványmodellek csődjének egy borzalmas példája, és bizonyítja a középpontok hatalmát a mi mobilis és összefüggő társadalmunkban. Kétségtelen, ha a vírusokról és járványokról van szó, a középpontok szerepe halálosan fontos lehet.

## 1.

Mint sok millió más amerikai, 2000. november 8-án este Mike Collins is látta a vitatott, mindent eldöntő szavazócédulák képét a tv-ben. Jesszusom, hogy nem voltak képesek arra, hogy kövessék a nyilakat a pontokhoz? - volt az első reakciója. - Talán rajzolok valamit, ami még zavaróbbá teszi."

Collins, ez a huszonhat éves elmirai vízügyi mérnök és amatőr karikaturista rajzolt egy négy részből álló humoros rajzsorozatot, és elküldte e-mailben harminc barátjának. A következő nap a születésnapja volt, valamint lánytestvére egy kislánynak adott életet, így egész nap házon kívül volt. Amikor aznap este visszatért, óriási ajándék várta: 17000 új regisztrált rákattintás a weblapjára és néhány száz e-mail. Amíg távol volt, a rajzsorozat, amely tökéletesen kifejezte az emberek csalódottságát a 2000-es elnökválasztással kapcsolatban, körbejárta a Földet.



**10.1 ábra. Florida elnökválasztó cédulája.** Mike Collins rajzsorozata, mely az összezavaró, „csapongó” szavazócédulát gúnyolja ki, amit a 2000-es elnökválasztáson használtak. (Reprodukálva Mike Collins engedélyével.)

Bárki, aki kiszúrta, rögtön egy másolatot akart. Az Amerikai Egyesült Államoktól Japánig újságok és weblapok bombázták a kiadás jogaiért. Néhány órán belül Mike kész szupersztár lett, rá vadászó lányokkal és szülőkkel, akik arra vágytak, hogy összeboronálhassák lányaikkal. Mialatt a választási vita lassan alábbhagyott, Collins különleges rajza valószínűleg az évtized legismertebb rajzsorozatává vált, mindenhol felbukkant a pólóktól - amiket a weblapján keresztül árul - az üdvözlőkártyákig. Alighanem ez a rajz a legjellegzetesebb, legmaradandóbb képe a szerencsétlen 2000-es floridai választócédulának.

Mike Collins közvetlen útja a hírességhez a klasszikus amerikai álom újrajátszása. De ami szokatlan, az az a sebesség, ahogy ez megtörtént. Néhány évtizede lehetetlen volt világhírré szert tenni szó szerint egyik napról a másikra, még Amerikában is. Valami megváltozott. Általában az internetet jelöljük meg e változások okaként, és bizonyára ez a médium táplálja és terjeszti a hírnevet. De egy teljesen technológián alapuló magyarázat nem kielégítő. Valami minőségileg újnak vagyunk szemtanúi, valaminek, ami lehetővé teszi, hogy a gondolatok és szeszélyek a fény sebességével érhessenek el mindenkihez.

## 2.

Gaetan Dugas-ban és Mike Collinsban látszólag kevés a közös vonás. Egyikük egy kegyetlen betegséget terjesztett, a másik egy kisvárosi amatőr, aki egy szellemes ötlettel megütötte a főnyereményt. Egy évtizedbe telt, míg az AIDS kiszivárgott az afrikai kontinensről, és partnertől partnerig, elsősorban szexuális érintkezés útján elterjedt az egész világon. Collins rajzsorozata egy éjszaka alatt robbant, kattintások és e-mailek útján járva körbe a világot. Mindazonáltal egy fontos dolog közös kettőjükben. Mindketten jó példák az összetett hálózaton belüli diffúzióra. Az AIDS az 1980-as évek összetett szexuális hálózatának kapcsolatait követve terjedt el, melyet egy szexuálisan igen aktív homoszexuális kultúra segített. A szavazócédulás rajzsorozat azonnal a kusza számítógépes hálózaton vált világhírűvé, melyet az gyorsított, hogy bármikor képesek vagyunk elérni barátainkat e-mailen. Mindkettő azokat az alapvető törvényeket követte azonban, melyek összetett hálózatokban meghatározzák a szeszélyek, gondolatok, és járványok terjedését. Ezeket a törvényeket mélyrehatóan kutatták és kutatják marketingigazgatók, akik arra keresik a választ, hogy termékeiket hogyan csempésszék zsebünkbe; szociológusok, akik próbálják megérteni a szeszélyeket, divatokat és lázadásokat; szavazási mintákat és politikai szerencsét vizsgáló politológusok; orvosok és járványkutatók, akik azt remélik, hogy megfékeznek mindent az Ebola-vírustól a visszatérő tél eleji nátháig; számítógépes vírusokat író tizenévesek, abban a reményben, hogy elpusztítják a Microsoft összes termékét egy éjszaka alatt; és a vírusok fentebb említett tevékenységének megelőzésére eltökélt rendszergazdák. Ezeket a törvényeket univerzálisnak tartották, és valóban azok is. De növekvő ismereteink az

összetett hálózatokról arra ösztönöznek, hogy új szemszögből vizsgáljuk meg őket.

### 3.

Jóllehet, a hibrid kukoricát 1933-ban csak 16 400 hektáron termesztették Észak-Amerika-szerte, ez 1939-re elérte a 9,84 millió hektár, az Egyesült Államok kukoricatermesztésre használt termőföldjének egynegyedét. Forradalmasította és újraformálta az amerikai gazdálkodást, végül végigsöpört az egész középnyugati mezőgazdaságon kevesebb mint tíz éven belül, Iowa különösen gyorsan állt át. Habár az új vetőmag 1929 előtt nem volt kapható, 1939-re Iowa kukoricaföldjeinek 75 százaléka volt a hibrid kukoricával bevetve. Ez a hirtelen terjeszkedés a farmerek jó könyvelésével együtt volt az első lehetőség arra, hogy azt kutassák, hogyan terjednek el az újítások. Bryce Ryan és Neal C. Cross az Iowa State College-ből 1943-ban fogott neki ennek a tanulmánynak.

Mielőtt elfogadnánk egy újítást, általában felteszünk néhány kérdést: Töltsék időt a termék kiértékelésével? Költsék pénzt rá? Honnan tudjam, hogy úgy működik, ahogy megígérték? A kérdések pontosan ugyanezek voltak a hibridnél is. Hogy átálljanak, a farmereknek be kellett fektetniük az új vetőmagokba, hogy lecseréljék a régieket. Míg az átállás nagyobb, bőségesebb termést ígért, kevés garancia volt arra, hogy a többlethaszon ellensúlyozná a kezdeti befektetéseket. Ez a kockázat különösen nagy volt az első átallok számára. Mindezek ellenére a hibrid meggyökeresedett Iowában a kockázatot vállaló emberek kis csoportjának köszönhetően. Ma az ilyen embereket újítóknak hívjuk.

Mindannyian ismerünk néhány újítót. Ők azok az ismerőseink, akik ugrottak, hogy megvegyék az Apple Newton nevű kézisámítógépét, csak azért, hogy ráébredjenek, hogy a technológia nem váltotta valóra ígéreteit. Néhány évvel később ők voltak az elsők, akik betűket irkáltak az első Palm Pilotok szürke kijelzőire, ez alkalommal elindítva a kézisámítógépek forradalmát. A tizenévesek azok, akik felkapják a legújabb trendeket, mielőtt a főáramba kerülnének, a művészek és értelmiségiek, akik táplálják az elképzeléseket, jóval azelőtt, mielőtt elérnek bennünket könyveken, filmekben és magazinokon keresztül, Iowában pedig azok a farmerek voltak az újítók, akiknek elég volt az üzletkötőkkel beszélni, és elolvasni egy leírást ahhoz, hogy megvegyék az új vetőmagokat.

Ryan és Cross azt találta, hogy a vetőmagra átálló farmerek évenkénti száma egy görbét képez, amely gyorsan növekszik, míg elér egy maximumot, majd ugyanilyen gyorsan csökken később. Ez egy haranggörbe. Ha egy új termék átmegy az újítók kritikus tesztjén, mely javaslataikon alapul, a korai befogadók beszerzik. Őket követi a nagyszámú korai többség, amíg az embereknek a fele, akik végül elfogadják a terméket, már rámozdul. Ezen a ponton túl az új befogadók száma elkezd csökkenni, az újítás azokat vonzza, akik lassan döntenek, de akiket az elsőprő bizonyítékok meggyőznek előnyéről. Ez a késői többség olyan gazdákból áll, akiket a tény, hogy az őket körülvevő földek fele átpártolt a hibridhez, végül is meggyőzött. A görbe szükségszerűen

azzal a néhány késlekedővel ér véget, akik csak akkor csatlakoznak, amikor nyilvánvalóan kisebbségbe kerülnek.

A Ryan és Cross által vizsgált haranggörbe nem egyedül Iowa farmereire vonatkozik. Jellemzi a legtöbb újítás elterjedését, kitűnő eszközt biztosítva a marketing- és tervezési szakértőknek, hogy előre láthassák az új termék iránti igényt. Azonban nem képes választ adni arra, amit a járványkutatóktól a vezérigazgatókig mindenki tudni akar napjainkban: Játsszik-e bármilyen szerepet - és ha igen, pontosan milyen - a szociális hálózat egy vírus vagy újítás elterjedésében?

#### 4.

1954-ben Elihu Katz, a Columbia Egyetem alkalmazott szociológia tanszékének kutatója beadott egy indítványt ismeretségi kapcsolataink viselkedésre gyakorolt hatásának tanulmányozására. Úgy esett, hogy a gyógyszeróriás Pfizer piackutatási igazgatója a Columbián végzett. Érdekelte annak megértése, hogy az orvosok hogyan fogadják el az új gyógyszereket, Katznak és két kollégájának, James Colemannek és Herbert Menzelnek, 40 000 dollárt ajánlott fel, hogy kövessék nyomon a tetraciklin, egy 1950-es évek közepén bevezetett antibiotikum terjedését.

Coleman, Katz és Menzel százhuszonöt orvossal folytatott megbeszélést egy kis illinois-i városból, és megkérték őket, hogy írjanak össze három orvost, akikkel leggyakrabban tárgyalják meg orvosi gyakorlatukat, hármat, akiktől tanácsot kértek egy gyógyszert illetően, és hármat, akiket barátjuknak tartanak. A listák segítségével rekonstruálták az ismeretségi kapcsolatok és hatások összetett hálózatát az orvosi társadalmon belül.

Az eredmények jelentős különbségeket mutattak ki az orvosok közt. Néhányukat a kollégáik nagy hányada jelölte meg, mint a napi döntéseikben fontos szerepet játszó egyént. Ők az orvosi közösség középpontjai. A többség azonban sokkal kisebb szerepet játszott. Amikor a tetraciklin elterjedéséről volt szó, azoknál az orvosoknál, akiket legalább három vagy több kollégájuk barátként nevezett meg, háromszor vagy többször valószínűbb volt, hogy elfogadják az új gyógyszert, mint azoknál, akiket senki sem nevezett meg.

A kutatók gyógyszerárak receptnyilvántartását felhasználva követni tudták a gyógyszer terjedését az ismeretségi kapcsolatokon keresztül. Az derült ki, hogy a korai elfogadókat és korai kisebbséget túlnyomóan a sok ismeretségi kapcsolattal rendelkező orvosok alkották. Ők nagyobb eséllyel voltak kapcsolatban újítókkal, ily módon gyorsabban hallottak az új gyógyszerről. Mikor ezek az orvosok elfogadták, a gyógyszer ezekből a középpontokból terjedt a kevesebb kapcsolattal rendelkező kollégáikhoz, akik a késő többséget alkották. Végül jöttek a késlekedők, azok az orvosok, akik a legvégsőig visszautasították az új gyógyszer elfogadását.

A Pfizer-tanulmány bemutatta, hogy az újítások az újítóktól a középpontokig terjednek. A középpontok pedig kapcsolataikon keresztül továbbítják az információt, és elérik a legtöbb embert egy adott ismeretségi vagy szakmai hálózaton belül. A középpontok, a

skálafüggetlen hálózatok szerves részei, statisztikailag ritka, sok kapcsolattal rendelkező egyének, akik az ismeretségi hálózatokat összetartják. Az AIDS-járványban a homoszexuális légiutas-kísérő, Gaetan Dugas, egyértelműen fő középpontnak minősül. A sokat utazott Pál apostol, barátai és követői kiterjedt körével ugyanígy a korai kereszténység egyik legnagyobb hatású középpontja volt.

A középpontok - a marketingben gyakran meghatározó személyként, befolyásos felhasználóként, befolyásolókként hivatkoznak rájuk - olyan egyének, akik egy adott termékről többet beszélnek, mint egy átlagos ember. Sok ismeretségi kapcsolatuk miatt az elsők között vannak, akik észlelik és felhasználják az újítók tapasztalatait. Bár maguk nem feltétlenül újítók, az ő átállásuk a kulcs egy ötlet vagy újítás bevezetéséhez. Ha a középpont elutasít egy terméket, olyan áthatolhatatlan és befolyásos fal képződik, hogy az újítás biztosan megbukik. Ha elfogadja, nagyon sok emberre hat ezzel a döntésével.

Szociológusok és marketingszakértők tökéletesen tudatában vannak ezeknek a jelenségeknek. De egészen napjainkig a középpontokat egyedülálló jelenségeknek tekintették, nem nagyon tudták, miért és mennyi létezik belőlük. A szociális hálózatmodellek nem támogatták a középpontok létezését. A skálafüggetlen hálózatok által nyújtott szerkezet első ízben biztosította a középpontok megérdemelt szerepét. Ahogy látni fogjuk, a középpontok szinte mindent megváltoztatnak, ami a gondolatok, újítások és vírusok terjedési sebességével kapcsolatos.

## 5.

1993-ban megszületett John Sculley, az Apple Pepsi által kinevelt vezérigazgatójának szellemi gyermeke, de az óriási kampánnyal népszerűsített kézisámítógép, a Newton, soha nem futott be. Mindazonáltal egy forradalmat indított el.

Manapság zsebméretű készülékek milliói vannak forgalomban. Ennek ellenére sokak szerint még mindig csak az elején vagyunk a piaci térhódítás haranggörbéjének. Az Apple problémája csak az, hogy egyik ilyen hasznos kis készülék sem a Newton. Palm, Handspring, különféle Pocket PC-k és megszámlálhatatlan rokonuk teszik tönkre az Apple álmát, bizonyítékot szolgáltatva arra, hogy nem mindig az első elrugaskodónál van az előny. A Newton sok új technológiát fogott össze egy „eddig még sohasem látott” készülékben, s egy álom valóra válásának ígérését hordozta. Ez azonban nem volt ilyen egyszerű. A rémálom a Newton kézírás-felismerő képességét nevetségessé tevő rossz kritikák sorozatával indult. Bírálói rámutattak, hogy a szerkezet pusztán húsz perc használat után lemeríti az elemeket. Csalódás csalódást követett, és a MessagePad, a Newton újratervezett verziója gyászos 85 000-es eladási statisztikát ért csak el 1995-ben. A termék gyártását három évvel később, a veszteségek visszaszorítására tett kísérlet keretében beszüntették, miután Steve Jobsot visszahelyezték az Apple ideiglenes vezérigazgatójának.

A Newton kézisámítógép és sok más termék bukása magyarázatot követel. Hogy lehet, hogy néhány találmány, híresztelés és vírus

átutazza a földgolyót, míg mások csak részlegesen terjednek el, és eltűnnek? Miért és mi a különbség a nyertesek és a vesztesek közt? Világos, hogy a reklámozás nem elegendő magyarázat. Hiszen a Newton az Apple hatalmas marketinggépezetének dacára megbukott. A milliárddolláros kérdés az, hogyan szűrje ki valaki a rohadt almát.

## 6.

Azzal a szándékkal, hogy megmagyarázzák néhány szeszély és vírus eltűnését és a többi elterjedését, társadalomtudósok és járványkutatók egy nagyon hasznos eszközt fejlesztettek ki, amit küszöbértékmodellnek hívnak. Mindannyian különböző mértékben vagyunk fogékonyak az újításokra. Általánosságban, elegendő pozitív bizonyosság birtokában bárki meggyőzhető, hogy elfogadjon egy újítást. Azonban az elfogadható bizonyítékok szintje egyénenként változik. Különbségeinket tudomásul véve a diffúziós modellek egy küszöbértéket rendelnek minden egyénhez, mennyiségileg kifejezve annak valószínűségét, hogy elfogadja-e az újítást. Például akik megvették a Newtont rögtön kibocsátása után, közel nulla küszöbértékkel rendelkeznek. Mielőtt hitelkártyánkkal fizetnénk, legtöbbször látni akarja a terméket működés közben; ebből a szempontból legtöbbször nagyobb küszöbértéket képvisel.

A jelentős szándék- és részletességben különbségek ellenére minden diffúziós modell ugyanazt a jelenséget jósolja meg: minden újításnak jól definiált terjedési értéke van, amely megmutatja annak valószínűségét, hogy elfogadja-e az, akinek bemutatták. Például a terjedési érték magában foglalja annak valószínűségét, hogy egy kézisámítógép bemutatása után ösztönözve érzi-e magát a célszemély, hogy megvegye. De azért a terjedési érték ismerete önmagában még nem elég, hogy eldöntse egy újítás sorsát. Ezért ki kell számítanunk a kritikus küszöbértéket, egy, az adott hálózat tulajdonságainak alapján meghatározott mennyiséget. Hogyha az újítás terjedési értéke kevesebb, mint a kritikus küszöbérték, az hamarosan el fog tűnni. Ha azonban túl van a küszöbértéken, akkor az azt elfogadó emberek száma exponenciálisan növekszik, amíg mindenki, aki használhatja, fogja is.

Annak felismerése, hogy a kritikus küszöbérték alapfeltétele a szeszélyek és vírusok elterjedésének, valószínűleg a legfontosabb fogalmi előrelépés volt a terjedés és diffúzió megértésében. Jelenleg a kritikus küszöbérték része minden diffúziós elméletnek. Járványkutatók dolgoznak vele, mikor egy fertőzés járvánnyá válását modellezik, ahogy az AIDS-vírusnál történt. Marketingtankönyvek írnak róla, mikor azt kell megbecsülni, hogy egy termék befut, vagy azt kell megértenünk, hogy néhány sohasem fog. Szociológusok használják, hogy megmagyarázzák a születésszabályozás elterjedését a nők körében. Ezt aknázza ki a politológia, hogy indokolja a pártok és mozgalmak életciklusát, vagy hogy modellezze a békés tüntetések lázongássá válásának valószínűségét.

Évtizedeken keresztül egy egyszerű, de hathatós paradigma uralta a diffúziós problémák megközelítését. Ha meg akartuk becsülni, hogy egy

újítás milyen valószínűséggel terjedne el, csak a megfelelő terjedési értéket és a kritikus küszöbértéket kellett ismernünk. Senki sem kérdőjelezte meg ezt a paradigmát. Nemrégiben azonban megtudtuk, hogy ez néhány vírusra és újításra nem érvényes.

## 7.

A Fülöp-szigetéről indított Love Bug, a valaha létezett legkártékonyabb számítógépvírus órákon belül elérte a világ minden számítógépét. 2000. május 8-án kontinensről kontinensre sorban buktak el a számítógépek egy keletről nyugat felé terjedő globális dominóhatás nyomán. Számítógépes biztonsági szakértők épp csak elkezdtek segíteni az első áldozatokat Hongkongban, amikor egy német újság rendszergazdái rémülten nézték, ahogy a vírus elpusztított kétezer digitális fényképet. Belgiumban akadályozta a bankjegykiadó automatákat, visszatartva az ügyfelek pénzét. London egy órával később ébredt, szemtanúja volt a parlament lezárásának. Mielőtt továbbhaladt Európából, a svéd, német és holland számítógépek nem kevesebb mint 70 százaléka, romokban hevert. A pusztítás továbbterjedt az Egyesült Államokba, ahol belopakodott a Kongresszus székházának épületébe Washington D.C.-ben, és megfertőzte az államirányítás 80 százalékát, beleértve a védelmi és állami szerveket, és leállította Bush elnöki kampányának e-mail kommunikációját.

A Love Bug, mely több mint tízmilliárd dolláros kárt okozva 45 millió számítógépet tett működésképtelenné világszerte, egy jól megtervezett pszichológiai csapda volt, melynek senki sem tudott ellenállni. Ki tudna sokáig várni, hogy megnyisson egy üzenetet olyan címmel, mint SZERELMES-LEVÉL-NEKED (LOVE-LETTER-FOR-YOU)? Ha engedett a kísértésnek, az aktivált vírus egy sor dokumentumot törölt le a merevlemezéről, különös tekintettel a jpeg és az mp3 kiterjesztésű fájlokra, amik digitális képeket és zenét kódolnak. A következő lépésben a Microsoft Outlook Express e-mail programját kereste. Ha talált egyet, másolatokat küldött a szerelmes levélből az áldozat összes barátjának és ismerősének, akiknek az e-mail címét az illető tárolta.

A pusztítás lelassult, amikor Richard Cheng és Maricel Soriano a Fülöp-szigetéről elkészítették az ellenszert, egy programot, mely védetté tette a számítógépet a vírus ellen. A Love Bug vírusban az az elképesztő, hogy a széles körben elérhető, és ingyenes ellenszert ellenére a vírus még ma is létezik. A Virus Bulletin - egy online forrás - szerint, amely vírus-előfordulásokat gyűjt össze, 2001 áprilisában a Love Bug még mindig a hetedik legaktívabb vírus volt, egy évvel az őt felismerő és hatástalanító program megjelenése után. Nagyon későn, 2001 júliusában én is megkaptam.

Csábító lenne úgy spekulálni, hogy a Love Bug valószínűleg annyira fertőzőképes, hogy valójában lehetetlen gyökeresen kiirtani. De folyamatos jelenlétét nem lehet egyszerűen a fertőzőképességével magyarázni. Erre a következtetésre jutott két fizikus, Romualdo Pastor-Satorras és Alessandro Vespignani, akik kimutatták, hogy a küszöbértékmodellek szilárd jövődöléseivel szemben a valódi

hálózatokban a nagy fertőzőképesség nem garantálja egy vírus elterjedését.

## 8.

A páratlan észak-olaszországi város, Trieszt vegyes és kavargó történelmi örökségével ad otthont a tekintélyes International Center for Theoretical Physics intézménynek. A Nobel-díjas pakisztáni fizikus, Abdus Salam alapította és igazgatta évtizedekig. Ez a hely biztonságos és intellektuálisan stimuláló környezetet biztosít a Harmadik Világ fizikusainak, kapcsolatba kerülhetnek kollégáikkal az egész világon. Romualdo Pastor-Satorras, egy spanyol fizikus 1999-ben két éves posztdoktori pozícióban dolgozott a központban, mielőtt visszatért Barcelonába, hogy elfogadjon egy tanári állást. 2000 nyarán visszatért Triesztbe egy két hónapos látogatásra, úgy tervezte, hogy befejez több elmaradt projektet, amibe ő és korábbi mentora, Alessandro Vespignani korábbi tartózkodása alatt kezdett. Egy új kézirat bibliográfiáját állította össze, amikor véletlenül rábukkant egy tudományos tanulmányra Nyitott kérdések a számítógépes víruskutatásban címmel (Open Problems in Computer Virus Research), szerzője Steve R. White volt, az IBM egyik számítógépvírus-szakértője. A tanulmány mellett érvelt, hogy a biológiai ihletésű járvány-modellek nem írják le helyesen a Love Bug és egyéb számítógépes vírusok terjedését.

Ettől a felfedezéstől nyugtalanítva, a kutatók úgy döntöttek, hogy óvatosabban vizsgálják a problémát. Felhasználva a Virus Bulletin - a számítógépes vírusról szóló online forrásának - nyilvántartásait, megállapították annak a valószínűségét, hogy egy vírus még több hónapon keresztül létezen első előfordulása után. Az eredmények meglepőek voltak: a legtöbb vírus jellemző élettartama hat és tizennégy hónap között volt. Azaz, vírusok az első megjelenés és a feltételezett kihalás után egy évvel később is fertőznek meg számítógépeket. Ahogyan Pastor-Satorras és Vespignani megfogalmazza, „ezek a jellemző időtartamok elképesztően nagyok azzal az időtartammal összehasonlítva, amelyen belül vírusölő szoftverek elérhetők a piacon (általában napokon vagy heteken belül az első incidens után)”. Mint a múmiákat, a vírusokat újra és újra felébresztik szarkofágjukból, így képtelenek pihenni.

A kutatók rendszerint a hagyományos küszöbértékmodell többféle verzióját használják a számítógépes vírusok elterjedésének leírására. Ezekben a modellekben minden egyes számítógép lehet egészséges vagy fertőzött. Adott idő alatt egy egészséges számítógép fertőzötté válhat, ha kapcsolatban áll egy fertőzött számítógéppel. Amint egy számítógép „meggyógyult”, újra fogékony a fertőzésre. Ha azt feltételezzük, hogy a számítógépek véletlenszerűen vannak összekötve egymással, ez a modell alátámasztja a vírusok terjedésének klasszikus elképzelését: egy fertőzőképes vírus, a kritikus küszöbértéknél nagyobb fertőzőképességgel elérheti a legtöbb számítógépet. Ennek az ellenkezője is igaz, ha egy vírus fertőzőképessége kisebb, mint a küszöbérték, az újonnan megfertőzött számítógépek száma gyorsan csökken, míg a vírus ki nem hal.



2000 augusztusára Pastor-Satorras és Vespignani arra a következtetésre jutott, hogy White-nak igaza volt: a számítógépes vírusok szembeszállnak a klasszikus járványmodellek jóslataival. Ennek az ellentmondásnak a forrása azonban homályos maradt számukra. A véletlen úgy akarta, hogy kutatócsoportomnak az internet Achilles-sarkáról írt tanulmányát címlapon hozta az a heti Nature. Azt olvasva hirtelen ráleltek a hiányzó darabra. Az interneten a számítógépek nem véletlenszerűen vannak összekötve egymással. A mögötte lévő hálózatnak inkább skálafüggetlen a topológiája. Ennélfogva a számítógépes vírusokat egy ilyen hálózaton kell modellezni az összes előző tanulmányban használt véletlenszerű helyett. Pastor-Satorras és Vespignani nagy sietve így is tett, először tanulmányozva a diffúziót egy valóság-hű skálafüggetlen hálózatban. Az eredmények nagyon meglepők voltak: a skálafüggetlen hálózatokban a járvány küszöbértéke csodával határos módon eltűnt! Vagyis ha egy vírus nem nagyon fertőző, még akkor is terjed, és megmarad. Fittyet hányva a diffúziós tanulmányokban öt évtized alatt felhalmozott tudásnak, a skálafüggetlen topológiában utazó vírusok nem vesznek figyelembe semmilyen küszöbértéket. Gyakorlatilag megállíthatatlanok.

Ennek a rendkívül váratlan viselkedésnek a magyarázata az internet egyenlőtlen topológiájában rejlik. A skálafüggetlen hálózatokat a középpontok uralják. Mivel minden középpont sok számítógéphez kapcsolódik, nagy esélye van, hogy valamelyiktől megfertőződjék. Amint megfertőződött, a középpont továbbadhatja a vírust minden hozzákapcsolt számítógépnek, így a sok kapcsolattal rendelkező középpontok kivételesen jó terepet biztosítanak a vírusok terjedéséhez és fennmaradásához. Habár a fertőző egyedek bármely hálózatban gyorsan eléri a csomópontokat, egy skálafüggetlen hálózatban csak enyhén fertőző társaiknak is jó esélyük van a túlélésre.

Ezek az eredmények nem korlátozódnak a számítógépes vírusokra. A Pastor-Satorras és Vespignani által használt modellek néhány változtatással egyszerűen alkalmazhatóak a gondolatok, újítások és új termékek elterjedésére és a fertőző betegségek diffúziójára is. Durva becsléssel rögzítik a folyamatot, mely a vallások elterjedését is segíti: Pál apostol, egy sok kapcsolattal rendelkező és mobilis középpont segítette a korai kereszténység tanainak a lehető legtöbb emberhez való eljuttatását. A gondolatok és újítások embertől emberig terjednek az ismeretségi háló kapcsolatainak keresztül. Minthogy az ismeretségi hálózat skálafüggetlen topológiájúnak tűnik, a számítógépes vírusoknál tanulmányozott rendellenességek ezekben a rendszerekben is jelen kell hogy legyenek.

## 9.

Ismeretségi kapcsolataink százaiból csak néhány elég intim ahhoz, hogy egy szexuális betegséget közvetíthessen. Emiatt az AIDS ismeretségi hálónknak csak egy nagyon szórványos alhálózatán haladhat. Ezzel és a betegség viszonylag alacsony fertőzőképességével együtt a járványnak mostanra le kellett volna lassulnia, és ki kellett volna

halnia. Ennek ellenére azonban az AIDS már körülbelül ötvenmillió embert fertőzött meg, s a szám továbbra is emelkedik. Csábító a lehetőség, hogy elfogadjuk a Trieszt-tanulmányt, és az AIDS-vírus gyors elterjedését a társadalmi hálózat skálafüggetlen topológiájának tulajdonítsuk. De amiatt, hogy nem mindegyik társadalmi kapcsolat jelent szexuálisan aktív összeköttetést, fel kell hogy tegyünk a kérdést: Milyen a topológiája a szexuális hálózatnak, mely ezt a halálos betegséget hordozza?

Egy késő novemberi napon 2000-ben, Carina Mood Roman a stockholmi egyetem PhD-hallgatója egy különösen bonyolult hibafüggvényt próbált megérteni. A feladat az volt, hogy becsülje meg egy svéd alanyokból álló csoport szexuális partnereinek számát. A szexuális erkölcs Svédországban, amely az elsők között engedélyezte nem összeházasodott pároknak az együttélést, viszonylag liberális. Svédország továbbá büszke figyelemre méltó egészségügyi rendszerére és társadalmi szolgáltatásaira. Ahogy az AIDS áldozatokat kezdett követelni Észak-Európában, svéd kutatók nekiláttak a szexuális kapcsolatok széles körű tanulmányozásának, remélve, hogy megtalálják a módját annak, hogy lelassítsák a járványt.

A szexuális háló térképéhez, mely szexuális viszonyaikon keresztül köti össze az embereket, egyszerűen lehetetlen hozzájutni. Vajon az olvasó hajlandó lenne nekem mindenkinek a nevét megadni, akivel intim közelségben volt, tudva azt, hogy velük is kapcsolatba kell lépnem, hogy felvázoljam az ő szexuális kapcsolataikat is? Szerencsére nincs szükségünk a szexuális háló teljes térképére ahhoz, hogy eldöntsük, skálafüggetlen vagy véletlenszerű-e. Csak az eloszlás mértékét kell megmérnünk úgy, hogy megkérdezzük a társadalom egy tipikus részét arról, hogy hány szexuális partnerük volt. Nem kívánhatjuk, hogy az alanyok felfedjék partnereik kilétét, ezért hirtelen egy kisebb erőpróbát jelentő feladattal nézünk szembe. 1996-ban svéd tudósok több ilyen interjút folytattak, egy majdnem 5000 egyénből kiválasztott véletlenszerű minta alapján, 18 és 74 éves kor közötti alanyokat kérdezve szexuális szokásaikról. 59 százalékos válaszaránnyal a svéd szexuális háló kapcsolódásait 2810 középpont alapján tanulmányozhatták.

Ma a hallgatók gyakran megkapják az összegyűjtött adatokat, hogy ellenőrizzék a különféle statisztikai módszereket. Roman is épp ezeket tanulmányozta, amikor szobatársához, Fredrik Liljeroshoz fordult segítségért a hibagörbe értelmezéséhez. Szociológiai tanulmányai elején Liljerosban annyira jó benyomást hagytak a matematikai szociológia órák, hogy úgy döntött, ennek a területnek fogja szentelni magát, s a társadalmi szervezetek fejlődésére összpontosít. A kutatás alatt matematikai eszközök széles körével találkozott, az önszer-vezést és hatványfüggvényeket is beleértve. Bár külsőleg tipikusan északi típus, amikor a szenvedélyéről, a kutatásról van szó, a huszonvalahány éves Liljeros, a honfitársaira jellemző visszafogottság nélkül reagált: „Ez úgy néz ki, mint egy hatványfüggvény!” - ordította szobatársának, miután észrevette a görbét Roman képernyőjén. Ahelyett, hogy segített volna neki a feladatban, elkérte az adatokat, és továbblépett, hogy ellenőrizze sejtését. A következő lépésben elküldött e-mailben egy másolatot Luis

Amaralnak a bostoni egyetemre, akivel előzőleg együttműködött. Amaral nemrégiben fordította figyelmét az összetett hálózatok felé, több nagy hatású tanulmányt írt a skálafüggetlen hálózatok topológiájáról. Rögtön észrevette, hogy a Liljeros által elküldött adatok tartalmazták a kulcsot korábbi kérdésünk megválaszolásához: milyen a szexuális hálók topológiája?

Minden, a szexuális szokásokat kutató tanulmány komoly elfogultsággal kell hogy szembenézzen: úgy tűnik, a férfiak több szexuális partnerre emlékeznek, mint a nők. Emiatt a svéd vizsgálat alanyait először csak arra kérték, hogy azt árulják el, hány szexuális partnerük volt az előző évben, remélve, hogy a válasz valamennyire pontos lesz. Világos volt, hogy egész életük összes partnerének számát erősen befolyásolná a kihagyó emlékezet és a sejtések. Ezeknek a lehetséges torzításoknak a dacára az eredmények ellentmondásmentesek voltak. Azt mutatták, hogy az átlagos válaszadó szexuális partnereinek száma egész életében egy és tíz között mozgott. Néhálynak ennek ellenére több tucat vagy még több partnere volt. Egy kevésnek több száz. Az eloszlás egy hatványfüggvényt követett, függetlenül attól, hogy egyéves időtartamot, összes szexuális partner számát vettük-e alapul, vagy csak a férfiakra vagy nőkre koncentráltunk. Az adatok együtt szembeszökő bizonyítékot szolgáltatottak arra, hogy szexuális kapcsolataink hálózatának skálafüggetlen topológiája van, s ezt a következtetést egy későbbi, az amerikai népességet vizsgáló tanulmány is megerősítette. Gaetan Dugas látszólag még rekorder lenne évi kétszázötven szexuális partnerével, de Wilt Chamberlain megdöbbentő állítása, mely szerint húszezer nővel volt kapcsolata, természetesen felülmúlja az előző eredményt. „Igen, ez így van, húszezer különböző hölgy - írta. - Az én koromban ez naponta 1,2 nővel való közösülést jelent, mindennap, mióta tizenöt éves vagyok.” Az NBA Hall of Fame tagját macsó beszámolója a kritikusok célpontjává tette, akiket sértett promiszkuitása. A Stockholm-Boston együttműködés eredményei alapján azonban nem ő az egyetlen. A skálafüggetlen topológia azzal is jár, hogy míg a legtöbb ember csak kevés szexuális kapcsolattal rendelkezik, a szexuális kapcsolatok hálóját a sokakkal összekapcsolt középpontok hierarchiája tartja össze. Ők a Wilt Chamberlainnek és Gaetan Dugas-k, akik elképesztő számú szexuális partnert gyűjtöttek össze.

Ezeknek az eredményeknek a fényében a Trieszt-jóslatok egy új nézőpontból láttatják az AIDS-járványt. A halálos vírus az újítások és vírusok elterjedésénél felismert utat kellett hogy kövesse: a középpontok az első fertőzöttek között vannak nagyszámú kapcsolatuknak köszönhetően. Miután megfertőződtek, gyorsan újabb százakat fertőznek meg. Ha a szexuális hálónk egy homogén, véletlenszerű hálózatot alkotna, akkor az AIDS lehet, hogy már rég kihalt volna. Az AIDS rendelkezésére álló skálafüggetlen topológia tette lehetővé a vírus terjedését és fennmaradását.

Amikor 1997-ben az egyesült államokbeli AIDS-áldozatok száma először csökkenni kezdett, azt gondoltuk, hogy a leg-rosszabban már túl vagyunk. Tévedtünk. Ma mindennap 15 ezer ember fertőződik meg a világon. A legtöbbjük egy évtizeden belül meghal a betegségben. Ha az olvasó egy tizenöt éves kamasz lenne Botswanában, annak valószínűsége, hogy elkapja az AIDS-et és belehal, majdnem 90 százalék. Igazán nehéz dolgunk lenne, ha Botswanában vagy más, a Szaharától délre fekvő országban egy olyan tizenévest kellene találnunk, aki maholnap nem fog meghalni ebben a betegségben. Ez ellentmond annak a ténynek, hogy már több, aránylag hatásos orvosság létezik az AIDS-re a piacon. Meg kell hagyni, ezek közül egyik gyógykezelés sem gyógyír a betegségre. De mindegyik krónikus betegséggé változtatja, amivel a betegek szinte korlátlan ideig élhetnek. A legnagyobb probléma az, hogy ezek az évi 15 ezer dollárba kerülő kezelések anyagilag elérhetetlenek a legtöbb ország számára Európán és Észak-Amerikán kívül.

A helyzet Afrikában a legkritikusabb. A probléma nem csak az, hogy a legtöbb afrikai ország nem tud fizetni a gyógyszerekért. Még ha a gyógyszerek csökkennének is, ezeknél a nemzeteknél hiányzik az infrastruktúra a gyógykezelés adminisztrációjához és elosztásához. Húszéves „pályafutása” alatt az AIDS halálos hírességgé vált. Tüntetések és híres szimpatizánsok, mint Bill Gates, illetve popsztárok segítségével az AIDS-mozgalom a rivaldafénybe került, és rákényszerítette a nagy gyógyszergyártó cégeket, hogy kereskedelmi áron szállítsanak gyógyszereket szegény országoknak. Ez csak az első lépés. Nyilvánvaló, hogy a több milliárd dolláros nemzetközi alap ellenére sem lesz elég pénz arra, hogy mindenkinek gyógyszert vegyenek, még kereskedelmi áron sem. Akkor ki kapja őket?

Jóllehet az AIDS korai terjedését elsősorban a homoszexuális szexnek tulajdonították, ma a heteroszexuális szex átadásának vezető módja. Ahogy megállapítottuk, a középpontok kulcsfontosságú szerepet játszanak ezekben a folyamatokban. Egyedülálló szerepük határozott, de kegyetlen megoldást sugall: amíg a források végesek, csak a középpontokat kezeljük. Vagyis, amikor létezik egy gyógyszer, de nincs elég pénz, hogy mindenkinek biztosítsuk, elsődlegesen a középpontoknak kell hogy adjunk. Erre a következtetésre jutott két friss tanulmány, az egyik Pastor-Satorras és Vespignani műve, a másik Dezső Zoltáné, egy doktori képzésben részt vevő hallgatóé a kutatócsoportomban. Az eredmények azt mutatják, hogy ha minden pontnak, amely nagyobb fokozattal rendelkezik, mint az előre beállított érték, biztosítunk gyógyszert, akkor mindegy, milyen értéket adunk meg határnak, a járványküszöbérték végessé válik. Tehát minél több középpontot kezelünk, annál nagyobb a valószínűsége, hogy a vírus kihal. A probléma az, hogy nem tudjuk biztosan, kik a középpontok. Ezért Dezső Zoltán és én a bonyolultabb probléma megoldásának keresésére indultunk. Bár nem tudjuk nagy biztonsággal azonosítani a középpontokat, évtizedek kutatásai számos szociológiai eljárást hoztak létre veszélyes csoportok, valamint egy adott közösségen belüli valószínű járványforrások azonosítására. Társadalmi helyzet, kor, foglalkozás és sok más tényező mind szerepet játszik. Ezért, bizonyos

hibaszázalékkal ugyan, de azonosítani tudjuk a középpontokat. Kétségtelen, hogy sok középpont felfedezetlen marad, míg néhány nem középpont is szerepel a listán. De fel kell tennünk a kérdést: vajon hasznos-e egy ilyen tökéletlen eljárás? Mivel a középpontok azonosítása nem elég, vissza tudjuk-e állítani a járvány küszöbértékét? Hogy megválaszoljuk a kérdést, fel kell tételeznünk, hogy a pontokat nem véletlenszerűen kezeljük, hanem az egészségügyi szervezetek bizonyos elveket követnek, így valószínűbb, hogy egy sok szexuális kapcsolattal rendelkező egyént kezelnek egy kevéssel rendelkező helyett. E sztochasztikus megközelítés segít, hogy összehasonlíthassuk azokat az eljárásokat, melyek nagyon hatékonyak a sok kapcsolattal rendelkező pontok azonosításában és kezelésében, azokkal, melyek véletlenszerűen osztják el a kezelést. Dezső Zoltán vállalkozott az összehasonlításra, és meg voltunk lepve az eredménytől. Az biztos, hogy mindegyik eljárásnak, ami folytatta a kezeléseket véletlenszerű elosztását, továbbra is zéró küszöbértéke volt, és nem sikerült megállítania a vírust. De bármely eljárás, amely előnyben részesítette a sok kapcsolattal rendelkező középpontok kezelését, akárcsak kis részrehajlással, visszaállította a véges járványküszöbértéket. Vagyis, még ha nem is sikerül az összes középpontot megtalálnunk, ha megpróbáljuk, csökkenteni tudjuk a betegség terjedési sebességét.

Bármely megkülönböztető eljárás fontos etikai kérdéseket vet fel. Mivel forrásaink korlátozottak, a promiszkuitás megjutalmazásánál kötnénk ki: minél több szexuális partnere van valakinek, annál nagyobb a valószínűsége, hogy kiválasztják a kezelésre. Minél jobbak vagyunk a szexuálisan kicsapongó egyének kiválasztásában és kezelésében, annál kevesebb embert érint a betegség. Fel vagyunk készülve arra, hogy sorsára hagyjuk a kevesebb kapcsolattal rendelkező betegeket a népesség egészének előnyéért? Fel vagyunk készülve arra, hogy inkább a szegény prostituáltaknak biztosítsunk gyógyszereket, mint a gazdagabb, de szexuálisan kevésbé összekapcsolt középosztálynak?

Van egy megoldás, amellyel ezek a morális kétségek megoldódnának: egy oltóanyag. Jelenleg a világ pusztán 350 millió dollárt költ évente az AIDS-oltóanyag kutatására. A szám eltörpül azzal a hárommilliárd dollárral összehasonlítva, melyet évente költenek AIDS-gyógyszerekre Amerikában és Európában, vagy az egymilliárd, vagy még több dollár mellett, amennyibe egy egyszerű vadászgép kerül. Miközben a prioritások felállításán küszködünk, érzésem szerint most kéne mindent megtennünk, amit lehet, hogy megállíthassuk a betegség terjedését, még akkor is, ha ez azzal jár, hogy a promiszkuitást jutalmazzuk.

## 11.

A sikerek és kudarcok, járványok és szeszélyek megértése figyelemre méltó módon sokat fejlődött az úttörő iowai tanulmány óta. Az utolsó néhány évtizedben a téma elképesztő változatosságának lehettünk tanúi. Megtudtuk, hogy egy új vetőmagra való átállás tanulmányozása segíthet megérteni az AIDS elterjedését és a

kasszasikerek titkát. Megtudtuk, hogy bár minden diffúziós folyamat magában foglal némi véletlenszerűséget, a folyamat maga olyan törvényeket követ, melyeket precíz matematikai kifejezésekkel szabályba tudunk foglalni. És kezdjük megérteni az ismeretségi hálózatoknak ezekben a folyamatokban játszott fontos szerepét.

Az elmúlt öt évtizedben azonban sok minden változott. A világméretű ismeretségi hálózatban belső robbanás következett be a nagy sebességű kommunikációs eszközök elterjedésével - a faxoktól az e-mailig -, mely a történelem során eddig példátlan módon hoz össze minket. Sürgetően fontos, hogy megértsük, hogyan befolyásolja ez a robbanás a diffúzió törvényeit. A bioterrorizmus egyre fenyegetőbb veszélyével és az AIDS állandó terjedésével a hátunk mögött feltétlenül szükség van arra, hogy képesek legyünk megjósolni és követni a halálos vírusokat egyre mobilisabb világunkban, ahol a fertőzöttek felpattanhatnak a repülőgépre, és egy helyi járványt világméretűvé tehetnek. Egyre inkább számítógépfüggő világunkban vírusok olyan új nemzedékét hoztuk létre, melyek számára nem léteznek nemzetiségi korlátok. A Love Bug ezen testvérei többek egyszerű kellemetlenségénél. Kézelfogható fenyegetést jelentenek biztonságunkra és életformánkra, könnyedén képesek arra, hogy életveszélyes fenyegetést jelentsenek ránk. Elburjánzásukkal egy új fajta született meg a járványkutatóknak, a számítógépes biztonsági szakértő, aki éberrel figyeli online világegyetemünk egészségét.

Újítások és biológiai vagy számítógépes vírusok terjednek inhomogén hálózatokon, melyeket a középpontok vezetnek. A Trieszt-tanulmány rejtett üzenete az, hogy még több meglepetésben lehet részünk, ha a terjedésről és a diffúzióról van szó. Úgy gondolom, hogy az eddigi eredmények csak a jéghegy csúcsát jelentik. Míg a terjedésnek és diffúzióknak univerzális tulajdonságai vannak, az egyéni rendszerek egyedülálló sajátosságokkal rendelkeznek, amik gyakran ugyanolyan fontosak, mint néhány általános törvény. Csak magunkat csapnánk be, ha azt hinnénk, hogy számítógépes vírusok modellezése hű képet adhat nekünk az AIDS-járványról. Hogy képesek legyünk részletes előrejelzéseket készíteni a betegség terjedéséről, a modelleknek tartalmazniuk kell sok részletet, melyek a világméretű betegségekre jellemzők. Ez még mindig csak távoli álom. De a terjedést és a diffúziót irányító alapvető törvények megértése elengedhetetlen a sikerhez. Az újabb áttörések arra ösztönöznek, hogy ismét elővegyük a marketingtől az influenzáig terjedő problémákat, és hogy kritikusan vizsgáljuk a hozzájuk tartozó feltételeket. Ha követjük ezt az utat, meg vagyok győződve róla, hogy még sok meglepetés és áttörés kerül napvilágra.

A diffúzió és járványügyi tanulmányok területén mostanában lezajlott paradigmaváltozások az internet által biztosított adatbőség miatt voltak lehetségesek. Az internet segített abban, hogy egyáltalán felfedezzük a skálafüggetlen hálózatokat. A rajta terjedő vírusok biztosították a rálátást és a szükséges adatokat, melyek lehetővé tették a Trieszt-tanulmány megszületését, felfedve néhány járvány küszöbértéktől mentes voltát. A tanulság, melyhez vezettek, arra készítet minket, hogy újra elővegyünk minden kérdést a szeszélyektől az AIDS világméretű problémáig. De

most lépünk hátra, és vessünk egy pillantást az összekuszált közegre, mely lehetővé tette ezeket a felfedezéseket, és vázoljuk fel a mögötte lévő hálózatot.

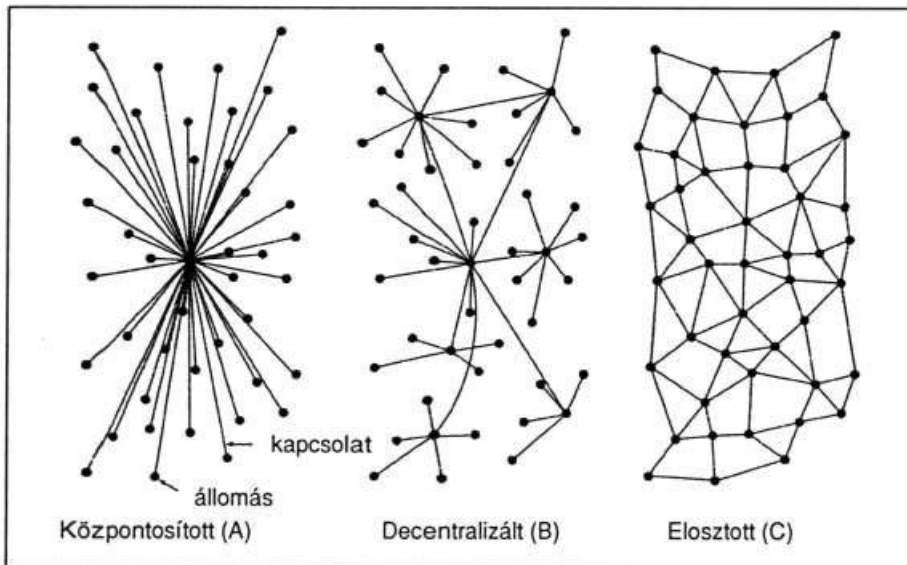
# A TIZENEGYEDIK LÁNCSZEM

## *Az ébredező internet*

Amikor Paul Baran egyhetes késéssel beiratkozott informatika szakra a pennsylvaniai egyetemre, tudta, hogy már kihagyta az első órát, de ez nem aggasztotta túlságosan. Általában nem sok történik az első órán. Úgyhogy csak a második órán jelent meg, ahol a Boole-algebrával, a számítógépes logika mögötti matematikával foglalkoztak, így emlékszik vissza rá: „Az előadó a táblához ment, és felírta:  $1 + 1 = 0$ . Körülnéztem a teremben arra várva, hogy valaki kijavítsa ezt a gyalázatos számítást. Senki sem tette. Úgyhogy megállapítottam, hogy itt valami nekem hiányzik, és nem mentem tovább vissza.” Mégis tíz évvel később újra felvette ezt a tárgyat, az egyetem elvégzése utáni negyedik állása idején. Ez alkalommal egy másik problémával kellett szembenéznie: túl korán érkezett. Alig volt harmincéves, és még csak néhány hónapja dolgozott a RAND Corporationnál, amikor Baran egy új, atomháborút is túlélő kommunikációs rendszer kidolgozásának rendkívüli feladatát kapta. 1959-ben az, hogy egy szovjet nukleáris robbanófej leeshet az égből, nem pusztán sci-fi volt, hanem egy olyan háborús eshetőség, melynek bekövetkezésétől jogosan félték. Baran munkaadója, egy kaliforniai „agytröszt”, melyet 1946-ban létesítettek, hogy biztosítsa a hadsereg nukleáris megerősítéséhez szükséges intellektuális technikai tudást, nagy tapasztalattal rendelkezett a háborús forgatókönyvek és lehetséges katasztrófák kimenetelének terén. Az ilyen kegyetlen feladat, milliók halálának megjósolása egy nukleáris támadás esetén és ennek részletezése sohasem volt forrása a jó sajtónak, és gyakran hasonlították a cég tevékenységét a Stanley Kubrick híres filmjében, a Dr. Strangelove-ban megismerthez. Baran megbízása, hogy kifejlesszen egy kommunikációs rendszert, mely képes átvészelni egy ilyen csapást, átlagosnak számított a RAND-nál. Baran komolyan vette a munkáját, és a RAND Memorandumok egy húszkötetes sorozatában aprólékosan ecsetelte a létező kommunikációs infrastruktúra sebezhető pontjait, és egy jobbat ajánlott - az internetet.

Baran világosan látta az 1950-es évek végrehajtási rendszerének sérülékenységét, amely a létező kommunikációs hálózat topológiájában rejtőzött. Mivel egy nukleáris csapás akadályoz minden berendezést a robbanás körzetében, olyan rendszert kívánt létrehozni, aminek e körzeten kívüli felhasználói nem vesznek el egymással a kapcsolatot. Az akkori kommunikációs rendszereket tanulmányozva háromfajta hálózatot látott (lásd 11.1-es ábra). Baran elvetette a csillagszerű topológiákat, mivel „a központosított hálózat nyilvánvalóan sebezhetőbb, hiszen egy egyedülálló központ kiiktatása megakadályozza a kommunikációt a végállomások között”.





**11.1 ábra. Paul Baran hálózatai.** 1964-ben Paul Baran elkezdett az internet optimális szerkezetéről elmélkedni. Három különböző típusú szerkezetet gondolt lehetségesnek egy ilyen hálózat esetében -központosított, decentralizált és elosztott típusokat-, és figyelmeztetett arra, hogy a központosított és a decentralizált struktúrák, mint amilyenek az abban az időben uralkodó kommunikációs rendszerek voltak, a támadásokkal szemben túl sebezhetőek. Helyette azt javasolta, hogy az internetet úgy tervezzék, hogy elosztott rácsszerű felépítése legyen. (Reprodukálva Paul Baran engedélyével.)

Baran szerint az akkori rendszer a következő volt: „csillagok halmazának hierarchikus szerkezete, melyek egy nagyobb csillagokban vannak összekapcsolva”. Ez gyakorlatilag a skálafüggetlen hálózatok korai leírása. Ezt a topológiát - elképesztő éleslátással - túl központosítottnak találta ahhoz, hogy életképes legyen támadások közepette. Baran szerint az ideális rendszer, mely képes a túlélésre, elosztott rácsszerű hálózat kell hogy legyen, mint egy országúti rendszer, amely elég redundáns ahhoz, hogy ha néhány csomópont kiesik, alternatív útvonalak tartsák fenn a kapcsolatot a megmaradt csomópontok között. Egy makacs mítosz szerint az internetet úgy tervezték, hogy túléljen egy szovjet nukleáris csapást. Az igaz, hogy Baran fő indítéka az volt, hogy olyan rendszert tervezzen, melyet nem tesz tönkre egy szovjet nukleáris arzenál. De hosszú időn át elgondolásait és újításait teljesen figyelmen kívül hagyta a katonaság. Ennek eredményeképpen a mai internetnek nem sok köze van ehhez az elképzeléséhez. Valójában nem az általa javasolt topológiai változtatás miatt ellenezték hevesen terveit mind a katonaságnál, mind ipari téren. A tiltakozás az ellen a szándéka ellen irányult, amely szerint az üzeneteket egységes méretű kisebb adatcsomagokra kell bontani, melyek képesek arra, hogy függetlenül mozogjanak a hálózaton. Ezt nem lehetett elérni az akkor létező analóg kommunikációs rendszerrel. Ezért digitális rendszerre való áttérést javasolt. Ez a lépés túl bonyolult volt az AT&T, az akkori távközlési monopólium számára. Emiatt Jack Osterman végleg

elvetette Baran elképzeléseit, mikor kijelentette: „Először is valószínűleg nem működne, de ha mégis, átkozott bolondok lennénk, ha megengednénk egy versenytárs létrejöttét.”

Baran ötleteit, amelyeknek megvalósulását az ipar és a katonaság meggátolta, csak évek múlva fedezték fel újra, mikor az Advanced Research Projects Agency (az amerikai Védelmi Minisztérium Fejlett Kutatási Projektek Ügynöksége), mivel nem értesült eredményeiről, tőle teljesen függetlenül ugyanazt a tervet hozta létre. Ekkor azonban az internet már javában fejlődött.

Az internet topológiájának megértése feltétlenül szükséges az eszközök és a szolgáltatások létrehozásához, melyek gyors és megbízható kommunikációs infrastruktúrát biztosítanak. Annak ellenére, hogy emberek készítették, az internet nem központilag tervezett. Szerkezetileg az internet közelebb áll egy élő rendszerhez, mint egy svájci karórához. Emiatt az internet megértése nem csak mérnöki vagy matematikai probléma. Fontos döntések, történelmi erők formálták topológiáját. Összetartó gondolatok és egymással versenyző motivációk zavaros meséje hagyta nyomát az internet szerkezetén, zűrzavaros információtümeget hagyva a történészeknek és számítástechnikusoknak, hogy kibogozzák.

## 1.

Az Advanced Research Projects Agency vagy ARPA, Eisenhower elnök válasza volt az első szovjet műhold, a Szputnyik kilövésére. Eredetileg az ARPA-nak elsöprő hatalma volt a legfejlettebb katonai kutatási és fejlesztési tervek, nevezetesen a rakétaelhárítási és a műholdas programok felett, de elvesztette erejét, mikor a NASA átvette az űrprogramot. Megbízásért küzdve, az ARPA a katonasággal kapcsolatos hosszú távú kutatásokra állt át, ellentétben az azonnali fejlesztési projektekkel, melyekre a különböző katonai ügynökségek szakosodtak. Az internet 1965 vagy 1966 táján jött a képbe, amikor Bob Taylor, az ARPA számítástechnikai programjának vezetője hirtelen aggódni kezdett az állami készletek hatalmas pazarlása miatt, amit épp akkoriban fedezett fel.

Az 1960-as években az ARPA már nagyban finanszírozta a számítógépes kutatásokat. Ez valóban figyelemre méltó befektetést igényelt - évtizedekkel a PC-k forradalma előtt a számítógépek ára félmillió dollártól indult, és a határ a csillagos ég volt. Az ARPA birtokában több ilyen gépszörny is volt, szerte az országban különböző kutatólaboratóriumokban. A probléma az volt, hogy még az egy szobában lévő számítógépek sem tudtak kommunikálni egymással. Más ARPA által támogatott laborban lévő számítógépes fonás megcsapolása szóba sem jöhetett. Bob Taylornak briliáns ötlete támadt: miért nem kapcsoljuk össze ezeket az inkompatibilis gépeket valahogy? 1966 februárjában, miután lefestette elképzeléseit Charlie Herzfeldnek, az ARPA igazgatójának, egy friss millióval a zsebében és új küldetése tudatával sétált el.

A számítógépek összekötésének gondolata másnak is eszébe jutott. Donald Davies, a Nagy-Britannia Nemzeti Fizikai Laboratóriumának számítástechnikai igazgatója Tennington-ban, egy London mellett fekvő városban keményen dolgozott azon, hogy elképzeléseit valóra váltsa. Davies újra feltalálta a csomagokat és a csomagkapcsolást, jóval azelőtt, hogy értesült volna Baran már létező munkájáról. A csoportja az 1967-es texasi gatlinburgi szimpóziumon mutatta be koncepcióját, megismertetve az ARPA-t saját és Baran elképzeléseivel. Azonnal nyilvánvalóvá vált mindenki számára, hogy a gyorsabb vonalakon történő csomagkapcsolás volt az a technológia, ami a valóban hatékony kommunikációhoz kellett. Baran évtizedes elgondolása végre kezdett megvalósulni. És így a hálózat, melyet ma internetnek hívunk, megszületett.

Az internet szót gyakran online világegyetemünk egészének leírására alkalmazzuk, a számítógépeket, routereket, optikai kábeleket, még a World Wide Webet is beleértve. Itt a szót csupán a számítógépeket összekötő fizikai infrastruktúrára használjuk, a protokollokon keresztül egymással kommunikáló internetrouterek hálózatára, melyet Paul Baran álmódott meg, és az ARPA mély zsebeinek köszönhetően született meg. A sors fintora, hogy az internetet uraló mai alapelvek mindenben megegyeznek Baran eredeti elképzeléseivel, kivéve a vezérelvet, mely munkája során motiválta, hogy megelőzze a támadásokkal szembeni sérülékenységet. Baran elosztott, országútszerű rendszere valósággá válhatott volna, ha az internetet továbbra is a katonaság tartja fenn és szabályozza. Az internet azonban a saját életét kezdte élni.

## 2.

A számítástechnikai közösségben Bill „Ches” Cheswick, a Lucent/Bell laboratóriumok mellett kialakult Lumeta nevű cég kutatója legjobban a tűzfalokról és számítógépes biztonságról szóló munkáiról ismert. De a nyilvánosság egyre inkább a színes internettérképek miatt ismeri meg őt és Hal Burchöt, aki szintén a Lumetánál dolgozik. Ezeket a térképeket ők készítik, és a Peacockmaps.com-on keresztül adják el őket. A milleniumi térkép, amely az internet topológiáját ábrázolja 2000. január 1-jén, a routerek és kapcsolatok sűrű, kusza, de akár szépnek is mondható erdejét tárja elénk. Bonyolultsága valószínűleg csak az emberi aggyal lehet egyenrangú. Van azonban egy fontos különbség a kettő között. Amíg az emberi agy mérete évszázadokon keresztül változatlan, addig az internet folytatja az exponenciális növekedést, a lassulás bármilyen jele nélkül.

Cheswick egyáltalán nem egy magányos tudós művészi ábrándokkal. Illusztris társaság tagja. A DARPA, az ARPA utódja, jelenleg dollármilliókat költ kutatócsoportokra szerte az Egyesült Államokban, akik azzal foglalkoznak, amivel Cheswick: az internet térképével. A legismertebb ezek közül a tervek közül a Cooperative Association for Internet Data Analysis vagy CAIDA, egy internettomográfias együttműködés a kaliforniai egyetemen, San

Diegóban, aminek fő célja, hogy megfigyelje az internet szinte összes jellegzetességét a forgalomtól a topológiáig. Az Atlanti-óceánon túl, de épp csak egy kattintásnyi távolságban Martin Dodge, a londoni Center for Advanced Spatial Analysis kutatója tartja fenn a cybermaps.com című oldalt, ahol az internetet megjelenítő térképek elképesztő anyagát gyűjti össze.

Gyakran megtörténik önnel, hogy aprólékos tervrajzot készít a karórájáról, egy Pentium-chipről a számítógépében, vagy az autóról, mellyel mindennap munkába megy? Aligha. Ha valóban tudni akarja, mi van a motorháztető alatt, kapcsolatba léphet a gyártóval a kocsis részletes terveierért. A mérnökök tervrajzok százait készítik el, mielőtt egy órát, áramkört vagy autót előállítanak, részletezve nemcsak minden egyes alkotóelemet, de a helyet és a kapcsolatot is minden egyes elem között. De ma, amikor az internet az amerikai gazdaság igáslova, még mindig nincsen részletes térképünk róla. Mióta a National Science Foundation kiengedte a kezéből az internet felügyeletét 1995 elején, semmilyen központi hatóság nem irányítja vagy dokumentálja növekedését és tervezését.

Manapság az internet helyi, elosztott döntések alapján, „ahogy szükség van rá” alapon fejlődik. Mindenki, a cégektől az oktatási intézményekig, csomópontokat és kapcsolatokat ad hozzá, bármiféle központi hatóság engedélye nélkül. Nem létezik egységes hálózat sem. Független, de összekapcsolt hálózatok léteznek és működnek együtt, olyan nevek, mint a WNET, a vBNS vagy az Abilene.

Lehet, hogy az olvasó azt gondolja, hogy van valaki, aki, ha szükséges, le tudná állítani az egész dolgot. Nem igaz. Noha meg tudna győzni egy intézményt, hogy szüntesse meg az általa irányított hálózatrészt, egyetlen cég vagy személy sem irányít egy elhanyagolható kis résznél többet az egész internetből. A mögöttes rendszer annyira elosztottá, decentralizálttá és helyileg védetté vált, hogy még az az egyszerűnek tűnő feladat is gyakorlatilag lehetetlen, hogy egy központi térképet szerkesszünk.

### 3.

Fontos praktikus okok léteznek egy globális internettérkép kutatására. Az internet topológiájának ismerete nélkül lehetetlen jobb eszközöket és szolgáltatásokat tervezni. A mai internetes protokollokat egy kis hálózattal fejlesztették ki az 1970-es évek technológiájával, az akkori elvárásokat figyelembe véve. Ahogy a hálózat nőtt, és új alkalmazások jelentek meg, ezek a protokollok gyakran kevésnek bizonyultak vágyainkhoz. A mai internetfelhasználás legnagyobb része elképzelhetetlen volt azok számára, akik a napjainkban is használatos infrastruktúra alapját tervezték. Például az e-mail akkor született, mikor egy vállalkozó kedvű hacker, a BBN-nél, egy kis tanácsadó cégnél Cambridge-ben, Massachusetts-ben dolgozó Rag Tomlinson kitalálta, hogyan változtassa meg az állományátviteli protokollt, hogy levélüzeneteket szállítson. Tomlinson hosszú ideig hallgatott újításáról. Amikor először megmutatta kollégái egyikének, figyelmeztette: „Ne

mondd el senkinek! Nem ezen kéne dolgoznunk." Az e-mail azonban kiszivárgott, és a korai internet egyik uralkodó alkalmazásává vált.

Ugyanez igaz a World Wide Webre is. Az infrastruktúrát egyáltalán nem erre készítették. Ez tökéletes példája a „sikeres katasztrófának” (success disaster), amikor egy alkalmazási lehetőség még az előtt szabadul ki a világba és válik sikeressé, hogy a tervezése befejeződött volna. Mostanában az internetet szinte kizárólagosan a World Wide Web és az e-mail elérésére használják. Ha az eredeti feltalálói ezt előre látták volna, teljesen más infrastruktúrát terveztek volna, ami sokkal zökkenőmentesebb felhasználást tenne lehetővé. Ehelyett be vagyunk zárva egy olyan technológiába, amely csak nagy nehézségekkel alkalmazkodik az internet egyre kreatívabb felhasználása miatt növekvő változatosságához és igényekhez.

A kilencvenes évek közepéig minden kutatás a protokollok és alkotóelemek létrehozására koncentrált. Ezzel szemben az utóbbi időben tudósok egyre növekvő száma teszi fel a nem várt kérdést: „Pontosan mit alkottunk?” Bár teljesen emberi tervezésű, az internet most már a saját életét éli. Rendelkezik egy bonyolult fejlődő rendszer minden sajátosságával, sokkal inkább hasonlít egy sejthez, mint egy számítógép chipjéhez. Sok, külön-külön fejlődő, eltérő alkotóeleme egy olyan rendszerré áll össze, amely jóval több, mint részeinek összessége. Emiatt az internet kutatói tervezőkből egyre inkább felfedezőkké válnak. Olyanok, mint a biológusok vagy ökológusok, akik egy elképesztően összetett rendszerrel néznek szembe, ami minden gyakorlati érv ellenére, nélkülük teljesen függetlenül létezik. A rejtély azonban kicsit homályosabb ennél. Míg a biológusok évtizedeket töltöttek el azzal, hogy rájöjjenek, hogy néznek ki a fehérjék, és hogyan hatnak egymásra, az internet alkotóelemeivel kapcsolatos minden részlet elérhető az internet tomográfusa számára. Amit sem a számítástechnikusok, sem a biológusok nem tudnak, az az, hogy vajon hogyan állnak össze a részletek nagy formátumú struktúrává.

#### 4.

Vern Paxon és Sally Floyd számítástechnikai kutatók az International Computer Science Institute Center for Internet Researchnél a kaliforniai Berkeleyben. Egyik nagy hatású és sokat hivatkozott 1997-es tanulmányukban a hálózati topológiáról való korlátozott ismereteinket tartják a legnagyobb akadállyal az internet egészének jobb megértésében. Két évvel később három görög számítástechnikus testvér, a river-side-i kaliforniai egyetemen dolgozó Michalis Faloutsos, a torontói egyetemen kutató Petros Faloutsos és a Carnegie Mellon Universityn dolgozó Christos Faloutsos meglepő felfedezést tettek. Rájöttek, hogy az internetes routerek összekapcsolhatósági elosztása hatványfüggvényt követ. Szemináriumi tanulmányukban - On Power-Law Relationship of the Internet Topology (Az internet topológiájának hatványfüggvényi összefüggéséről) - azt mutatták ki, hogy az internet, a különféle fizikai kapcsolatokkal összekötött routerek összessége, egy skálafüggetlen hálózat. Felfedezésüknek egyszerű üzenete volt, melyet

a kutatói társadalom gyorsan megértett: minden módszer, melyet az internet struktúrájának modellezésére használtak 1999 előtt, a véletlen hálózatok elméletén alapult, ezért egyszerűen téves volt.

A Faloutsos fivérek nem ismerték a World Wide Web topológiájában párhuzamosan felfedezett hatványfüggvényeket. Ezekkel kombinálva felfedezésük új értelmet nyert, eltávolította az internetet a véletlen hálózatok csoportjából, és a skálafüggetlen topológiák színes világába helyezte. Ez eléggé váratlan volt. Hiszen az internet fizikai kapcsolatokból és routerekből áll. Az egész csak hardver. Hogy követhetik ezek a költséges és nehéz réz- és optikai összekapcsolások ugyanazokat a törvényeket, melyeket az emberek, mikor láthatatlan ismeretségi kapcsolataikat hozzák létre vagy linkeket adnak weblapjukhoz?

## 5.

1969 októberében megkérték Charley Kline-t, hogy bonyolítsa le az első számítógéptől számítógépig menő üzenetküldést egy egyszerű telefonvonalon. Leonard Kleinrock, az UCLA laboratóriumának egy programozója tagja volt az egyetlen másik internetes csomóponttal, a Stanford Egyetemen kapcsolatot létesíteni próbáló projektnek. Miután a kapcsolat megteremtése megtörtént, Kline elkezdte a login (belépés) szó beírását. Begépelte az „l”-t, és megkapta a visszaküldött karaktert, megerősítve, hogy a karaktert fogadták. Tovább folytatta az „o” betűvel, és megint megkapta a karakter-visszaküldést. Majd megkockáztatta a „g”-t. Ez azonban túl sok volt a fiatal rendszernek, és összeomlott, megszakítva a kapcsolatot.

A kapcsolatot hamar visszaállították, és miután az UCLA- és a Stanford-csomópontok szilárdan működtek, sok másik is csatlakozott. Az A Brief History of the Future szerzője, John Naughton szerint a Santa Barbara-i kaliforniai egyetem és a utah-i egyetem kapta a harmadik és negyedik csomópontot 1969 novemberében és decemberében. Az ötödiket a BBN, egy massachusettsi konzultációs cég kapta 1970 elején, az első országon keresztül hálózattal együtt - ez egy másik vonal volt, mely a Los Angeles-i gépeket kötötte össze a BBN bostoni számítógépeivel. 1970 nyarára a hatos, hetes, nyolcas és kilences csomópontot is telepítették: a MIT-nél, a RAND-nál, a System Development Corporationnál és a Harvardon. Ahogy Naughton megfogalmazta: „A rendszer elkezdte kiterjeszteni szárnyait vagy - hogyha gyanakvó természet vagy - a csápjait.”

Ahogy már az olvasó is észrevehette, az internet a növekvő hálózatok klasszikus forгатókönyvét követi. Manapság, két évtizeddel később, folytatja a pontonkénti terjeszkedést, amely az első és szükséges feltétele a skálafüggetlen topológiának. A népszerűsítő kapcsolódás, a második feltétel azonban sokkal kényesebb kérdés. Miért akarná bárki is a számítógépét más routerhez kapcsolni, mint a legközelebbi? Elvégre a hosszabb kábel lefektetése költségesebb.

Az derül ki, hogy nem a kábel hossza a korlátozó tényező az internet növekedése vagy stagnálása megállapításakor. Mikor egy intézmény

úgy dönt, hogy csatlakoztatja számítógépeit az internethez, csak egy paramétert tart szem előtt: a kommunikáció költségeit. A sáv szélesség szempontjából, vagyis hogy egy kapcsolat hány bitet tud másodpercenként továbbítani, a legközelebbi csomópont gyakran nem a legjobb választás. Néhány pluszmérföld gyorsabb routerekhez biztosíthat elérést.

A nagyobb sáv szélességet kínáló routerek valószínűleg több kapcsolattal rendelkeznek. Ezért, miközben jó kapcsolódási hely után kutatnak, a hálózatmérnökök elkerülhetetlenül a több kapcsolattal rendelkező csatlakozási pontok felé hajlanak. Ez az egyszerű következmény a népszerűségi kapcsolódás egy lehetséges forrása. Nem tudjuk biztosan, hogy ez-e az egyetlen forrása, de a népszerűségi kapcsolódás megkérdőjelezhetetlenül jelen van az interneten. Először Soon-Hyung Yook és Hawoong Jeong szemléltette, akik mindketten az én kutatócsoportomban dolgoztak, amikor összehasonlítottak több, havonta rögzített internetes térképet. Feltérképezve, hogyan nő az internet pontról pontra, mennyiségi bizonyítékot találtak, hogy a kapcsolatokban gazdag csomópontok több összeköttetést szereznek, mint a csak néhány összeköttetéssel rendelkező pontok.

A növekedés és a népszerűségi kapcsolódás elég kellene hogy legyen ahhoz, hogy megmagyarázza a Faloutsos testvérek által felfedezett skálafüggetlen topológiát. Ennek ellenére az interneten a dolgok egy kicsit bonyolultabbak. Bár nem az elsődleges szempont, a távolság igenis számít. Megcáfolhatatlan, hogy költségesebb kétférföldnyi optikai kábelt lefektetni, mint felet. Azt is figyelembe kell hogy vegyük, hogy a csomópontok nem jelennek meg véletlenszerűen a térképen. Routereket ott csatlakoztatnak, ahol igény van rájuk, és az igény az internetet használni szándékozók számától függ. Ily módon szoros összefüggés áll fenn a népsűrűség és az internetes csomópontok sűrűsége között. A routerek elosztása Észak-Amerika térképén egy fraktálcsoportot alkot, egy önazonos matematikai objektumot, melyet Benoit Mandelbrot fedezett fel az 1970-es években. Következésképpen, amikor az internetet próbáljuk modellezni, egyszerre kell hogy ismerjük a növekedés összjátékát, a népszerűségi kapcsolódást, a távolságtól való függőséget és a mögöttes fraktálszerkezetet.

Ezen erők mindegyike, ha maximálisan hatna, elegendő lenne, hogy megsemmisítse a skálafüggetlen topológiát. Például ha a vezeték hosszúsága lenne az elsődleges szempont abban, hogy eldöntsük, hova kapcsolódunk, a keletkező hálózat exponenciális fokú eloszlással bírna, egy országúthoz nagyon hasonló topológiát hozva létre. De az elképesztő az, hogy ezek az egyszerre létező mechanizmusok finoman kiegyensúlyozzák egymást, fenntartva egy skálafüggetlen internetet. Ennek az erőnek az egyensúlya az internet saját Achilles-sarka.

## 6.

A MAI Network Services, a virginiai McLean székhellyel rendelkező internetszolgáltató cég számos nagy sebességű, a Sprint és az UUNET birtokában lévő hatalmas hálózatokhoz csatlakozó routerrel

rendelkezik. 1997. április 25-nek reggelén a MAI útvonal-választási tábla frissítési parancsot adott ki routereinek. A routerek a fogadott csomagokat a címzetthez irányítják úgy, hogy a csomag fejlécébe írt címet kikeresik egy útvonal-választási táblázatból. Ezek az útvonal-választási táblázatok az internet úthálózati térképei. Ahogy a hálózati topológia állandóan változik, ezeket a táblázatokat is periodikusan frissítik. Reggel 8.30-kor a MAI szórt üzenetekkel frissítette a továbbítási információkat saját routerein. Egy helytelen beállítás miatt a frissítés nem állt meg a MAI határainál, hanem továbbterjedt, és újraírta a Sprint és az UUNET routereinek útválasztási tábláit. Arra utasította őket, hogy minden forgalmat különféle MAI-routerekhez irányítsanak.

Olyan volt az egész, mint a vizet nézni, mikor előtör az átszakadt gátból, mindent elpusztítva, ami az útjába kerül. A MAI rémülten nézte, ahogy minden internetes forgalom hirtelen hozzá irányítódott. Mivel sohasem volt elég kapacitása ahhoz sem, hogy egy töredékét irányítani tudja ennek az áradatnak, a MAI fekete lyukká vált, elképzelhetetlen sebességgel nyelte el a csomagokat. Negyvenöt perccel később a vállalatot leállításra kényszerítették, hogy megállítsák a károsodást. Időközben az internetszolgáltatók kétségbeesetten nézték, ahogy teljes forgalmukat beszippantja egy téves beállítás miatt létrejött fekete lyuk. A Sprint csak a routerek útvonalválasztási táblázatainak manuális megváltoztatása után tért magához, ahogy sok más kis és nagy internetszolgáltató is, akiket a probléma érintett.

A gyors megoldásnak és az internet viszonylagos fiatalságának köszönhetően, a világ csak kis figyelmet szentelt az eseménynek. Az eset azonban ragyogó példája annak, hogy milyen sebességgel terjednek tovább a hibák a világhálón: a rosszul konfigurált tábla a közzététel után percekben belül több nagy hálózat részévé vált, és a lavinaszerű hibasorozatok klasszikus példáját mutatta be.

Paul Barannek egy speciális fenyegetés lebegett szeme előtt, mikor az internet prototípusát tervezte. Szovjet nukleáris robbanófejeket várt, melyek hírszerzési és katonasági főhadiszállásokat találnak el, potenciálisan teljes információ- és kommunikációvesztést okozva. Sem ő, sem az internet korai úttörői nem vették figyelembe annak lehetőségét, hogy egy nap bármely ország bármely polgára hozzáférhet az infrastruktúrához. Sok éven át az Egyesült Államok akadályozta a technológia megosztását az ellenségesnek vélt országokkal. Magam is tapasztaltam, ahogy a nagyon utált COCOM-lista hivatalosan elzárta Magyarországot az internettől a berlini Fal leomlásáig. Az internet azonban túl ragályos volt, hogy ilyen mesterséges akadályok megállítsák. A helyi rendszerek találékony irányítóinak köszönhetően sok kelet-európai egyetem e-mailen keresztül már összeköttetésben állt nyugati kollégáikkal, jóval azelőtt, hogy a korlátozásokat eltörölték. Ma a Föld jóformán minden országa össze van kötve az internettel. A nyitott hozzáférés e politikája nem várt veszélyeket és sérülékenységet hozott magával, egyre jobban fenyegetve összekapcsolt világunkat.

Az Egyesült Államok legforgalmasabb csomópontjainak egyike az AT&T birtokában van, ez Schaumburgban, az Illinois állambeli Chicago elővárosában, egy szigorúan őrzött föld alatti intézményben található. Ez és még több hasonlóan jól őrzött kulcscsomópont a biztonságunk azzal



a hamis érzésével tölthet el bennünket, hogy az internetet nem lehet lerombolni nemzetközi támadásokkal. A hálózati architektúra és a protokollok közti egyre jobban megértett kölcsönös kapcsolat azonban teljesen más képet fest. Néhány jól képzett hacker működésképtelenné tehetné az internetet harminc percen belül a világ bármely pontjáról. Sok módja van, hogy ezt véghezvigyék, a kulcsfontosságú routereket tartalmazó csomópontokhoz való betöréstől a legforgalmasabb csomópontok elleni szolgáltatás megtagadása típusú támadásokig (ennek a támadásnak az angol neve DOS, azaz Denial Of Service attack). A Code Red féreg, amely mint egy vírus terjedt, és a világ számítógépeinek százazreit fertőzte meg 2001 nyarán, jó példa arra a technológiára, amely ilyen pusztítást itt véghez. Először ártalmatlan vírusnak tűnt, mert nem károsította meg a gazdagépet. De néhány napi szunnyadás után hirtelen zombikká változtatta a megfertőzött gépeket, és egyidejűleg forgalommal bombázta a whitehouse.gov címet. A Code Red csak egy működési elv bizonyítéka volt, hogy mire képes egy automatizált vírus. Kifinomultabb változatok még soha nem látott kárt tudnának okozni. Néhány főbb csomópont kiiktatása még nem lenne elegendő ahhoz, hogy darabokra törje a rendszert, de a lavinaszerűen továbbterjedő többi routerhiba, melyek a kisebb csomópontokhoz átirányított forgalom miatt keletkeznének, bevégeznék a munkát.

A legtöbb elegendő felkészültséggel rendelkező crackernek és hackernek nem állna érdekében, hogy az internet egészét tönkretegyje. Egy sikeres támadás kedvenc játékuktól fosztaná meg őket, lehetetlenné téve a világháló elérését. Ezért egy, az egész internetet magában foglaló akció sohasem az igazi hackerek munkája lenne. De könnyen lehetne a célja vandál nemzeteknek és terroristáknak. Az internet topológiájának megértése segíti megvédését.

## 7.

2001. augusztus 30-án, a National Public Rádió ötperces részletet sugárzott legutóbbi, a brit Nature folyóiratban megjelent kutatásunkból. Nem ez volt az első eset, hogy kutatásainkat közölte a média. De a következő reggel, hitetlenkedve bámulva a projekt weblapjának számlálóját, mely tízezer találatot regisztrált az éjszaka során, ráébredtem, hogy a dolgok ezúttal kicsit különbözőek voltak. A postaládám zsúfolt volt a megszámlálhatatlan e-maillal. Legtöbbje pozitív volt. De néhány elég ijesztő volt. „Tartsd nagyon távol magad a számítógépeimtől!” - írta egy elhárítóprogramokat fejlesztő cégnél dolgozó rangidős tiszt. „Gyűlölném, ha egy újabb kelet-európai számítástechnikust kéne börtönbe dugnia az Amerikai Szövetségi Kormányzatnak” - szólt egy nem túl barátságos levél, emlékeztetve egy orosz hackernek az amerikai hatóságok által nemrég történt letartóztatására. „Kérem, igazolja, hogy hálózatunkon egyetlen számítógép sem volt, sem most célpontja ennek a programnak” - írta egy norvégiai cég vezérigazgatója. „Emlékeztetem arra, hogy ezen IP-címekbeli erőforrások bármely illetéktelen felhasználása jogi lépéseket és kártérítési követeléseket vonhat maga után.” Hogy lehet, hogy egy egyetemi hallgatóságnak szánt, az egyik legtekintélyesebb tudományos

folyóiratban megjelent cikk ilyen indulatokat és azonnali reakciót váltott ki?

James McAdamsnek, a Notre Dame Egyetem Department of Government and International Studies tanszékvezetőjének jó ötlete támadt 2000 elején. Összeállított egy hét egyetemi tanárból álló csoportot, mindegyik különböző szakterületről, mint a közgazdaságtan, fizika, jog, vegyészeti technológia, számítástechnika és ázsiai nyelvek, hogy félhivatalosan megvitassák az Internetet érintő hatásokat, a demokráciától a tanításig mindent. Egy hónapban egyszer összejöttünk ebédre vagy reggelire, felváltva ajánlottunk témákat a megbeszéléshez és jelöltünk ki olvasnivaló anyagokat, a kibertörvényektől a társadalmi mozgásokig a weben. Egy ilyen reggeli közbeni találkozó alatt említette meg Jay Brockman, hogy a web - metaforikusan szólva - egy számítógép. Ez töprengésre késztetett. Meg kell hagyni, az internet számítógépekből áll, melyek képesek weblapokat és e-maileket cserélni. De ez a korlátozott, felhasználó irányította kommunikáció még nem teszi a világhálót egyetlen számítógéppé.

Tudnánk valamit tenni, hogy ezen változtassunk? Rá tudnánk egy számítógépet venni arra, hogy irányítsa más számítógépek tevékenységét? Először is kényszeríthetnék-e egy számítógépet, hogy az én érdekeimben végezzen számításokat? Na, ez egy érdekes kérdés volt, amivel szívesen foglalkoztam. Kis kutatócsoportok alakításában egyeztünk meg, hogy megpróbáljuk eldönteni. Brockmanhez és hozzám hamarosan csatlakozott Vincent French, az internetes protokollok szakértője, és régi munkatársam, Hawoong Jeong. Sok megbeszélés és bevezetőóra után arról, hogy a számítógépek hogy kommunikálnak, egy egyszerű, de vitatott gondolat jelentkezett: élősködő számítások.

Elküldeni egy üzenetet az interneten keresztül komplex protokollok rétegei által szabályozott bonyolult folyamat. Például amikor rákattint egy URL-címre, hogy megnézzen egy weblapot, az igényt kis csomagokra bontják, majd elszállítják a weblap tulajdonosához. Ott az igényt rekonstruálják és értelmezik, a távoli számítógépet arra szólítva fel, hogy küldje el a kért webdokumentumot. Ezért egy ilyen látszólag egyszerű feladat, mint ráklikkelni egy URL-címre, jelentős mennyiségű számítást foglal magában. Az élősködő számítások ezt a helyzetet használják ki, hogy számításokat végezzenek egy irányító számítógép hatására úgy, hogy egész egyszerűen lefoglalják a számítógépeket a kommunikációban. Hogy elérjük ezt, összetett számítási problémákat szabályos internetes kérelmekbe bújtattunk. Mikor egy számítógép megkapta a csomagot, rutinellenőrzést hajtott végre, hogy ellenőrizze, nem sérült-e meg a csomag útja során. A számításokat végezve megoldotta az általunk csomagba kódolt problémát is.

Az élősködő számítások bemutatták, hogy képesek vagyunk arra, hogy ezer mérföldekre fekvő számítógépeket leigázzunk, arra kényszerítve őket, hogy a mi érdekeinkben végezzenek számításokat. Ez az alapvető sebezhető pontja az internet-nek számítási, etikai és jogi kérdések özönét vetette fel. Mi történik, ha valaki továbbfejleszti a módszert, hatékonyra teszi, és nagyban kezdi el használni? Ki birtokolja a forrásokat, melyeket bárki számára elérhetővé tettek az interneten?

Lehet ez a jele egy új internet-számítógép születésének? Lesz-e egy új intelligens lény az út végén?

Ha végletesen gondolkodunk, az élősködő számítások azt sugallják, hogy a jövőben a számítógépek szükség szerint tudják cserélni az információkat és a szolgáltatásokat. A chipen belüli kommunikáció jelenleg nagyságrendileg gyorsabb, mint a kommunikáció az interneten keresztül. A széles sávú kommunikáció fejlődésével a rés szűkülni fog. Nemsokára teljesen normális lesz más számítógépeket megkérni, hogy erőforrásaikkal vegyenek részt olyan összetett problémák megoldásában, melyre egy különálló számítógép vagy kutatócsoport nem képes. Ezt a lehetőséget kisebb méretben már megragadta a SETI@home, egy Berkeleyyn indított projekt, mely PC-k millióinak nem használt idejét használja ki a földön kívüli intelligencia kutatására.

A SETI-modell önkéntes együttműködésünket igényli. Legtöbbünk egyszerűen túl lusta ahhoz, hogy csatlakozzon. Ha azonban a protokollok engedélyezik az információk és szolgáltatások cseréjét, és ez normává válik, hatalmas erőforrásokat lehet megcsapolni. Útközben az internet függetlenedhet az emberi felügyelettől, mivel irányítani tudja az információk és szolgáltatások nagy részét, melyek ahhoz szükségesek, hogy speciális problémákat oldjon meg. Ennek beláthatatlan hatása lenne az internet topológiájára is, még nagyobb szerepet biztosítva az önszervezésnek. Talán eljön az idő, amikor, miután megkaptuk a választ webböngészőnkől, sem az olvasó, sem a számítógép nem fogja biztosan tudni, honnan is érkezett. Végül is ön tudja, hogy hol tárolja adatait az A betűt?

## 8.

A bőrünk egyedülálló mérnöki alkotás. Megvan az a képessége, hogy mérje és érzékelje a hőmérsékletet, a levegő mozgásának változását; fel tudja mérni a tárgyak nagyságát és azonosítani formájukat. Ezt a rengeteg apró beépített kémiai érzékelő segítségével éri el, amelyek az idegrendszeren keresztül kommunikálnak egymással. Ahogy Neil Gross rámutatott a Business Weekben, egy hasonló érzékenységű „bőr” borítja be a Földet is. Mérőeszközök milliói tűnnek fel mindenütt, beleértve kamerákat, mikrofonokat, termosztátokat és hőmérsékletmérőket, fény- és forgalmi érzékelőket, szennyezésdetektorokat, egyre gyorsabb és kifinomultabb számítógépekbe táplálva az információt. Szakértők 2010-re körülbelül tízezerre jósolják az egy emberre jutó távmérő eszközöket a bolygón. Ez a szám nem önmagában és önmagától különösen jelentős. Már jó ideje vannak érzékelőink, az élelmiszer-áruházak felügyeleti kameráitól az autódetektorokig, melyeket közúti lámpáknál rejtettek a járdába, hogy váltsák a fényeket a kereszteződésnél. Csak az változik, hogy ezek az érzékelők először táplálják az információt egyetlen integrált rendszerbe. Nemsokára több mint hárommilliárd internetre kötött mobiltelefon lesz, és közel tizenhatmilliárd internethez kapcsolt számítógép. A bolygó „bőrének” apró szenzorai minden után kémkedni fognak a környezettől országutainkig és testünkig. A legfontosabb: mind összekötte. Bolygónk egyetlen hatalmas számítógéppé alakul át, melyet összekapcsolt processzorok és

érzékelők milliárdja alkot. A kérdés, melyet sokan feltesznek, a következő: mikor lesz ennek a számítógépnek önálló tudata? Mikor fog egy gondolkodó gép, nagyságrendekkel gyorsabb parancsokkal, mint az emberi agy, spontán módon kibontakozni összekapcsolt modulok milliárdjából?

Lehetetlen megjósolni, hogy mikor válik az internet öntudatossá, de nyilvánvalóan már saját életét éli. Összehasonlíthatatlan sebességgel növekszik és fejlődik, követve ugyanazokat a törvényeket, amiket a természet használ, hogy saját hálóját szője. Valóban sokban hasonlít a valódi élő szervezetekhez. Pontosan úgy, mint egy sejtben történő reakciók milliói, a több terabájtnyi információ halad vonalain nap mint nap. Meglepő dolog, hogy az információk némelyikét nagyon nehéz megtalálni. Ez egy másik hálózathoz vezet minket: a World Wide Webhez.

# **A TIZENKETTEDIK LÁNCSEM**

## ***A darabokra tört világháló***

A tudományos-fantasztikus írók és látnokok, akiknek a könyveit gyermekként faltam, elhitették velem, hogy a századfordulón emberkinézetű robotok fogják az összes földi feladatot ellátni. Mégis anélkül léptünk át az új évezredbe, hogy ezek az alázatos szolgálók feltűntek volna a színen. Vagy talán a robotok csendben érkeztek. Nincsen olyan csillogó, arányló külsejük, mint az örökké aggódó C-3PO-nak, és nem tudnak olyan örömteli füttyöt sem produkálni, mint R2-D2. Bölcsen elkerülik, hogy megosszák velünk a zsúfolt euklideszi teret, ahol az ingatlan kincsnek számít. A huszonegyedik század robotjai láthatatlanok és testetlenek. Ők a virtuális világot lakják, amely lehetővé teszi számukra, hogy irigylésre méltó könnyedséggel ugorjanak át egyik kontinensről a másikra. Hiába meredünk rá számítógépes képernyőnkre, az nem fogja ezeket a robotokat leleplezni. De ha időt szánunk arra, hogy gondosan áttanulmányozzuk a számítógép naplófájljait, ami részletesen tárolja, hogy ki látogatott el honlapunkra, akkor tetten érhetjük őket. Látni fogjuk, ahogy fáradhatatlanul végzik a leghálátlanabb és legunalmasabb feladatokat, amit az emberiség valaha is kitervelt: weboldalak millióinak olvasását és indexelését.

Ezek a robotok, amelyeket gyorsra és hatékonyra terveztek - a világháló sportautói -, villámgyorsan söpörnek végig a linkeken, és kiszaglászhatnak majd mindent, ami az útjukba kerül. Miközben ezek a rendíthetetlen katonák elhomályosították azt a kis „bogarat”, amit Hawoong Jeong épített a háló feltérképezésére, én igazán büszke voltam Jeong programjára. Ez olyan volt, mint az első használt autó, amit az ember végre megengedhet magának. És majd minden másnap összeomlott, gyakran bajba is került, amikor akaratlanul olyan honlapokkal tért haza, amelyet robotok elleni védelemmel láttak el.

Hamarosan nyilvánvaló lett, hogy a teljes világháló feltérképezése egy olyan álom volt, amely kis gépünk képességeit meghaladta. Ám lopakodva és gyakran megakadva ugyan, mégis hazahozott körülbelül 300 ezer honlapot, eleget ahhoz, hogy felfedezzük a skálafüggetlen hálózatokat a weben. Egy bizonyos ponton abbahagytuk - valószínűleg egy kicsit túl hamar. Ha engedjük továbbmenni, és egy nagyobb mintát hozatunk vele haza a világhálóból, lehet, hogy a bonyolult hálózatok olyan más vonásait is felfedezhettük volna, amelyek a kis mintából nem voltak nyilvánvalóan észrevehetőek. Az internetkeresők a világháló sokkal nagyobb részét járják be, mint amennyit mi a kísérletünkben. Ezeket az óriási mintákat tanulmányozó kutatók néhány lenyűgöző felfedezésre bukkantak. Rájöttek, hogy a világháló kontinensekre és közösségekre töredezett, ami korlátozza és meghatározza viselkedésünket az online világegyetemben. Paradox módon azt is megmondták nekünk, hogy vannak ismeretlen területek, a webnek robotok által soha meg nem látogatott vagy nem látott egész kontinensei. Ami a legfontosabb, hogy megértettük, hogy a világháló szerkezete a rajta végzett szörföléstől a demokráciáig mindenre hatással van.

## 1.

Néhány évvel ezelőtt azt gondoltuk, hogy ismerünk mindent, amit a világhálóról tudni lehet. Gyakoriak voltak az olyan megjegyzések, hogy „ha nem találsz az AltaVistával, akkor valószínűleg nincs is”, vagy „a HotBot az első keresőrobot, ami képes a teljes webet indexelni és végigkeresni”. Hittünk abban, hogy az internetes keresők tudósítanak mindenről, és odahozzák nekünk a világhálót. Ez 1998 áprilisában hirtelen megváltozott. „A minőségi oldalak indexelését részesítjük előnyben a nagyobb mennyiségű oldal felkeresése helyett”, hangzott el az új szlogen az egyik fő internetkereső szóvivőjétől. Mások még tovább mentek ennél, azt állították, hogy „sok oldalt egyáltalán nem érdemes indexelni”. Mi történt? Ezt a hirtelen hangulatváltást egy 1998. április 3-án a Science-ben megjelent kutatás váltotta ki. A háromoldalas cikk teljesen megváltoztatta a világhálón tárolt információ elérhetőségével kapcsolatos felfogásunkat.

Steve Lawrence és Lee Giles soha nem tervezte, hogy aláaknázza az internetkeresők szavahihetőségét. A New Jersey-i Princetonban található NEC Research Institute-ban dolgoztak, és tanulógépekkel foglalkoztak, amely akkoriban a számítástechnika virágzó területe volt. Egy metakereső gépet építettek, egy Inquirusnak. elnevezett robotot, ami minden egyes nagyobb internetes keresőnél megérdeklődhetette, hogy talált-e egy megadott kereséssel megegyező oldalakat. Félúton felismerték, hogy robotuk többre képes, mint amire eredetileg kitalálták: segíthet megbecsülni a világháló méretét.

Inquirus megkért néhány internetkeresőt, hogy listázza ki az összes olyan oldalt, amiben egy adott szó, például a „crystal” (kristály) szerepel. Ha minden internetkereső végiglátogatja és indexeli a teljes webet, akkor a dokumentumokról azonos listát kell visszahoznia. A valóságban a különböző internetkeresőktől kapott listák azonban ritkán azonosak. Mindig van viszont egy jelentős átfedés. Például az AltaVista által megtalált ezer olyan dokumentumból, amiben szerepelt a „crystal” szó, háromszáznegyvenhárom rajta volt a HotBot listáján is. Ha elosztjuk az egymást átfedő dokumentumok számát az AltaVista által visszahozott oldalak számával, akkor megkapjuk, hogy a világháló mekkora hányadát fedi le a HotBot. Mivel a HotBot 1997 decemberében állítólag 110 millió oldalt indexelt meg, a NEC-csoport a világhálót közelítőleg 110/0,343 millióra becsülte, vagyis körülbelül 320 millió oldalra. Ma ez a szám már nem tűnik olyan nagyoknak. 1997-ben azonban ez legalább kétszer akkora volt, mint a világháló méretére vonatkozó akkori legmerészebb becslés.

1998 előtt elhittünk mindent, amit az internetkeresők nekünk a web méretéről mondtak. Úgy gondoltuk, hogy ha valakik, hát ők tudják. Lawrence és Giles korszakalkotó tanulmánya a világhálót tudományos vizsgálatok céljává tette - olyanná, amit szisztematikus és megismételhető módszerekkel lehet és kell elemezni. Az internetkeresők webfeltérképezési képességére vonatkozó felfedezésük azonban kevés okot adott a vidámságra.

## 2.

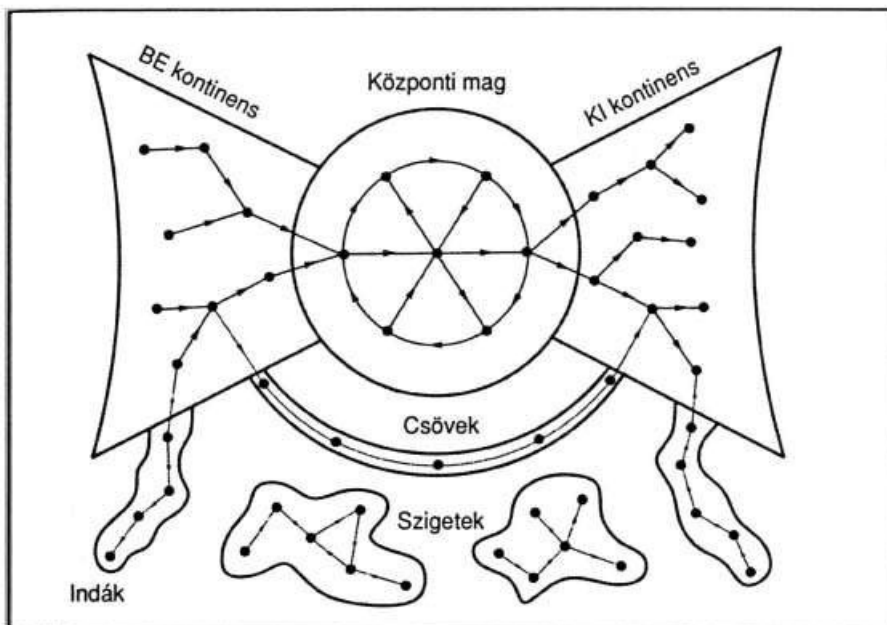
Az 1997-es NEC-tanulmány szerint a HotBot gyűjtötte össze a legnagyobb számú dokumentumot, így rászolgált arra a megkülönböztetésre, hogy ez a legnagyobb lefedettséget nyújtó internetkereső. Ez nagyon jó hír volt a vállalatnak. David Pritchard, a HotBot kereskedelmi igazgatója büszkén ismerte ezt el: „Miénk a legnagyobb indextartomány - nincs semmi meglepetés számunkra ebben a jelentésben.” Hát azért mégiscsak akadt itt néhány! A rossz hír az volt, hogy a HotBot a teljes világhálónak csak 34 százalékát fedte le. Az összes weboldal 66 százalékát nem látta. Az AltaVista, az abban az időben legnépszerűbb internetes kereső azért volt második a listán, mert robotjuk csak a web 28 százalékán szaglászott. Néhány internetkereső, mint a Lycos pedig csak 2 százalékot látott. Reakciójuk megjósolható volt: „Őszintén szólva nem túlságosan hiszek az ilyen típusú jelentésekben. Mi nem a mennyiségre, hanem a minőségre koncentrálnunk” - jelentette ki Rajive Mathur, a Lycos Inc. fő termékmenedzsere. Azt gondoltuk, hogy a NEC vizsgálata arra motiválhatta volna az internetkeresőket, hogy megnöveljék lefedettségüket. De nem ez történt. Egy évvel később, 1999 februárjában Lawrence és Giles megismételték a mérésüket, és azt találták, hogy a web mérete több mint kétszeresére, 800 millió oldalra duzzadt, de az internetkeresők ezzel a növekedéssel nem tartották a lépést. Lefedettségük valójában tovább romlott. Ekkor a Northern Light lett a vezető, amely a világháló 16 százalékát járta be. A HotBot és az AltaVista lényeges veszteséget szenvedett: lefedettségük 11, illetve 15 százalékra csökkent. A Google a 800 millióra becsült oldal nem egész 8 százalékát tekintette csak át. Összességében 1999-ben az internetkeresők a teljes web 40 százalékát fedezték fel. Ez azt jelenti, hogy tízből hat olyan oldal, amely a keresésünknek megfelelt, soha nem jelent volna meg egyik internetkeresővel sem. Egyszerűen soha nem látták. A NEC-tanulmány ádáz küzdelmet gerjesztett az internetes keresők között. Hirtelen számítani kezdett a méret. A harc az AltaVista és egy új internetkereső, a Fast között alakult ki; az új vállalat címe (alltheweb.com- a teljes világháló) nem hagyott egy pillanatnyi kételyt sem céljait illetően. 2000 januárjában az alltheweb.com túllépte a 300 millió oldalt. Az AltaVista szorosán követte. 2000 júniusára az „új fiú”, a Google vált a legkomolyabb kihívóvá, és túllépte az 500 millió oldalas határt. Az Inktomi rövidesen utolérte, és így tett egy másik újonnan jött is, a WebTop.com. 2001 júniusában a Google új rekordot ért el, átlépte a bűvös egymilliárd oldalas határt. Most a Google vezet. Az alltheweb.com - miközben azt az álmát próbálja megvalósítani, hogy a teljes világhálót feltérképezze - a második helyezett, több mint 600 millió oldallal, amelyet az AltaVista követ 550 millióval. Az internetkeresők egyre jobbak lesznek. Ez nagyszerű hír. Csak egy probléma van: a világháló még ennél is gyorsabban nő. A legtöbb kereső nem is próbálja meg a teljes világhálót lefedni. Az ok egyszerű: a legtöbb oldalt lefedő internetes keresők nem szükségképpen a legjobbak is. Ha nehezen megtalálható információt keresünk, akkor tényleg az a legjobb számunkra, ha ilyenkor a legnagyobb lefedettséget nyújtó keresőt használjuk. De ha népszerű témákról van szó, akkor a nagyobb index

nem feltétlenül ajánlja fel a legjobb eredményeket. Többségünknek elege van a találatok ezreiből, amivel az internetkeresők az egyszerű keresés használatakor visszatérnek. Ezért egy ponton túl több haszonnal jár úgy finomítani az algoritmusokat, hogy az internetes kereső óriási adathalmazából már csak a legjobb oldalt válasszák ki, ahelyett hogy mind mélyebbre hatolnának a világhálón belül. Mikor a hálón barangolunk - akár személyesen, akár robotok segítségével -, akkor nem csak a gazdasági ösztönzők (vagy azok hiánya) az egyetlen korlátozó tényező. A világháló egy skálafüggetlen hálózat, amelyet középpontok és sok kapcsolattal rendelkező csomópontok uralnak. Ahogy azt a következőkben látni fogjuk, a világháló nagy léptékű topológiája számos kis léptékű struktúrával létezik együtt, amelyek élesen korlátozzák, mennyit fedezhetünk fel belőle, ahogy egyszerűen a linkeken keresztül haladunk előre.

### 3.

A világhálón található egymilliárd oldal ellenére a tizenkilenc lépésnyi távolság azt sugallja, hogy a világhálón könnyen közlekedhetünk. Nagy, de mégis kicsi. A világháló mögötti kis világ azonban kissé félrevezető. Ha két oldal között van útvonal, akkor ez tipikusan rövid. De a valóságban nem minden oldal kapcsolható össze minden másikkal. Tetszőleges oldalról kezdve az összes dokumentumnak csak 24 százaléka érhető el. A többi láthatatlan számunkra, barangolással elérhetetlen. Ez annak a következménye, hogy különböző technikai okokból a web linkjeinek iránya van. Más szóval, egy adott URL mentén csak egy irányba utazhatunk. Nincs közvetlen kapcsolat egy irányított hálózat két pontja között, csak más pontokon keresztül köthető össze: például ha az **A** pontból **D** pontba akarunk menni, akkor kezdhetjük az **A** pontból, aztán a **S** pontra megyünk, amelynek van olyan mutatója a **C** ponthoz, ami a **D** pontra mutat. De nem lehet körutazást tenni. Egy nem irányított hálózatban - ahol mindkét irányba követhetőek a linkek - az **A** → **B** → **C** → **D** útvonal azt jelenti, hogy a legrövidebb út a **D**-ből az **A**-ba a fordított, **D** → **C** → **B** → **A**. Az irányított hálózatban azonban nincs garancia arra, hogy a fordított útvonal létezik. Legvalószínűbb, hogy visszafelé eltérő útvonalat kell követni: **D**-ből lehet, hogy közbeeső pontok tucatjait kell végiglátogatni, mielőtt visszaérünk az **A** ponthoz. A világháló tele van ilyen, nem összefüggően irányított ösvénnyel. Ezek a weben való közlekedést alapvető módon meghatározzák. Az irányított hálózatok nem jelentik a hálózatoknak egy igazán új osztályát: akár skálafüggetlen vagy véletlen a hálózat, ez lehet irányított vagy irányítatlan. Eddig többnyire irányítatlan kapcsolatokkal foglalkoztunk. Valóban az ismeretségi kapcsolatoktól a fehérjék közötti kapcsolatokig a legtöbb hálózat irányítatlan. De bizonyos hálózatok - a világhálótól a táplálékláncig - rendelkeznek irányított linkekkel. Ez az irányítottság a hálózat topológiájára nézve következményekkel jár.





**12.1 ábra. Egy irányított hálózat kontinensei.** Az irányított hálózatok - mint a World Wide Web - természetes módon több, könnyen azonosítható kontinensre oszthatók. A központi magban minden egyes pont bármelyik másik pontból elérhető. A BE kontinensben a pontok úgy vannak elrendezve, hogy ha követjük a linkeket, akkor az azonnal visszavisz minket a központi magba, de ha a magból indulunk, akkor nem tudunk visszatérni a BE kontinensre.

Ezzel ellentétben a KI kontinens összes pontja csak a magból érhető el, de ha egyszer odaértünk, nincs link, amely visszavinné a magba. Végül a csövek közvetlenül a BE és a KI kontinenset kötik össze; bizonyos pontok leágazást, indát alkotnak, amely csak a BE és a KI kontinenshez kapcsolódik; néhány pont pedig elszigetelt szigetet alkot, amelyek nem érhetőek el a többi csomópontból.

A világhálóval kapcsolatos hasonló következményeket először az AltaVistánál dolgozó Andrej Broder vizsgálta, aki együttműködött az IBM-mel és a Compaq-kal. 200 millió pontból álló mintát vizsgáltak, ami 1999-ben a világháló oldalainak körülbelül egyötödét jelentette. Méréseik azt mutatták, hogy az irányítottság legfontosabb következménye, hogy a web nem egyetlen homogén hálózatot alkot. Inkább négy fő kontinensre osztható (lásd a 12.1 ábrát), amelyek mindegyike különböző közlekedési szabályok betartására kényszerít bennünket, mikor be akarjuk őket járni. E kontinensek közül az első az összes weboldal majdnem egynegyedét tartalmazza. Gyakran hívják „központi mának”, otthont ad az összes fő weboldalnak a Yahoo!-tól a CNN.com-ig. Megkülönböztető vonása, hogy könnyen bejárhatjuk, mivel bármelyik két oldala között létezik útvonal. Ez nem azt jelenti, hogy a központi mag bármelyik két pontja között közvetlen kapcsolat van. Inkább, hogy a maghoz tartozó pontok mentén létezik olyan ösvény, ami lehetővé teszi, hogy bármelyik két csomópont között szörfölhessünk. A második és harmadik kontinens a BE és a KI, amelyek ugyanolyan

nagyok, mint a központi mag, de lényegesen nehezebb rajtuk a helymeghatározás. A BE kontinens oldalairól elérhetjük a központi magot, de a központi magból nincs visszafelé vezető útvonal a BE földre. Ezzel ellentétben a KI kontinenshez tartozó csomópontokat könnyen elérhetjük a központi magból, de ha egyszer kiléptünk a magból, nincs visszafelé vezető link. A KI földet a vállalati weboldalak népesítik be, amelyeket kívülről könnyű elérni, de ha már ott vagyunk, akkor nincs kifelé út. A negyedik kontinens „indákból” és nem kapcsolódó szigetekből áll, azaz egymáshoz kapcsolódó oldalak elszigetelt csoportjaiból, amelyek a központi magból nem elérhetőek, és nincs oda vezető linkjük sem. Néhány elszigetelt csoport weboldalak ezreit is tartalmazhatja. A világháló összes dokumentumának negyede ilyen szigeteken vagy indákon található. Általában a weben egy hálóoldal elhelyezkedésének nem sok köze van az oldal tartalmához, helyét többnyire inkább a kapcsolatai határozzák meg, a más oldalakhoz vezető bejövő és kimenő mutatói. Ez a négy kontinens lényegesen korlátozza a web bejárhatóságát. Hogy milyen messzire jutunk el a barangolással, attól függ, hogy honnan indulunk. Ha a központi mag egy pontjától kezdünk, akkor e fő kontinenshez tartozó összes oldalt el tudjuk érni. Nem számít azonban, hogy egerünkkel hányszor vagyunk hajlandók kattintani, a világhálónak közel a fele még mindig láthatatlan lesz számunkra, mivel a BE földet és az elszigetelt szigeteket nem lehet a központi magból elemi. Ha ebből a magból kijövünk a KI földre, akkor hamarosan zsákutcába jutunk. Ha az utazásunkat egy indáról vagy elszigetelt szigetről kezdjük, akkor a web nagyon picinek fog tűnni, mert csak az ugyanazon a szigeten található más oldalak lesznek elérhetőek. Ha az olvasó honlapja egy szigeten van, akkor az internet-keresők soha nem fogják felfedezni, hacsak URL-címét nem küldi el nekik. Ezért a teljes világháló feltérképezése nem csak erőforrásoktól vagy gazdasági kezdeményezésektől függ. A linkek iránya egy nagyon széttördelt webet hoz létre, amelyet a négy fő kontinens ural. Nagyjából a háló egyik felének - az összekapcsolt összetevőnek és a KI földnek - a feltérképezésében az internetkeresőknek könnyű dolguk van, mivel az ezekhez tartozó pontok a gyakran látogatott központi mag tetszőleges pontjából elindulva megtalálhatóak. A web másik - a szigetekből és a BE földből álló - fele azonban reménytelenül elszigetelt. Nem számít, mennyit próbálkoznak a robotok, nem lesznek képesek az ott található oldalakat megtalálni. Ez az, amiért a legtöbb internetes kereső megengedi, hogy elküldjük neki honlapunk címét. Ha ezt megtesszük, akkor onnan indulhatnak a keresésre, és lehetőség szerint a web olyan tartományainak linkjeit fedezhetik fel, ahol még soha nem jártak. Ha visszautasítjuk ennek az információnak az önkéntes kiszolgáltatását, akkor még az elkövetkező években is „ismeretlen földeken” üldögélhet sok pont. Vajon megmarad-e ez a széttöredezett szerkezet? Vagy a fejlődő és növekvő világháló valószínűleg egyetlen, teljesen összekapcsolt maggá olvasztja össze a négy kontinenst? A válasz egyszerű: addig, amíg a linkek irányítottak maradnak, ilyen egybeolvadás soha nem fog létrejönni. A kontinensek megjelenése semmi esetre sem csak a világháló jellemző tulajdonsága. Minden irányított hálózatban felbukkannak. Tekintsük például azt a hálózatot,

amely fontos számunkra, ha tudományos információkat keresünk: az idézettségi hálózatot. Minden tudományos cikk idéz más cikkeket, amelyek az adott munka tárgyához tartoznak. Egy matematikai cikk hasonló problémákat vizsgáló más matematikai cikkekre hivatkozik, vagy néha egy biológiai vagy fizikai cikkre, amely az elért eredmények alkalmazásait szemlélteti. Ezért az összes tudományos publikáció a tudomány hálójának része, amelyben a pontok a kutatási publikációk, a linkek pedig a hivatkozások. Ezek a kapcsolatok irányítottak. Ha az olvasó követi a könyv végén található irodalomjegyzéket, akkor megtalálhatja az idézett cikkeket. De e cikkek egyike sem irányítaná az olvasót ehhez a könyvhöz, mivel nem hivatkoznak rá. Az idézettségi háló egy nagyon különös, irányított hálózat, amelyben a BE és KI összetevők a cikkek történelmi megjelenési sorrendjét tükrözik, és a központi összetevő nagyon kicsi, ha egyáltalában létezik. A természetben is található néhány irányított háló. Ha egy faj a táplálékláncban egy másikkal össze van kötve, akkor ez megmondja, hogy melyik faj melyik másikkal táplálkozik. Ezekben a hálózatokban a kapcsolatok ritkán kétoldalúak: az oroszlán megeszi az antilopot, és ez soha nem fordítva történik.

A végkövetkeztetés az, hogy minden irányított hálózat ugyanarra a négy kontinensre esik szét. Létezésük tehát nem a web speciális szervező elveit tükrözi. Mindegy, hogy a hálózat véletlenszerű vagy skálafüggetlen, ha a kapcsolatok benne irányítottak, akkor ott lesz a négy kontinens. Ezt demonstrálta nemrégiben Sergei Dorogovtsev, Jose Mendes és A. N. Samukhin a portugáliai Portó egyeteméről. Megmutatták, hogy ezeknek a kontinenseknek a mérete és a szerkezete analitikusan<sup>15</sup> előrejelezhető. Nyilvánvaló, hogy az adott hálózat tulajdonságaitól függően ezeknek a kontinenseknek a mérete változó. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy bármennyire összetett és nagy lesz a web, a kontinensek akkor is megmaradnak majd.

<sup>15</sup> A fizikusok által használt egzakt - tehát nem közelítő, hanem precíz - matematikai eszközök egyike a matematikai analízis. Ha egy fizikai problémát sikerül egzakt matematikai nyelven megfogalmazni, akkor az arra adott megoldást a fizikusok gyakran analitikus megoldásnak nevezik (a szaklektor).

## 4.

2000 júniusában Cass Sustein, a chicagói egyetem jogászprofesszora hatvan, véletlenszerűen kiválasztott, politikai honlapról készített felmérést. Arra az eredményre jutott, hogy csak 15 százalékuknál volt link ellenkező nézetű honlapra. 60 százalékuk azonban azonos nézetű lapokra mutatott. Hasonló következtetésre jutott a hálón zajló, demokratikus párbeszédet vizsgáló tanulmány is. Csak a weblapok 15 százaléka ajánl mutatót ellenkező nézőpontú oldalakra. Sustein attól tart, hogy az ellenkező nézőpontok korlátozott elérése miatt a fejlődő online világegyetem a szegregációt és a szociális rétegződést segíti elő. A szociális és politikai elkülönülés mechanizmusai a weben valóban önfelerősítő módon működnek: megváltoztatják a világháló topológiáját is, megosztják az on-line világegyetemet. Ezért a weben nem csak a négy kontinens az egyetlen elkülönült struktúra.

Kiseb léptékű hálón ezek a kontinensek vibráló városokból és metropoliszokból állnak. Ezeket a weboldalakat egy közös eszme, hobbi vagy lelki alkat hozza össze. A jazzkedvelők egy jól definiált web alapú társaságot alkotnak, hasonlóan a madárfigyelőkhöz. A kelet-európai vallási fundamentalisták közös virtuális teret alkotnak az Amerikai Egyesült Államok területén található hasonló beállítottságúakkal. Az európai antiglobalista aktivisták egyesítik erőiket a Japánban működőkkel, hogy stratégiájukat és tevékenységüket összehangolhassák.

A közösségek az emberiség szociális történelmének lényeges összetevői. Granovetter baráti körei, a közösségek elemépítő blokkjai rámutatnak erre a tényre. Ezek a közösségek mostanában azonban saját tagjaik számára nem felismerten, növekvő mértékben fellelhetőek a web topológiájában. Digitális életünk egy mellékhatása, hogy hitünk és hovatartozásunk nyilvánosan elérhető. Minden egyes alkalommal, ha egy weblapra kapcsolódunk, jelezzük, hogy az intellektuális kíváncsiságunkkal megegyezik, így egy lelkes madarász linkjei más hasonló weboldalakra vihetnek el, lehetővé téve a madarak iránt lelkesedő közösség feltérképezését.

Az ilyen web alapú közösség azonosítása rengeteg alkalmazási lehetőséget kínál. A sportkocsik szerelmeseinek közösségét megtalálva az autógyártó vállalatok valóban a leghatékonyabb módon árusíthatják új modelljeiket, ha hirdetéseiket elhelyezik e közösség néhány kedvenc weboldalán. Az AIDS-aktivisták felhasználhatják a közösségi tudást, hogy mozgósítsák azokat, akiket ez a betegség szenvedélyesen foglalkoztat, hogy egy hatékonyabban lobbizó és cselekvő csoportba olvasszák őket. A probléma az, hogy hogyan találjuk meg a megfelelő közösségeket egy ilyen gigantikus méretű hálón az oldalak milliárdjai közül.

Potter Stewart, az Egyesült Államok Legfelső Bíróságának bírása 1964-ben tette a következő híres megjegyzését: „Ma nem próbálom meg tovább definiálni [az obszcenitást]... és talán soha nem is sikerülne ezt intelligensen meghatározni. De felismerem, amikor látom!” Hasonló problémával szembesülünk, amikor a web alapú közösségekre keresünk megfelelő definíciót. Felismerjük őket, mihelyt meglátjuk, de mindenkinek egymástól szögesen eltérő meghatározása van rájuk. Ennek egyik oka, hogy a különböző közösségek között nincsenek szigorú határok. Ugyanaz a weboldal teljesen különféle csoportokhoz tartozhat. Például egy fizikus honlapján keveredhetnek a fizikára, a zenére, a hegymászásra vonatkozó mutatók. Melyik közösségben helyezük el az ilyen oldalt? A közösség mérete szintén változó. Például míg a kriptográfia iránt érdeklődő közösség kicsi, és viszonylag könnyen megtalálható, az angol irodalom iránt elkötelezett táborát már sokkal nehezebb azonosítani, a Shakespeare-rajongóktól a Vonnegut-hívekig sok közösségre oszlik.

Nemrégiben Gary Flake, Steve Lawrence és Lee Giles a NEC-ből úgy gondolták, hogy az oldalak akkor tartoznak ugyanahhoz a közösséghez, ha több egymásra mutató linkkel rendelkeznek, mint ahánnyal a közösségen kívüli helyekre. A meghatározás elég pontos ahhoz, hogy olyan algoritmusokat fejlesszünk ki, amelyek a világháló

topológiájában azonosítják a különféle csoportosulásokat. Kiderül, hogy mégis nagyon nehéz ezeket a közösségeket megtalálni. Az ilyen típusú keresés az un. NP teljes problémák osztályába tartozik. Ez azt jelenti, hogy bár elvileg ezek a közösségek lokalizálhatók, nem létezik hatékony algoritmus a meghatározásukra. Ezért a hálón a közösségek megtalálása az utazó ügynök problémájához hasonló, amelyben adott számú város elérésére keressük a legrövidebb utat, de egy várost csak egyszer látogathatunk meg. Az egyetlen algoritmus, amely garantáltan működik a közösség, illetve útvonal megtalálására, ha minden lehetséges kombinációt megpróbálunk. A közösségek esetén az ilyen keresés ideje a világháló méretével exponenciálisan nő. Elég gyors számítógépekkel képesek lehetünk adott közösségek megtalálására egy száz oldalból álló mintában. Egymilliárd hálózati oldalból felfedezni őket azonban lehetetlen feladat.

Ha kombináljuk a tartalmat és a topológiát, ez kisebb kihívást jelentő probléma. Például kereshetünk olyan oldalakat, amelyek egy vagy két kulcsszót tartalmaznak. Lada Adamic a Stanford Egyetemről mostanában azokat a közösségeket vizsgálta, amelyeket az abortion-pro choice (abortusz mellett) és az abortion-pro life (abortusz ellen) kifejezésekre való kereséssel talált. Az abortusz elleni keresés negyvenegy oldalt talált, amelyeknek egyik lapjáról a másikkra juthatott át. Ettől eltérően az abortusz melletti mozgalom sok, nem összekapcsolt oldalra oszlik.

Az egymással versengő közösségek szerkezetének ilyen különbségei fontos következményekkel járnak arra nézve, hogyan tudják magukat a közös ügy érdekében hirdetni és szervezni. Adamic szerint a részleges-szülés-abortusz törvény elleni kampány, amelyet az abortuszellenesek csoportjának közepéről indítanak, könnyen elérheti a többi abortuszellenes oldalt, mert közöttük sok link van. Továbbá az abortusz melletti oldalak látogatói is értesülnek róla. Azonban több, nem összekapcsolt, abortusz melletti oldalon kell hirdetni ahhoz, hogy a törvény elleni kampányukkal hasonló eredményt érjenek el. Ezért a pro-life, az abortusz elleni közösség fokozottabban van jelen a weben, jobban is szervezett, honlapjaik egymásról gyakrabban tudnak.

A web nem a csomópontok és kapcsolatok homogén tengere, hanem négy kontinensre oszlik, ezeken mindegyiken számos falu és város van, amelyek egymást átfedő közösségeknek tűnnek. Virtuális jelenlétével bármelyikük ezek egyikéhez vagy másikához tartozhat. Messze vagyunk attól, hogy a web finom szerkezetét teljesen megértsük. De sok erő - a kereskedelmi érdekeltségektől a tudományos kíváncsiskodókig - egyre erősebben motivál bennünket arra, hogy erre törekedjünk.

Ahogy mélyebbre ásunk, biztos vagyok benne, hogy sok meglepetéssel találkozunk majd, amelyek még világosabb elképzelést adnak bonyolult, amorf, örökké változó online világegyetemünkről .

Egy precedenst teremtő határozatában 2000. november 20-án a francia Jean-Jacques Gomes bíró elrendelte, hogy a Yahoo! köteles megtagadni, hogy a francia vásárlók hozzáférhessenek a náci emlékeket árusító weboldalakhoz. Ezt úgy tehette meg, hogy alkalmazott egy francia törvényt, amely szerint az ilyen cikkek árusítása Franciaországban tilos. A bírósági határozat jogi következményeit mindmáig világszerte vitatják. A Yahoo! szerint az internet alapvetően szabad a földrajzi és nemzeti határok tekintetében, és ezért egy amerikai vállalat más nemzeti törvények szerinti elítélése az internet alapvető filozófiájának komoly megszegését jelenti. Mások nem értettek ezzel egyet, és azt állították, hogy semmi különleges újdonság nincs az internettel kapcsolatban, és ugyanazokat a nemzetközi kereskedelmi egyezményeket kell rá alkalmazni, mint bármilyen más nemzetközi üzlet esetén.

A jogi finomságokon túl a fontosabb kérdés a kódra vonatkozik - a web mögötti szoftverprogramra. A francia bíróság elismerte, hogy ha figyelembe vesszük a web természetét, akkor nincs mód arra, hogy Franciaországot teljesen elszigeteljék a világtól. A szakértők véleménye alapján azonban meg voltak győződve arról, hogy a Yahoo! üzembe helyezhetne egy szűrőmechanizmust, ami a francia nemzetiségűek legalább 60-70 százalékát megakadályozná, hogy a Yahoo! náci oldalait akarják elérni, így a bíróság elrendelte, hogy a Yahoo! változtassa meg a programját. Ez pontosan olyan eset, mint amit Lawrence Lessig, a Stanford Egyetem jogászprofesszora a Code and Other Laws of Cyberspace című, nagy hatású könyvében elképzelt. Lessig szerint „magára hagyva, a kibertér az ellenőrzés tökéletes eszközévé válik majd... A kibertér láthatatlan keze egy olyan architektúrát épít fel, ami teljesen az ellenkezője annak, ami a kibertér születésekor volt”.

Lessig az architektúra szó alatt a web mögött futó szoftverek összességét érti, és arra a következtetésre jut, hogy a kibertérbeli viselkedésre csak a kód szabályozásával lehetséges hatni. Úgy gondolja, hogy két erő sorakoztatható fel éppen erre a célra. Először is a kormányoknak nehéz a weben való viselkedés elveinek kialakítása. Könnyű törvényeket előírni, amik korlátozzák az elérését mindennek, a pornográfiától a titkosítási kódok kulcsáig. Egy határok nélküli kibertérben azonban majdnem lehetetlen ezeknek a törvényeknek a betartatása. Ha a kormányok továbbadják a web szabályozásának lehetőségét, akkor a kereskedelem élni fog vele. Az olyan biztonságosabb üzleti környezetet kereső vállalatok, amelyben vásárlóikat különböző célokból azonosíthatják, biztonsági megfontolásoktól az üzleti szempontokig, az ellenőrzés irányába fogják a kódot taszítani. Ahogy a technológia fejlődése találkozik majd a kereskedők kívánságaival, a hálólakok teljesen el fogják veszíteni névtelenségüket és helytől független létezésüket.

Ahogy azt a Yahoo! és mások esetei megmutatták, Lessig zord előrejelzései részben valósággá váltak. Másrészt, ahhoz, hogy igazán megértsük a kibertérrel, meg kell tudnunk különböztetni a kódot és az architektúrát. A kód - vagy szoftver - a kibertér építőköve és habarcsa. Az architektúra az, amit a kód felhasználásával felépítünk. Az emberiség történelmének nagy építészei Michelangelótól Frank Lloyd Wrightig jól

szemléltetik, hogy miközben a nyersanyagok korlátozottak, ez nem hat ki az építményre, az architektúrára. A kód korlátozhatja a viselkedést és hat az architektúrára. Azonban nem határozza meg azt egyértelműen.

Az építészek épületeihez hasonlóan a web architektúrája két egyformán fontos réteg terméke: a kódé és a kollektív emberi viselkedése, amely kihasználja a kód előnyeit. Az elsőt szabályozhatja a bíróság, a kormány vagy egy vállalat.

A másodikon azonban egyetlen felhasználó vagy intézmény sem alakíthat, mert a webnek nincs központi tervrajza - a világháló önszervező. Felhasználók millióinak egyedi cselekedeteiből jön létre. Ennek eredménye, hogy architektúrája sokkal gazdagabb, mint a részek összege. A web legtöbb igazán fontos jellegzetessége és előbukkanó tulajdonsága levezethető nagy léptékű önszervező topológiájából.

Jó példa erre a hálón meglévő demokrácia. Láttuk, hogy a skálafüggetlen topológia azt jelenti, hogy az oldalak nagy többsége alig látható, mivel egy nagyon népszerű kisebbség birtokolja az összes linket. Igen, tényleg van szólásszabadság a hálón. Azonban annak nagyobb a valószínűsége, hogy hangunk túl gyenge ahhoz, hogy meghallják. Azokat az oldalakat, amelyeknek csak kevés bejövő mutatója van, lehetetlen véletlen barangolással megtalálni. Ehelyett örökké a középpontokhoz vagyunk irányítva. Abba a kísértésbe eshetünk, hogy azt gondoljuk, hogy a robotok el tudják kerülni ezt a népszerűség vezérelte csapdát. El is kerülhetnék, de nem teszik. Ehelyett annak a valószínűsége, hogy egy oldalt felvesz-e listájára egy internetkereső, erősen függ a rá mutató linkek számától. Az egy bemenő mutatóval rendelkező oldalnak 10 százaléknál is kisebb arra az esélye, hogy tetszőleges kereső észre fogja őket venni. Ezzel szemben a robotok megtalálják, és felveszik listájukra az olyan oldalak 90 százalékát, amelyekre 21 és 100 közötti link utal.

Lessignek igaza van: a világháló architektúrája majdnem mindent szabályoz, a vásárlók elérésétől annak a valószínűségéig, hogy a linkek mentén barangolással meglátogatják. De a világháló tudománya növekvő mértékben bizonyítja, hogy ez az architektúra magasabb szintű szervezettséget képvisel, mint maga a kód. Az olvasónak azt a képességét, hogy honlapomat megtalálja, csak egyetlen tényező befolyásolja: a weben való elhelyezkedése. Ha sok ember érdekesnek találja honlapomat, és linket állít be az oldalamra, akkor csomópontom fokozatosan egy kisebb középponttá válik, és a keresők elkerülhetetlenül észre fogják venni. Ha senki nem törődik a honlapommal, akkor a keresők sem fognak. Csatlakozni fogok a láthatatlan weboldalak csapatához, amik különben is a többséget alkotják, így a világháló nagy léptékű topológiája - azaz a valódi architektúrája - szigorúbb korlátozásokat kényszerít viselkedésünkre és a weben való láthatóságunkra, mint amit a kormány vagy az ipar el tudna érni a kód átalakításával. A szabályok jönnek-mennek, de a topológia és az azt irányító alapvető természeti törvények az időtől függetlenek. Folytathatjuk az egyén választásának befolyásolását azzal kapcsolatban, hogy hova kapcsolódjon, de nem leszünk arra képesek, hogy jelentősen megváltoztassuk a web nagy léptékű topológiáját, és együtt kell élnünk ennek következményeivel.

## 6.

Az a jó a világhálóban, hogy velünk együtt fejlődik. Ha egyszer megváltoztatjuk honlapunkat, senki sem kísérthet bennünket az évtizedekkel korábban vallott ellentétes nézeteink miatt. Emlékszik ön a fiújára, akivel néhány éve szakított? Természetesen igen, de valószínűleg reméli, hogy senki más nem emlékszik rá. Mindenesetre ön a fiú összes fényképét levette honlapjáról. Mi is a helyzet azzal a középiskolai kiáltvánnyal, ami miatt ön még mindig szégyelli magát? Vagy a demokrata oldalakra szóló mutatók gyűjteményével, amit ön még két évvel a republikánus oldalon indulása előtt honlapján tartott? Ezek mind kinyomozhatatlanok. Legalábbis hajlunk rá, hogy ezt képzeljük. Ez azért van, mert a legtöbb hálólakó soha nem hallott még Brewster Kahle-ről. Az az igazság, hogy könnyen előfordulhat, hogy Kahle-nek van egy másolata az összes képről és dokumentumról, amit ön gondosan eltávolított, és mostanra már elfelejtett.

Kahle a web egyik veteránja. Ő találta fel a széles területet lefedő információs szervereket, ő az alapítója az egyik legnagyobb internetkeresőnek, az Alexa Internetnek. Miután 1999-ben az Alexát eladta az Amazon.com cégnek, Kahle annak bevételéből létrehozta az Internet Archives vállalatot, ami egy nonprofit szervezet San Francisco belvárosában, egy átalakított katonai támaszpont helyén Presidióban. Célja egyszerű: meg akarja akadályozni, hogy a web tartalma a múltban elenyésszen.

Amikor 2000 márciusában ellátogattam az Archivesba, hogy előadást tartsak a First Internet Archive konferencián, Kahle emlékeztetett az ókori alexandriai könyvtárra. Úgy tartották, hogy az ókorban írt összes könyvről őriztek ott egy másolatot, amik azonban teljesen megsemmisültek, amikor a könyvtár földig égett. Kahle beszélt nekem a nagyszerű filmtekercsgyűjteményekről, amelyeket ezüsttartalmuk miatt újra feldolgoztak. Kulturális műalkotások nélkül az emberiség elveszíti emlékeit; emlékek nélkül pedig nem tanulhat a sikerekből és kudarcokból. Amikor a világhálóról van szó, mi ismét kihagyjuk a történelem megörökítésének lehetőségét. Azért, hogy a történelem ne ismétlje önmagát, Kahle szellemi gyermeke, az Internet Archives gondosan megőrzi azokat az oldalakat, amelyeken az Alexa 1996 óta végigment. A gyűjtemény már százmilliárd oldalra duzzadt, ami közel száz terabyte-nyi információ. Összehasonlításképpen: a washingtoni kongresszusi könyvtár összes könyve és dokumentuma csak húsz terabyte.

Az Archives gyűjteménye páratlan értékű a történészek, társadalomtudósok és a web topológiáját kutatók részére. Ha valaki meg akarná írni a 2000. évi amerikai elnökválasztás történetét, az Archivesnál kezdené a munkát. Van egy időgépünk, ami lehetővé teszi, hogy megnézzük a jelöltek honlapját, a szavazónak írt útmutatót és a politikai pártok weboldalait, pontosan úgy, ahogy a kampány idején látható volt. Szeretné az olvasó végigkövetni a 2001. szeptember 11-ei terrortámadásokra adott reakciókat? Az események után egy hónappal



az Archivesnak már 200 millió dokumentumból állt a témára vonatkozó gyűjteménye. Ha ön a web topológiáját kutatja, és célul tűzte ki, hogy a világháló architektúráját megértse, akkor is kiváló kiindulópont az Archives. Lehetővé teszi, hogy végigkövessük, hogy mikor és hol jelentek meg új honlapok és mutatók, vagy honnan mozdítottak el egyet; hogyan lett népszerű egy éjjel alatt egy később létrehozott csomópont, és hogyan vesztette el fényét egy korábbi középpont. Ha a különböző időközönként felvett webtérképeket összehasonlítjuk, jól követhetjük a virtuális közösségek feltűnését és kibontakozását. Az Archivesnál megvannak azok az adatok, amelyekből rekonstruálható a csomópontok és mutatók kaotikus fejlődése, és amelyek segítségével felfedhetjük a világháló jelenlegi architektúrájáért felelős mechanizmusokat.

Az Archivesnak sok rajongója van sokféle különböző területről, de a legtöbb kutató, aki kihasználhatná ezt, vagy nem tud a létezéséről, vagy hiányzik a programozási készsége, hogy elérje, és hatékonyan felhasználja őket. Így az Archives teljes potenciálja kiaknázatlan a kutatók és a publikum számára egyaránt. Remélem azonban, hogy az Internet Archives csak kezdetét jelenti annak, hogy felébredt bennünk az on-line világegyetemmel kapcsolatos történelmi felelősség. Az Archives messze áll attól, hogy mindent, ami kinn van a weben, elcsúszjon. Gyűjtésük fő részét az Alexa szolgáltatja, az az internetes kereső, amelyet Kahle és Bruce Gilliat 1996-ban alapított. Mint azt már tudjuk, a keresők a világhálónak csak kis részét fedik le, és az Alexa soha nem arról volt ismert, hogy jelentős lefedettségre törekedett volna. Ezért óriási mérete ellenére az Archives jelenlegi gyűjteménye a világhálónak csak picike részét, a legnépszerűbb weboldalakat képviseli. Az Alexa eléri a középpontokat; a többi, a robotjaik által nem látogatott, kevesebb mutatóval rendelkező oldal pedig naponkénti milliós nagyságrendben merül feledésbe.

## 7.

Egy, a Naprendszerünkhöz közelítő földön kívüli lény számára a Föld csak egy gömb alakú labdának tűnne. Ahogy közelebb érne, elkezdené észrevenni a kontinenseket. Párizs, New York, London és Tokió világító fényei intelligens élet jeleire utalnak. Ha még közelebb jön, akkor megkülönböztethetőek lesznek a kisebb közösségek, és az összekötő autópályák és utak szerkezete is előbukkan. A földönkívülinek nagyon közel kellene azonban ahhoz jönnie, hogy észrevegye az emberi lényeket, akik az űrből látható nagy léptékű rendszert létrehozták.

A világháló felderítése során az idegennel azonos utat jártunk be. Először az inhomogén, nagy léptékű topológiát fedeztük fel, és megértettük, hogy ez ugyanúgy elkerülhetetlen, mint az, hogy a legtöbb bolygó gömb alakú. Közelebről szemlélődve négy fő kontinenst vettünk észre, amelyek mindegyike különböző törvényeknek engedelmeskedik. Ahogy több részletre koncentráltunk, látni kezdtük a közösségeket, az azonos érdeklődés által kialakított weboldalakat. Ezek az ismeretlenbe történő behatolások lényegesen megváltoztatták azt, amit a világhálónak kapcsolatban értünk. Megtudtuk, hogy ez az online világegyetem sokkal nagyobb, mint azt valaha bárki elképzelte. És gyorsabban is nő, mint

ahogy azt hittük. Nagy meglepetésünkre azt tapasztaltuk, hogy sokkal kevésbé feltérképezett, mint ahogy azt véltük. Két évvel ezelőtt minden tíz oldalból hat oldalt nem látogatott meg egyetlen internetkereső sem. Ha ebben a trendben bízhatunk, akkor a mai keresők a web még kisebb hányadát látják. Az jó hír, hogy a verseny rákényszeríti a keresőket arra, hogy jobb munkát végezzenek. De soha nem szabad szem elől tévesztenünk azt a tényt, hogy akármekkora is a verseny köztük, a web még nagyobb.

Nem kell azonban alábecsülnünk az internetkeresők és robotjaik nekünk felajánlott hatalmas szolgáltatását. Gyakran sóhajtunk fel az elkeseredéstől, és nevezzük a webet dzsungelnek. Az igazság az, hogy robotok nélkül ez egy fekete lyuk lenne. A tér begömbülne körülötte, így ha bármi belekerülne, soha nem jutna ki. A robotok megóvják a világhálót attól, hogy saját növekvő komplexitása miatt összeomoljon. A robotok kifordítják nekünk a teret, fenntartják a rendet a pontok és mutatók káoszában.

Életünket egyre növekvő mértékben befolyásolja a világháló. Mégis milyen kevés figyelmet és erőforrást fordítunk arra, hogy megértsük! Viszonylag kis erőfeszítésre lenne szükség ahhoz, hogy az információ elérésének új forradalma jöjjön létre. Ez meg fog történni. A kérdés az, hogy mit veszítünk el addig?

Egy egyre inkább az internet által dominált társadalomban a világháló megértése önmagában is óriási értéket jelent. Számomra a jutalom ennél több. Ennek a felfedezőútnak az egyik legizgalmasabb pontja azoknak a törvényeknek a megtalálása volt, amelyek érvényessége túllépi a kibertér kapuit. Ezek a törvények, amelyek egyaránt jól alkalmazhatóak a sejtre és az élővilágra is, megmutatják, hogy mennyire elkerülhetetlenek a természet törvényei, és mennyire mélyen az önszerveződés alakítja a világot körülöttünk. A világháló digitális természete és hatalmas mérete miatt egy olyan modellrendszer ajánl számunkra, amelyben minden részlet felfedezhető. Eddig még soha nem jutottunk ilyen közel egyetlen hálózathoz sem. Ez továbbra is az ihlet és ötletek forrása marad majd bárki számára, aki hálószerű világegyetemünk tulajdonságait akarja megérteni.

# A TIZENHARMADIK LÁNCZEM

## *Az élet térképe*

1987 februárjában a Nature című folyóirat egy korszakalkotó jelentőségű felfedezésről számolt be: a mániás depresszió vagy újabb nevén a bipoláris rendellenesség génjéről. A mániás depresszió az Egyesült Államok felnőtt lakosságának 1-5 százalékát érinti, és közülük 25 és 50 százalék között vannak azok, akik legalább egyszer öngyilkosságot kíséreltek meg. Mivel a mániás depresszió kitörésének kockázata öt- illetve tízszer valószínűbb, ha egyenes ági rokonnak van ilyen betegsége, ezért elterjedt nézetek szerint a mániás depresszió genetikai eredetű rendellenesség, így mihelyt megjelentek azok a módszerek, amelyek segítségével a betegségeket adott génekhez lehetett kapcsolni, elkezdődött a verseny, hogy megtalálják a mániás depresszió génjét. A hön óhajtott „elsőség” úgy tűnt, hogy az 1987-es Nature-cikk szerzőié, akik egy pennsylvaniai Lancasterben élő amish vallású nagycsalád vizsgálata során lokalizálták a gént a tizenegyedik kromoszómán. Igen ám, de két évvel később a kutatócsoport visszavonta eredményeit. A tévedés azonban nem bántortalanított el más génavadászokat. Ha valami, ez csak még inkább motiválta őket a valódi gén megtalálására. 1996-ban, majdnem egy évtizeddel az első publikált vizsgálat után, három kutatócsoport egymástól függetlenül beszámolt más kromoszómákon található génekkel való kapcsolatokról. Egy másik, amish vallásúakat vizsgáló tanulmány a hatos, tizenhármas és tizenötös kromoszómákat vonta be; a Costa Rica-i Central Valley elszigetelt populációjára koncentráló tanulmány a tizennyolcas kromoszómával mutatott ki kapcsolatot; és egy nagy skót családra vonatkozó eredmény a négyes kromoszóma érintettségére utalt. Egy másik vezető mentális rendellenességnek, a skizofréniának a kutatása hasonló módon alakult, a betegséget először az egyes kromoszómához kapcsolták, majd néhány évvel később egy másik kutatócsoport az ötös kromoszómával hozta összefüggésbe.

Szórakozott tudósok? Hibás kutatás? Egyáltalán nem erről van szó. Ezek semmiképp nem ellentmondó eredmények. Egyszerűen azt mutatják, hogy a legtöbb betegséget - a mániás depressziótól a rákig - nem egyetlen hibásan működő gén okozza. Inkább az a helyzet, hogy a sejtjeinkben elrejtett bonyolult hálózaton keresztül több gén együttműködése a felelős érte. A kutatók, akik azzal az óriási feladattal szembesültek, hogy megtalálják a sejt építőelemeit a génektől a fehérjékig, eddig a biológiára koncentráltak a hálózatok helyett. Napjainkban a kutatók már igen sok részletet ismernek, és a genom - az emberi DNS - meghatározása után a biológiai kutatás távolabbról próbál a megszerzett ismeretekre tekinteni; hátralépünk két lépést, hogy a teljes képet megérthessük. Az új és izgalmas felfedezések, amelyek forradalmasítják a biológiát és az orvostudományt, egyértelműen és világosan tudtunkra adják: ha meg akarjuk érteni az életet - és végül meggyógyítani a betegségeket -, hálózatokban kell gondolkodnunk.

„Ma azt a nyelvet tanuljuk, amelyen Isten a világot megalkotta”, mondta 2000. június 26-án Bill Clinton elnök a Fehér Házban azon az ünnepségen, ahol bejelentették az emberi génállomány hárommilliárd kémiai „betűjének” a megfejtését. Igaz ez? Valóban az emberiség birtokában van „az élet könyve”? Francis Collins és Craig Venter, az a két úr, akik az elnök mellett álltak, ők lennének a huszonegyedik század prófétái? Collins és Venter, akik az emberi génállomány kódjait megfejtő állami finanszírozású Human Genome Projectet és a Celera Genomics magáncéget képviselik, elhozták nekünk ezt a könyvet.

Nyissuk ki „az élet könyvét”, és körülbelül hárommilliárd betűből álló „szöveg” lesz előttünk, olyan hosszú, mint a The New York Times vasárnapi számának tízezer példánya. Minden sor valahogy így néz ki:

```
TCTAGAAACA  ATTGCCATTG  TTTCTTCTCA  TTTTCTTTTC  
ACGGGCAGCC
```

Ezek a betűk a DNS-t alkotó molekulák rövidítései, és könnyen jelenthetik azt, hogy a névtelen donor, akinek a génállományát feldolgozták - szekvenálták -, ötvenéves korára kopasz lesz. Vagy felfedhetik, hogy hetvenévesen Alzheimer-kóros lesz. Nekünk azt mondják, hogy minden - a személyiségünktől a jövőbeni egészségügyi problémáinkig - benne van ebben a könyvben. Vajon az olvasó el tudja ezt olvasni? Kétlem. Hadd osszak meg egy titkot önnel: sem a biológusok, sem az orvosok nem tudják.

Az emberi génállomány szekvenálása valóban nagy eredmény, ami annak köszönhető, hogy a modern molekuláris biológia képes a bonyolult élő rendszereket a legkisebb részekig lebontani. Ez kétségtelenül egy új korszak létrejöttének katalizátora, az orvostudományban és a biológiában egyaránt. De a génállományt feltáró tanulmány új felismerést hozott: az élő rendszerek viselkedését ritkán lehet csak molekuláris összetevőikre korlátozni.

A legjobb példa erre az, hogy képtelenek voltunk egyetlen olyan gént találni, amely felelős lenne a mániás depresszióért. A gyanúba keveredett gének listája nem elegendő. A legtöbb betegség meggyógyításához az élő rendszert egységében kell megértenünk. Meg kell fejtenünk, hogyan és mikor működnek együtt a különböző gének, hogy a sejten belül hogyan terjed az információ, és adott pillanatban milyen reakciók játszódnak le, vagy melyek nem működnek, és hogy e bonyolult sejthálózatban hogyan terjed egy reakció hatása. Ahhoz, hogy ezt elérjük, fel kell térképeznünk a sejten belüli hálózatot. Az életnek ez a hálóját határozza meg, hogy vajon a sejt bőrré alakul vagy a szívben működik majd állandóan, a háló dönti el a sejt külső zavarokra adandó válaszát, és ez jelenti a túlélés kulcsát az állandóan változó környezetben, megmondja a sejtnak, hogy mikor osztódjon vagy pusztuljon el, és felelős a betegségekért, a ráktól kezdve a pszichiátriai rendelleneségekig. Az emberi génállomány megfejtéséről szóló történelmi jelentőségű cikk a Science című lapban azzal fejeződik be, hogy „nincsenek »jó« és »rossz« gének, csak különböző szinteken létező hálózatok”.

## 2.

Az emberi génállomány megfejtése a sejt részeinek leltárát is felkínálta számunkra. Az autós párhuzamhoz visszatérve, ez olyan, mint amikor hátsó udvarunkban autóalkatrészek ezrei hevernek. Ha valaha is újra működőképesen szeretnénk látni az autót, meg kell találnunk a tervrajzát, a térképet, ami megmondja, hogy hogyan szereljük össze. A legtöbb sejt esetében ez a térkép majdnem olyan meghatározhatatlan most, mint tizenöt évvel ezelőtt, a Human Genome Project kezdetekor volt. A sejten belüli kereső hiánya csak egy része ennek a problémának. A legnagyobb nehézséget az okozza, hogy minden egyes sejt belsejében sokrétegű a szervezettség, amit tekinthetünk egy bonyolult hálózatnak is. Ahhoz, hogy az élet térképét megértsük, meg kell ismerkednünk vele.

Napjainkban, amikor annyit foglalkozunk testsúlyunkkal, közismert, hogy a sejtek táplálékot égetnek a bonyolult molekulák szétbontása segítségével, és így hozzák létre a sejt építőköveit, valamint azt az energiát, ami életben maradásunkhoz szükséges. Ezt többlépéses, sejten belül lejátszódó, biokémiai reakciók százainak hálózata által érik el; a hálózatot együttesen anyagcsere-hálózatnak nevezzük. Ennek a hálózatnak a pontjai lehetnek egyszerű vegyi anyagok, mint a víz vagy a széndioxid, vagy atomok tucatjaiból álló bonyolultabb molekulák, mint az ATP-molekula. A kapcsolatok a biokémiai reakciók, amelyek ezek között a molekulák között lejátszódnak. Ha két molekula, az **A** és **B**, egymással reakcióba lép, hogy létrehozza a **C** és **D** molekulát, akkor a sejt bonyolult anyagcseréjében mind a négy össze lesz kötve.

Gondoljunk a sejt anyagcseréjére hasonlóképpen, mint autónkban a motorra. Ha önmagában csak a motor áll rendelkezésünkre, akkor nem jutunk túl messzire. Szükségünk van kerekekre, fékekre, lámpákra és sok más alkatrészre, amelyek biztosítják, hogy a kocsi biztonságosan menjen az úton. Hasonló módon, a sejtnak is van egy belső szabályozó hálózata, amely az anyagcserétől a sejt pusztulásáig mindent irányít. Ennek a hálózatnak a pontjai lehetnek a gének és a fehérjék, amelyek az óriási DNS-molekulákban le vannak írva. A kapcsolatok pedig az összetevők közötti különböző biokémiai kölcsönhatások. A gének először a speciális üzenethordozó RNS-molekulákba másolódnak le, amelyeket azután fehérjemolekulákba ír át a sejt. Bizonyos fehérjék kölcsönhatásba lépnek a DNS-sel, amely serkenti vagy elnyomja új gének átírását, megjavítják a DNS-en véletlenül keletkezett sérüléseket, vagy átmásolják a DNS kettős láncát, amikor a sejt osztódik és így tovább. Más fehérjék egymással lépnek kapcsolatba, és nagy fehérjekomplexumokat alakítanak ki. Erre jellegzetes példa a hemoglobinmolekula, amely négy kisebb fehérjemolekulából álló fehérjekomplexum; a hemoglobint alkotó négy fehérjemolekula összekapcsolódik, hogy véráramunkban az oxigént szállítsák. Ezért a fehérjéket tekinthetjük egy bonyolult - fehérjék közötti kölcsönhatást leíró - hálózat pontjainak, amelyekben két fehérje összekapcsolódik, ha fizikailag képesek egymást vonzani. Egy sejt teljes, hálószerű molekuláris felépítését az ún. sejthálózat írja le, amely a sejten belül található összes alkotóelemből rakható össze (génekből, fehérjékből és

más molekulákból). A sejthálózat pontjait a fiziológiailag létrejönni képes kölcsönhatások - a biokémiai reakcióktól a fizikai kapcsolatig - kötik össze. Az életnek ez a hálója tartalmazza az összes, anyagcserében részt vevő fehérje-fehérje, valamint a fehérjék és a DNS közötti kölcsönhatást, amelyek jelen vannak a sejtben.

Nemrégén még széles körben elterjedt volt az a nézet, hogy minden, ami egy élőlény biológiai története szempontjából fontos, az a génekben le van írva. A genom megismerése utáni új biológia, bár még csecsemőkorát éli, máris egy fontos csatát vív. Az a célja, hogy az egyes gének történelmileg nekik tulajdonított, mindent eldöntő szerepét szétrombolja. A génekről ismert, hogy a szerkezeti felépítésben játszanak szerepet, meghatározzák a fehérjék működési területét és elkészítését, és öröklés segítségével továbbadják ezt az információt a következő nemzedékeknek. Mostanában azonban a kutatók felfedezték, hogy a géneknek egy bonyolult hálózat tagjaiként fontos szerepük van a működésben is. Ez a működési szerep csak dinamikus vonatkozásban kerül előtérbe, amikor egyetlen gén kapcsolatba lép sok más sejtösszetevővel: a géneknek a sejt felépítésében játszott szerepe a szekvenciából kiderül. Most már ismerjük néhány fontos élőlény - az *Escherichia coli* baktériumtól az emberig - teljes génállományának felépítését. De még csak a kezdeteknél tartunk egy másik hasonlóan forradalmi kalandnak: hogy feltárjuk a géneknek a sejt működésében játszott szerepét. Ahhoz, hogy ezt elérjük, szükség van egy második genomprojektre, amely ezúttal a sejtben belüli hálózatot térképezi fel. Rendelkezünk „az élet könyvével”, most már az élet térképére van szükségünk.

### 3.

Oltvai Zoltán, a chicagói Northwestern University orvosi karának sejtbiológusa; amikor 1998-ban találkoztunk, már jó néhányjelentős és sokat idézett felfedezése volt. Ez idő tájt mindketten Chicago kertvárosában, Oak Parkban laktunk, amelyet Frank Lloyd Wright építészeti stílusa uralt. Hasonló korú kisgyerekeinkkel elkezdtük egymást rendszeresen látogatni. Miután minden témát kimerítettünk a kultúrától a politikáig, beszélgetésünk a tudományra és a biológiára terelődött. Addigra csoportom már előrehaladt a világháló és az internet kutatásában. Hétvégi fecserészésünk elkerülhetetlenül eltolódott a világháló és más összetett hálózatok hasonlóságai és különbözőségei irányába. Hamarosan egy folyamatos vita alakult ki közöttünk. A világháló és a színészek hálózata skálafüggetlen, mert ezek a növekedésnek és a népszerűségi kapcsolódásnak köszönhetik keletkezésüket, tehát olyan folyamatoknak, amelyek mindkét hálózatban könnyen azonosíthatóak. A sejt azonban különbözik ettől. A szerves molekulákból álló ősselevesben az első ősi sejtek sokasága olyan lehetett, mint egy növekvő hálózat. De az elmúlt hárommilliárd év folyamán az evolúció és a természetes kiválasztódás hatása érvényesült. Ezalatt lényegesen kevesebb volt a növekedés, csak a sejthálózattal való sok bajmóldás, csiszolgatás, finomítás és optimalizálás folyt, így egyrészt, még ha ki is fejlődött a skálafüggetlen topológia, amikor az élettelen

molekulák első lépéseiket tették az élet irányába, ez elveszhetett az evolúció mindent irányító hatása következtében. Másrészt nehezen hihető, hogy az összetett biokémiai háló a sejten belül teljesen véletlenszerű lenne. Véletlenszerű-e az élet térképe, mint az Erdős-Rényi-féle hálózat, vagy skálafüggetlen, mint a világháló? Hogyan jellemezzük a sejt összetett topológiáját? Miután kifogytunk az egymás ellen felsorakoztatott érvekből, Oltvai és én elhatároztuk, hogy megbeszéléseinket nem a játszótéren folytatjuk, hanem megkeressük az élet hálójának valódi adatait. Szerencsére a huszadik század nagy részében a biológia és a biokémia azzal foglalkozott, hogy azonosítsa és összekapcsolja a különböző molekulákat a sejten belül. James Watson, a DNS kettős spiráljának egyik felfedezője 1970-ben Molecular Biology című, ma már klasszikusnak számító könyvében azt írja, hogy: „Már ismerjük a valaha leírásra kerülő anyagcsere-reakciók legalább egyötödét és lehet, hogy több mint egyharmadát (az E. coli baktériumban)”, ami azt sugallja, hogy „az elkövetkező tíz-húsz éven belül közelítünk ahhoz, hogy lényegében az összes reakciót leírassuk”. Watson látomása valóra vált. Ma a bakterológusok úgy gondolják, hogy a több mint kétszáz csomópontból és közel ezer kapcsolatból álló összetett hálózat az E. coli anyagcseréjét tápláló reakciók közel teljes listája. Amit Watson 1970-ben el sem tudott képzelni, az az, hogy harminc évvel később online adatbázisok tartalmazzák majd az élőlények százainak anyagcsere-reakcióit leíró hálózatokat. Miközben még mindig hiányzik a nagyon összetett emberi sejt anyagcseretérképe, az egyszerűbb élő szervezetekkel kapcsolatos tudásunk majdnem teljes.

Igy Oltvaival folytatott beszélgetéseinket nem is folytathattuk volna jobbkor. Néhány évvel korábban laboratóriumom kutatása, hogy a sejt topológiáját tanulmányozzuk, adatok hiányában leállt volna. 1999 végén azonban néhány weboldalon már rajta voltak azok a térképek, amelyeket kerestünk. Végigkutatottuk az elérhető adatbázisokat, és egy új mellett állapodtunk meg, amelyet a Chicagón kívüli Argonne National Laboratory állított össze „What Is There?” néven, és negyvenhárom különböző élő szervezet anyagcsere-hálózatát foglalta magában. Hawoong Jeong ismét bemutatta számítógépes varázslatát, s írt egy programot, amely minden egyes reakciót egyénileg letöltött. Oltvai és én a válla fölött figyeltük, ahogy ennek a különösen összetett hálónak értelmet adott, s egyenként összeállította a negyvenhárom élő szervezet teljes anyagcseretérképét. Amint ezt befejezte, rátért ezeknek a hálózatoknak a jellemzésére, és kiszámította, hogy az egyes molekulák hány reakcióban vesznek részt. Az eredmények megdöbbentőek voltak. Mindegy volt, melyik élő szervezetet vizsgáltuk, egy skálafüggetlen topológia üdvözölt bennünket. Minden sejt egy pici hálónak nézett ki, és aránytalanul kevés molekula vett csak részt a reakciók többségében – ők az anyagcsere középpontjai –, a legtöbb molekula csak alig egy vagy két reakcióban szerepelt.

#### 4.

Ismeretségi hálózatunkkal analóg módon, ha két molekula ugyanabban a reakcióban vesz részt, akkor a távolság egylépésnyi. Ha

azonban két egymást követő reakció szükséges ahhoz, hogy összekössük őket, akkor távolságuk kettő. Ha összerakjuk az összes csomópontot és kapcsolatot, vajon lesz-e ennek a sejten belüli összetett hálózatnak kis világokra jellemző szerkezete?

A molekulák közötti távolság mérése nem a hatlépésnyi távolság iránti elfogultságunk terméke. A hálózat átmérője - vagy a csomópontok közötti távolság foka - biológiai jelentőségű. Például ha azt találnánk, hogy két molekula közötti legrövidebb kémiai ösvény száz lépés, akkor az első molekula koncentrációjában bekövetkezett tetszőleges változás száz közbeeső kapcsolaton kellene keresztülmenjen, mielőtt a második molekulát eléri. Ilyen hosszú ösvényen bármekkora perturbáció<sup>16</sup> csökken és elhal. Legnagyobb meglepetésünkre a mérések azt mutatták, hogy az összekötő útvonal tipikus hossza száz lépésnél sokkal rövidebb. A sejtek valóban kis világok, háromlépésnyi távolsággal. Azaz a legtöbb molekulapár három reakción keresztül összekapcsolható.

<sup>16</sup> Egy rendszer kis megváltoztatásának, az egyensúlyból való kis kimozdításának, kibillentésének megnevezésére a fizikusok általában a perturbáció szót használják (a szaklektor).

A perturbációk ezért soha nem lokalizálódnak: egy molekula koncentrációjában történt bármilyen változás rövidesen eléri a többi molekula nagy részét. Ezt az eredményt Andreas Wagner az új-mexikói egyetemről és David A. Feli az Oxford Brooks Universityről is alátámasztotta, akik egymástól függetlenül rájöttek arra, hogy az E. coli anyagcsere-hálózata skálafüggetlen és a kis világokra jellemző tulajdonságokkal bír. Bár várakozásunkon felül rövid, mégsem a háromlépésnyi távolság volt felfedezésük legérdekesebb eredménye. Mivel a negyvenhárom élő szervezet mindegyike különböző méretű volt, azt vártuk, hogy a távolság az élőlény méretével arányosan növekedni fog ugyanúgy, ahogy a világháló átmérője nő az oldalak számának növekedésével. Meglepő módon a mérések azt mutatták, hogy akár egy kis parazita baktérium pici hálózatán barangolunk, vagy egy többsejtű szervezet - mint egy virág - magas fejlettségű országúti rendszerében, a távolság azonos. Bár a különbség egy primitív baktérium és egy többsejtű élőlény sejtfelépítése között olyan nagy, mint egy pici falucska és New York városa között, dinamikus szempontból hasonló hálózatok, és minden sejt egy kis városka lehet. Ha mélyebbre ástunk, megértettük, hogy a legtöbb sejt ugyanazokat a középpontokat használja. Azaz az élőlények többségében a tíz legjobban összekötött molekula azonos. Az adenzin-trifoszfát (ATP) majdnem mindig a legnagyobb középpont, amelyet szorosan követ az adenzin-difoszfát (ADP) és a víz.

Az ATP, ADP és a víz jelentős középponti szerepe valójában egyáltalán nem meglepő. A sejtekben az ATP sokoldalú energiaforrás, amely biokémiai reakciók százait irányítja. Miközben ezekhez a reakciókhoz energiát szolgáltat, az ATP átalakul ADP-molekulává és megszabadul egy foszfátcsoporttól, így az anyagcserehálón belül az ATP és az ADP összekapcsolódik az energiára éhes reakciókban részt vevő óriási nagyszámú molekulával. Mégis, amikor a legtöbb kapcsolattal rendelkező első tíz molekula listáját összegyűjtöttük, eléggé meglepő volt az eredmény. A skálafüggetlen modell kulcsfontosságú előrejelzése szerint a nagyszámú kapcsolattal bíró csomópontok azok, amelyek korán adódtak hozzá a hálózathoz. Az anyagcsere nyelvén ez



azt jelentené, hogy a legtöbb kapcsolattal rendelkező molekuláknak kell a sejten belül a legöregebbnek lenniük. És valóban, Wagner és Feli analízise megmutatta, hogy a legösszekötöttebb molekulák korai evolúciós történettel is rendelkeznek. E molekulák közül néhányról azt feltételezik, hogy az úgynevezett RNS-világ maradványai (az RNS-világ a DNS előtti evolúciós lépés volt), míg a többről ismert, hogy a legősibb anyagcsereösvények összetevői. Ezért úgy látszik, az első induló előnye az élet megjelenésében is érvényesül.

Ha az összes élő szervezet azonos skálafüggetlen topológiájú, azonos távolságú csomópontokkal és azonos középpontokkal, akkor miben különböznek a különböző szervezetek egymástól? Van-e bármilyen különbség egy baktérium vagy egy emberi sejt kémiai felépítése között? Kiderült, hogy jelentős eltérések vannak. Ha összehasonlítjuk mind a negyvenhárom élőlény anyagcsere-hálózatát, azt látjuk, hogy a molekuláknak csak 4 százaléka tűnik fel mindegyikben. Bár a középpontok azonosak, amikor a kevésbé összekötött molekulákról van szó, minden élőlénynek megvan a maga sajátos eltérő változata. Az élet egy kertvárosra hasonlít, amelyben mindegyik házat ugyanaz az építész tervezte, de különböző építőmunkások és belsőépítészek feladata volt a végső befejezés, a padló anyagától az ablakok méretéig és elkészítéséig. Egy légi felvételen az összes ház egyformának tűnik. Ahogy azonban közelebb érünk hozzájuk, egyre inkább kezdjük észrevenni a különbségeket.

Az anyagcsere csak egy, bár kétségtelenül fontos összetevőt képvisel: a sejhálózatot. Jelen lesz-e ugyanaz a skálafüggetlen felépítés a szabályozó hálózatban - a sejt működéséért felelős hálóban? Bennünket valójában az élő szervezetek teljes hálószerű molekuláris felépítése érdekel. Az a kérdés, hogy az életnek e hálójában a különböző összetevők azonos törvényeket és felépítési jellegzetességeket követnek-e, vagy a különböző összetevők számára az evolúció különböző megoldásokat fedezett fel? Azon a vágyon túl, hogy a sejt felépítésének alapvető vonásait megértsük, a szabályozó hálózat megértésének fontos gyakorlati oka is van. A genetikai rendellenességek igazából a szabályozó hálózat rosszul működő pontjainak eredményei. Ezért ennek a hálózatnak a hibatűrő képessége meghatározza, hogy túlélünk-e különböző betegségeket, és megismerése révén a kutatók képesek lesznek olyan orvosságok tervezésére, amelyek ezeket a rendellenességeket meggyógyíthatják.

## 5.

A pék élesztője, az egyik legegyszerűbb, sejttaggal rendelkező (eukarióta) sejt, 6300 génből áll, amelyek azonos számú fehérjét kódolnak. Bár ez csak ötöde egy emberi sejt 30 ezerre becsült különböző génjének, ez így is hatalmas szám. Általában amikor a fehérjék egymással kapcsolatba lépnek, egymáshoz tapadnak, és jó okuk van arra, hogy ezt tegyék. A legtöbb kapcsolatba lépés valamilyen fontos funkcionális szerepet játszik a sejt életében. Ezért ahhoz, hogy megértsük, hogyan működnek a sejtek, az összes egymással kapcsolatba lépő fehérjepárt azonosítanunk kell. A pék élesztője esetén

ehhez 6300-szor 6300 pár ellenőrzésére van szükség - közel 40 millió lehetséges kapcsolódásról. A szokásos molekuláris biológiai eszközökkel ez évtizedekig tartana, még emberek százainak részvételével is. A munka nagysága ellenére két, egymástól független kutatócsoport is megkapta az élesztő fehérjehálózati térképét. Stanley Fields 1989-ben kifejlesztett két hibrid módszere viszonylag gyors, félig automatizált technikát ajánl a fehérje-fehérje kapcsolat észrevételére. Bár a módszerről ismert, hogy számos hamis pozitív és negatív eredményt is ad, a generált térkép példátlan lehetőséget kínál arra, hogy bekukucskáljunk a sejt szabályozási szervezésébe.

A sejt anyagcseréjének topológiai elemzésébe bepillantva felvillanyozódtunk, és 2000 őszén Oltvai, Jeong és én egy fiatal diákkal, Sean Masonnel együtt érdeklődni kezdtünk a fehérjék közötti kapcsolathálózat iránt. A néhány hónappal korábban publikált két hibrid adat kitűnő lehetőséget kínált egy ilyen vizsgálathoz. Miután letöltöttük az összes ismert fehérje-fehérje kapcsolatot, rekonstruáltuk az élesztő fehérjehálózatát, hogy főbb vonásait tanulmányozzuk. Az eredmények ismét kevés okot hagytak a kételkedésre: azt mutatták, hogy a fehérje kapcsolati hálózata skálafüggetlen topológiájú. Azaz a sejtben a legtöbb fehérje nagyon sajátos szerepet játszik, és csak egy vagy két fehérjével lép kapcsolatba. Néhány fehérje azonban képes rengeteg más fehérjéhez fizikailag kapcsolódni. Ezek a középpontok alapvető fontosságúak a sejt megfelelő működése és túlélése szempontjából. Bizonyítani tudtuk, hogy az esetek 60-70 százalékában egy középponti fehérjéért felelős gén elmozdítása elpusztítja a sejtet. A kevés kapcsolatu fehérjéket érintő mutációk ezzel ellentétben kevesebb mint 20 százalékos valószínűséggel bizonyulnak halálosnak.

Párhuzamos eredmények sorozata támasztotta alá ezeket a felfedezéseket. Andreas Wagner tőlünk függetlenül megerősítette, hogy az élesztő fehérjehálózata skálafüggetlen topológiájú. Stefan Wuchy, a European Media Lab fiatal kutatója hasonló felépítést talált a sejten belül egy teljesen különböző hálózatban. Az ő úgynevezett fehérjetartomány-hálózatában hálózat pontjai az egyes fehérjemolekulák jellegzetes résztartományai (protein domains), amelyeken keresztül a fehérjék egymáshoz kapcsolódnak. Két fehérje-résztartományt összekapcsolnak tekintünk, ha ugyanazon a fehérjén egyidejűleg jelen vannak. Jong Park és társai az Egyesült Királyságban lévő European Bioinformatics Institute-ból skálafüggetlen topológiára bukkantak, amikor az élesztőhálózatot rekonstruálták a Protein Data Bank által gyűjtött fehérjekapcsolatok adataiból. Kutatócsoportunk ugyanazt a szerkezetet megtalálta egy, az élesztőtől nagyon különböző élőlényben is, egy egyszerű baktériumban, amelyet *Helicobacter pylori*-nak neveznek. Ez azt sugallja, hogy a fehérje kapcsolati hálózatnak skálafüggetlen volta minden élőlény általános vonása. Az anyagcserének és a fehérje kapcsolati hálózatának hasonló topológiája azt mutatja, hogy a sejt felépítésében nagyfokú harmónia létezik: bármelyik szervezési szintet is vizsgáljuk, skálafüggetlen topológiával találkozunk. Ezek a sejten belüli utazások azt mutatják, hogy Hollywood és a világháló csak újra felfedezte azt a topológiát, amelyet az élet hárommilliárd évvel korábban kifejlesztett. A sejtek valóban kis világok, amelyek sok más, nem

biológiai hálózat topológiájára hasonlítanak, mintha az élet építőmestere csak ilyeneket tudott volna tervezni.

Hogyan jött létre az élet ebben a felépítésben? Amikor feltettem ezt a kérdést, szinte azonnal meg is volt a válaszuk rá. Körülbelül fél évvel azután, hogy a fehérje kapcsolati hálózatának topológiájára vonatkozó eredményeinket publikáltuk, egy hónapon belül három e-mailt kaptam. Mindegyikük egy kéziratot tartalmazott különböző kutatócsoportoktól. Meglepetésünkre mind a három kutatócsoport ugyanazt az egyszerű és elegáns magyarázatot kínálta, azt állították, hogy a skálafüggetlen topológia a sejtek általános hibája, amely szaporodásuk során jön létre.

## 6.

A sejtek úgy szaporodnak, hogy megkétszerezik tartalmukat, és aztán kettéosztódnak. Ennek a folyamatnak a részletei változhatnak az egyszerű baktérium és az összetettebb emberi sejtek esetében. Bizonyos lépések azonban általánosak. Először is: a genetikailag azonos új sejt létrejöttéhez a DNS-t hűen kell lemásolni. Ez a folyamat azonban nem mentes a hibáktól. Bár a sejt belső másoló mechanizmusa biztosítja, hogy a DNS-szekvenciák különösen nagy hűséggel öröklődjenek, azért minden 200 ezer évben körülbelül egy betű véletlenszerűen megváltozik. A másik általános hiba a gén kettőződése. A másoló folyamatban ritkán előforduló baleset folytán a génkettőződés akkor jöhet létre, amikor a széttört DNS-molekulák végei ismét összeforrnak. Eredményképpen a kiinduló DNS változó hosszúságú darabjai kétszer is feltűnnek az utód génállományában. Ilyen másolási hibák néha elpusztítják a sejtet. Más esetekben ugyanannak a génnek több másolata evolúciós előnyt jelent, és átöröklődik a következő nemzedékeknek. A hemoglobin egy jól ismert példa.

A sejtekben eredetileg csak egy hemoglobingén volt.

Mintegy 500 millió évvel ezelőtt a magasabb rendű halfajok evolúciója folyamán a génkettőzések sorozata következett be, amelynek eredménye a hemoglobingén négy másolata lett, a génállományon belül szétszórva. Ma e gének mindegyike a hemoglobin fehérjekomplexum négy összetevőjének egyikét kódolja.

A sejhálózatban a gén kettőződésének jelentős a hatása. Eredménye két azonos gén, amely azonos fehérjéket állít elő, amelyek azonos fehérjékkel lépnek kapcsolatba, így egy új csomópont jött létre: az a fehérje, amelyet a megkettőződött gén termel. Szomszédjai, a fehérjék, amelyekkel a megkettőződött fehérje kapcsolatba lép, most már mind a kiinduló, mind az új fehérjével kapcsolatba lépnek. Ezért minden egyes fehérje, amelyik kapcsolatba kerül a megkettőződött fehérjével, egy extra kapcsolatra tesz szert. Ebben a játékban a sok kapcsolattal rendelkező fehérjéknek természetes előnyük van: valószínűbb, hogy inkább a megkettőződött fehérjével lesz kapcsolatuk, mint kevés kapcsolatú társaikkal. Nem igaz, hogy a középpontok gyakrabban kettőződnek meg. Inkább az a helyzet, hogy - mivel a középpontok több fehérjével vannak kapcsolatban - nagyobb

valószínűséggel rendelkeznek kapcsolattal a megkettőződött ponthoz, amelyik egy extra kapcsolatot ajánl neki.

Ennek a magyarázatnak a legfontosabb vonása az, hogy a skálafüggetlen topológia eredetét visszavezeti egy jól ismert biológiai mechanizmusra, a génkettőződésre. Közben megmutatja, hogy a génduplázódás egyidejűleg vezet a fehérjehálózat növekedéséhez egy extra fehérje hozzáadásával és a népszerűségi kapcsolódáshoz; az új kapcsolatok létesítésével a már több összeköttetéssel bíró fehérjék gyorsabban szereznek további kapcsolatokat. Túl korai lenne még ezt kizárólagos magyarázatként elfogadnunk, mivel elképzelhető, hogy különböző, eddig még felderítetlen mechanizmusok ugyanazt a topológiát tudják létrehozni. Nem világos, hogy ez megmagyarázza-e az anyagcserében látott skálafüggetlen szerkezetet is. Mindenesetre ez azt mutatja, hogy a sejten belül jelen lévő mechanizmusok képesek skálafüggetlen topológiát előállítani. Ezért ennél a pontnál készen állunk arra, hogy a következő fontos kérdést vizsgáljuk: fog-e segíteni nekünk az élet térképe abban, hogy jobban megértsük és gyógyíthassuk a betegségeket?

## 7.

A rák legtöbbször kutatott emberi betegség. Az orvosi közösség ráirányuló különleges figyelméne néhány jelentős áttörést eredményezett. A legfontosabb valószínűleg a p53-as gén felfedezése. Bár David Lane és Arnold J. Levine már 1979-ben felfedezte, csak a nyolcvanas évek végén, Bert Vogelstein munkáját követően ismerték fel teljesen a rák kialakulásában játszott szerepét. Vogelstein rájött, hogy a p53 gén által létrehozott p53 fehérje daganat-visszafejlesztő hatású.

Ahogy a fékek lehetővé teszik, hogy autónkat megállítsuk, úgy lassítják és állítják meg a DNS másolását és osztódását a daganatot elnyomó gének az új sejtekben. Az egészséges sejtek körül kevés p53 molekula van. Ha sugárzás vagy más sérülés károsítja a sejtet, akkor több p53 termelődik, hogy megakadályozza a sejt osztódását, azaz a szaporodást. Ez időt enged a sejtnek, hogy megjavítsa a sérülést, mielőtt a rosszul működő sejtől további másolatok készülnének. Ha azonban a sérülés javíthatatlan, akkor a p53 fehérje aktivizálja a gének egy csoportját, hogy pusztítsák el a sejtet. Ha a sejt fékje - a p53 fehérje - elromlik, a sejt átokfutásba kezdhet. A rákos sejtek abban térnek el az egészséges sejtektől, hogy nagyon nagy sebességgel képesek szaporodni. A különböző emberi rákok mintegy 50 százaléka a p53 gén egy mutációját tartalmazza. Ez a megfigyelés a kutatások özönét indította el, amely 1989 óta több mint 17 000 publikációt eredményezett. A rák létrejöttében játszott központi szerepének elismeréseként 1993-ban a Science című folyóirat „Molecule of the Year”-nek (az év molekulájának) nevezte a p53 molekulát. A molekulát kísérő figyelem alapján azt várhattuk, hogy mostanra már megtalálták a rák gyógymódját. Más dolgunk nincs is, csak olyan gyógyszereket fejleszteni, amelyek biztosítják, hogy a p53 molekula mindig elvégezze

munkáját. Hogy lehet akkor, hogy ilyen hatalmas mennyiségű kutatás még nem eredményezett egy univerzális rákgyógyszert?

Az emberi rák kifejlődésében játszott fontos szerepe ellenére a p53 gén rendbehozatala önmagában még nem fog ennek a halálos betegségnek a gyógyításához vezetni. Az okot mostanában fogalmazták meg éppen azok az emberek, akik a p53-at a rákkutatás középpontjába állították. Vogelstein, Lane és Levine 2000 novemberében a Nature című lapban publikált egy cikket, amelyben a hálózatok kerültek célkeresztbe. Az ok, amiért nem értjük teljesen a rákot, hármójuk szerint az, hogy a sejt olyan, mint az internet.

A három kutató azt állítja, hogy fel kell hagynunk a p53 molekula mindenhatóságával kapcsolatos elfogultsággal és helyette, ahogy ők nevezték, a p53 hálózatra kell összpontosítani, arra a hálózatra, amelyet a p53 molekulával kölcsönhatásban álló gének és molekulák összessége alkot. Ahogy ők mondták: „A p53 hálózat megértésének egyik módja az, ha összehasonlítjuk az internettel. A sejt, mint az internet, skálafüggetlen hálózatnak tűnik: a fehérjék egy kis részhalmaza sok kapcsolattal bír, és sok más fehérje működését irányítja, miközben a legtöbb fehérje csak néhány másikkal lép kapcsolatba. A fehérjék ebben a hálózatban a csomópontok, és a legtöbb kapcsolattal rendelkező pontok a középpontok. Ilyen hálózatban a viselkedés majdnem változatlan marad, ha pontokat véletlenszerűen elmozdítunk. De az ilyen rendszernek lehet egy Achilles-sarka.”

Egy hálózat Achilles-sarka, ha az olvasó emlékszik, a középpontjainak a sebezhetőségében van. A kevesebb kapcsolattal rendelkező molekulák kikapcsolása nem jelent a sejt számára drámai hatást, miközben egy mutáció a p53 molekulában, a sejthálózat egyik középpontjában rákossá teszi a sejtet, és megöli az élőlényt. Ez magyarázza, hogy a p53 molekulával kapcsolatban álló molekulákra ható kombinált gyógyszertámadások sokkal nagyobb hatással vannak a sejtre, és hasonlítanak magára a p53 molekulára vonatkozó támadásra.

A. Vogelstein, Lane és Levine által a Nature folyóiratban publikált cikk megmutatta a hálózati gondolkodás erejét és széleskörű érvényességét. Az internet hatékonyabb megvédésére született ötletek és azok, amelyek hackertámadások hatásait mérik, termékeny talajra hullottak a sejtbiológiában, ami az egészséges emberi sejtek védelmével foglalkozik. Az internetkutatás és a sejtbiológia lényegi kérdései hasonlóak. Az első lépés az, hogy feltérképezzük a rendszerek mögötti hálózatot. Aztán ezekből a térképekből ki kell találnunk a hálózatokat vezérlő törvényeket. Ebből a szemszögből az internet térképészei és a rákkutatók egy csoportba tartoznak.

Mégis, a p53 hálózat legfontosabb következménye túlnő azokon az azonosságokon, amelyek a sejtek és az internet között léteznek. Egy új megközelítés irányába mutat a gyógyszeres terápiákkal és a gyógyszerfejlesztéssel kapcsolatban. A p53 hálózat tanulmányozásának végső célja, hogy megtaláljuk a rák gyógy módját. Amint azt a következőkben tárgyaljuk, ez egy lépésről lépésre haladó eljárás. A rák elleni terápia a legtöbb esetben a megsemmisítésre irányul: megölik a rákos sejt eket, szétrombolják a sejthálózatokat gyógyszerek vagy besugárzás segítségével. A p53 hálózat megértése más utat vetít előre:

először ennek a hálózatnak a topológiáját kell pontosan megfejtenünk, és az összes kölcsönhatást teljesen meg kell értenünk. Egy ilyen térképpel a kezünkben már frontális támadást indíthatunk, és olyan gyógyszereket találhatunk, amelyek helyreállítják a p53 molekula funkcióit az öt körülvevő hálózat szétrombolása nélkül.

## 8.

A rákot, a szívbetegséget és a pszichiátriai rendellenességeket egészen napjainkig csupán tüneti kezeléssel tudtuk gyógyítani. Mindenütt - a vegyészlaboratóriumoktól az esőerdőig - ritka vegyi anyagokat kerestünk, és reménykedtünk, hogy valamelyik betegségre léteznek csodagyógyszerek. Bizonyos becslések szerint a piacon elérhető gyógyszerek az emberi testben található 30 ezer fehérjéből csak ötszázat céloznak meg. És bár sok betegségre többféle gyógyszerünk van, gyakran csak apró lépések sorozatával lehet kitalálni, hogy az adott páciens számára melyik működik.

A sejten belüli teljes biokémiai hálózat részletes megértése azt ígéri, hogy abbahagyhatjuk a próbálgatást. A sejt pontos huzalozási tervrajzának ismeretével és olyan diagnosztikai eszközök segítségével, amelyek képesek a különböző, sejten belüli interakciók erejét elcsípni, az orvosok a jövőben tesztelhetik sejteink válaszát egy gyógyszerre, még mielőtt elkezdenénk szedni azt. Hála az élet térképének, amelynek segítségével azt is részletesen megérthetjük, hogyan működnek együtt a gének, valamikor képesek leszünk olyan betegségek diagnosztizálására, mint a mániás depresszió vagy rák, mielőtt még bármilyen tünetük megjelenne. Ez a tudás segíteni fog nekünk a gyógyszerek kifejlesztésében, amelyek olyan finoman beállíthatók és pontosak lesznek, hogy csak a hibásan működő sejtekre hatnak majd, és békén hagyják az egészséges sejteket. Más szóval: ezek valódi gyógymódot nyújtanak.

Ha gyógyszer segítségével megváltoztatjuk testünkben egy vegyi anyag koncentrációját, az csökkentheti az adott betegség tüneteit. Mivel azonban a sejtet egy kis világ tulajdonságú összetett hálózat irányítja, a gyógyszer által okozott perturbáció sok más vegyi anyagra is elkerülhetetlenül hatni fog, és valószínűleg nemkívánatos mellékhatásokat vált ki. A mániás depresszióval kezelt páciensek meghalhatnak szívbetegségben, holott korábban semmi problémájuk nem volt ezek a téren. Ugyanakkor az a gyógyszer, amelyik szívbetegséget okozott egy páciensnek, egy másik személy esetében nem okoz mellékhatásokat. Mindnyájunknak különböző színű a szem- és hajszíne, és arcvonásaink is eltérnek, így nem meglepő, hogy a gyógyszereket is különféleképpen dolgozzuk fel. Ha kezünkben van az élet térképe és olyan eszközök, mint a mostanában kifejlesztett DNS-chipek, amelyek a gének közötti kapcsolatokat mutatják meg, az orvosok képesek lesznek az összes molekula és gén részletes listáját megadni, amelyekre az adott gyógyszer hat. Személyre szóló orvosságunk lesz, amely elfogadhatóvá teszi azokat a gyógyszereket is, amelyek csak a lakosság 10 százalékára hatnak és bárki másnak potenciálisan halálosak.

## 9.

Ha az olvasó az utóbbi években mániás depresszióban szenvedett, akkor az orvosnál tett első látogatása egy egyórás beszélgetéssel kezdődött, amelynek során gondosan megvizsgálták gondolatait és érzéseit. Ezután az olvasó nyilván egy recepttel lépett ki az orvostól. Ha korábban soha nem gondolta, hogy agyának aktivitása és jó közérzete az agy kémiai állapotától függ, most a gyógyszer bevétele után bizonyára rájött erre. Az ön testébe bejuttatott vegyi anyagok egy rétege gyorsan átveszi a viselkedés és az érzések felett az uralmat. Minden bizonnyal felfedezte, hogy olyan dolgokat cselekszik és olyan érzéseket él át, amelyeket eddig soha nem tapasztalt. A legtöbb esetben az első gyógyszer nem működik. Talán hiperaktív lesz tőle, vagy még depressziósabb. Néhány hét eltelte után egy másik gyógyszerre kell áttérni a jobb eredmény reményében. A páciensek öt vagy hat gyógyszert is kipróbálnak néhány hónap alatt, míg rátalálnak arra, amelyik a legjobban működik. Miközben az olvasó jobban érzi tőlük magát, ezek a gyógyszerek nem gyógyították meg a betegségét. Csak időlegesen változtatták meg az agy vegyi állapotát, és kikapcsolták azokat a változásokat, amelyeket az olvasó rosszul működő genetikai hálózata okozott. Ha a gyógyszer szedését abbahagyják, a kémiai kiegyensúlyozatlanság visszatér a mániás depresszió tüneteivel együtt.

Húsz év múlva a dolgok másképp nézhetnek majd ki. Ugyanazzal az orvossal a találkozás csak ötperces beszélgetés lehet, mint egy egyszerű influenza esetén. Egy asszisztens néhány csepp vért vesz, és az olvasó üres kézzel tér haza. Este pedig a legközelebbi gyógyszertárban beszerezheti a gyógyszert. A következő nap olyan frissen és boldogan ébredhet, mint a tünetek jelentkezése előtt, mániás és depresszív viselkedése nyomtalanul eltűnne.

Hogyan következhet be ez az áttörés? Először is addigra az emberi sejt teljes biokémiai hálózatát feltérképezik, és ez lehetővé teszi, hogy részletesen megértsük, hogyan működnek együtt a különböző gének és molekulák. Másodsor pedig a DNS- és fehérjehipek, a manapság fejlesztés alatt álló új technológiák jelen lesznek minden orvosi rendelőben, és lehetővé teszik, hogy megállapítsák, melyek az olvasó sejtjeiben hibásan működő gének és molekulák. Miközben az emberi sejthálózat feltérképezésére valószínűleg egy évtized szükséges, a génaktivitás felmérése bizonyos kutatólaboratóriumokban már napjainkban is lehetséges.

2020-ra ezek az előrelépések teljesen átalakítják majd az orvostudományt. A gyerekeket nem viszik majd el egy torokfájás esetén az orvoshoz - a mamának lesz egy kézi eszköze, egy helyettesíthető chippel, amely kimutatja, hogy Tomi fájó torkát egy Streptococcus-fertőzés okozza, és egyúttal a fertőzés altípusát is azonosítja majd. A mama aztán rákapcsolja az eszközt a számítógépre, és elküldi a profilt az orvos rendelőjébe, így mire Tomi beér az iskolába, gyógyszere már várja az iskolaorvosnál. Ami a legfontosabb, hogy Tomi gyógyszere nem egy erős antibiotikum lesz, ami az összes baktériumot elpusztítja, függetlenül attól, hogy az káros vagy nem. A gyógyszert úgy fogják

megtervezni és elkészíteni ott helyben, hogy csak azt az élő szervezetet pusztítsa el, amelyik Tomi torkát megtámadta. Hatástalan lesz a többi baktériumra, és minimalizálja annak valószínűségét, hogy Tomi szervezetében rezisztencia alakuljon ki az antibiotikummal szemben.

Azt hiszem, ez nem valami valóságtól elrugaszkodott látomás. Igazából meglehetősen józan elgondolás, talán még egy kicsit rövidlátó is. Ez valójában csupán azoknak az eszközöknek egyszerű továbbgondolása, amelyek ma már a világ legtöbb kutatólaboratóriumában léteznek. Ezek az előrelépések abból az alapvető változásból erednek, ahogyan az életre és a betegségekre tekintünk. Annak eredményei, hogy a sejtet egésként - hálózatként -, nem pedig független vegyi anyagok tartályaként vizsgáljuk.

## 10.

A genomprojekt a gént alapvető építőelemként használja. Mostanáig azt hittük, hogy egy emberi lény teljes biológiai történetét lekódolja a spirális DNS hárommilliárd betűje. Igaz, hogy az emberi génállomány feltérképezése forradalmasította a biológiai kutatást, de azt is megmutatta nekünk, hogy a határtalan világ egy kis részét ismerjük csak igazából, és hogy milyen sok minden maradt, ami még felfedezésre vár.

1996-ban az élesztő génállományának meghatározása megdöbbenetette a tudományos közösséget: az élesztő 6300 génből áll. Ennek körülbelül csak negyedét várták és ennyihez tudtak hozzárendelni valami bizonytalan célt. A biológusok a biztonság kedvéért - és mivel az embert az evolúció csúcspontjaként reklámozzák -, az emberi génállományt legalább százezerre becsülték. Erről a számról úgy gondolták, hogy elég nagy ahhoz, hogy a Homo sapiens magas szintű bonyolultságát biztosítsa. Aztán érkezett 2001 februárja és az emberi génállomány megjelentetése. Kiderült, hogy a várt génszám harmadánál is kevesebbünk van - körülbelül csak 30 ezer. Ezért ez az alig egyharmados növekedés kell hogy magyarázza az egyszerű Caenarhabditis elegans féreg és a köztünk lévő különbségeket - elég provokatív gondolat, amikor azt nézzük, hogy a C. elegans húszezer génje csak háromszáz neuront kell lekódoljon, míg a mi tízezer többletgénünk kell hogy megmagyarázza az agyunkban jelen lévő egymilliárd idegsejtet.

Röviden: most már világos, hogy a gének száma nem arányos az általunk érzékelt komplexitásunkkal. Mit jelent akkor a komplexitás? A kérdésre a hálózatok adják meg a választ. A hálózatok nyelvén megfogalmazott kérdés így hangzik: hányféle, lehetőség szerint különböző viselkedést képes egy génhálózat előállítani, ha a gének számát rögzítjük? Elméletileg két sejt, amely minden tekintetben azonos azt kivéve, hogy egy specifikus gén bekapcsolt állapotban van az egyik sejtben és kikapcsoltban a másikban, eltérő módon viselkedhet. Ha feltesszük, hogy minden gén egymástól függetlenül kivagy bekapcsolható, akkor egy  $N$  génből álló sejt  $2^N$  különböző állapotban lehet. Ha a komplexitás mérésére elfogadjuk egy tipikus sejt különböző viselkedéseinek lehetséges számát, akkor a féreg és az ember közötti



különbség meghökkentő: az emberek 103000-szer komplexebbnek látszanak, mint féreg rokonaink!

Miközben a huszadik századot a fizika évszázadának láttuk, a huszonegyedik századról gyakran azt jósolják, hogy a biológia évszázada lesz. Egy évtizeddel ezelőtt kísértésbe eshettünk volna, hogy a gének századának nevezzük. Kevés ember merné most ezt mondani az új évszázadról, amelybe éppen átléptünk. Valószínűleg a komplexitás százada lesz. És a biológiai hálózatok évszázada is. Ha létezik olyan terület, amelyben a hálózati gondolkodás forradalmat idézhet elő, azt hiszem, az a biológia.

# **A TIZENNEGYEDIK LÁNCSZEM**

## ***Hálózati gazdaság***

Tíz évvel ezelőtt az egyik új és teljesen ismeretlen internetes vállalatnak súlyos anyagi problémái támadtak. A kezdő cég egyik igazgatósági tagja, aki egyben a Time Warner egyik vezetője is volt, úgy látta, hogy a kis cég problémái kapóra jöttek az általa képviselt szórakoztatóipari óriásnak. Ezért a Time Warner egyik felsőbb vezetőjének javasolta, hogy húzzák ki frissen induló céget a bajból. Potom 5 millió dollárért a médiabirodalom a cég 11 százalékát megkaphatta volna. Mindez Time Warner számára csupán aprópénz lett volna, és hozzáférést biztosíthatott volna számára az internethez, ami akkoriban egy vadonatúj információs csatorna volt. „Ha ezt megtennénk” - válaszolta a felsőbb vezető, azaz ha elfogadták volna, hogy az internet egy, a Time Warner számára is életképes műsorszórás csatorna - „akkor azzal az ablakon hajítanánk ki mindent, amit 1923 óta tettünk”.

Az idézett vezető a részvényválasztásban alaposan leszerepelt: tíz évvel később az ötmillió dolláros befektetés több mint tizenötmilliárd dollárt ért volna. A tranzakció egész biztosan megváltoztatta volna a történelem menetét is, hiszen egy évtizeddel később Steve Case, az America Online (AOL) - a korábban ismeretlen kezdő cég - első számú vezetője és Jerry Levin, a Time Warner elnöke egy manhattani sajtókonferencián bejelentették a két cég összeolvadását. Néhány évvel korábban a Time Warner könnyűszerrel bekebelezhetette volna a kezdő internetes vállalkozást. Viszont 2000-ben már az AOL, az egy évtizeddel korábban még ismeretlen cég volt az, amelyik lenyelte a médiaóriást.

A Time Warner biztosította a tartalmat, az AOL-nak pedig megvoltak az eszközei arra, hogy ezt a fogyasztóhoz eljuttassa. Mindez nem sokkal a NASDAQ-buborék 2000. tavaszi kipukkanása előtt történt; Jerry Levin kénytelen volt az internet irányába nyitni, hogy a Wall Street figyelmét ismét cége felé fordítsa, és Steve Case-nek szüksége volt a Time Warner kábelhálózatára, hogy az emberek otthonába eljuthasson. A két vállalat szemlélete közötti hatalmas különbségek ellenére a pénzügyi elemzők éjt nappallá téve győzködtek mindannyiunkat, hogy ez a frigy a mennyben kötött. Ugyanezek az elemzők mondták 1998-ban, hogy a Daimler-Benz és a Chrysler számára is ésszerű lépés volt, hogy az előbbi felvásárolta az utóbbit. Éppúgy, mint a két ipari óriás, az Exxon és a Mobil fúziója 1998-ban, vagy négy hónappal korábban az a hatalmas bevásárlás, melynek során a British Petroleum megszerezte az Amocót. Ám a figyelemre méltó fúziók és felvásárlások sora itt nem ér véget. 1998-ban a Bell Atlantic összeállt a GTE-vel, az SBC Communications megvásárolta az Ameritechet, egyesült a BankAmerica és a NationsBank, és a Citicorp fuzionált a TravelersGroup-pal.

Van értelme ezeknek a fúzióknak? Ha a globalizációt ellenzőkre hallgatunk, akik a nagy vállalatcsoportokat azzal vádolják, hogy a nagy horderejű döntésektől a divatokig mindent ránk kényszerítenek, akkor bizonyosan nincs. Viszont ha a gazdaságot egy összetett hálózatként fogjuk fel, amelynek pontjai vállalatok, és linkjei a köztük meglévő különböző gazdasági és pénzügyi kapcsolatokat jelölik, akkor ezek az

egyesülések elkerülhetetlenek. Azért, mert egy hálózatos gazdaságban a hálózat növekedésével a csomópontoknak is növekedniük kell. Az üzleti világ hálózatának pontjai az új kapcsolatok iránti éhségük csillapítása érdekében megtanulják lenyelni a kisebb pontokat; ez egy olyan újszerű jelenség, amely más hálózatokban ismeretlen. A globalizáció rákényszeríti a csúcsokat arra, hogy egyre nagyobbra nőjenek, és ezért az összeolvadások és felvásárlások a növekvő gazdaság természetes velejárói.

A hálózatoknak a matematika és a fizika terén bekövetkezett újjászületése nyomán a közelmúltban számos új eredmény született, amely bemutatja, hogy szerepük a vállalatok szerkezetétől kezdve a piacokig majd mindenütt igen jelentős. Rájöttünk, hogy néhány nagy hatalmú igazgató kicsiny hálózata irányítja a Fortune 1000 lista vállalataiban a kinevezéseket; rájöttünk, hogy a vállalaton belüli hálózat szerkezete felelős azért, hogy a vállalat képes-e alkalmazkodni a gyorsan változó piaci követelményekhez; a vásárlók tömegeinek hálózatos szerkezetét kihasználó stratégiák pedig megdöbbentő eladási rekordokhoz vezetnek. Mivel a linkek és a kapcsolatok egyre nagyobb szerephez jutnak, a hálózati jelenségek megértése egy gyorsan fejlődő, újszerű gazdaságban a túlélés alapvető feltételévé vált.

## 1.

A huszadik századi vállalatok szerkezete - a képviselt területtől és iparágtól függetlenül - egy feje tetejére állított fához hasonló hálózatra épült, amelyben a vezérigazgató a fa gyökere, majd a fa lejjebb lévő, szétváló ágai az egyre speciálisabb feladatú vezetőket és munkásokat jelölik, akiknek a feladatai közt nincs átfedés. A fa ágain a gyökértől távolodva egyre csökken a felelősség, míg végül eljutunk azokhoz, akik már csupán a fent kidolgozott utasítások zsinóron rángatott végrehajtói.

A vállalati fa-struktúra igen gyakori, de sok problémát is okoz. Először is a hierarchiában fölfelé haladó információt gondosan meg kell szűrni. Ha a szűrés az ideálisnál gyengébb, akkor a hierarchia csúcsán, ahol az ágak találkoznak, hatalmas lehet a túlterhelés. Másodszor a független részfeladatok egybeillesztése meglepően rugalmatlanná teheti a céget. Jellegzetes példa erre Ford gyárai, ahol az elsők között valósították meg a teljes hierarchikus szerkezetet. A probléma az volt, hogy túl jól csinálták. A Ford-gyár összeszerelő egységei szervezetileg olyan szoros és optimalizált egységbe voltak összeillesztve, hogy az autókön végrehajtott apró változtatások miatt is hetekre vagy hónapokra le kellett hogy álljanak a gyárak. Az optimalizálás az egyesek által bizánci monolitoknak nevezett egységekhez vezet. Ezek a szervezetek agyonszervezettek, teljesen rugalmatlanok és képtelenek a változó üzleti környezettel együtt változni.

A fa-modell leginkább a tömegtermelésnek kedvez; egészen a közelmúltig ez volt a piaci siker kulcsa. De napjainkban az érték már az ötletekben és az információkban van. Elértük azt a pontot, amikor már képesek vagyunk előállítani bármit, amit megálmodunk. A sarkalatos kérdés már csupán az, hogy mit is gyártsunk?

Miközben a vállalatok az információs robbanással szembesülnek, és a gyorsan változó piac példa nélküli rugalmasságra kényszeríti mindannyiukat, folyik a vállalati struktúra teljes átalakítása. Mindez nem csupán néhány ember munkaköri leírásának apró változásában jelenik meg. Alapvető átszervezésről van szó, amelynek célja az, hogy a vállalatok a posztindusztriális korszakban képesek legyenek alkalmazkodni az információs gazdaságnak is nevezett, megváltozott piaci környezethez.

Ennek az átalakításnak az egyik leglátványosabb része a fa jellegű szerkezetről a horizontális, hálózatos szerkezetre való átállás, amelyben az egyes csomópontok között sok kapcsolat van. Megfigyelhető, hogy napjainkban a fontos erőforrások az értékes berendezések helyett egyre inkább az információ egyes bitjei, a vertikális helyett a virtuális integráció kerül előtérbe, a pénzügyi mozgás országos helyett globálissá válik, az elkészített leltárak hónapok helyett csak órákig érvényesek, a vállalatok nem felülről, hanem alulról építkeznek, és a dolgozók alkalmazottakká vagy önállóan cselekvő egységekké válnak.

Az új termékek vállalaton kívül és belül is új együttműködések tesznek szükségessé, és új szerkezetet kényszerítenek ki. Ennek érdekében a középvezetői állásokat sok helyen megszüntették. Egyes alkalmazottak, akik korábban kisegítő szerepet kaptak, ma egyik napról a másikra a vállalat valamelyik fontos termékének fő felelősei. Virágkorukat élik a munkacsoportok, a vállalaton belüli és kívüli együttműködések, és a munkaerő-kölcsönzés. Ezért azok a vállalatok, amelyek a gyorsan változó piaci környezetben versenyben kívánnak maradni, a merev, optimalizált fa jellegű szerkezettől a dinamikus, hálózatos szervezeti felépítés felé mozdulnak el, amely rugalmasabb, jobban alakítható, és alkalmasabb a feladatok elvégzésére. A változtatást halogatók pedig könnyen a perifériára kerülhetnek.

A vállalatok belső szerkezetének átalakítása csupán az egyik következménye a gazdaság „hálózatosításának”. Egy másik fontos következmény az a felismerés, hogy a vállalatok soha nem egyedül élik életüket. Együttműködnek más intézményekkel, és átveszik azokat a módszereket, amelyek más szervezeteknél már sikeresnek bizonyultak. Minden vállalat számára kulcsfontosságú a felső vezetők kapcsolata a többi céggel; ez legtöbbször a vezérigazgatón és az igazgatótanács tagjain keresztül valósul meg. Amint azt a következőkben látni fogjuk, ezekben a kapcsolatokban a hálózatosság alapvető szerephez jut.

## 2.

„Egyértelműen és minden kétséget kizárva azt kívánom önöknek mondani, hogy Ms. Lewinsky határozottan azt mondta nekem, hogy nem volt szexuális kapcsolatban az Elnökkel” - ezt olvasta fel Vernon Jordan egy, a Clinton-Lewinsky-botrány kellős közepén sietősen összehívott sajtókonferencián. Ám hamarosan sor került arra, hogy - Eric Pooley, a Time magazin újságírója szerint - „pályafutásának leglátványosabb gimnasztikai gyakorlatát vigye véghez, és kitáncoljon a csapdából, amibe maga sétált bele”. Ugyanis nem sokkal később mindenki annak a

négy találkozóznak és hét telefonhívásnak a magyarázatát követelte tőle, amelyek a Fehér Ház volt gyakornokával történtek, és amelyekkel nagyvállalatoknál próbált állást szerezni Ms. Lewinsky számára.

Washingtoni bennfentesek számára nem volt meglepetés Jordan szerepe Monica Lewinsky álláskeresésében. Viszont az már meglepő volt, hogy nem volt képes magáról elterelni a figyelmet. Jordan az 1970-es években a polgárjogi mozgalom sikeres tagja volt, és 1980-ban egy fajgyűlölő fehér hátba lőtte, miután megtudta, hogy Jesse Jackson, akit eredetileg meggyilkolni készült, nincs a városban. Jordan azóta gondosan kerül a reflektorfényt; az amerikai főváros legfőbb szürke eminenciása lett belőle, a washingtoni médiafüggők tömegében ritkán megszólaló vagy látható sztárügyvéd, a különleges megállapodások nyélbeütője. Pooleynak a Time-ban megjelent írása szerint: Jordan évi egymillió dollárt keres egy olyan ügyvédi iroda jóvoltából, amelyben nem kell egyetlen ügyet sem iktatni vagy tárgyalásokra járni, mert a fogadóórát fényűző éttermekben adja, mobiltelefonon vagy limuzinok süppedős hátsó bőrülésén; itt hozzátesz egy gördülékeny bevezetést, amott finoman használja valamelyik törvényhozói kapcsolatát, vagy elsimít egy kínos ügyet, még mielőtt azt a sajtó lehozná."

Meglepő módon 1998-ban Jordan saját maga került be a lapokba országszerte. Találkozóit és telefonhívásait nagyító alá vette a sajtótól kezdve Kenneth Starr független tanácsadóig mindenki. Kiderült, hogy Jordan a Clinton-Lewinsky-ügy (más néven a „hatugrásnyi Monica-hálózat”) összevissza gubancolt hálójának egyik fontos csomópontja.

Jordan régi motoros volt a kis világok világában. Korábban igen sikeres volt az egyik legnagyobb hatalmú amerikai kis világ hálózatban, a nagyvállalatok hálójában, s így tehetett szert - már tapasztalt washingtoni bennfentesként - különleges pozíciójára. A Clinton-Lewinsky-botrány és a Clinton-kormányzat előtti néhány évben Jordan lett a Fortune 1000-es részvénytársaság-csoportot irányító szűk elit legnagyobb hatalmú igazgatója.

Az igazgatótanács - kb. egytucatnyi taggal - különleges hatalommal rendelkezik egy vállalat jövője szempontjából. A gyengén szereplő vezérigazgatók menesztésétől kezdve a nagyobb fúziók és beszerzések jóváhagyásáig minden fontosabb döntés az igazgatótanács hatáskörébe tartozik. Ezért a nagy cégek mindent megtesznek, hogy jó kapcsolatokkal rendelkező és tapasztalt tagokkal töltsék fel igazgatótanácsukat. A sikeres vezérigazgatókat, jogászokat és politikusokat gyakran hívják igazgatótanácsukba. Olyannyira, hogy gyakran több vállalat igazgatótanácsában való részvételre is ráveszik őket.

Egyes vezetők számos vállalat igazgatótanácsában is tagok, és gyakran nehezen képzelhető el, hogyan képesek összes feladatunknak eleget tenni. Ennek ellenére a legtöbb vállalat fontosnak tartja, hogy vezetői más cégek igazgatótanácsában is szerezzenek tapasztalatot. Egy vezető az egyik igazgatótanácsban tanultakat alkalmazza más vállalatok hasonló problémáira is, és így az igazgatótanácsi tagoknak ez a sokszorosán összekapcsolt hálózata alapvető szerepet játszik a vállalatokon belüli szokások elterjesztésében és a nagyvállalatok politikai és gazdasági befolyásának megőrzésében.

Az igazgatótanácsok hálózata - az amerikai nagyvállalati rendszer alakításában betöltött nagy szerepe miatt - gyakran kerül a szakmai sajtó nagyítójára alá. Viszont csupán a közelmúltban derült fény arra - miután a komplex hálózatok elemzése lehetővé vált -, hogy ennek a hálózatnak a hatalmas jelentős részben az erősen összekapcsolt szerkezetben rejlik.

Az igazgatók hálózatában minden egyes pont egy vezető, és közülük ketten össze vannak kötve, ha mindketten tagjai valamelyik igazgatótanácsnak. Ez egy igen nagy hálózat; ne felejtjük, hogy több ezer vállalatról van szó, és mindegyiknek nagyjából tucatnyi ember ül az igazgatótanácsában. Gerald F. Davis, Mina Yo és Wayne E. Baker a University of Michigan Business Schoolból nemrég megvizsgálták ennek a hálózatnak a legbefolyásosabb komponensét: a Fortune 1000 nevű vállalatcsoport által alkotott hálózatot elemezték, amelyben 10100 igazgatótanács helyet 7682 vezető tölt be. Ha minden egyes vezető csupán egyetlen igazgatótanácsnak lenne tagja, akkor a hálózat szétesne egymástól elvágott, de belül szorosan összekötött apró hálózatokra, amelyek mindegyike pontosan egy vállalatból állna. Ám a valóságban nem ezt látjuk. A vezetők 79 százaléka egyetlen igazgatótanácsnak tagja, míg 14 százalékuk kettő, 7 százalékuk pedig három vagy több igazgatótanácsban is részt vesz. A mérések szerint ennek a kisszámú közös igazgatótanácsnak köszönhetően a hálózat egy kis világ, amelyben az átlagos távolság ötlépésnyi. A részletes eredmények szerint a 6724 pontból álló legnagyobb csoportban két igazgatótanács tag között a távolság átlagos értéke 4,6 kézfogásnyi.

Az igazgatótanács hálózat attól a 21 százaléknál lesz kis világ, akik egynél több igazgatótanácsban tagok, hiszen ők azok, akik ezt a komplex hálózatot összetartják. Vernon Jordan szerepe különleges köztük. Jordan tíz igazgatótanácsnak tagja, és százhat olyan igazgatótanácsbeli taggal találkozik rendszeresen, aki valamelyik Fortune 1000-es vállalatot vezeti. Ő a vállalatvezetői elit legfontosabb alakja; a legtöbb igazgatótanács tagjaitól három vagy kevesebb kézfogás választja el.

### 3.

Jordan karrierje a napnál is világosabban mutatja, hogy a vállalati életben a legtöbb fontos kinevezés az igazgatósági tagok kis világ szerkezetű hálózatának kezében van. Ha alaposabban szemügyre vesszük Jordan újabb pozícióit, azt látjuk, hogy legtöbbször olyan igazgatótanácsban lett új tag, ahol már legalább egy igazgatót korábbról ismert. A hetvenes évek elején Jordan a National Urban League nevű, befolyásos polgárjogi szervezet elnöke volt, és többször felszólította a nagyhatalmú gazdasági elitet, hogy feketéket is vegyen fel tagjai közé. 1972-ben John Brooks, a Celanese Corporation nevű, vegyipari termékekkel foglalkozó cég elnöke ezt mondta Jordannek: „A pénzével és a szájával ugyanazt kellene mondania... Arról beszél, hogy feketékre van szükség az igazgatótanácsokban. Nincs kedve a Celanese igazgatótanácsában részt venni?”

Jordan röviddel azután, hogy a Celanese igazgatótanácsának tagja lett, két telefonhívást kapott: a Marine Midland Bank és a Bankers Trust igazgatótanácsába hívták. Tanácstalan volt, hogy melyik felkérésnek tegyen eleget, ezért felhívta John Brookst. „Erről nem ön dönt. Itt a Bankers Trustról van szó” - jött a rövid válasz. Amikor Jordan megkérdezte miért, Brooks egyszerűen így felelt: „Ön szerint ki jelölte a Bankers Trust igazgatótanácsi tagságára? Benne vagyok az igazgatótanácsban, én jelöltem.” A Bankers Trustnál Jordan együtt dolgozott William H. Ellinghaus-zal, aki a JC Penney igazgatótanácsában is részt vett. Egy évvel később Jordan a JC Penney-hez is meghívást kapott.

Három évvel később Jordan megkérte Peter McCullough-t, a Xerox vezérigazgatóját, hogy vállalja el a National Urban League elnöki tisztét. McCullough igent mondott a következő feltétellel: „Az elnökük leszek, ha ön részt vesz a Xerox igazgatótanácsában.” Jordan beleegyezett ebbe. Három évvel a Xerox igazgatótanácsi tagságának elvállalása után Jordan meghívást kapott az American Express igazgatótanácsába, ahol két Xerox igazgató már tag volt. Ezek után már nem meglepő, hogy 1980-ban Jordan beszállt az RJ Reynolds vezetésébe is; a Celanese vezérigazgatója és egy másik JC Penney igazgató tagja volt az RJ Reynolds igazgatótanácsának, és Jordan jó kapcsolatokat ápolt az RJ Reynolds vezérigazgatójával is, aki a Celanese vezetésében kollégája volt.

Az igazgatók a már meglévő ismeretségek révén tudnak kezességet vállalni leendő kollégáikért. Ez a kis világ dinamika hozza létre a vállalati elitet, ami nem más, mint egy óriási gazdasági és politikai befolyással rendelkező „haveri kör”.

Jordannek Washington egyik legnagyobb jogi tanácsadó cégénél, az Akin, Gump, Strauss, Hauer & Fieldnél betöltött jelenlegi állása is ennek a körnek köszönhető: Robert S. Strauss, aki a cég számára felhajtotta Jordant, a Xerox vezetésében Jordan kollégája volt.

Jordan pályája egyáltalán nem különleges. A hálózati hatások minden iparágban jelen vannak. A Szilícium-völgy cégei közti erőteljes munkaerő-áramlás a vállalatok közt egy sűrűn szőtt, személyes ismeretségekből álló hálózatot hoz létre. Mivel egy cég dolgozói ismerőseikért kezességet tudnak vállalni, akárcsak az igazgatótanácsi tagok esetében, a személyes kapcsolatokon keresztül szerzett új munkatársak tovább kitartanak új munkaadójuknál, és jobban teljesítenek, mint a más módon szerzett új dolgozók.

Az igazgatótanácsi tagok és Szilícium-völgybeli dolgozók sűrű és szövevényes hálózata csupán két példája az Egyesült Államok gazdasága mögött húzódó ismeretségi és hatalmi hálóknak. De ahhoz, hogy a gazdaság működésébe valóban belelássunk, azt kell megértenünk, hogy hogyan hatnak egymásra az igazgatók sűrű hálózata által irányított nagyvállalatok és a többi gazdasági egység.

#### **4.**

Napjainkban az új gyógyszerek fejlesztése mögötti fő hajtóerőt az egyetemek és a belőlük kinövő apró biotechnológiai cégek jelentik,

viszont az átfogó klinikai vizsgálatok indításához és a világméretű reklámkampányokhoz szükséges anyagi és emberi erőforrások változatlanul a nagy vegyipari és gyógyszeripari cégek kezében vannak. Mivel egy új gyógyszerfejlesztésének és piacra való bevezetésének költségei 150 és 500 millió dollár közé esnek, ezen a területen - az egyetemektől, kutatólaboratóriumoktól és kormányzati kutatóprogramoktól a vegyipari és gyógyszeripari cégeken át a kockázati tőkéig - mindenki rákényszerül arra, hogy stratégiai partnerek után nézzen. A biotechnológiai iparág meglehetősen fiatal, és ezek a partneri kapcsolatok a hálózatképződés egy kiemelkedően jól dokumentált példáját jelentik; rajtuk meg tudjuk vizsgálni, hogy hogyan alakulnak ki a hálózatok a gazdaságban.

A biotechnológiai ipar már egészen a kezdetektől fogva rendelkezett a növekvő hálózatok legfőbb ismertetőjegyeivel. Walter W. Powell, Douglas White és Kenneth W. Koput egy általuk kifejlesztett változó gráf segítségével felrajzolták a biotechnológiai hálózat 1988 és 1999 közötti növekedésének különböző állomásait. 1988-ban (a kezdeti időkben) a hálózatban jóval kevesebb kapcsolat volt, mint csomópont: a hetvenkilenc szervezetet harmincegy kapcsolat kötötte össze. A híres Erdős-Rényi-jóslat szerint ennek a hálózatnak sok apró, egymástól elszigetelt részből kellett volna állnia. A valóságban viszont azt láttuk, hogy a csomópontoknak már két nagy, összefüggő csoportja is létezett ekkor; az egyik csoportban huszonhét, a másikban pedig négy pont volt. Más szóval: a harmincegy kapcsolat egyike sem volt fölösleges, mindegyik hozzájárult valamelyik nagy, néhány biotechnológiai vállalat köré csoportosuló komponenshez. E két nagy komponens egyike sem jöhetett volna létre egy véletlen hálózatban. A hálózatban már ekkor látható volt néhány központi szerepű csomópont. Ezek voltak a terület első cégei: a Centocor, a Genzyme, a Chiron, az Alza és a Genentech. Nélkülük a biotechnológiai hálózat darabokra hullott volna.

De ahhoz, hogy egy hálózat típusát megállapítsuk, nem elegendő néhány sok kapcsolattal rendelkező és csomópontra emlékeztető vállalat megléte. A hálózat típusának megállapításához meg kell vizsgálni a fokszámeloszlást - ezt a vizsgálatot a közelmúltban végezte el a sienai egyetem két közgazdásza, Massimo Riccaboni és Fabio Pammolli, és a római La Sapienza Egyetem fizikusa, Guido Cardarelli. Munkájuk során a sienai egyetem gyógyszeripari adatbázisának adatait használták fel. Ebben az adatbázisban megtalálhatóak 3093 kutatási és fejlesztési megállapodás adatai, amelyek 1709 vállalat és intézmény között születtek. A vizsgálat eredményei szerint a Powell, White és Koput által talált csomópontok nem a véletlen művei, és meglétük erősen kapcsolódik a gyógyszeripari háló skálafüggetlen tulajdonságaihoz. A vizsgálatból kiderült, hogy azoknak a vállalatoknak a száma, amelyek pontosan  $k$  darab másik vállalattal kötöttek együttműködési megállapodást - azaz pontosan  $k$  darab kapcsolatuk van ebben a hálózatban -, hatványfüggvényt követ. Ez skálafüggetlen szerkezetre utal. Néhány kapcsolatban gazdag nagyvállalat összehozott egymással sok kis céget, és ezáltal a terület összes szereplőjét egyetlen skálafüggetlen egységbe olvasztotta egybe.



Napjainkban a kutatás, a technológiai és a termékfejlesztés, valamint a piaci hasznosulás egymástól egyre inkább távolodó és specializálódó területek, ezért egy olyan gazdaság kialakulásának lehetünk szemtanúi, amelyben a stratégiai kapcsolatok és szövetségek a túlélés zálogai. Németország délnyugati területein és Észak-, illetve Közép-Olaszországban az alvállalkozók és beszállítók hálózata jól dokumentált; a japán üzleti élet az erős vállalatközi kapcsolatokat régóta használja arra, hogy a technológiai fejlesztések terheit egyenletesen ossza el; a koreai üzleti modellben egészen különböző profilú vállalatok egész sora is része lehet egy konglomerátumnak; a Szilícium-völgyben rendszeresen hasznát veszik a technológiai tapasztalatcserének, amikor egy-egy kezdő és befutott céget egymással összehoznak. Ezekon a képlékeny szövetségeken keresztül megsejthetjük a világ üzleti életének jövőjét; a partneri kapcsolatokat időről időre újratárgyalják, amint azt a piaci környezet vagy a résztvevők érdekeinek változása megköveteli.

## 5.

Annak ellenére, hogy ezek a vállalatközi kapcsolatok meghatározó erejűek a gazdaságban, a gazdasággal foglalkozó elméletekben a szerepük meglepően kicsi. Egészen a közelmúltig a közgazdászok az úgynevezett standard formális modellt használták a gazdasági élet leírására, amelyben egymástól független és mindenféle megkülönböztető jelzéstől mentes alapegységek szerepelnek, és ezek egymásra csak az árrendszeren keresztül hatnak. E modell szerint a cégek és a fogyasztók egyes lépéseinek hatása a teljes piac állapotára elhanyagolhatóan kicsi. A teljes gazdaság állapotát legjobban az olyan összesített mennyiségekkel jellemezték, mint például a foglalkoztatottság, termelés vagy az infláció; teljesen figyelmen kívül hagyták azoknak a hatásoknak apróbb részleteit, amelyek ezekért az összesített mérőszámokért felelősek. A vállalatokat és cégcsoportokat nem egymással kölcsönhatásban álló egységekként kezelték, hanem mindegyikük csak a „piaccal” - egy mitikus, a hatásokat közvetítő egységgel - állt kölcsönhatásban.

A valóságban a piac nem más, mint egy irányított hálózat. A vállalatok, a vállalatcsoportok, a pénzügyi intézmények, a kormányok és a gazdaság minden lehetséges szereplője ennek a hálózatnak egy-egy pontja. A kapcsolódások ezen intézmények egymás közti kapcsolatait mutatják, beleértve a beszerzéseket és eladásokat, a közös kutatási és piacszerzési programokat és minden egyebet. Egy kapcsolat súlya a két szóban forgó egység közt lezajló ügylet értékét mutatja, és a kapcsolatnak iránya is van: a feladótól a címzett felé mutat. Ennek az irányított és súlyozott hálózatnak a szerkezete és fejlődése határozza meg a makrogazdasági folyamatok kimenetelét.

Walter W. Powell ezt írja a *Neither Market nor Hierarchy: Network Forms of Organization* című könyvében: „Az üzleti életben a hagyományos stratégia szerint a lehető legkeményebb üzletet a lehető leghamarabb nyélbe kell ütnünk. A hálózatokban sokkal előnyösebb, ha hosszú távra szóló elkötelezettséget és bizalmat építünk fel.” Tehát egy hálózati gazdaságban a vásárlók és az eladók nem versenytársak,

hanem partnerek. A kapcsolatuk gyakran igen hosszú időre szól és stabil.

Kapcsolataik stabilitása miatt képesek az egyes cégek fő tevékenységi körükre koncentrálni. Ha ezek a kapcsolatok megszakadnak, akkor az az egyes cégek számára súlyos következményekkel járhat. Egy kapcsolat megszűnése a legtöbb esetben csak az általa összekötött szereplőket teszi cselekvésképtelenné. Azonban néha az is előfordul, hogy az egész gazdaság megérzi egyetlen hiba hatását. A következő részben látni fogjuk, hogy egy-egy makrogazdasági hibajelenség teljes nemzetgazdaságokat taszíthat mély pénzügyi válságba, és egy-egy vállalati kapcsolat megszakadása súlyos károkat okozhat az új gazdaság ékköveinek.

## 6.

1997. február 5-én a thaiföldi Somprasong Land nevű ingatlanfejlesztési társaság elmulasztotta kifizetni 3,1 millió dollárnyi eurókonvertibilis kamattartozását. A globalizáció korában, amikor naponta ennél milliószor nagyobb összegek cserélnek gazdát, ez az összeg aprópénz, így hát nem is meglepő, hogy ez az eset a legtöbb befektető figyelmét elkerülte. Ám annak ellenére, hogy szinte senki nem figyelt rá, mégis ez volt az a szikra, amely a világ pénzügyi szerkezetének súlyos válságát kiobbantotta.

Egy hónappal később a thaiföldi kormány megtette első, elkeseredett lépését annak érdekében, hogy az országot megmentse az azonnali pénzügyi összeomlástól: bejelentette, hogy kész felvásárolni 3,9 milliárd dollárnyi rossz követelést pénzügyintézetektől. Néhány nappal később a kormány visszavonta ajánlatát. Ezt a lépést néhány elemző a stabilitás jeleként értékelte. Az International Monetary Fund (Nemzetközi Pénzügyi Alap) elnöke, Michel Camdessus - akit később sokan bíráltak az általa irányított szervezetnek az ázsiai pénzügyi válságban betöltött szerepe miatt - ekkoriban ezt nyilatkozta: „Nem látom semmilyen jelét annak, hogy ez a válság továbbterjedne.”

Az ez után következő események nem igazolták őt. Két héttel később Malajzia pénzügyi szektora omladozni kezdett, és a központi bank kénytelen volt korlátozni a kölcsönöket. Ezzel egy időben Dél-Korea huszonhatodik legnagyobb konglomerátumának fő cége, a Sammi Steel ügyészi védelemért folyamodott, ami a csődeljáráshoz vezető kezdőlépés. Májusban Japán megszellőztette, hogy kész emelni a kamatokat, hogy a yen romlását megakadályozza. Erre a lépésre nem került sor, de a bejelentés nyomán mindenki szabadulni igyekezett a délkelet-ázsiai valutáktól, és a helyi tőzsdék megrendültek. Egy héttel később Thaiföld képtelen volt megmenteni legnagyobb pénzügyi intézetét, a Finance One-t; a cég lényegében csődbe ment. Ezután Thaiföld fizetőeszköze, a baht erős spekulációs nyomás alá került, és a kormány erre vonatkozó ígéretei ellenére a baht használatát július 2-án beszüntették.

A thaiföldi, indonéziai, malajziai, koreai és Fülöp-szigeteki vállalatok és pénzügyi intézetek sorozatos tönkremenetelének teljes leírása

oldalak százait töltene meg. Akárcsak az egymásra mutogatás története, amelyben olyan gyöngyszemeket is találhatunk, mint a malajziai miniszterelnök, Mahathir Mohamad elkeseredett támadása a „szélhámos spekulánsok” ellen, melynek csúcspontjaként az IMF/World Bank éves konferenciáján mondott beszédében erkölcsstelennek nevezte a valutakereskedelmet. Egy nappal később Soros György, a neves nemzetközi pénzügyi szakértő így válaszolt: „Dr. Mahathir a saját országa számára veszélyes.” Egyes közgazdászok a „régio gazdaságainak szerkezetében és irányelveiben meglévő torzulásoknak” tulajdonították a pénzügyi válságot. Ennek ellenére Clinton elnök és gazdaságelemző csapata az 1999-es kongresszusi elnöki beszámoló gazdaságról szóló fejezetében megerősítette, hogy a válság oka „nem a gazdasági élet alapjaiban keresendő”. Alig több mint egy évvel az események után Paul Krugman, a princetoni egyetem közgazdasági és nemzetközi ügyekkel foglalkozó professzora így összegezte az általános hangulatot: „Biztonsággal állíthatjuk, hogy senki sem számított még hasonlóra sem, mint a jelenlegi ázsiai pénzügyi válság.”. Néhány apró, helyi pénzügyi bonyodalom egy olyan láncreakciót indított el, amelynek során a problémák átlépték a nemzeti határokat, és Ázsiától Dél-Amerikáig valuták súlyos leértékelődéséhez, és több tőzsdekrachhoz vezettek. Ez a válság dicsekedhet az összegzett ipari tőzsdeindex, a Dow Jones legnagyobb zuhanásával: az index 1997. október 27-én 554,26 pontot zuhant.

Hogy eshetett meg, hogy egy nagy, de mégis csekély jelentőségű ingatlanfejlesztési cég csődje megrendítette a világ legnagyobb tőzsdéjét, és a „világ legerősebb nemzetének” elnökét még két évvel később is a magyarázat keresésére készítette? Ha a gazdaságra úgy tekintünk, mint egy hálózatra, amelyben a vállalatok és a pénzintézetek egymáshoz ezernyi szálon keresztül kapcsolódnak, akkor már közel járunk a történetek megértéséhez. Az ilyen hálózatokban egy-egy pont kitörlése nem befolyásolja a hálózat egészét. Nagy ritkán viszont előfordul, hogy egy megfelelően kiválasztott csomópont kitörlése az egész hálózatot alapjaiban rázza meg.

Az ázsiai válság globális példa volt a sorozatos pénzügyi csődök jelenségére, ami hasonló a 9. fejezetben tárgyalthoz. A jelenség természetes következménye annak, hogy a hálózat kapcsolatban gazdag és az elemek erősen egymásra utaltak. Mégsem ez a válság volt az első: két évvel korábban Dél-Amerika és Mexikó hasonló krízisen esett át. Minden bizonnyal nem is az utolsó; annak ellenére, hogy a bankok és kormányzatok látszólag minden tőlük telhetőt megtettek a további válságok megakadályozására.

Ezeket az eseményeket nem lehet egy olyan modell segítségével megmagyarázni, amelyben minden résztvevő csupán a mitikus piaccal áll kölcsönhatásban. A sorozatos hibajelenségek a hálózatos gazdasági szerkezet és az erős egymásrautaltság közvetlen következményei, mert egy globális gazdaságban egyetlen intézmény sem működhet a többiek nélkül. Ha a hálózatok szemszögéből is megismerjük a makrogazdasági kölcsönhatásokat, akkor esélyünk lehet a jövőbeli válságok megjósolására és kordába szorítására. A hálózatokban való gondolkodás megtaníthat bennünket arra, hogy kövessük a terjedő

hibajelenségek útját, megerősítsük azokat a pontokat, amelyek a gazdasági erdőtüzek terjedését megállíthatják.

Ne ringassuk magunkat abba a hitbe, hogy az ázsiai és a dél-amerikai válsághoz hasonló, terjedő hibajelenségek visszavezethetők arra, hogy egyes, gyorsan fejlődő országok pénzügyi rendszere instabil. A fejlett ipari országoknak - mint például az Egyesült Államoknak - megvan a szükséges anyagi és tapasztalati tőkéje ahhoz, hogy az ilyen válságokat felszámolják, mielőtt azok globális méretűvé duzzadnának. Ám ezek az országok is áldozatai lehetnek a sorozatos hibajelenségeknek. Az erős összekapcsoltság miatt meglévő sebezhetőség a stabil gazdaságokban is jelen van, amint azt a high tech cégek csődhulláma is mutatja.

## 7.

1999 végén történt, hogy a Compaq Pocket PC-je a cég legnagyobb sikerét produkálta. A Strategy & Business egyik friss elemzésében leírtak szerint az eszköz iránti kereslet huszonötszörösen meghaladta a termelést, és a Compaq vezetői arról álmodoztak, hogy a terméktámogatással és a kiegészítőkkel együtt a kéziszámitógépek piaca hamarosan túlnő a hagyományos PC-k piacán. Aztán felbukkantak az első problémák.

A Compaq, a Cisco Systems, és több más nagyvállalat élen járnak egy új gazdasági eszköz, az outsourcing alkalmazásában. Az outsourcing alkalmazása mögötti hajtóerő a Cisco, amely nemrégiben arra készült, hogy a vállalatok közt elsőként lépje át az egybillió (egymilliószor egymillió) dolláros küszöböt. A Cisco évente 30-40 százalékkal tudta növelni a bevételeit, mert a gyártást egy meglepően új és agresszív módon végezte: az eladott termékek közül semmit sem önmaga gyártott. Ehelyett szoros kötelékeket alakított ki sok gyártóval, akik legyártották és összeszerelték a később a Cisco névjegyével eladott termékeket. A Compaq és több más cég is követte a példát.

Az outsourcing a gyártók munkájának pontos összehangolását igényli, hogy minden alkatrész a megfelelő időben érkezzen meg. Ezért amikor néhány gyártó nem tudott bizonyos alapvető eszközöket - mint például kondenzátort vagy flash memóriát - szállítani, a Compaq hálózata működésképtelenné vált. A vállalat kénytelen volt tétlenül nézni 600-700 ezer, kézi eszközökre szóló várakozó rendelést. A 499 dolláros Pocket PC-ket az eBay és az Amazon.com aukcióin 700-800 dollárért lehetett megvásárolni. A Cisco egy másik, de legalább ilyen súlyos problémával került szembe: amint a rendelések elapadtak, a Cisco elmulasztotta befagyasztani a beszállítói rendeléseket, és a nyersanyagkészlete 300 százalékkal megnőtt.

A végső elszámolás rémisztő: a teljes piaci veszteség 2000 és 2001 márciusa között annál a tizenkét vállalatnál, amely outsourcingot használt (Cisco, Dell, Compaq, Gateway, Apple, IBM, Lucent, Hewlett-Packard, Motorola, Ericsson, Nokia és Nortel) meghaladta az 1,2 billió dollárt. Ezeknek a vállalatoknak és befektetőiknek fájdalmas tapasztalata élő példa arra, hogy mi történik, ha a hálózati hatásokat

figyelmén kívül hagyjuk. Az énközpontú megközelítés, amelynek egyetlen célja a vállalat pénzügyi egyensúlyának rövid távú megőrzése, a hálózati gondolkodás gátja. Ha nem értjük, hogy egy pont hogyan befolyásolja a hálózat más pontjait, a hiba könnyen megbéníthatjuk a hálózat teljes tartományait is.

A szakértők egyetértenek abban, hogy az ilyen, tovaterjedő hatások miatti veszteségek a hálózatos gazdaságnak velejárói, de nem elkerülhetetlenek. Az említett cégek azért buktak nagyot, mert a gyártást outsourcing segítségével oldották meg anélkül, hogy megértették volna, hogy ez a változtatás a vállalat felépítésében milyen egyéb módosításokat igényel. A hierarchikus gondolkodásmód ellentmond a hálózatos felépítésnek. A hagyományos szervezetekben van lehetőség a vállalaton belüli gyors átrendezésekre olyan módon, hogy a felmerülő veszteségeket a hierarchia más részein keletkező profit meghaladja. Egy hálózatos gazdaságban minden egyes egységnek nyereségesnek kell lennie. A hálózati játszma legnagyobbjai ezzel nem voltak tisztában, és kítették magukat az erős összekapcsoltság veszélyeinek anélkül, hogy az előnyeiket kihasználták volna. Amikor pedig problémákkal szembesültek, elmulasztották meghozni a szükséges kemény döntéseket - mint például az alkatrész-beszállítás azonnali leállítását a Cisco esetében -, és még nagyobb bajba kerültek.

A hálózatos gazdaság most már hosszú időre útitársunk lesz; a makro- és mikrogazdaság szintjén egyaránt. A néhány hatalmas fiaskó ellenére az outsourcing napról napra népszerűbb. A globalizáció pedig tovább erősíti a pénzügyi egymásrautaltságot, amely minden nemzeti és földrajzi határon átível. Forradalom van kibontakozóban a vállalatok vezetésében. Új, hálózatos gazdasági gondolkodásmódra és az erős összekapcsoltság megértésére lesz szükség a dolgok rendbetételéhez.

## 8.

Sabeer Bhatianak fogalma sem volt arról, hogy hogyan kell egy céget eladni. De mivel Indiában született és ott is nőtt fel, tudta, hogyan kell hagymát vásárolni. Tárgyalni kell. Éppen egy igen különleges hagymát akart eladni. 1996. július 4-én üzlettársával, Jack Smithszel együtt elindított egy szolgáltatást, amely egyetlen dologgal foglalkozott: ingyenes e-mail címet biztosított a világon bárki számára. A szolgáltatásnak a Hotmail nevet adták. Az év végére egymillió regisztrált felhasználójuk volt, akik az e-mailjeik olvasása közben mindennap megnézték az oldalon található reklámokat; ez volt a Hotmail fő bevételi forrása. Amikor egy évvel később a Microsoft megjelent a kérők között, a Hotmailnek már tízmillió felhasználója volt. Bhatia ekkoriban csupán huszonnyolc éves volt. Először körbevezették a Microsoft birodalmának mind a huszonhat épületén (Washington állam Redmond nevű városában), majd betessékelték egy szobába, ahol a Microsoft tizenkét fős tárgyalócsoportja már várta; 160 millió dollárt ajánlottak neki, mire ő csak ennyit válaszolt: „Még gondolkodom”, és kisétált.

Napjainkban az összes e-mail cím körülbelül egynegyedét a Hotmail üzemelteti. Svédországban és Indiában a legnagyobb e-mail szolgáltató,

annak ellenére, hogy ezekben az országokban soha nem voltak reklámjai. A Microsoft végül is 400 millió dollárt fizetett a cégért. A vállalat értéke egy évvel később - az internetes cégek piacának összeomlása előtt - hatmilliárd dollár volt.

Hogyan tudta egy kezdő cég szinte tőke nélkül az e-mail címek egynegyedét megszerezni? A válasz egyszerű: megszelídítették a hálózatokban rejlő erőt, és egy új, „vírusmarketing”-nek is nevezett reklámtechnológiát alkalmaztak. A vírusmarketing ugyanazt az elvet használja ki, mint amin a Love Bug alapult, hogy néhány óra alatt megkerülje a Földet. A számítógépes vírus úgy jutott el mindenkihez, hogy megnézte a Microsoft Outlook levelezőprogramban tárolt e-mail címlistát, és elküldte magát az összes ott talált címre. Egy hasonló újításnak köszönhetően a Hotmail felhasználói önként elvégzik ezt a feladatot.

A Draper, Fisher and Jurvetson kockázati tőke társaságnál dolgozó Tim Draper 300 ezer dollár induló tőkét adott a Hotmailnek, majd meggyőzte Bhatiát és Smitht arról, hogy tegyék hozzá minden elektronikus levélhez a következő sort: „Legyen önnek is saját, ingyenes e-mail címe a <http://www.hotmail.com> címen!”. Ettől kezdve, ha egy Hotmail felhasználó levelet küld a barátainak, akkor egyúttal reklámozza és személyes példájával népszerűsíti a céget. A Hotmail híre egy skálafüggetlen hálózaton terjed, és pontosan azokat az útvonalakat használja, mint amiken a Love Bug vírus is körbejárta a világot. Mivel az ilyen hálózatokon az újítások elterjedéséhez szükséges minimális befektetés igen kicsi, a Hotmailnek jó esélye volt a sikerre. Viszont az már meglepő volt, hogy milyen gyorsan és milyen hatalmas sikert aratott.

Mi a Hotmail fantasztikus sikerének oka? A választ részben tartalmazza a 10. fejezetben említett trieszti tanulmány. A gyorsan terjedő újításoknak és termékeknek nagyobb esélyük van arra, hogy a hálózat számottevő részéhez eljussanak. A Hotmail ezt a terjedési sebességet még tovább tudta növelni azáltal, hogy megszüntette az egyének által fizetendő indulási költségeket. Először is, a Hotmail ingyenes: tehát nem kell azon gondolkodnunk, hogy érdemes-e költenünk rá. Másodszor, a regisztráció a Hotmail weboldalán nagyon egyszerű; tehát még időt sem kell rá fordítanunk. Harmadszor, amint egy felhasználó jelentkezett, onnantól kezdve minden egyes e-mail elküldésével ingyen reklámozza a Hotmailt. Ez a három tulajdonság együtt egy hihetetlenül „erősen fertőző” (gyors terjedésre programozott) szolgáltatást jelent. A hagyományos piacelemzési elméletekből megtudhatjuk, hogy az ingyenes szolgáltatás, a gyors tanulási idő és a felhasználók által megvalósított hatékony reklám miatt a termék a kritikus küszöb fölé került, és ezért tudott mindenkihez eljutni. A komplex hálózatokon történő diffúzióról szerzett legújabb ismereteink alapján ma már tudjuk, hogy ez a magyarázat csak részben igaz. Igaz, hogy a terjedési sebesség igen magas. De küszöbérték nincs. Egy termék vagy egy vélemény úgy tud terjedni, ha átveszik a fogyasztói háló legtöbb kapcsolattal rendelkező pontjai: a csomópontok.

Megismételhető-e a Hotmail sikere? Kicsi az esélye. Vegyük például az EpidemicMarketing.com példáját. Ez a cég 2000-ben 2,1 millió dollárt

költött egy harminc másodperces reklámra, amelyet a Super Bowl egyik szünetében játszottak le.

A reklám egy férfit mutat, aki bemegy a mosdóba, ám ahelyett, hogy ő adna pénzt az ott ülő alkalmazottnak, saját maga kap borravalót. Amint azt a reklám oly ügyesen elmagyarázta, az Epidemic úgy tervezte, hogy az embereket olyasmióért jutalmazza meg, amit amúgy is naponta megtesznek. A tervük az volt, hogy az ügyfeleiknek fizetnek azért, hogy kimenő leveleikhez internetes cégekre mutató linkeket csatoljanak. Ennek megfelelően arra számítottak, hogy egy cég vagy újonnan létrejött társaság híre szájról szájra terjed majd, és megismételhetik a Hotmail sikerét. Viszont a tervből hiányzott a vírusmarketing egy alapvető eleme: a levél címzettjének már semmi érdeke nem fűződött ahhoz, hogy a kapott linket az ismerőseinek továbbítsa. Ezért nem is meglepő, hogy miután az Epidemic elszórta a 6,7 millió dolláros kezdőtőkét, 2000 júliusában lehúzták a rolót, és elbocsátották mind a hatvan alkalmazottjukat.

A Hotmail példája jól mutatja, mekkora erő rejlik a fogyasztói hálózatokban. Egyes termékeknek nincsen szükségük költséges tv- és újsághirdetésekre vagy telemarketingre ahhoz, hogy a piacot megszerezzék. Egyszerűen szájról szájra terjed a hírük, akár egy vírus. A vírusmarketing nem alkalmazható mindenütt, de segítségével a legtöbb termékből többet lehetne eladni. Mindazonáltal az Epidemic példája jól mutatja, hogy a Hotmail sikerét nem könnyű megismételni. Inkább a Hotmail tapasztalatának felhasználására volna szükség. E tapasztalatokra építve új reklámozási stratégiákat lehetne kidolgozni, amelyek a hagyományos módszereket a hálózati hatásokra vonatkozó alaposabb ismeretekkel ötvözik.

## 9.

Az üzlet világában a hálózati hatásoknak se szeri, se száma. Láttuk, hogy Vernon Jordan az óriáscégek bonyolult hálózatban ügyesen lavírozott, és a nagyvállalati elit befolyásos tagja lett. Láttuk, hogy a Hotmail kihasználta a fogyasztói hálózat skálafüggetlen szerkezetét, és a világ legnagyobb e-mail szolgáltatója lett. A listának ezzel még nincs vége. A piac átalakulásán felbuzdulva újonnan indított cégek hosszú sora tett fogadalmat, hogy hálózatokban fog gondolkodni. Az eredményeik meglehetősen vegyesek.

Vegyük például a SixDegrees.com esetét. A New York-i cég arra kérte a nála regisztrált tagokat, hogy küldjék el neki barátaik nevét. A barátokat is meghívták a tagok közé, és aki jelentkezett, az elküldte az ő barátainak a nevét is. A SixDegrees.com szép lassan feltérképezte a tagjai körül az ismeretségi hálózatot, és végül mindenkit el tudtak érni, aki legfeljebb két lépésre volt az eredeti tagoktól. Ezzel a fogyasztócentrikus vírusmarketing módszerrel a SixDegrees.com hárommilliónál is több ügyfelet szerzett. Ám a frissen indult cég 2000. december 3-án lehúzta a rolót, és adós maradt a hatlépcsényi távolság életképes üzleti eszközzé válásával.

A dot.com-buborék kipukkanásának oka sokak szerint az internet lelkes híveinek gyakran egydimenziós gondolkodásmódjában keresendő. A legtöbb újonnan induló cég úgy gondolta, hogy ha az interneten kínál valamit, az máris elég ahhoz, hogy az új gazdaság sikereit is leutánozza. Ám néhány korai fecskét leszámítva - mint például az Amazon.com, az AOL vagy az eBay - a legtöbben csődbe mentek. Valójában az internet nem ezernyi új cég születését okozta, hanem a meglévő cégeket alakította át. A sarki fűszerestől a nagy multinacionális cégcsoportokig mindenütt láthatjuk az internet hatásának jeleit.

A hálózatok nem csodafegyverek, amikkel bármilyen üzleti környezetben legyőzhetetlenné válhatunk. A hálózatok igazán nagy jelentősége abban rejlik, hogy a meglévő szervezeteket hozzásegítik ahhoz, hogy a gyorsan változó piaci feltételekhez alkalmazkodjanak. Maga a hálózat fogalma elengedhetetlenné teszi, hogy túllépjünk az egydimenziós gondolkodásmódon.

Az üzleti és a gazdasági élet hálózatainak száma elképesztő. Találhatunk hálózatokat a politikában, vannak tulajdonviszony szerinti hálózatok, léteznek együttműködési hálózatok, intézményhálózatok, hálózati reklámpiac - amit csak el tudunk képzelni. Lehetetlen vállalkozás volna ezeket a kölcsönhatásokat mind egyetlen, átfogó hálózatba foglalni. De mégis, a vizsgált szervezeti szinttől függetlenül minden helyről ugyanazok, a természet hálóját szabályozó törvények köszönnek vissza. A kihívás a gazdaságtudomány és a hálózati kutatás számára egyaránt az, hogy ezeket a törvényeket hogyan lehet a gyakorlatba átültetni.



# **AZ UTOLSÓ LÁNCSEM**

## ***Háló, pók nélkül***

1998 márciusában, amikor egy szokatlan gesztussal meghívtam Albert Rékát ebédre, ő még csak harmadik féléves doktori hallgató volt, mégis elég publikációja volt ahhoz, hogy megkapja a doktori fokozatot. Egyik, a granuláris anyagokról és homokvárakról írott tanulmányát a Nature és a Science News a címlapon hozta le, és folyamatban levő kutatásainak kezdeti eredményei is biztatóak voltak. Tehát az ebédmeghívás célja ellenkezett minden józansággal: arra akartam rávenni, hogy adja fel kutatásait, melyekben oly sikeres volt, és kezdjen valami teljesen másba. Elmondtam neki álmomat a hálózatok tanulmányozásáról.

Négy évvel korábban, 1994 őszén, friss elméleti fizikusi doktorátussal az IBM legendás vállalati elefántcsonttoronyában, a Yorktown Heights-i T. J. Watson Kutatóközpontban kezdtem. Már négy hónapja dolgoztam ott, amikor - talán a hely szellemétől megérintve - kivettem a könyvtárból egy, a nagyközönség számára íródott számítástechnikai könyvet, hogy a karácsonyi szünet alatt elolvassam. Ahogy belemélyedtem az algoritmusokba, a gráfokba és a Boole-algebrába, kezdtem megérezni, hogy általában milyen keveset tudunk a hálózatokról. Olvasmányaim azt sugallták, hogy a Manhattan kövezete alatt összezsúfolt elektromos, telefon-és internetkábelek milliói egy alapjaiban véletlenszerű hálózatot alkotnak. Minél többet gondolkodtam rajta, annál erősebb lett az a meggyőződésem, hogy kell lenniük olyan rendezőelveknek, amelyek ezt a minket körülvevő, összetett hálózatot irányítják. Abban a reményben, hogy sikerül a rend valamiféle jelét felismernem, elkezdtem a hálózatelméletet tanulmányozni Erdős és Rényi klasszikus munkáival kezdve. Mielőtt 1995 őszén otthagytam az IBM-et a Notre Dame Egyetem természettudományi karáért, benyújtottam első tudományos dolgozatomat az összetett hálózatokról.

A Notre Dame-on az a törekvésem, hogy keresőprogramokat állítsak a világháló topológiájára, kevés sikerrel járt. Mivel erős volt a nyomás, hogy publikáljak, és elismerést szerezzek, a hálózatokat fokozatosan felváltottam biztonságosabb és megszokottabb kutatásokkal. 1998 elejére mégis készen álltam arra, hogy visszatérjek a csomópontokon és kapcsolatokon való gondolkodáshoz. Most az egyik legjobb tanítványomat kértem arra, dobjon félre mindent, amivel eddig foglalkozott, és tartson velem ezen a kockázatos utazáson. Akkoriban nem sok mindennel tudtam kecsegtetni. El kellett mondanom, hogy egyetlen, hálózatokról szóló tanulmányomat négy folyóirat utasította vissza, és még soha nem jelent meg. Elmondtam neki, azt kockáztatja, hogy a sikertörténetnek - melynek idáig részese volt - hirtelen vége szakadhat. De azt is elmondtam, néha készen kell állnunk arra, hogy kockázatokat vállaljunk. Véleményem szerint a hálózatok megértésként egy próbát.

1994-ben vagy akár 1998 elején senki sem számíthatott a felfedezések ama özönére, amely az utóbbi években teljesen átformálta összefüggő világunkról alkotott képünket. Annál az ebédnél, melyen

Albert Rékának igyekeztem a hálózatokról mindent elmesélni, nem beszélhettem még neki a kis világokról. Legvadabb álmaimban sem varázsolhattam volna elő hatványfüggvényeket vagy skálafüggetlen hálózatokat. A hiba- és a támadás elleni tőrésről sem beszélhettem, hiszen ezekkel akkoriban nem foglalkozott a hálózat kutatás. Tulajdonképpen minden kutatásra érdemes kérdés, amiről akkor beszélhettem vele, mára tévesnek vagy egyszerűen oda nem illőnek bizonyult.

Hawoongjeong robotja segített abban, hogy elszakadjunk a hagyományos elképzelésektől. Jeong 1998 augusztusában, doktori fokozatát megszerezve tudományos munkatársként csatlakozott kutatócsoportunkhoz, öt hónappal azután, hogy Albert Réka és én megkezdtük a hálózati kutatási témájával kapcsolatos vizsgálódásainkat. A tekintélyes koreai Seoul National University friss végzőseként, a számítógépektől való elragadtatása s velük kapcsolatos tudása egyaránt bámulatos volt. Egy napon, egy éjszakai beszélgetés után, mellékesen megkérdeztem, képes lenne-e egy olyan robotot létrehozni, amellyel feltérképezhetnénk a világhálót. Nem ígért semmit. Egy hónappal később azonban robotja szorgosan gyűjtötte a csomópontokat és kapcsolatokat. Akkora már valamennyire ismertük a véletlenszerű gráfokkal és a hálózatokkal foglalkozó klasszikus irodalmat, így azonnal világossá vált, hogy a robot által látott hatványfüggvények komoly eltérést mutattak minden, akkor a hálózatokról ismert eredménytől. Mégis csak a skálafüggetlen modell felépítése után értettük meg teljesen, mennyire különbözőek a valódi hálók azoktól a véletlenszerű világegyetemektől, melyeket Erdős és Rényi festettek le.

Ma már tudjuk, hogy noha a valódi hálózatok nem olyan véletlenszerűek, mint ahogy Erdős és Rényi megjósolták, szerkezetükben a véletlennek és a véletlenszerűségnek fontos szerepe van. Az igazi hálózatok nem olyan statikusak, mint az összes mai elméleti modell. Ellenkezőleg, a növekvés kulcsszerepet játszik topológiájuk megformálásban. Nem olyan központosítottak, mint egy csillaghálózat. Inkább a középpontok egyfajta hierarchiája az, mely ezeket a hálózatokat összetartja, egy sok kapcsolattal rendelkező csomópont, amelyet számos kevesebb kapcsolata követ szorosan, melyeket még ezeknél is kisebb pontok kísérek. Semmilyen központi csomópont nincs a pókháló közepén, amely irányítana és megfigyelne minden kapcsolatot és pontot. Nincs egyetlen olyan pont, melynek eltávolítása szétszakíthatná a hálót. Egy skálafüggetlen hálózat olyan, mint egy háló pók nélkül.

S a pók hiánya sem egy, a hálózat mögötti, részletekbe menő elgondolást takar. Az igazi hálózatok önmaguktól szerveződnek. Ragyogó példái annak, hogyan vezet a csomópontok és kapcsolatok millióinak független működése látványos, egyedülálló viselkedéshez. Pók nélküli skálafüggetlen topológiájuk fejlődésük kikerülhetetlen következménye. Valahányszor a természet kész egy új háló megszövésére - mivel nem tudja elkerülni saját törvényeit -, olyan hálózatot alkot, melynek alapvető szerkezeti sajátosságai megegyeznek a már korábban megszőtt hálók tucatjainak sajátosságaival. Az összetett hálózatok keletkezését uraló törvények ereje a magyarázat a

skalafüggetlen topológia mindenhol megfigyelhető jelenlétére, mely olyan különféle rendszereket határoz meg, mint a nyelv mögötti hálózat, a sejtekben levő fehérjék közötti kötések, az emberek közti szexuális kapcsolatok, a számítógép chipjének huzalozási rajza, a sejt anyagcseréje, az internet, Hollywood, a világháló, a társszerzőséggel összekapcsolt kutatók hálójának és a gazdaság mögötti bonyolult együttműködési háló, hogy csak egy néhányat említsek.

## 1.

Egy új tudományág születésének egyik leglenyűgözőbb aspektusa az új nyelv, melyet megteremt, és így hozzájárul ahhoz, hogy mellékesen olyan gondolatokról és problémákról társalogjunk, melyeket korábban alig tudtunk leírni. A hálózatelmélet reneszánsza lehetővé tette ezt összefüggő világunk számára. A társadalom kapcsoló elemei, Hollywood sztárjai és az élővilág alapvető fajai hirtelen csak egyetlenegy valóság megnyilvánulásaként jelennek meg, környezetükben tapasztalt fontosságuk saját hálózatukban elfoglalt központi szerepüknek tulajdonítható. A hálózatokban való gondolkodás az emberi tevékenység minden tartományát és az emberi vizsgálódás legtöbb területét elárasztani készül. Több ez, mint egy újabb hasznos perspektíva vagy eszköz. A hálózatok - természetüknél fogva - a legösszetettebb rendszerek építőkövei, s a csomópontok és kapcsolatok mélyen áthatnak minden módszert, mely behálózott világegyetemünk megközelítésére törekszik.

A 2001. szeptember 11-e utáni események drámai példáját adták az új nyelv nagyfokú elterjedtségének, mikor a hálózat szó felvett egy olyan jelentést, amely azelőtt legtöbbünk számára ismeretlen volt. A tragédiához vezető dolgok többsége a hálózatelmélet szempontjából könnyen értelmezhető. Az al-Kaidát, a támadásokért felelősnek tartott terroristahálózatot nem hét nap alatt teremtették. A radikális szervezet vallásos hiedelmek és a létező társadalmi és politikai renddel szembeni türelmetlenség által vezérelt emberek ezreit szívta magába több éven keresztül. A hálózat csomópontként növekedett, felvéve a pók nélküli hálózatok minden jellegzetességét, így az al-Kaida nem válhatott középpontokból és végpontokból álló hálózattá, amely egy központi vezető irányítását feltételezi. A fa-struktúrát, a hadászatot és a huszadik századi vállalatokat jellemző irányítási láncolatot sem vette fel. Ezek helyett egy önműködő, pók nélküli hálóvá fejlődött, melyben a középpontok hierarchiája tartotta egyben a szervezetet.

Szeptember 11-e után Valdis Krebs vezetési tanácsadó, aki egyébként a vállalati távközlés elemzésére használja a hálózatelméletet, összeállította a négy repülőeltérítő, a támadásban részt vevő tizenkilenc terrorista és a velük a hatóságok által kapcsolatba hozott tizenöt ember térképét. Krebs gondosan feljegyzett minden, a nyilvánosság előtt el nem titkolt kapcsolatot e harmincnégy egyén között, a kapcsolatokat az alapján mérlegelve, hogy - tudomásunk szerint - mennyire voltak szorosak. Az így nyert háló rendkívül leleplező bárki számára, aki meg akarja érteni a támadásokat kivitelező halálos sejt

belső működését, s néhány meglepetéssel is szolgál azok számára, akik ismerik az igazi hálózatok felépítését. Mohamed Atta, a támadások vezető elméje bizonyosan a legtöbb kapcsolattal rendelkező csomópont. Ennek ellenére a huszonnégyből csak tizenhat ponttal volt közvetlen kapcsolata. Szorosan a nyomában van Marwan Al-Shehhi, a második legtöbb kapcsolattal rendelkező csomópont, tizennégy kapcsolattal. Ahogy lefelé megyünk a listán, sok kevés kapcsolattal rendelkező csomópontot találunk, a halálos szervezet perifériális katonáit.

A térkép azt is mutatja, hogy központi szerepe ellenére, Atta kikapcsolása sem bénította volna meg a sejtet. A többi középpont összetartotta volna a hálót, s feltehetőleg segítsége nélkül is végigvitte volna a támadást. Sokan gyanítják, hogy a szeptember 11-ei támadásért felelős sejt szerkezete az egész terrorszervezetet jellemzi. Elosztó jellegű, önszervező topológiája miatt az al-Kaida oly szétszórta és önfenntartó, hogy még Oszama bin Laden és legközelebbi helyetteseinek eltávolítása sem vetne véget az általa jelentett fenyegetésnek. Ez egy háló, valódi pók nélkül.

Mára a világ legveszélyesebb agresszorai az al-Kaidától a kolumbiai drokartellekig, nem hadosztályokból álló katonai szervezetek, hanem a terror önszerveződő hálózatai. A szervezettség és a rend ismert jeleinek hiánya miatt gyakran hívjuk ezeket „irreguláris hadseregeknek”. Ezzel azonban ismét egyenlőségjelet teszünk az összetettség és a véletlenszerűség közé. Valójában a terroristahálózatok merev szabályoknak engedelmessé válnak, melyek meghatározzák topológiájukat, szerkezetüket, és ennél fogva képességüket a működésre. Az önszerveződő hálózatok minden természetes előnyt kihasználják, beleértve a robusztusságot és a belső hibákkal szembeni toleranciát. Leghalálosabb ellenségeink talán az új elrendezésben való járatlanság, és egy olyan nyelv hiánya, mely lehetővé teszi, hogy tapasztalatainkat formába ontsuk.

Az al-Kaida elleni háborút minden bizonnyal a hálózat megbénításával kell és fogják megnyerni, akár elegendő mennyiségű középpontja eltávolításával, hogy elérjék a szétesés kritikus pontját, akár erőforrásainak elvonásával, hogy megteremtsék az alapot a belső hibák láncreakciójának elindításához. Az al-Kaida összeomlása azonban nem fog véget vetni a háborúnak. Kétségkívül más hasonló céllal és ideológiával rendelkező hálózatok foglalják majd el a helyét. Nem Bin Laden és szárnysegédei találták fel a terroristahálózatokat. Egyszerűen csak meglovagolták az iszlám aktivistáinak dühhullámát, felhasználva az önszerveződés törvényeit útjuk során. Ha valaha is meg akarjuk nyerni a háborút, egyetlen reményünk, hogy megbirkózzunk azokkal az alapjukul szolgáló társadalmi, gazdasági és politikai gyökerekkel, melyek a hálózat növekedését táplálják. Segítenünk kell felszámolni a csomópontoknak azt a szükségét és vágyát, hogy terroristahálózatok kapcsolataivá váljanak, azáltal hogy építőbb jellegű és értelmesebb hálókhoz való csatlakozás esélyét ajánljuk fel. Nem számít, milyen ügyessé válunk minden egyes hálózatcsata megnyerésével, ha nem tudjuk kiküszöbölni a kapcsolódás iránti vágyat, e halálos, önszervező hálózatok képződésének előfeltételét, a hálózatok háborúja sosem ér véget.

## 2.

1995. június 23-án a The New York Times címlapján közöltek egy fényképet a német parlamentről, a százéves Reichstag-ról. Ez öt évvel Németország újraegyesítése után, s majdnem pontosan négy évvel azután történt, hogy a Bonnban székelő Bundestag arra szavazott, hogy ismét Berlint válasszák meg az egyesített Németország fővárosának. Ennek ellenére, a politikának és a kommunizmus összeomlásának kevés köze volt a Reichstag iránt világszerte megújult érdeklődéshez. A Berlinbe két hétre rá özönlő ötmillió ember számára az igazi vonzóerő az a tény volt, hogy egyikőjük sem tudott akár egy négyzetcentiméternyi is észrevenni az épületből. A Reichstag ismertetőjegyei, a diszkrét szürke falak, a német történelem egy zűrzavaros évszázadának sötét és csendes szemtanúi láthatatlanok voltak. Az erőnek eme abszolút szimbólumát lépcsőtől zászlórúdjáig beburkolták egy alumíniumszínű anyagba, ezáltal azt a tömegművészet monumentális darabjává változtatva. Több mint százezer négyzetméter vastagon szőtt polipropilén vászon, melyet ezeröttszáz méternyi kék kötél tartott össze, borította be az építmény minden egyes négyzetcentiméterét, korunk egyik legnagyobb művészeti látványosságát nyújtva.

Christónak, a bulgáriai születésű művésznek, és társának, a francia Jeanne-Claude-nak művészete olyan monumentális munkákat tartalmaz, mint a híres párizsi hidat sárga szövettel borító Becsomagolt Point Neuf, és a pompás Körülvett Szigetek, aminek elkészítéséhez 700 ezer négyzetméternyi rózsaszín vásznat használtak fel a floridai Miami Biscayne-öblének tizenegy szigete körül. A Becsomagolt Reichstag sok szempontból több évtizedes csomagoló művészi tevékenységük tetőpontját jelentette. Az azonban túlzott leegyszerűsítés lenne, ha úgy fognánk fel, hogy e művészek csupán épületek, hidak és más tárgyak becsomagolói. Munkájuknak erőteljes filozófiája van: „leplezés általi feltárás”. A részletek elrejtésével lehetővé teszik számunkra, hogy csak a formára összpontosítsunk. Ez a becsomagoltság élesíti látásunkat, éberebbé és figyelmesebbé tesz minket, a hétköznapi tárgyakat monumentális szobrokká és építészeti alkotásokká változtatja.

Ebben a könyvben bizonyos értelemben Christo és Jean-Claude szellemében közelítettük meg a világot. Hogy olyan összetett rendszereket, mint a sejtet vagy a társadalom mögötti hálózatokat megvizsgáljunk, elrejtettünk minden részletet. Azáltal, hogy csak a csomópontokat és kapcsolatokat láttuk, abban a kiváltságban részesültünk, hogy megfigyeljük az összetettség architektúráját. Azáltal, hogy eltávolodtunk a részletektől, futó pillantást vethettünk eme összetett rendszerek mögötti egyetemes rendezőelvekre. A leplezés feltárta előttünk azokat az alapvető szabályokat, amelyek a körülöttünk lévő hálószerű világ fejlődését irányítják, és segített megértenünk, hogy ez a zavaros architektúra hogyan befolyásol mindent a demokráciától a rák gyógyításáig.

Hogyan tovább? A válasz egyszerű. El kell távolítanunk a csomagolást. Az előttünk álló feladat az, hogy megértsük az

összetettséget. Ahhoz, hogy ezt elérjük, túl kell jutnunk a szerkezeten és a topológián, és el kell kezdenünk összpontosítani a kapcsolatok között fellépő mozgatóerőkre. A hálózatok az összetettségnek csak a vázát adják, a világunkat zümmögővé tevő különféle folyamatok autópályái. Hogy meg tudjuk határozni a társadalmat, fel kell öltöztetnünk a társadalmi kapcsolatokat az emberek közötti aktuális dinamikai kölcsönhatásokkal. Hogy megértsük az életet, az anyagcsere-hálózat kapcsolatai között fellépő mozgató erőkre kell tekintenünk. Hogy megértsük az internetet, forgalmat is hozzá kell számítanunk kusza kapcsolataihoz. Hogy megértsük, miért tűnik el néhány faj az élővilágból, fel kell ismernünk, hogy néhány prédát a többinél könnyebb elkapni.

A huszadik században az összetett hálózatok összetevőinek feltárásában és leírásában olyan messzire mentünk, amennyire csak tudtunk. A természet megismerését célzó küldetésünk során egy üvegtetőbe ütköztünk, mert még nem tudjuk, hogyan kell a részleteket összeilleszteni. Azok az összetett problémák, melyekkel szemben találtuk magunkat, a kommunikációs rendszerektől egészen a sejtbiológiáig, egy teljesen új vázszerkezetet követelnek meg. Térkép nélkül vállalkozni az előttünk álló útra reménytelen lenne. Szerencsére a folyamatban lévő hálózati forradalom már a kulcsfontosságú térképek jelentős részéről gondoskodott. Bár még mindig sok „sárkány” áll az utunkba, egy új világ körvonalai már kontinensről kontinensre megfigyelhetőek. A legfontosabb az, hogy megértettük a hálózatok térképészetét, s így valahányszor új rendszerekkel találkozunk, új térképeket rajzolhatunk. Most már csak követnünk kell ezeket a térképeket, hogy a részletek csomópontból csomópontra és kapcsolatról kapcsolatra való egymáshoz illesztésével utunk végére jussunk, és megőrökítsük dinamikus összjátékukat. Kilencvennyolc évünk van arra, hogy sikerrel járjunk ebben, és a huszonegyedik századot a komplexitás - az összetettség - századává tegyük.

## **Köszönetnyilvánítás**

Lehetetlen elég alaposan megköszönni mindazoknak a kutatóknak a segítségét, akiknek kutatásai inspiráltak. Néhányukat megemlítettem könyvemben, mások a jegyzetekben jelennek meg. A túlnyomó többség mégsem került be a könyvbe, de nem kevésbé fontosak. Sok tekintetben munkájuk e könyv alapját képezi.

E könyv megírásakor nem csak kiadott munkákra hagyatkoztam. Sok mindent hasznomra fordítottam az évek során a hálózatok ügyében hozzám forduló tanítványok és kollégák kérdéseiből és ötleteiből is. Ezek a beszélgetések és e-mailek döntő szerepet játszottak a könyv tartalmának kialakításában, azáltal hogy felnyitották a szemem a hálózatokban való gondolkodásra több különböző területen. Ez a könyv nem jöhetett volna létre valóban rendkívüli, volt és mostani tanítványaim, Albert Réka, Ginestra Bianconi, Dezső Zoltán, Farkas Illés, Ravasz Erzsébet, Soon-Hyong Yook segítségével nélkül, akik a hálózatok kutatása mellett döntöttek. Hawoong Jeong kutatócsoportomban dolgozott fiatal posztdoktori kutatóként. Az ő kivételes szakértelme és állhatatossága utazásunkat az igazi hálózatok világa felé nem csupán megvalósíthatóvá tette, de vidámmá is. Szintén adósa vagyok számos együttműködő kutatónak, beleértve Eric Berlow-t, Jay Brockmant, Derényi Imrét, Jennifer Dunne-t, Vincent Free-t, Byungnam Kahngot, Kertész Jánost, Neo Martinezt, Néda Zoltánt, Oltvai Zoltánt, Peter Schiffert, Schubert Andrást, Tombor Bálintot, Yuhai Tut, Vicsek Tamást és Rich Williamst, akik rengeteg ötletet és segítséget ajánlottak fel az utóbbi pár évben.

Sokan láttak el olyan információval, ami a könyv anyagának gyűjtésekor döntő jelentőségűnek bizonyult. Még 1999-ben Braun Tibor küldte el az ötlépésnyi távolságról szóló Karinthy-novellát, és Thomas Bess segített megértenem Milgram hat lépésről szóló munkáját. Luis Amaral, Eric Bonabeau, Guido Caldarelli, Christopher R. Edling, Lee Giles, Mark Granovetter, Byungnam Kahng, Jeff Kantor, Judith Kleinfeld, Valdis Krebs, Steve Lawrence, Fredrik Liljeros, Sid Redner, Richard V. Soié és Alessandro Vespignani osztottak meg velem kiadatlan kézírataikat, információikat, forrásaikat.

Sokan áldozták rá idejüket, hogy elolvassák és kommentálják a kéziratot, annak különböző szakaszaiban. Oltvai Zoltán valóban hősi munkát vitt véghez, mikor sorról sorra tette meg javaslatait, hogy tökéletesítsük azt. Szintén sokat hasznosítottam Albert Réka, Kevin Barry, Steve Buechler, Reuven Cohen, Forgács Gábor, Gyuris Viktor, Jankó Boldizsár, Hawoong Jeong, Gerald Jones, Jim McAdams, Mark Newman, H. Eugene Stanley, Alessandro Vespignani, Vicsek Tamás, Ed Vielmetti és Eduardo Zambrando megjegyzéseiből és a lényegét megvilágító javaslataiból. Az igazán ösztönző, ebéd melletti beszélgetések a Notre Dame-en Jim McAdams csoportjának - a Web Csoportnak - a tagjaival segítettek finomítani azon gondolatok némelyikét, melyek végül bekerültek a könyvbe. A csoport tagja volt Sheri Alpert, Kevin Barry, Patrícia Louise Bellia, Kathy Biddick, Jay Brockman, Leo Burke, David S. Hachen, Martin Haenggi, Lionel M. Jensen, Lee Byung Joo, Jeffrey C. Kantor, Barry Patrick Keating,

Gregory Madey, Gail Hinchion Mancini, Khalil Mattá, Kajál Mukhopadhyay, Daniel Myers, Susan Ohmer és Richard Pierce.

A fizika tanszéken dolgozó kollégáim, akik bátorították azokat a jelentős fordulatokat, melyeken az utóbbi néhány évben munkám átesett, kutatásaimat és a könyv megírását hűségesen támogató légkört teremtettek. Különösen hálás vagyok Bruce Bunker, Margaret Dobrowolska, Jacek Frudyna, Jankó Boldizsár, Gerald Jones és Kathie Newman állandó támogatásáért. Jennifer Maddox igazán professzionális, ugyanakkor vidám hozzáállása minden logisztikai problémával szemben, amit csak ki tudtam találni, mérhetetlen időt spórolt meg nekem, amit mind ebbe a könyvbe fektethettem.

Deborah Justice rengeteg órát töltött a kézirat korai változatainak szerkesztésével, s segített megértenem az angol nyelv és stílus nehézségeit. A könyv sosem készülhetett volna el Lesley Krueger elkötelezett technikai segítségével nélkül, aki a piszkozat könyvvé alakulásának közvetlen szemtanúja volt. Jankó Enikő és Dezső Zoltán szintén sok órát töltött a kézirat számtalan változatának korszerűsítésével, időnként váratlanul be-betoppnva. Valóban hálás vagyok Hawoong Jeong-nak, aki időről időre megcsillogtatta varázslatos képességeit és vég nélküli türelmét, melyek segítségével a könyv ábráit véglegesítette.

A Perseus szerkesztősége rendkívül segítőkész és ügyes volt az írói és kiadási folyamat minden fokán. El se tudok képzelni Amanda Cooknál és Joan Benhamnál jobb szerkesztőket, akiknek szerkesztői útmutatása a könyvet sokkal könnyebben olvashatóvá tette. Elizabeth Carduff, Chris Coffin és Marco Pavia kivételes gyorsasággal kalauzolta végig a kéziratot a kiadási folyamat bonyolult útvesztőiben. Nagyon köszönöm Lissa Warrennek, hogy segített abban, hogy a szöveg megjelenjen. Hálás vagyok Katinka Matsonnak és a Brockman, Inc.-nek, amiért összehozott a Perseus Kiadóval.

A Behálózvát nemcsak hogy nem fejeztem volna be, hanem el sem kezdtem volna Janet Kelley kedves lelkesedése nélkül, aki lelket öntött belém, valahányszor fel akartam adni. Nehéz szóban elmondani, hogy az ő segítsége mennyit jelentett számomra.