

## A komplexitás

### Abstract

Az általunk ismert vagy annak csak létezését tudni vélt világ finomhangolt működése, annak komplexitása nap, mint nap lenyűgözi a kutatókat. Évtizedek óta természet- és társadalomtudósok számos tudományterületen próbálják megfejteni az összetettség azon már-már absztrakt szintjét, melyet a komplex rendszerek képviselnek, s mely minden megállapítás után egyre csak túlmutat az addig leírt ismereteken. Épp ezért mai napig nem született pontos, mindent átfogó definíció a komplexitásról, maga a jelenség megfoghatatlan és körülhatárolhatatlan, mégis valóságos és minden egyes pillanatunkra kiterjedő. Dolgozatomban a komplexitás feltételeit, megjelenési szintjeit, és annak leírására szolgáló megközelítéseket tárgyalom, néhány természetből vett példával szemléltetve.

### Kulcsszavak:

- (nem lineáris) adattömörítés
- komplexitás
- Shannon entrópia
- Kolmogorov-komplexitás
- Turing-gép
- kognitív architektúra
- adaptációs képesség
- modell
- hierarchikus struktúra
- visszacsatolás

### Keywords:

- (nonlinear) compression
- complexity
- Shannon entropy
- Kolmogorov complexity
- Turing machine
- cognitive architecture
- adaptability
- model
- hierarchic structure
- feedback

A komplex rendszerek vizsgálatához előbb definiálnunk kell a rendszer fogalmát. Ez lehetséges matematikai modellek irányából, relációkkal összekapcsolt elemek egy halmazaként, vagy a bemenet és kimenet közötti információfeldolgozás szempontjából. Az egyéni elemek tömördek kapcsolatot alkotnak egymással, ezen kapcsolatok minősége: iránya, irányítottága, súlyozottsága, erőssége, láthatósága végtelen kombinációt hordoz magában, összességük a rendszer működésének alapját képezi. A fent említett hatások és kölcsönhatások teszik a különálló részeket egyetlen egésszé. A rendszer lehet egy fizikai egység, de egy algoritmikus megvalósítás is, mely képzelt objektumok összefüggéseit kódolja. (Pletl Sz., Kincses Z., 2019) Nem szabad elfelejtenünk, hogy bármilyen szempontból is közelítünk a fogalomhoz a környezet hatását a rendszerre és a rendszer hatását a környezetre nem hagyhatjuk figyelmen kívül.

Felmerül a kérdés, hogy a komplexitás valóban különálló tudományág, vagy minden már létező tudományterület kritikus pontja, egy-egy sajátos összetett rendszerelmélet, melyet adott területen belül mintegy problémaként fel lehet oldani, azaz területspecifikus. Több neves gondolkodó is megfogalmazta kutatásainak eredményét, véleményét a témakörrel, ezek valamelyest egybevágnak, valamennyien meglátták a rendszer fejlődésével, evolúciójával járó komplexifikációt, a kezdeti feltételek finomhangoltságában rejlő végtelen kimeneti lehetőséget, de néhol ködös jelzőket, pontatlan változókat használnak. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013) Mit jelent a változatosság, meddig terjedhet a skála, van-e egyáltalán határa, vagy inkább egy átmeneti rész a lehetséges kimenetek és a káosz között, definiálható-e ez a szint?

A komplex rendszer több, mint a részek összessége, ezt részben a bemenet és a kimenet linearitásának hiánya tükrözi, tehát a relációk szimultán érvényesülésével nem teljesül a szuperpozíció elve, az operátorok, bár látszólag függetlenek egymástól, nem csak hatásuk többszörösével képesek hatni, de kölcsönhatásukkal egészen váratlan kimenetekre is képesek. A jelenlegi megközelítések nem túl pontosak, rendszerek modelljei általában lineáris, szétválasztható változójú, analitikusan megoldható egyenletek végtelen sora. Természetesen épp a kölcsönhatások elhanyagolása miatt nem elég pontosak. Ahogy lecsökkentjük a változók számát, a relációk összetettségét a redukció gyakran olyan drasztikus, hogy már meg sem közelíti az eredeti jelenséget. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Ha csak a mikroállapotokat tekintjük a sejtek valójában élettelen partikulumai, szervecskéi folyamatos dinamikus egyensúlyra való törekvése zavarba ejtő, hiszen leginkább annyit láthatunk, hogy a különböző transzport fehérjék Brown féle mozgást követve lebegnek az intracelluláris térben, s néha, amennyiben épp jó helyre keverednek mérnöki pontossággal le-,

majd új pozícióba felkapcsolódik a szállítmányuk. Nem sikerült felépítenünk még egyetlen sejtet sem, hiszen nem tudunk reprodukálni egy olyan minimális térigényű komplexumot, mely önmaga fenntartása, fejlesztése, a külső és belső környezet folyamatos monitorozása mellett osztódásra is képes. Ha pedig az élő és élettelen részek közötti fázisátalakulást vesszük figyelembe, hiszen nincs pontosan meghatározott köztes állapot sem, végképp tanácstalanok vagyunk. (Pulselli, R.M., et al., 2009)

A sejtet az élő szervezet alapegységének tekintjük, a benne történő molekuláris elváltozások, fázis tranzíciók képesek a felsőbb szintek differenciálására. A genetikai kód tartalmazza mindazt az információt, ami a szervezet kifejlődéséhez, fenntartásához és alkalmazkodásához szükséges. A kezdeti kondíciók (input) drasztikusan befolyásolják a végső értéket (output), a kettő közötti kapcsolat szintén nem lineáris, mindössze egy esemény bekövetkezésének, egy tulajdonság kifejeződésének lehetőségét s annak valószínűséget mutatja meg. Ez a szenzitivitás a pillangóhatást is felidézheti bennünk, mely egy dinamikus rendszerben a káosz kezdeti értékeinek fontosságát, lehetséges hosszú távú hatásait hangsúlyozza. (Strogatz, S. H., 2018)

Látható, hogy egy dinamikus rendszer folyamatosan változik, az alegységek alig látható, sokszor rendezetlennek tűnő ténykedése a rendszer egészének működését befolyásolja. A hierarchia egy pervazív jelenség, mely biztosítja, hogy a makroállapot már a mikroállapotok szintjén előre definiált legyen (bottom-up elrendezés). A különböző szintek, azok alrendszerei folyamatos interakcióban állnak egymással, és bár úgy tűnhet a rendszer mintegy vezényelve halad és fejlődik, meghatározott központi kontroll nincs. Kiemelkedően szemléletes példa erre az együttműködés egy hangyabolyban, ahol az egyedek külön-külön nem feltétlenül eszes teremtmények, mégis képesek feromonok segítségével tudtára adni a többi egyednek, ha segítségre van szükségük, ha találtak valamit, ami a bolynek is jó, ha veszély fenyegeti a tojásokat, a királynőt stb. Mintegy kollektív tudattal képesek egy olyan társadalmat létrehozni, melyben mindenkinek megvan a dolga a közös cél elérésében, pl. ha egy hangyászszün elpusztítja a beszerző hangyák nagyrészét a többiek átveszik a feladatkörüket még mielőtt a boly hiányt szenvedne az ellátmányból. (Li, Y. et al. 2018)

A lokális interakciókból hierarchia épül fel, minél több alapvető modullal rendelkezik a rendszer annál komplexebb információval teli hálózat jön létre, melynek következménye az emergencia. A megjelenés-tudomány tárgya a káoszból spontán kiemelkedő, nem várt rend, mintázat kialakulásában rendkívül fontos szerepet tölt be a már említett kritikus „mennyiség”. Ekkor a rendszer megszűnik részek, egységek csoportjaként létezni, áramlat jön létre, a legfontosabbá a pozíció és a kapcsolatok száma válik, ezek topológiája szerint redefiniálódik a

hálózat, a térbeli szerkezet megváltozik. Fontos kiemelni, hogy egy kapcsolat létrejöhet direkt és indirekt módon, közbeeső elemekkel, loopokkal és feedbackekkel teletűzdelve. Minden egységnek megvan a saját helye, a saját feladata és kapcsolatrendszere, mégis bármely elem nélkülözhető, szinte azonnal pótlásra kerül, szerepei átvállalódnak. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Az önszerveződés egy emergens vonás, mely a lokális interakciókat használja fel a további feladatok elvégzéséhez. Az autonómia elemszintű jelenléte az emergencia hatására képessé válik a környezethez való adaptációra saját utasítások szerint, központi kontroll nélkül. Ez a fokú autonómia lehetővé teszi, hogy az elemek közreműködjenek, pl. egymáshoz hangolják helyzetük, de ezzel egyidőben nő a lehetséges válaszlehetőségek, a rendszeren belüli diverzitás száma. A jelenségre egy szemléletes példa a madárarajok mintázata. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Ezt a komplexitást a tudomány mai szintje nem képes sem modellezni, sem teljes mértékben kivitelezni, de az információ digitalizálásával szükség volt a bonyolultabb, beláthatatlanabb outputok számokba történő kódolására. A 90' évek közepén Claude Shannon leírt egy optimális módszert, mellyel bármilyen szöveget a benne előforduló karakterek vagy karakterláncok előfordulásának valószínűsége szerint kódolt. Minél nagyobb eseményterületet vizsgált, annál nagyobb volt annak bizonytalansága, s annál több információt kellett kódolnia az üzenetben. Észrevette, hogy minden nyelv egy statisztikus szerkezetre épül, s a leggyakrabban használt szavak, karakterek kapták a legrövidebb, legkisebb térigényű kódot, míg a ritkán előfordulók, azaz a kis valószínűséggel előfordulók egy bonyolultabbat, nagyobb térigényűt, mivel azoknak több eltérő, váratlan információt kellett átadniuk. A lehetséges outputok valószínűsége normál eloszlást követ, Shannon az entrópiát választotta, mely megadja egy eseménytér bizonytalanságának mértékét. Az entrópia maximális, ha minden lehetséges kimenet valószínűsége megegyezik, ilyenkor a legnagyobb a megjósolhatatlanság is. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Minden esetben a legfontosabb szempont, hogy karakterláncok információtartalmának visszafejthetőnek kell lennie az adattömörítés után, tehát az üzenet lényegében nem változhat mindössze bizonyos mintázatok alapján rövidebben megfogalmazható. A szabálykeresésre különböző programnyelveket, vagy Turing-gépeket használnak, ezek megvizsgálják a bitsorozatok és a karakterek, vagy az azokból felépülő láncok periodikus ismétlődése, esetleges szimmetriája, vagy bármilyen belső rendezőelve alapján megfogalmazzák a felismert mintázatot. Ezen a ponton jutunk el a Kolmogorov-komplexitáshoz, vagyis egy adatsor

lehetséges legrövidebb leírásához a talált mintázatok segítségével. Amennyiben egy szekvencia random, azaz nem található benne semmilyen rendezőelv előfordulhat, hogy a szekvencia direkt módon való beillesztése célszerűbb, mint a ráerőltetett mintázatok alapján való leírás. Erre jó példa a  $\pi$ , hiszen az értékeinek legenerálása, és az abban való mintázatkérés nagyobb futási időt és tárhelyet igényelne, mint maga a karakterlánc kiírása. A Lempel-Ziv komplexitás éppen az eredeti és a rövidített string hányadosát adja meg. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Fontos megjegyezni, hogy a 0 vagy 1 értékű érmefeldobás 0,5 valószínűséggel eredményez fejet vagy írást. Ha egy string 1000 valódi feldobás eredményét tartalmazza 0-k és 1-k komplex sorozatát kapjuk majd. Ha egy számítógépet kérünk erre, az is Kolmogorov random sorozatot generál nekünk, főleg, ha parancsként megadjuk neki, hogy az átlag 0,5 legyen. Egy 01 kódot 500 alkalommal egymás után tartalmazó string ugyanazt a valószínűséget adja. Ugyanazt az eredményt több úton is elérhetjük, hiszen mindhárom adatsor azonos számú kísérletet, és azonos valószínűségű kimenetet ad. A komplexitáshoz való viszonyuk mégis más. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Seth Lloyd a komplexitást három mérhető szempontból vizsgálta: a leírás és a megalkotás nehézsége, valamint a rendezettségi fok szerint. Ahogy fent is látható volt egy organizmus működését nehéz leírni, mesterséges megalkotása pedig szinte lehetetlen. Egy homogén, tökéletes gömböt könnyű leírni, viszont meglehetősen nehézkes létrehozni. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Egy következő aspektus William Paley órásmester egy érdekes gondolat kísérletében tetten érhető, miszerint egy pusztán áthaladva talál egy követ. Ha valaki megkérdezné tőle, hogy az hogyan került oda egyszerűen azt felelné: mindig is ott volt, s a kérdező sem kételkedne a válasz helyességében. Más a helyzet egy pusztában talált zsebórával. A kérdésre, hogy hogyan kerülhetett oda nem annyira evidens a válasz, miszerint mindig is ott volt. Az is meglehetősen valószínűtlennek tűnne, hogy a lépteink által okozott rezgések szubatomi mozgásokat idéztek elő, melyek olyan frekvenciával rezegtették a puszta szabad molekuláit, hogy spontán összeállt egy működő struktúra. Tekintettel arra, hogy az óra egy precíz, bonyolult szerkezet, okkal gondolhatjuk, hogy azt valakinek el kellett készítenie. Tehát az odakerülésének útvonala feltételez egy alkotót, aki kigondolta, megtervezte, kivitelezte a részeket egyesével és összerakta a működő szerkezetet, ez pedig felölel egy hosszabb történetet, melynek időbeli léptéke nem elhanyagolható. Még meg sem említettük, hogy ezt a folyamatot egy élő, cselekvő és algoritmikus gondolkodásra képes organizmus, egy ember, hozta létre, akinek szintén el kellett jutnia arra az intellektuális szintre, ahol nem csak kövekkel és botokkal harcol, nem is

mindössze a túléléséért küzd. A komplexitás magába foglalja a tényt, miszerint valamit teremteni, főleg, ami magától működik, és egyáltalán képes fennmaradni, nem csak nagyon bonyolult, de rengeteg időbe is telik. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013, Laats, A., Siegel, H., 2021)

Az adott információhalmaz szemléltetése után még inkább nyilvánvalóvá válnak a környezeti és belső tényezők folyamatos monitorozásának korlátai. Az agy olyan flexibilis komputációs architektúrával rendelkezik, mely képes minden mozdulatot valós időben lekövetni, korrigálni, és hosszú időre elraktározni. (Kaiser, M., 2007) Ezzel szemben egy gépnek minden egyes mozdulatot, elvet egyesével be kell tanítani, többszörösen tesztelni.

Az általánosítás egy érzékeny téma, mivel gyakran mi magunk, emberek is sztereotípiákba kapaszkodunk, azaz a saját tapasztalat helyett mások tapasztalatain keresztül egyszerűsített formában szemléljük a világot. Ezzel szemben egy MI általánosításra való képessége a vele „megetetett” adatok függvényében változik. Kizárólag akkor fogja tudni, hogy a standard kilincses, a kerek kilincses, a liftbe vezető, a fotocellás, vagy kártyával nyitható falba épített objektumok azonos funkcióval bíró ajtók, és mindegyiknek saját nyitómechanizmusa van, mindössze, ha mindet egyenként megmutatják neki. (Klingbeil, E. et al., 2010) Nem fogja tudni, hogy egy kötel hajlik és nem törik, mert hiányzik a belső intuitív fizikája és pszichológiája, a kognitív architektúrája. Épp ezért minden egyes döntés előtt a meglévő információk feldolgozása, a korábbi információk előhívása komoly számítási kapacitást igényel. (Ladyman, J., Lambert, J., 2013)

Összességében látható, hogy a világ jelenleg nem egy számunkra egyszerűen leírható szerkezet. A matematikai formalizmusokkal való közelítést bővíteni, fejleszteni kell, a természetet, mint követendő példát körültekintően, kölcsönhatásokkal együtt megfigyelni s minél pontosabban modellezni. Egy jó modell, melynek hatékonysága eléri az emberi agyét, képes lehet a hibáin át tükrözni egy sajátos helyzetet, mely akár az élő szervezet kérdéseinek megoldásához is közelebb vihet. Végtelen mennyiségű információval kerülünk kapcsolatba nap, mint nap. A memória működése, annak fajtái, a tömörítési, az előhívási lehetőségek pedig részben feltérképezetlenek, és további kutatásokat igényelnek.

## Bibliográfia:

1. Jost, L. (2006) *Entropy and diversity*, DOI:10.1111/j.2006.0030-1299.14714
2. Kaiser, M. (2007) *Brain architecture: a design for natural computation*, DOI:10.1098/rsta.2007.0007
3. Klingbeil, E., Saxena, A., Ng, A. (2010) *Learning to open new doors*, DOI: 10.1109/IROS.2010.5649847
4. Laats, A., Siegel, H. (2021) *6 Beyond “Creation Science”: The Scientific Status of Intelligent Design* (Teaching Evolution in a Creation Nation), DOI: 10.7208/9780226331447-008
5. Ladyman, J., Lambert, J. (2011) *What is a Complex System?*, DOI:10.1007/s13194-012-0056-8
6. Li, Y., Zhang, C., Yang, Q., Li, J. (2017). *Improved Ant Colony Algorithm for Adaptive Frequency-Tracking Control in WPT System*, DOI:10.1049/iet-map.2017.0159
7. Pletl Sz., Kincses Z. (2019) *Jelek és rendszerek*, Szegedi Tudományegyetem tananyag
8. Pulselli, R. M., Simoncini, E., Tiezzi, E. (2009) *Self-organization in dissipative structures: A thermodynamic theory for the emergence of prebiotic cells and their epigenetic evolution*, *BioSystems* 96 (2009) 237–241
9. Strogatz, S. H. (2016). *Nonlinear Dynamics and Chaos with Student Solutions Manual*, ISBN 9780813350547