

BODA DEZSŐ

## Komplex vagy komplikált?

Ebben a rövid írásban arra teszek bátortalan kísérletet, hogy közelebb hozzam az olvasóhoz a komplexitás fogalmát, ugyanis akár a szakirodalom, akár a közéleti hírek vagy elemzések tanulmányozása során egyre gyakrabban találkozunk ezzel a kifejezéssel. Egy keresés az angol nyelvű tudományos publikációkban a „complex system”, azaz a „komplex rendszer” karakterláncra azt adja, hogy 1972 és 2020 között – exponenciális növekedést mutatva – kb. 50.000-ról másfél millióra nőtt a „complex system” kifejezést tartalmazó cikkek száma. Nyilván hasonló változást mutatnánk ki, ha napilapokban politikusok beszédeiben keresgélünk.

Vajon mi lehet az oka ennek az egyre élenkülő érdeklődésnek? Nyilván az, hogy a világ tényleg egyre komplexebbé válik. Mindenki érzi, hogy ez valóban így van. Egyre nehezebben érthetőek a világban végbemenő folyamatok; egyre nagyobb hibaszázalékkal jósolható meg, mi lesz a helyzet 1 év múlva; egyre komplikáltabb adaptálódni a gyorsan változó körülményekhez. Az embert az evolúció úgy „rakta össze”, hogy szeret értelmet keresni az őt körülvevő világban. Ez szükséges ahhoz, hogy tervezni tudjunk, az agyunk nyújtotta evolúciós előnyöket kihasználva. Ha nem találjuk ezt az értelmet, vagy az az értelem, amit eddig adottnak véltünk, elveszni látszik, az jelentős kognitív disszonanciát okoz az elménkben, ami szorongáshoz és egyéb problémákhoz vezet.

No, igen, de mégis mit jelent az, hogy komplexitás? Mi jellemzi a komplex rendszereket? Maga a tény, hogy oly sokat használjuk ezt a fogalmat, szükségessé teszi,

hogy tudjuk, miről is beszélünk. A komplexitás ugyanis nem ugyanaz, mint hogy valami komplikált, azaz hogy bonyolult. A komplex rendszereknek jól körülírható tulajdonságaik vannak, amikről lehet beszélni, de semmiképpen sem lehet elütni egy bonyolult kérdés feldolgozását azzal, hogy az túl komplex, esélyünk sincs arra, hogy megértsük.

Egy laptop nyilvánvalóan bonyolult szerkezet, mégsem komplex rendszer. A laptop egy mérnöki produktum, ami tervrajz alapján készül, és minden egyes alkatrésze is előre kitalált és megtervezett módon működik: egyenként és az alkatrészek is megfelelően „munkálkodnak” együtt, hogy a gép a kívánt módon tegye a dolgát. A részek tulajdonságaiból következik az egész rendszer tulajdonsága. A komplex rendszerek ezzel szemben önszervezőek, és az sem érvényes rájuk, hogy az egész egyenlő lenne a részek összegével. Mivel a laptop komplikált, természetesen előfordulhat, hogy nem működik tökéletesen. Ez nem a komplexitás következménye, hanem tervezési hiba. Az optimalizáció még mindig jobban megy az evolúciónak.

Vannak persze komplex technológiai rendszerek, illetve technológiai komponenset tartalmazó nagyobb léptékű komplex rendszerek, de ezek visszacsatolásokat és emberi tényezőket is magukba foglaló részrendszerek bonyolult szövédéke, ahol egy alkatrész hibája vagy egy emberi mulasztás „önmagán túlmutató” hibákat okoz a rendszer működésében.

A komplex rendszerek fogalma távolról sem egyértelmű. Sokféle lehetnek és sokféle jellemző tulajdonságuk van. A definíciót

adó szerző – üléspontjától függően, azaz hogy milyen tudományterületről jön (társadalomtudós, fizikus, evolúciós biológus, informatikus, közgazdász stb.) – más és más jellemzőt tart fontosnak, és azt foglalja bele a saját tömör meghatározásába. E rövid definíció után viszont szinte mindig következik egy hosszabb kifejtés, ahol a komplex rendszerek egyéb ismérvei is terítékre kerülnek és ezen kifejtések során nagyjából mindig ugyanaz a kép alakul ki.

Én a következő fogalom meghatározást adnám a komplex rendszerekre: A komplex rendszer egy olyan hierarchikus struktúra, amely a struktúra alsó szintjén nagyon sok komponensből (építőközből, összetevőből, ágensből) áll. Ezeknek a kölcsönhatásai és a szabályok által vezérelt adaptív viselkedésük a struktúra magasabb szintjein egy spontán emergens rendhez (viselkedéshez, mintázathoz) vezetnek. A rendszer szintjei és komponensei között visszacsatolások működnek, amelyek lehetővé teszik az ágensek adaptív válaszát az őket ért behatásokra.

A következőkben sorra veszem az ebben a rövid összefoglalásban megbúvó fogalmakat, és példákkal próbálom megvilágítani a jelentésüket. Az első és egyik legfontosabb kijelentés az, hogy a komplex rendszerek nagyon sok kis összetevőből, építőközből épülnek fel. Az analógia miatt mindig érdemes megemlíteni a komplex fizikai rendszereket, ahol az élettelen anyagi rendszer molekulákból vagy atomokból áll. A molekulák közötti kölcsönhatásokat és a viselkedésüket a fizika alapvető törvényei – elektrodinamika, kvantummechanika, statisztikus mechanika – határozzák meg.

Ami minket sokkal inkább érdekel, az a komplex adaptív rendszerek, ahol a rendszer valamely szintjén jelen van az élet, vagy ha társadalmi rendszerekről

van szó, akkor az intelligencia is. A komplex rendszer fogalmán általában ezeket a komplex adaptív rendszereket értjük. A komplex fizikai versus adaptív rendszerek megkülönböztetése John Hollandtól,<sup>1</sup> a genetikus algoritmusok úttörőjétől származik.

A komplex adaptív rendszerekre mind a biológiából, mind a társadalomtudományokból lehet példákat hozni. Biológiai rendszerek esetében nagyon sokféle rendszerről beszélhetünk attól függően, hogy a hierarchia melyik szintjén állunk. Összetett makromolekulák építik fel a sejteket. Ekkor a molekulák az építőkövek, míg a sejt maga a komplex rendszer. Ha az agyat vagy az immunrendszert tekintjük komplex rendszernek, akkor ott az építőkövek a neuronok, illetve az immunrendszer sejtjei. Egy élő organizmus is egy komplex rendszernek tekinthető, ami alrendszerekből áll össze, de mint az agyra és az immunrendszerre vonatkozó példákból láttuk, ezek az alrendszerek is további alrendszerekre bonthatók.

Ez a felépítés magyarázza azt a feltevést, hogy a komplex rendszer egy hierarchikus struktúra. A társadalom kisebb egységekből épül fel, de végső soron mindegyik emberekből áll. Az ember maga is egy komplex rendszer, aminek a belső működése befolyásolja azt, hogy miként reagál a különböző behatásokra a társadalom részeként.

Amikor a komponensekről beszélek, ezentúl az ágens kifejezést fogom használni – hangsúlyozandó, hogy a rendszer komponensei „csinálnak valamit”, azaz hogy van nekik valamilyen tipikus viselkedésük. Azt, hogy egy adott ágens egy adott helyzetben és adott időpontban konkrétan mit csinál, az nagyon sok mindentől függ. Alaphipotézisem, hogy létezik egy jellegzetes viselke-

<sup>1</sup> Holland, John H.: Complexity. A Very Short Introduction. Oxford, 2014. 95 p.



Alka-raj, Shumagins szigete ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Auklet\\_flock\\_Shumagins\\_1986.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Auklet_flock_Shumagins_1986.jpg))

désük, azaz egy adott behatásra hajlamosak mindig ugyanazt a választ adni. Azt, hogy valamilyen bejövő jelre az ágens miféle választ ad konkrét cselekvés formájában, cselekvési szabályok írják le.

Ezeket a szabályokat valahogy úgy kell elképzelni, hogy amennyiben az ágens A jelet kap, akkor cselekedje C-t, míg ha B jelet kap, akkor cselekedje D-t. Ha A és B jelet egyaránt kap, akkor valamilyen valószínűséggel cselekedje C-t, illetve D-t. Mik ezek a bejövő jelek? Ezek lehetnek a külvilágból érkező impulzusok, vagy a többi ágens cselekvéseiből eredő információ. Ha egy ágens például azt látja, hogy egy másik ágens A-t cselekszik, akkor ezt felfoghatjuk egy A jelnek az ágens számára.

Vegyük például a madárraj esetét, amit látványossága és egyszerűsége miatt sokszor idéznek példaként. Mindannyian láttunk már ilyen madaraból álló „felhőket”, amik tipikus alakzatokat formálnak az égen. Ezeknek az alakzatoknak a for-

mája folytonosan és dinamikusan változik, ahogy a madarak repkednek a rajban, de azt érezzük, hogy ez a forma nem lehet akármilyen, valamilyen szabályszerűségek tehát érvényesülnek a háttérben. Mi csak az emergens mintázatot látjuk, ami egyáltalán nem véletlenszerű, nem rendezetlen. Nem is teljesen rendezett, hanem valahol a kettő között van.

Az egzotikusnak tűnő „emergens” szó – nincs rá igazán megfelelő magyar kifejezés – jelentésére is rávilágít a példa: az emergens tulajdonságok a komplex rendszer magasabb szintjein jelennek meg az alsóbb szinteken működő ágensek kaotikusnak tűnő, de valójában szabályozott viselkedésének eredményeként. Ha egy pillanatra visszakanyarodunk a fizikai analógiához, ilyen emergens tulajdonságnak tekinthető a molekulák által alkotott gáz hőmérséklete és nyomása, azaz azok a tulajdonságok, amiket a makroszkopikus szinten mérni tudunk.

Ahogy a gáz tulajdonságait is akkor érthetjük meg igazán, ha „lemegyünk a molekulák szintjére”, úgy a madárraj viselkedése mögött megbújó rendről is akkor tudunk valamilyen benyomást szerezni, ha „lemegyünk a madarak szintjére” és őket figyeljük. Ekkor a komplex rendszer a madarak összessége, a madarak pedig az ágensek. Egy adott madár számára minden időpillanatban a bejövő jel az az információ, hogy mit csinálnak a szomszédai, vagy a szélirány, vagy a támadó sólyom viselkedése. Ennek alapján a madárraj viselkedését kitűnően lehet szimulálni egy számítógépen,<sup>2</sup> ha például egy madár számára a következő egyszerű viselkedési szabályokat írjuk elő:

(1) Próbálj meg ugyanabba az irányba repülni, mint a szomszédaid!

(2) Próbálj meg közel maradni a szomszédaidhoz!

(3) Próbálj meg nem nekik menni!

Ezek olyan „ököl szabályok”, amiket a madár repülés közben könnyen tud alkalmazni, szem előtt tartani.

Itt tehát az történt, hogy az ágensek (a madarak) szintjéről lejjebb mentünk egy még alapvetőbb szintre, a szabályok szintjére. Ha így nézzük a dolgokat, akkor ebben a játszmában a madarak tényleg csak ágensek, akik eljártsszák a szerepüket, és a fontos kapcsolat a szabályok (a madarak közti kölcsönhatások) és a makroszkopikusan észlelt mintázatok (az egész madárraj viselkedése) között van.

Jogosan merül fel a kérdés, hogy honnan tudják a madarak ezeket? A madarak esetében ez ösztönös viselkedés, a szabályok nyilván a DNS-ükben vannak kódolva. Ezért az is kijelenthető, hogy ezek a „törvények” evolúciós úton alakultak ki, azaz

a madárraj ily módon való viselkedésének valamiféle adaptív előnye kell hogy legyen. Ez így is van; ez a viselkedés feltehetően a ragadozók elriasztására alakult ki.<sup>3</sup>

Amennyiben egy madárrajnál komplexebb rendszert, konkrétan emberek közösségét vesszük, akkor a helyzet jelentősen bonyolódik, mivel a viselkedési előírások már nem csak a génekben tárolt ösztönös törvényszerűségek lesznek, hanem tanult, társadalmi normák is. Ezek végső soron az agyunkban tárolódnak.

Már csak az maradt hátra, hogy röviden megvilágítsam, mit takarnak azok a kijelentések, hogy a rendszerben „visszacatolások működnek, amelyek lehetővé teszik az ágensek adaptív válaszát az őket ért behatásokra”. Az adaptációt az teszi lehetővé, hogy az ágenseknek van mozgásterük: habár viselkedésüket szabályok irányítják, azok mégsem olyan szigorúak, mint amelyek az atomok mozgását vezérik egy jégkristályban. Egyrészt mindig van választási lehetőség, hogy milyen szabályokat alkalmazzon az ágens, másrészt a ezek is változtathatók. A biológiai rendszerek esetében ez azt jelenti, hogy változnak a gének az evolúciós szelekciós mechanizmuson keresztül. Ez a mechanizmus kitűnően működik, de meglehetősen lassú. Ki kell várni a következő nemzedékeket, és a kicsi előnyös változások felgyülemelését a faj genomjában.

Az ember esetében sokkal gyorsabban történik ez a folyamat. A generális társadalmi szabályok is gyorsabban változnak a biológiai időléptékhez viszonyítva, de az ágensek a maguk kreativitása révén képesek új „törvények” kialakítására.

<sup>2</sup> Erre egy példa az alábbi videóban nézhető meg: [https://youtu.be/VyZZE4H1G\\_w](https://youtu.be/VyZZE4H1G_w) (Megtekintve: 2021. június 6.)

<sup>3</sup> A következő videón jól látható a madárraj támadó sólyom, ami nem nagyon tud mit kezdeni a helyzettel: <https://youtu.be/bb9ZTbYGRdc> (Megtekintve: 2021. június 6.)

A visszacsatolások egyrészt az ágensek között működnek, másrészt a hierarchikus komplex rendszer magasabb szintjeiről is érkehetnek jelek. Az ágens valamilyen viselkedése például előnyös lehet a csoport, azaz a teljes komplex rendszer számára. Ekkor felbukkannak azok a mechanizmusok, amelyek révén a csoport – mondjuk egy emberi közösség – motiválja az ilyen szabályok érvényesülését az ágensek szintjén. Ezekhez a mechanizmusokhoz tartoznak a jog, az erkölcs, a vallások által alkotott közösségi regulák.

Az emberek egymás közötti kooperációját elősegítő etikai és erkölcsi normák lassan, de biztosan választódtak ki évszázadokkal ezelőtt. Hatékonyságukat jellemzi, hogy az általuk életre hívott vallások és társadalmi normák még a mai kaotikus világban is tartják magukat. A káoszban az ember rendre vágyik, nem meglepő tehát, ha a magasabb rendű komplexitás miatt fellépő kaotikusnak tűnő világban a rendezettség irányába mutató folyamatok

indukálódnak. A komplex rendszerek egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy a rend és a rendezetlenség peremén egyensúlyoznak, ami a rendszer működésében rejlő versenyt és kiválasztódást elősegítő mechanizmusoknak és az ebből eredő nagyfokú optimalizáltságnak köszönhető. Persze, máshogy működnek ezek a mechanizmusok a biológiában és a gazdasági életben, de nem haszontalan észrevenni az analógiákat az egymástól látszólag nagymértékben különböző rendszerek között.

A komplex látásmód egy ilyen intellektuális keretrendszert szolgáltat. Ha ezeket az analógiákat szem előtt tartva tekintünk világunk folyamataira, talán rögtön nem lesznek olyan zavarba ejtők. Ha az olvasó ennél a rövid leírásnál mélyebben szeretne elmerülni a komplex rendszerek világában, javaslom a Felsőbbfokú Tanulmányok Intézetének gondozásában megjelent ismeretterjesztő könyvemet,<sup>4</sup> illetve az abban bőségesen citált irodalmat.

#### DEZSŐ BODA: KOMPLEX ODER KOMPLIZIERT?

Der Beitrag erzielt den Begriff der Komplexität zu definieren. Unter komplexen Systemen versteht man wenn ein System aus zahlreichen Komponenten besteht und es durchs Verhalten dieser Komponenten (Agenten) bestimmt wird, was für Ordnung und Muster auf Ebene des Systems wahrgenommen werden. Der Begriff der Komplexität wird oft damit verwechselt, daß etwas kompliziert ist. Es geht hier jedoch um viel mehr. In den komplexen Systemen fungieren komplizierte Rückschaltungen, die das adaptive Verhalten der Agenten ermöglichen.

#### DEZSŐ BODA: COMPLEX OR COMPLICATED?

The aim of the paper is to introduce the readers to the concept of complexity. By complex systems, we understand a system that consists of many components, and the behavior of these components (agents) determines the ordering and patterns we observe at the systemic level. The notion of complexity is often confused with something that is complicated. There is, however, much more to it than 'complication'. Complex systems have complex feedback loops that allow agents to behave adaptively.

<sup>4</sup> Boda, Dezső: Complexity in Nature and Society. From Dancing Molecules to Collapsing Societies. Kőszeg, 2020. 170 p. (IASK monográfiák sorozat)