

Szeremley Levente

# Az élet informatikája

## 2. rész

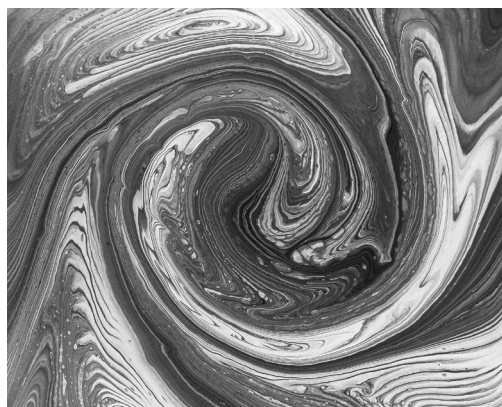


Az előző részben megmutattuk, hogy az információ az energia koncentrációjával összefüggő jelenség, így a fogalom adekvát értelmezési keretét a termodinamika jelenti, mint az energia megoszlását modellező tudományág. Tudjuk, hogy az energia koncentrációját megvalósító állapotok termodinamikai értelemben instabilak (II. főtétel), ezért az információ fogalmának tisztázását követően adódik a kérdés, hogy milyen mechanizmusok hozzák létre, ill. tartják fenn az informatikai mintázatokat. A továbbiakban az anyag, az energia és az idő átfogó szempontrendszerében vizsgáljuk meg az élet alapmechanizmusait, nevezetesen az energiabetáplálás szerepét ellátó munkavégző mechanizmusokat, az információhordozó közeg hálózatos struktúráit, valamint a fejlődést lehetővé tévő evolúciós mechanizmusokat. Végül bemutatjuk, hogy Buddha alaptanításai (*anitja*, *anátman*, *súnjata*) éppen az élet ezen három tényezőjére vonatkoznak, így a buddhizmusra – a tagadó nyelvi szerkezetek nyomán kialakult nihilista értelmezések ellenére – az Élet vallásaként kellene tekintenünk.

### Fenntartottság (*anitja*)

Ha egy rendszert nem ér semmilyen külső hatás, rövid úton a termodinamikai egyensúly állapotába kerül, vagyis alkotóelemei felveszik a legkisebb energiájú konfigurációt és egyenesen széteszlanak. Mivel a folyamat során felemésztnednek a hajtóerőt jelentő belső potenciálkülönbségek, végül beáll a nyugalmi állapot. Változás (*anitja*) csak akkor figyelhető meg ismét, ha a rendszerbe külső energia lép be, ami az energia egyenlőtlen eloszlását előidéző újra beindítja a dinamikus, kiegyenlítő-dési folyamatokat. Időben állandó mintázatok létrejöttéhez értelemszerűen folyamatos energiabetáplálásra, ill. munkavégzésre van szükség, ahogy ezt az előző fejezetben a sípálya modellel

szemléltettük. A sípálya modellben a sífelvonó képviseli a munkavégző mechanizmust, ami a síelő hegytetőre juttatásával energiát táplál a rendszerbe (szabadenergia-ciklus felszálló ága) – a síelő pedig a lesiklás során felélik ezt az energiát (szabadenergia-ciklus leszálló ága). Az informatikai mintázatot ebben az esetben a síelő áramlási útvonalai jelenítik meg, melynek állandósága – ami az információ fogalmának egyik alapfeltétele – a sífelvonó folyamatos működtetése által biztosítható. Ez a példa jól szemlélteti, hogy még a statikus fogalmakkal leírható, időben állandó mintázatok mögött is dinamikus folyamatok állnak, és akkor még nem beszéltünk az evolúcióról, ami egy nagyobb időléptékben a mintázatok megváltozásáról szól. Látható, hogy amikor változásról beszélünk (*anitja*), a változás közvetlen oka is képbe kerül, mint az érem másik oldala. A továbbiak-



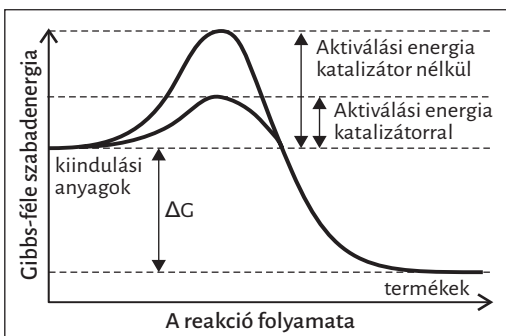
ban ezért a változást (informatikai mintázatot = életet) fenntartó munkavégző mechanizmusok természetét vizsgáljuk meg részletesebben. Mivel az élő rendszerek az evolúció során egy több szintű hierarchiába (holarchiába) szerveződtek, a fenntartó mechanizmusok is különböző szinteken, ill. információhordozókon vizsgálhatók. Mi most az élet legalsó, molekuláris szintjéről indulunk el. Ez egyrészt alkalmat ad a mun-

kavégző mechanizmusok szerepének bemutatása az élet keletkezésében, másrészt pedig minimálrendszer jellegükből adódóan a felépítésükben jól áttekinthető, általános alapelveket testesítenek meg, melyek a komplexebb rendszerek (pl. emberi társadalom) értelmezésében is irányelvként szolgálnak.

### A katalizátor fogalmának tisztázása

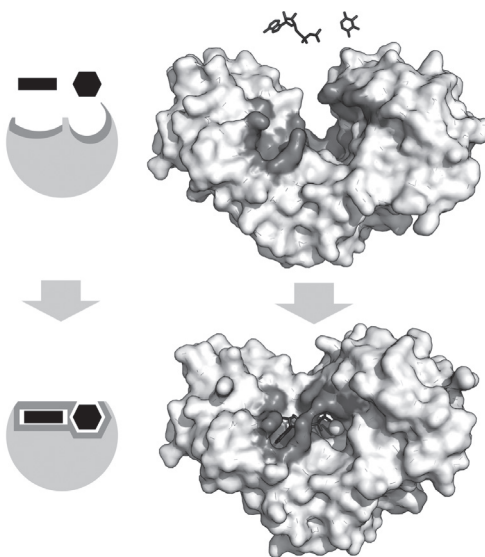
A sejtszintű élet fenntartásának kulcsszereplői az enzimek: a fehérje alapú biokatalizátorok. Működésük megértéséhez induljunk ki a katalizátor fogalmának tisztázásából, ezzel kapcsolatban ugyanis fennáll egy széles körben elterjedt félreértés, melynek helyreigazítása a témánkat is jól megvilágítja. Tankönyvi meghatározás szerint a katalizátorok olyan anyagok, melyek az adott reakció sztöchiometriai egyenletében (anyagmérlegében) nem szerepelnek, mégis képesek a reakció sebességének növelésére. A közismert magyarázat szerint ezt azáltal érik el, hogy egy kisebb aktiválási energiájú, alternatív reakcióutat nyitnak meg az átalakulás előtt. A jelenséget többnyire az ún. heterogén katalízis területéről vett példákkal szemléltetik. Ezekben a reakciókban a reakciópartnerek egyike gyenge, másodrendű kötéssel megkötődik a katalizátor (pl. platina) felületén, miközben kissé megfeszülnek, és ezáltal fellazulnak a molekulán belüli kötéseik. Ilyen körülmények között a reakciópartner kisebb energiájú ütközése is elegendő a régi kötések felszakításához és az újak kialakításához, vagyis a reakció lejátékosodásához. Ez a kép azt sugallja, hogy a katalizált reakcióknak megvan az affinitásuk arra, hogy végbemenjenek, csak éppenséggel gátolja őket a magas aktiválási energia (reakciógát); a katalizátorok pedig éppen azáltal gyorsítják a folyamatot, hogy egyfajta gátszakadást előidézve utat nyitnak a reakció előtt. A reakciók egy részénél mindez logikus magyarázatnak tűnik, sok esetben azonban teljesen csődöt mond az aktiválási energiára fókuszáló értelmezés. Tipikusan ilyenek a biokémiai reakciók, melyek termékei rendkívül magas szabadenergia-potenciálra kerülnek az átalakulások során. A termodinamika II. fő-tétele alapján tudjuk, hogy ha egy reakciónak

nincs hajtóereje, akkor a reakciógát szerepe értelmezhetetlenné válik: a golyó ugyanis nem gurul a lejtőn felfelé, így teljesen mindegy, hogy útközben egyébként milyen akadályok-



kal találkozna. Ez az alaphelyzet hangsúlyossá teszi, hogy az enzimkatalizált reakciók túlnyomó része energiaigényes folyamat, melyek hajtóerejét az ATP (adenozin-trifoszfat) bontása során felszabaduló energia biztosítja. Energetikai szempontból tehát a fő reakciót az ATP enzimatis bontása jelenti, míg a metabolikus átalakulás tulajdonképpen egy csatolt reakció, ami az előbbi farvizén megy végbe.

A mechanizmus bemutatásához vegyünk egy  $A + B = C$  egyenlettel leírható biokémiai reakciót. A folyamat azzal kezdődik, hogy a reakciópartnerek (A, B) megkötődnek az enzim aktív centrumában, ami a reakció szempontjából optimális pozícióban rögzíti őket.



Ezután az enzim egy másik részén megkötődik, majd elbomlik egy ATP molekula. A bomlás során felszabaduló energia olyan konformáció változást (szerkezeti torzulást) idéz elő az enzimben, ami az aktív centrumban lévő A és B molekulát egymáshoz préseli, mire azok C molekulává alakulnak át. Mivel a C molekula már nem illeszkedik az aktív centrum geometriájához, eltávozik onnan, és a folyamat kezdődhet előlről. Az enzim tehát egy erőátviteli szerkezetként, azaz molekuláris gépként működik. Legegyszerűbb modellje a fogó, melynek egyik végén a kezünkkel energiát táplálunk be, ez egy áttételen keresztül a munka tárgyára koncentrálódik és így hasznos munkát végez: vág, présel, lukaszt stb. Könnyen belátható, hogy a katalizátorok munkavégzéssel kapcsolatos aspektusa általánosabb szempont, mint a reakcióját szerepét firtató kinetikai megközelítés, egy enzimkatalizált reakció esetében ugyanis lényegében mindegy, hogy a szubsztrát megkötődésekor történik-e aktiválási energia csökkenés vagy sem – ha a szükséges energia rendelkezésre áll, a reakció így is úgy is végbemegy.

#### *Az élet biológiai és informatikai meghatározása*

Állításunk szerint a sejt minden egyes reakciója (vegyülete) mögött áll egy enzim, a fenntartó szerepében. Ha azonban figyelembe vesszük, hogy milyen komplex rendszer végzi az enzimek szintézisét, valamint a működtetésükhöz szükséges energiatöltetek előállítását (melyek maguk is enzimkatalizált reakciókon alapulnak), egy olyan kölcsönös függőségi viszony tárul elénk, amiben nem magától értetődő, hogy mi az ok és mi az okozat. A metabolizmus ugyanis legalább annyira feltétele az enzimek létrejöttének, mint fordítva. Ennek a „tyúk vagy a tojás” dilemmának az eldöntéséhez le kell egyszerűsíteniünk a rendszert, azaz vissza kell mennünk az élet keletkezéséhez.

Mielőtt azonban az élet keletkezéséről gondolkoznánk, arra kell valamiféle választ adnunk, hogy mit is tekintünk életnek – ettől függ ugyanis, hogy a fejlődési sorban hová tesszük az élet keletkezését. Ebben a kérdésben általában a biológiai élet legkisebb és osz-

hatatlan alapegységét, a sejtet szokták alapul venni. Mivel az első egysejtű fossziliák 3,8 milliárd éve jelentek meg, többnyire erre datálják az élet keletkezését. Az ezt megelőző korszakot kémiai- vagy prebiológiai evolúciónak nevezik, ezt követően pedig biológiai evolúcióról beszélünk. Mivel azonban az első prokarióta sejtek túlságosan komplexek voltak ahhoz, hogy alkotóelemeikből spontán összeállhattak volna, feltételezhető, hogy már korábban kialakult az élet valamilyen primitívebb formája. Ezt a fossziliák által nem dokumentált időszakot hidalja át Gánti Tibor chemoton elmélete. A chemoton az élet minimálrendszerének a modellje; egy olyan hipotetikus molekuláris rendszer, amely az anyag önszerveződésének folyamatában először jeleníti meg a sejtek legalapvetőbb logikai struktúráját, ugyanakkor komplexitás tekintetében még nagyon messze van azoktól. A chemoton ideája tulajdonképpen egy „felülről lefele” típusú gondolkodás eredménye, amely a sejt komplex rendszerét a végletekig redukálja, a működés alaplogikájának fenntartása mellett. A tovább már nem egyszerűsíthető rendszer az élet minimálrendszere, amely az elmélet szerint a kémiai evolúció előzetesen kitermelt molekuláris rendszereiből már spontán összeállhatott („mennyiség átcsap minőségbe”). De nézzük meg, pontosabban miről is van szó.

A chemoton egy molekuláris szuperrendszer, amely az alábbi három alrendszer kooperációja által jön létre.

1. Anyagcsere alrendszer: egy reakcióháló, a chemoton kémiai motorja, ami legyártja önmaga és a másik két alrendszer komponenseit.

2. Információs alrendszer: általánosságban egy templát-polimerként meghatározott óriásmolekula rendszer, ami katalitikus hatással van az anyagcsere alrendszerre, ezáltal szabályozó funkciót tölt be.

3. Határoló alrendszer: a rendszer integritását megteremtő burok, kémiai mivoltában egy lipid kettősmembrán, ami féligáteresztő hárttyaként a környezettel való anyagforgalom szabályozásában is részt vesz.

A három alrendszer sztöchiometriai kényszerkapcsolásban áll egymással, összehangoltan működik és olyan kezdetleges, ám alapvető élet-

jelenségeket produkál, mint az anyagcsere, a növekedés, a szaporodás és az evolúcióképesség. Innen már egyenes út vezet a modern sejtig.

Az elmélet leggyengébb pontja a chemoton létrejöttével kapcsolatos. Ha ugyanis a templát-polimer alrendszerbe behelyettesítjük a konkrét vegyületcsoportot – ami az ismereteink alapján nem lehet más, mint a nukleinsavak – egy reménytelenül komplex anyagcsere alrendszer adódik. Ha pedig ehhez hozzáveszünk a membránt alkotó lipidek szintézisét is, végképp nyilvánvalóvá válik, hogy a chemoton még mindig túlságosan komplex ahhoz, hogy független útvonalakon létrejött komponenseiből spontán összeállhatott volna.

Ez a probléma kiküszöbölhető, ha a chemoton létrejöttét egy ún. infrabiológiai rendszer evolúciója előzi meg. Infrabiológiai rendszernek nevezzük a chemoton három alrendszere közül kettőnek az együttműködését. A lehetséges kombinációk közül a templát-polimer és az anyagcsere alrendszer párosa alkotott a legnagyobb valószínűséggel egy evolúcióképes rendszert. Elképzelhető egy olyan munkamegosztás, melyben a katalizátor funkcióban lévő templát-polimer (nukleinsav) véletlenszerűen gyártja le az anyagcsere alrendszer elemeit, majd ebből választódnak ki a templát-polimerre és a lipidmembránra vonatkozó reakciók. Így fokozatosan, a darwini evolúció alapelvei szerint épülhetett ki a chemoton belső visszacsatolásokat tartalmazó anyagcseréje.

Az élet létrejöttének minimálrendszer előtti időkre való visszavezetése azonban önellentmondás, ami a minimálrendszer által megfogalmazott életkritériumok újragondolására készített. A helyzet körülbelül olyan, mintha egy gyereket a születése pillanatától tekintenénk élőnek, az embrionális fejlődés időszakában pedig élettelennek. Az ellentmondás végső soron abból származik, hogy egy korai állapotot nem lehet később kifejlődő tulajdonságok alapján értelmezni – márpedig ez a „felülről lefelé” típusú extrapolációban eleve kódolva van. Az anyagcsere szabályozottsága valójában egy evolúciós folyamat során fejlődik ki, ezért egy primordiális szervezetben nincs értelme információs alrendszert keresni.

A szabályozás evolúciójáról részletesebben a következő fejezetben lesz szó (*anátman*).

Ebből már látszik, hogy az evolúció hagyományosan kémiai- és biológiai evolúcióra felosztott szakaszai összemosódnak, és bár vannak benne paradigmaváltások, komplexitás tekintetében egy kvázi folytonos fejlődési sort alkotnak. Ugyanez mondható el az élet biológiai paradigmájának fordulópontján: az emberi faj megjelenésével ugyanis egy új replikátor evolúciója indult útjára, ami a következő metaszinten társadalmi élőlények egész ökoszisztémáját termelte ki. A paradigmaváltás időszakában itt is áthatja egymást a régi és az új (gén, mém). Kezdetben úgy tűnt, hogy az ember nem több egy intelligens állatnál – az ún. mesterséges intelligencia (vagy inkább gépi intelligencia) kifejlődésével azonban egyre nyilvánvalóbbá válnak a különbségek. Így pl. az új replikátor élőlényei nem függenek a biológiai erőforrásoktól (szőlőcukor); a távolságokat áthidaló kommunikációjuk pedig lehetővé teszi, hogy különböző élőlények egyidejűleg létezzenek ugyanabban a térrészben. Ha az életet az evolúció teljes időtávjában tekintjük, nyilvánvalóvá válik, hogy morfológiai jegyek alapján nem lehet egységes meghatározást adni. Ugyanakkor vannak olyan sajátosságok, amelyek közös nevezőt jelentenek – minden paradigma minden fejlődési szakaszában.

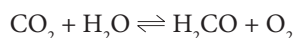
Tekintsünk tehát élőnek minden olyan nyílt rendszert (G), amely rendelkezik egy energia-betáplálást végző alrendszerrel (H), valamint egy energiaátalakító alrendszerrel (S). Az előbbiről már volt szó az enzimek kapcsán. Általában véve gépekről van szó, ami a külső energiaforrást információs entrópiává alakítja – nevezetesen az energiátranzformáló rendszer informatikai struktúrába – és ezzel energetikai értelemben fenntartja a rendszert (H). Az energiátranzformáló (= információfeldolgozó) alrendszert egy hálózatként határozzuk meg, melynek topológiája széles tartományban változhat: egy független pontthalmaztól (jelkészlet) a teljes gráfig bármi elképzelhető. Működését tekintve a lényeg, hogy a különféle anyag-energia inputokat (táplálék, üzenet) olyan módon alakítja át, hogy azzal fenntartsa a rendszer informatikai mintázatát (S).



Az energiaátalakító (információfeldolgozó) alrendszer lényegében megfelel a chemoton anyagcsere alrendszerének, az energiabetáplálást végző alrendszer pedig részben megfelel tethető a chemoton információs alrendszerével, a szabályozó funkció azonban nem feltétlenül követelmény. Ami a chemoton határoló alrendszerét illeti, a megléte esetleges. A chemoton esetében azért volt rá szükség, mert egy fluid információhordozó közegben (molekulák vizes oldatában) ezáltal biztosítható a rendszer integritása. Elképzelhetők azonban olyan körülmények, ahol nincs rá szükség – így pl. egy merev kapcsolatokkal rendelkező elektromechanikus szerkezet esetén, vagy éppen egy elektromágneses hullámokkal kommunikáló rendszernél, ahol nincs szigorúan meghatározva a komponensek térbeli helyzete. Vegyünk két példát a komplexitási skála két végéről, melyek a biológiai életkritériumoknak nem felelnek meg, a termodinamikai életkritériumoknak azonban igen.

### *Alfa és Ómega*

Az első egy egyszerű kémiai reakció, amely az élet kialakulásának egyik kulcslépése lehetett. Az ősföld körülményei között vízből és szén-dioxidból napfény hatására viszonylag nagy mennyiségben képződhetett formaldehid és oxigén az alábbi egyenlet szerint:



Ebben a reakcióban a később kifejlődő anyagcsere alrendszer két alapmotívuma ismerhető fel. Egyrészt a fotoszintézis, mint az élet legfontosabb energiamegkötő mechanizmusa, vízből és szén-dioxidból glükózt állít elő ( $\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_6$ ), ami a  $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_n$  általános összegképlettel leírható szénhidrátok csoportjába tartozik. Látható, hogy a formaldehid a szénhidrátok homológ sorának első tagjaként ugyanebbe a vegyületcsoportba tartozik ( $\text{C}(\text{H}_2\text{O})$ ), így a felső nyíl irányában lejátszódó reakció valószínűleg a fotoszintézis evolúciójának kiindulópontja lehetett. Az alsó nyíl irányában lezajló reakció ugyanezen gondolatmenet alapján az ún. sejt-légzés evolúciójának kiindulópontját képez-

hette, a sejt energiatermelő rendszere ugyanis a szénhidrátok elégetése során felszabaduló energiát építi be a már említett ATP molekulákba, a folyamat végterméke pedig, mint tudjuk a szén-dioxid és a víz.

A kétirányú nyíl ( $\rightleftharpoons$ ) azt jelzi, hogy a reakció fordított irányban is lejátszódik, ami energetikai vetületben egy szabadenergia ciklusra utal. A felső nyíl irányában – ami egyben a ciklus felszálló ágát képviseli (sífelvonó) – a Nap energiája nagy energiájú kötésekbe konvertálódik és ezzel létrejön a formaldehid molekula, mint nagy szabadenergiájú objektum. Ebben a lépésben ismerhető fel az energiabetápláló alrendszer az érintett molekulapályák, mint munkavégző mechanizmusok formájában. A formaldehid bizonyos idő után elbomlik, miközben többletenergiája a környezetébe távozik – az alsó nyíl irányában lezajló reakcióval tehát megvalósul a ciklus leszálló ága (lesiklás). Mivel ez az elemi ciklus rendszeresen ismétlődik, egy stacionárius működésű nyílt rendszerről beszélhetünk, melyben a formaldehid – mint anyag- és energiaforgalmat bonyolító informatikai mintázat – megfelel az energiátranszformáló alrendszernek.

Ami az információfeldolgozó rendszer hálózatos szerkezetét illeti: a formaldehid rendszer önmagában véve a molekula atomjainak kapcsolata révén egy hálózatot testesít meg, a metarendszer szempontjából pedig a formaldehid, mint elemi entitás, a következő szint jelkészletének egyik elemét képviseli. A következő fejezetben kitérünk arra is, hogy a formaldehid hogyan válhat a metaszinten megformálódó mintázatok (láncreakciók) részévé. Ez itt most annyiból érdekes, hogy az elemi reakciók a láncreakciók tagjaként is anyag- és energiaforgalmat bonyolító nyílt rendszerként működnek, vagyis élő rendszernek tekinthetők. Általánosságban úgy fogalmazhatunk, hogy egy élő rendszer minden alrendszere élőnek tekinthető, függetlenül attól, hogy rendelkezik-e információs alrendszerrel vagy sem. Így pl. az ember esetében élőnek tekintjük magát az egyedat, ezen belül pedig a szervezetünk minden szervét, a szerveink minden egyes sejtjét, és a sejtjeink anyagcseréjének minden egyes molekulaféleségét. Az élet tehát mind-

addig jelen van, amíg az utolsó molekulánk is megszabadul a többletenergiajától és visszatér a termodinamikai egyensúly állapotába. Ennek a megközelítésnek fontos világnézeti folyománya is van: hangsúlyossá teszi ugyanis azt a tényt, hogy egyetlen élőlény sem létezhet önmagában, hanem csakis energiaáramlási útvonalak, ill. hálózatok részeként.

Másik példánk a biológiai élet legmagasabb szintű entitása, az ökoszisztémák ökoszisztémája: a bioszféra. A bioszféra (GAIA) számos életjelenséget produkál (pl. anyagcsere, homeosztázis, evolúció), ugyanakkor Gánti há-



rom életkritériumából az esetében kettő nem teljesül: nem rendelkezik információs alrendszerrel, és nem rendelkezik határoló alrendszerrel – a bioszféra ebben a keretben pusztán anyagcsere alrendszerként létezik (tápláléklán-cok hálózata). A határoló alrendszer hiánya arra vezethető vissza, hogy az ökoszisztémák határai egybeesnek az életterük természetes határaival (sziget, tájegység, földgolyó), így a rendszer integritását biztosító struktúra létrehozására nem volt szükség. Az információs alrendszer hiánya nagyrészt ezzel az alaphelyzettel függ össze. A rendszert tápláló energia ugyanis a domborzatot többé-kevésbé egyenletesen befedő növényzeten keresztül kötődik meg, így nem áll fenn a rendszer „szökőkútról” való lepattanásának a veszélye. Ennek egy másik aspektusa, hogy az evolúció egyedüli

szereplőjeként nem áll versenytársak evolúciós nyomása alatt, így több olyan szelekciós hatás is kiesik, ami az alacsonyabb szintű életformákat stratégiai értelemben vett szabályozott működésre kényszeríti.

Az információs alrendszer hiányát illetően azonban mégsem ezek a meghatározó szempontok. A következő fejezetben (*anátman*) megmutatjuk, hogy az információs alrendszer kifejlődése a hálózatok központosulását előidéző termodinamikai folyamat eredménye. A legmagasabb szerveződési szinten a bioszféra egy primordiális élőlénynek számít, ahol még nem fejlődtek ki a szabályozás rendszerszintű hub-jai – a fejlődés azonban elkerülhetetlenül ebbe az irányba tart. Ha a bioszféra fogalmába a biológiai élőlényeken felül bele vesszük a már említett, nem biológiai természetű replikátor élőlényeit is, éppen napjainkban lehetünk tanúi a teljes rendszert kontrolláló információs alrendszer felépülésének (világkormány).

*A kezdetektől az evolúció első nagy paradigmaváltásáig ...*

A Föld keletkezésétől az első prokarióta sejtek megjelenéséig tartó időszakot nevezzük az élet keletkezésének. Ezt az időszakot két fejezetre szokták osztani: kémiai evolúcióra, valamint az ún. prebiológiai evolúcióra. Nézzük most meg, mi jellemzi ezeket az időszakokat a *fenntartottság* szempontjából. (Megjegyzés: Megtartottuk a kémiai-, ill. prebiológiai evolúció bevett elnevezéseit, szemléletünk szerint azonban, ezek alatt az élet különböző szerveződési szinteken zajló evolúcióját értjük.)

Az élet keletkezésének kutatása tulajdonképpen a történettudományok körébe tartozik, ráadásul egy olyan korszakról van szó, melynek nem maradtak fenn maradványai, így csak közvetett módszerekkel tudunk következtetni a megtörtént eseményekre. A prebiológiai evolúció tekintetében ilyen pl. a ma élő sejtek biokémiája, az önszerveződő rendszerek ugyanis egyfajta élő kövületként hordozzák magukban a történetiségük fontosabb állomásait. Magasabb szinten ugyanez figyelhető meg pl. az emlősök embrionális fejlődésében, ahol rendre felbukkannak a törzsfajlás mérőföldköveit jelző

életformák. Ami azonban a kémiai evolúciót illeti, ott teljes egészében az ősföld körülményeit modellező laboratóriumi kísérletekre, az ún. prebiotikus szintézisre vagyunk utalva.

A kémiai evolúciót rekonstruáló laboratóriumi kísérletek nyomán az a kép bontakozik ki, hogy az ősföld egyszerű vegyületeiből (víz, széndioxid, szén-monoxid, ammónia, metán, kén-hidrogén stb.), különféle külső energiaforrások hatására (UV sugárzás, elektromos kisülés, hőenergia, kavitációs energia stb.), valamint különféle szerves katalizátorok közreműködésével (agyagásványok, fémionok stb.) felépülhettek a biológiai élet alapvegyületei – nevezetesen a makromolekulák építőelemei (aminosavak, cukrok, lipidek, nitrogéntartalmú heterociklusok), valamint a makromolekulák kezdetleges formációi (polinukleotidok, polipeptidek, lipidmembránok).

Ezekre a reakciókra jellemző, hogy az energia közvetlenül és differenciálatlan módon lép kölcsönhatásba az anyaggal. Így például a korszakra jellemző erőteljes UV sugárzás azokon a pontokon nyelődik el, ahol ún. rezonanciafrekvencia alakul ki a sugárzás adott frekvenciája, valamint a megfelelő atom- és molekulapálya között (lásd még a híd és a menetelő katonák esetét). Mivel az UV spektrum többé-kevésbé folytonosnak tekinthető, az energia belépési pontjait végső soron a kiinduló vegyületek karaktere határozza meg, és pedig a molekulán belüli kötések szintjén. Így jönnek létre azok az aktivált molekulák (pl. formaldehid), melyek hajlamosak további reakciókban részt venni, és ezzel elindítani a biológiai alapvegyületek szintéziséhez vezető láncreakciókat. A teljes rendszer energetikáját és szerkezetét egy olyan sípálya hálózattal lehetne szemléltetni, ahol az egyes felvonóktól (iniciátor vegyületektől) elinduló pályák (láncreakciók) átfedik ill. keresztezik egymást. Figyelembe véve, hogy a vizes oldatban zajló reakciórendszereket nem kötik a sípályák térbeli korlátai, – vagyis bármely pálya kombinálódhat bármelyik másikkal – már csekély számú iniciátor molekula is óriási variabilitást generálhat. A biológiai alapvegyületek formájában megjelenő információs entrópia tehát végső soron a betáplált energia lecsengésének

a nyomvonalait jelzi. Mivel ezekben a láncreakciókban már az aktív molekulákban tárolt energia jelenti a hajtóerőt, ami néhány lépés után erodálódik, a láncreakciók hossza, ill. az azokban képződött vegyületek komplexitása korlátozott.

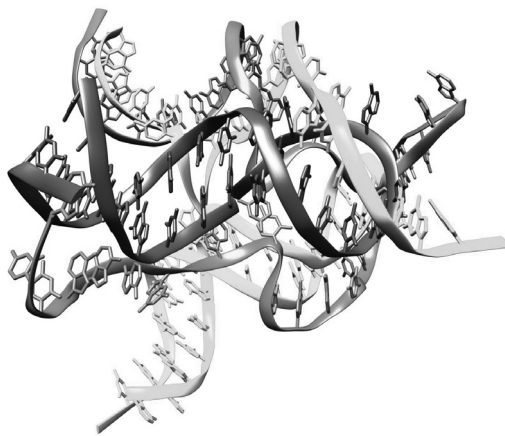
Felmerülhet a kérdés, hogy a már megképződött vegyületek a külső erőforrás hatására miért ne kerülhetnének ismét aktív állapotba, hogy aztán a komplexitás még magasabb fokára lépjenek? A válasz erre az, hogy az energia-abszorpció ugyan megtörténik, a komplexitás növekedésével azonban egyre nagyobb a valószínűsége annak, hogy ez a molekulák töredezéséhez vezet. Ebben nyilvánul meg a termodinamika II. főtétele, ami – mint tudjuk – az energia egyenletes eloszlásáról szól. A mechanizmus oldaláról a jelenség oka az, hogy az erő támadási pontja a molekula bármelyik kötését érintheti, beleértve az azok felszakadásához vezető reakciókat is, márpedig ezek energetikai okokból túlsúlyban vannak az építő jellegű reakciókhoz képest. Az tehát, hogy a kémiai evolúció milyen magas szabadenergia-potenciálra képes felemelni egy informatikai rendszert, eleve korlátozott az energiamegkötő mechanizmus differenciálatlan jellege okán.



A legkomplexebb vegyületcsoport, amit ez a mechanizmus ki tudott termelni, a nukleinsavak voltak: bizonyos agyagásványok felületén (montmorillonit) akár több száz nukleotid alegységet tartalmazó RNS láncok is polimerizálódhattak. Ez a fejlemény éppen elég volt ahhoz, hogy az evolúció szintet lépjen, és pedig egy fundamentális jelentőségű paradigma

megteremtésével – a nukleinsavak katalizátor funkcióba kerülése ugyanis a biológiai életformák négybilliárd éves fejlődése előtt nyitott kaput! De pontosan miről is van szó?

Tudjuk, hogy a nukleinsavak kémiailag a nukleotidok polimerjei (polinukleotidok), így létrejöttükkel először jelent meg az az információképző mechanizmus, ami az üzeneteket egy adott jelkészlet kombinálásával hozza létre. Másfelől pedig a nukleinsavak (ekkor még RNS molekulák), az enzimekhez hasonlóan hajlamosak arra, hogy gombolyag formába tekeredjenek fel, és ezzel a monomerek által bevitt oldalláncjai gyakorlatilag végtelen számú konstellációban találkozhatnak a gombolyag felületén. Az enzimek aktív centrumaihoz hasonlóan tehát az RNS gombolyagok felületén is kialakulhattak aktív helyek, vagyis az RNS láncok is katalizátor funkcióba kerülhettek (ribozimok). A nukleinsavak így önmagukon messze túlmutató jelentőségre tesznek



szert, hiszen katalizátor funkciójuk által olyan reakciók is hozzáférhetővé válnak, melyeket az egyszerű szerves katalizátorok nem tudnak kezelni, és ezzel megnyílik az út a sejtek anyagcsere alrendszerének kifejlődése előtt.

Kérdés azonban, hogy a ribozimok milyen energiát használtak a reakcióikhoz, hiszen ekkor még nem létezett a modern sejt energia-termelő rendszere, ami standard energiatöltetekkel (ATP) látta volna el őket. Márpedig a nagy energiájú szerves vegyületek előállításához energiára van szükség. A legkézenfekvőbb energiaforrás a környezet hőenergiája, ami

mindenhol jelen van és korlátlan mennyiségben áll rendelkezésre. Ennek a potenciálnak a munkavégzésre fordítása döntően azon múlik, hogy a munkadarabok fixen rögzíthető-e. Ha ugyanis a reaktánsok a megfelelő orientációban rögzíthetőek, – ahogy az az aktív centrumban történik – akkor már csak idő kérdése, hogy a hőmozgás ingadozása mikor biztosít egy olyan, extra nagy energiájú ütközést, ami képes a reakcióhoz szükséges prés-energia szerepét betölteni. Ez azt jelenti, hogy a katalizátor képes megcsapolni a környezet belső energiáját, és pedig nem csupán az aktiválási energia leküzdéséig, hanem akár endoterm reakciók kivitelezéséig is. A láncmolekulák mechanikája továbbá arra is alkalmas, hogy a felületükön lejátszódó egyszerű redoxi-reakciók energiáját közvetítsék (pl.  $\text{Fe}_2^+ \rightarrow \text{Fe}_3^+$ ) – ezen alapul az ősi kemoszintetizáló baktériumok anyagcsereje. A fokozatosan kibontakozó anyagcsere alrendszer később olyan közvetítő mechanizmusokat is kitermelt (vitorlabontás), ami a ribozimok, ill. enzimek számára közvetlenül nem hozzáférhető energiaforrásokat is elérhetővé tette. Ilyen mindenképp a fotoszintetizáló rendszer, ami a Nap elektromágneses sugárzását hasznosítja, valamint a sejt belső energiatermelő rendszere (mitokondrium), ami a biológiai eredetű, kémiai kötésekben tárolt energiát teszi hozzáférhetővé (szőlőcukorból ATP).

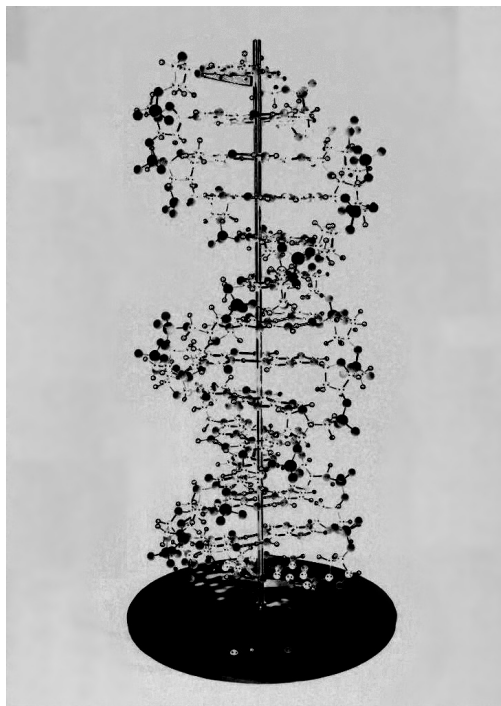
Fontos, hogy észrevegyük: a biokatalízis lényegében egy közvetítő mechanizmus, amely a környezet valamely energiaforrását képes információs entrópiává alakítani. Ebben egyfelől a bemeneti oldalon működő energia elnyelő, ill. átalakító mechanizmusok játszanak közre – ami hasonló ahhoz, mint amikor egy autó motorjában a dugattyú elmozdulása elnyeli az üzemanyag robbanásakor felszabaduló energiát. Másfelől pedig, a kimeneti oldalon egy olyan munkavégző mechanizmus működik (aktív centrum), ami képes az energiát a molekula adott pontjára összpontosítani. Ez döntő jelentőségű újítás a kémiai evolúció differenciálatlan energiatranszferéhez képest: így válik lehetővé ugyanis az egymásra épülő lépésekben történő fejlődés (önszerveződés), hasonlóan a szobrászok ragasztásos technikájához.



Amíg a kémiai evolúció időszakában a megkötött energia mennyiségét néhány iniciátor molekula energiaabszorpciós képessége határolta be, addig a prebiológiai evolúció biokatalizátorai, a „ragasztásos technika” által lényegében felső korlát nélkül teszik hozzáférhetővé a szerves vegyületek eseményterét. Ebből azonban nem következik az eseménytér teljes körű kifejeződése, az energia ribozimokon keresztül történő behatolása az eseménytérbe ugyanis már a darwini evolúció alapelveit követi (diverzitás, szelekció, öröklődés), melynek következtében az informatikai mintázatok specifikus útvonalak mentén épülnek fel. Végül soron ez a magyarázata az információ egyik alapvető tulajdonságának, melyről az előző részben, az információ fogalmának tisztázása során szó volt. Akkor tapasztalati alapon állapítottuk meg, hogy a mintázatok információtartalmának maximuma a Shannon skála köztes tartományába esik, vagyis az információtartalom tekintetében nem csak a jelkészlet diverzitása számít egy üzenetben, hanem karakterisztikus mintázatok jelenléte is. Nézzük meg, milyen rendezőelvek mentén alakulnak ki ezek a mintázatok!

... és a paradigmaváltás után

Ami a *diverzitás* kérdését illeti, a paradigmaváltásokra jellemző módon óriási hatékonysággal indul el a következő szerveződési szint elemeinek (jelkészletének) a kitermelése. A kezdetben véletlenszerűen szintetizálódó RNS láncok ugyanis széles spektrumban, átfogó módon látnak hozzá a szerves vegyületek szintéziséhez, létrehozva a természetes szelekció alapanyagát, melyből később kiválasztódhat a sejt anyagcsere alrendszere. Ezzel analóg jelenség a következő szerveződési szinten, a többsejtűek evolúciójának inicializáló szakasza (ediakara), amikor is az evolúció véletlenszerű tapogatózással kereste meg az élet legsikeresebb alapformáit, hogy a későbbiekben már csak ezek fejlesztésére „koncentráljon”. És végül, a társadalmi evolúció szintjén ennek a korszaknak felel meg a piacgazdaság időszaka, ami a vállalkozások szabadságának biztosításával hatékonyan segíti elő egy globális társadalmi konstrukció felépülését.



A tulajdonságok öröklődésében kezdetben nyilvánvalóan nem lehetett a sejtek genetikai apparátusára támaszkodni (mivelhogy nem létezett), a ribozimok véletlenszerű szintézise azonban valamilyen véges valószínűséggel a sikeres verziókat is újratermelte, és ez már elég lehetett a kiválasztódó tulajdonságok folytonosságának fenntartásához. A szelekció előrehaladásával ez a primitív mechanizmus egyre kifinomultabbá vált. Ha az oda vezető utat nem is, de a végeredményt ismerjük: az ún. templát-polimerizációs nukleinsavszintézis kifejlődése (amely során az új nukleotidlánc egy már meglévő minta komplementereként jön létre), nemcsak a tulajdonságok hatékony átörökítését alapozta meg, hanem a sikeres nukleinsav-szekvenciák stabilizálását is. Ez utóbbi erőteljes féket jelent a rendszer elemeinek további növelése szempontjából, erre azonban nincs is szükség, mivel a ribozimok replikátor funkcióba kerülése a paradigma vége felé következik be, a sejtszabályozás kifejlődése idején. Ezen a szinten a továbblépés elemi feltétele a sikeres stratégiák stabilizálása, mivel ezek képezik a következő szerveződési szint, a többsejtű szerveződés alapelemeit (jelkészletét).

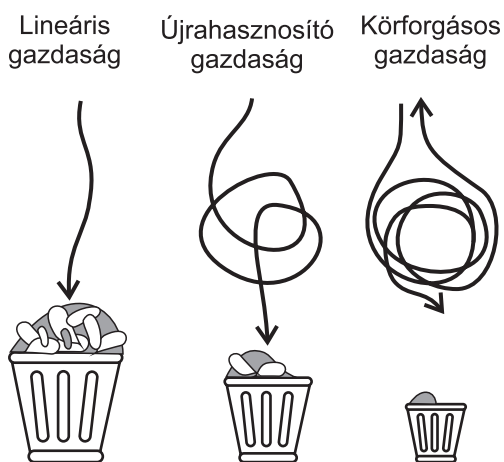
Témánk szempontjából (*anitja*) a három darwini alapelv közül talán a *természetes szelekció* kérdésköre a legfontosabb. A *diverzitás* és az *öröklődés* tényezői általában véve az energia betáplálását biztosító fenntartó mechanizmus tulajdonságaiból vezethetők le – jelen esetben az RNS katalizátorok szintézisével és működésével kapcsolatos tulajdonságokból. Erről eddig sok szó esett. A *természetes szelekció* azonban a konkrét mechanizmusokon felül álló, egyetemes rendezővel jelenít meg. Ennek megértéséhez idézzük fel az információ fogalmának energetikai aspektusát.

A szerves vegyületek eseménytere nem egy tombolacédulákkal teli kalaphoz hasonló, ahol minden cédula egyenlő eséllyel húzható ki, hanem egy olyan halmazról van szó, melynek elemei bizonyos értelemben egy „potenciáltér” meghatározott pontjain helyezkednek el. A szerves vegyületek ugyanis nagy szabadenergiájú objektumok, melyek mindegyikére hat a „termodinamikai gravitáció” (II. főtétel) erodáló hatása, és pedig az energiataralmukkal arányos mértékben. A sípálya modell megmutatta, hogy a mintázatok állandósága valójában a komponensek „keletkezésének és elmúlásának” stacionárius egyensúlyán múlik („ami befolyik, az rögtön kifolyik”). A ciklus fenntartásához pedig valamilyen munkavégző mechanizmusra van szükség: sípálya esetén ez a sífelvonórendszer, a sejtek anyagcseréjében pedig a biokatalizátorok (enzim, ribozim). Mindezt szem előtt tartva megállapítható, hogy a mintázatok magas potenciálon tartása – ami egyúttal a *szelekciós előny* legfőbb kritériuma – alapjában véve azon múlik, hogy a rendszer (1) milyen mértékben képes minimalizálni a veszteségeit, ill. (2) milyen mértékben képes maximalizálni az energiabetáplálást.

A veszteségek minimalizálásával (1) függ össze a reakciók zárt hálózatokba szerveződése (autokatalitikus ciklus). Mivel egy magas potenciálon lévő vegyület továbbalakítása jóval kisebb energiabefektetést igényel, mint ugyanezen termék zéró potenciálról történő felemelése, energetikailag kedvezményezett a láncreakciók kialakulása. Társadalmi szinten ugyanezt figyelhetjük meg, amikor a fejlesztések a kulturális örökség eredményeiről ru-

gaszkodnak el és nem kezdjük előlről a már meglévő tudások, ill. technológiák kialakítását. A következő lépésben a reakcióláncok zárt ciklusokba szerveződése evolúciós előnyt jelent a lineáris reakcióláncokkal szemben, az előbbi ugyanis rendkívül takarékos módon önmagába csatolja vissza a rendszer energiáját, míg az utóbbi kivezeti és ezzel önmaga felszámolását segíti elő. Társadalmi szinten ugyanez a kérdés az ún. lineáris gazdaság vs. körforgásos gazdaság dilemmájában.

Ami az erőforrások működésbe való bevonását illeti (2), itt a reakciórendszerek funkciójára vonatkozó szelekciós hatásról van szó. Általában véve minden olyan újítás előnyt jelent, ami növeli az erőforrások befogásának, ill. rendszeren belüli felhasználásának hatékonyságát. Az energiaközpontú fejlődés



Gazdasági modellek

legkézenfekvőbb módon a végeredmény felől, az eukarióta sejt habitusán keresztül szemléltethető. Az eukarióta sejt hálózatos szerkezetének legmagasabb szintű csomópontja a sejt-mag, ami bemenő- és kimenő kapcsolatain keresztül a teljes rendszert kontrollálja. Tudjuk, hogy a sejt-mag DNS állománya képezi a sejt információs alrendszerét, ami egyfelől fenntartja a sejt aktuális evolúciós stratégiá-

ját (szabályozás), másfelől pedig az evolúció letéteményese (másolódás/mutáció). A DNS történetileg az RNS katalizátorokból fejlődött ki, közben azonban megváltozott a funkciója. Egyfelől, a templát-polimerizációs nukleinsavszintézis kialakulásával a nukleinsavak replikátor funkcióba kerültek. Másfelől pedig a nukleinsav alapú fehérjeszintézis kifejlődésével az RNS láncok katalizátor funkciója kiszerveződött az enzimekre. Ezek a változások a vitorlabontás értelmében járultak hozzá a sejt anyagcseréjének differenciálódásához, ugyanakkor a DNS-mRNS-Riboszóma-Enzim-Szubsztrát útvonalon keresztül a nukleinsavak megőrizték a sejt erőforrásai feletti kontrollt (bővebben a következő fejezetben). A sejt energiagazdálkodása ugyanis úgy működik, hogy ahol megjelenik egy enzim (gép), ott automatikusan hozzárendelődik az energia is, mivel a sejt energiatermelő rendszere általános felhasználású pool-okban halmozza fel az ATP-t. Érdemes végiggondolni a társadalmi analógiákat is. A gazdasági vállalkozások hasonló módon kapnak hitelt (pénzt = energiát) különféle innovációikhoz a bankoktól, ill. befektetői csoportoktól. Vegyük észre, hogy a hitel fogalma, mint befektetésre szánt pénz, az erőforrások bővített újratermelésének elvét fejezi ki, összhangban a természetes szelekció erőforrásokra vonatkozó aspektusával. Az sem véletlen továbbá, hogy a pénz felett rendelkező gazdasági szereplők (pl. BlackRock) mára olyan, nemzetek felett álló hatalmi központokká nőttek ki magukat, melyek globális szinten képesek a világgazdaságot kontrollálni, ill. fejlődési irányait befolyásolni.

### *Hogyan tovább?*

Az eddigiek összegzéséként megállapíthatjuk, hogy egy élő rendszer (informatikai rendszer) léte két alapvető hatás eredménye. Egyik oldalról szükség van egy munkavégző mechanizmusra, ami a rendszer fenntartását biztosító energia betáplálásáról gondoskodik. Másfelől pedig létezik egy rendszertől független szelekciós hatás, ami az evolúciót az energiaforrásokra irányuló, pozitív visszacsatolású ciklusok kifejlődése felé tereli. Ez utó-

bi hatást az élőlényeknek valamilyen módon érzékelniük és kezelniük kell, különben nem tudnak megmaradni a „felszálló áramlatok” sodrásában. A továbbiakban az élet erre vonatkozó aspektusait vizsgáljuk meg (*anátman, súnjata*).

Tudati vetületben az energia motivációk és vágyak formájában jelenik meg, és különféle mentális konstrukciók közreműködésével, célszerű erő kifejtés által válik hasznos munkává. Érdemes elgondolkozni azon, hogy az életnek ez a fundamentális jelentőségű működése miért kapott a vallásokban negatív értelmezést? Így pl. a buddhizmusban a vágyakra a szenvedés gyökérokaként tekintenek, a szerzetesek szellemi praxisa pedig a világi tevékenységekről való lemondásra épül. Érdekes, hogy még a modern spirituális irányzatokra is jellemző a szellemit és az anyagit élesen szembeállító dualista gondolkodásmód – miközben egy olyan világban élünk, ahol a gyorsuló fejlődés egyre erőteljesebben veti fel a világi ügyeinkre vonatkozó felelősségvállalás kérdését.

Kérdés tehát, hogy létezhet-e olyan spirituális paradigma, ami a belülről kifelé irányuló erőfeszítést az élet szakrális, teremtő tevékenységeként fogja fel? Elképzelhető-e olyan létszemlélet, melyben a transzcendencia az evilági problémáink megoldását támogatja? Ez a kérdés nem csak a létünket fenyegető globális krízis okán merül fel, hanem egy mélyen szubjektív, egzisztenciális kérdésként is. Miért veszünk magunkra olyan identitásokat, mint a „szenvető lény” a „bűnös ember” vagy éppen a „beteg ember” képzetét? Ezek a tudat excentrikus, kibillent állapotait jelölik, az ezekre épülő módszertanok pedig mélyen beágyaznak minket negatív szerepeinkbe. Nagyon nem mindegy, hogy szenvedő/beteg/bűnös emberként imádkozom egy idealizált isteni hatalomhoz, vagy identitásomat a tudatosság középpontjába helyezem, és a belső erő és tisztánlátás képességeiből kiindulva határozom meg magam. A fenntartottság (*anitja*) szempontjából a különbség éppen annyi, mint fordítva ülni a lovon, vagy éppen irányba állni. A továbbiakban ennek a problematikának az értékrendbeli, valamint tudati (dimenzionális) aspektusait vizsgáljuk meg. 