

RENDSZER ÉS MODELL

Ujfaludi László

EKF Fizika Tanszék

Rendszerek

A *rendszer* általánosan ismert és kiterjedten használt fogalom, például a szoba, ahol tartózkodunk, rendelkezik fűtési-, esetleg légkondicionáló rendszerrel. Amikor utazunk, a közlekedési rendszert terheljük. Valamennyiünk szervezetében működik a vérkeringési- és emésztőrendszer, amelyek működését az idegrendszer szabályozza. Mit is jelent hát a "rendszer" fogalom? Hogyan lehetséges, hogy ennyi féle, egymástól különböző dologra ugyanazt a szót használjuk? A "rendszer" fogalmának értelmezését néhány, a könyvtárakban könnyen hozzáférhető enciklopédia alapján az alábbiakban idézzük.

1. "Természeti jelenségeknek, anyagi részecskéknél bizonyos törvényszerű összefüggések alapján egy zárt egészbe tartozó összessége." (*A Magyar Nyelv Értelmező Szótára*)
2. "Egymással meghatározott összefüggésben lévő elemek egységes egészet képező összessége. A rendszer jellegű objektum nem redukálható egyes elemeire és a közöttük fennálló egyes viszonyokra. A rendszer jellegű objektum sajátos egység a környezettel, többnyire más, magasabb szintű rendszer eleme, saját alkotóelemei pedig alacsonyabb szintű rendszert képeznek." (*Filozófiai Kislexikon*)
3. "Egymással meghatározott viszonyban lévő elemek egységes egészet képező halmaza. Alkatrészeinek kapcsolódási módja adja a rendszer szerkezetét. A rendszer, mint egész olyan integratív sajátosságokkal is rendelkezik, amelyeket alkatrészei (alrendszerei, elemei) nem mutatnak... A rendszerek hierarchiát alkotnak és alrendszerekre bonthatók." (*Jövőkutatási Fogalomtár*)
4. "Anyagi rendszer: azon, egymással kölcsönhatásban lévő anyagi testek összessége, amelyeket sajátosságaik tanulmányozása céljából elkülönítünk a környező világ többi tárgyától. Mindent, ami nem számít a rendszerhez, környezetnek nevezünk." (*Természettudományi Lexikon*)

A fenti definíciók együttesen fejezik ki a rendszer fogalom jelentését, külön-külön (talán a 3. definíciót kivéve) csak részleges tulajdonságokat világítanak meg. Lássuk most a problémának egy másik közelítését.

A fejezet elején említett rendszerek nagyon különböző alkotórészekből állnak: elektromos vezetőkekből, kapcsolókból, járművekből, izomszövetekből, idegrostokból, stb. A *rendszer* szó kapcsolatot teremt ezek között a különböző dolgok között, ily módon egy általános jelentést hordoz.

A *rendszer* fogalomnak egy mélyebb értelme is kiviláglik a fenti konkrét példákból: az, hogy ezek a rendszerek valamilyen módon működnek. Pl. a közlekedési rendszer embereket vagy árut szállít, a fűtési rendszer meleg vizet vagy levegőt szállít és fűti a hozzákapcsolt helyiségeket, stb. Vagyis minden egyes említett rendszerben fennáll egy anyagáramlás. Ennek természetes feltétele, hogy mindegyiküknek kell energiaforrással rendelkeznie. A fentiekhez hasonló rendszerek listáját és azok működésének leírását bárki folytathatja gondolatban; minél több példát gondolunk végig, annál inkább nyilvánvaló lesz, hogy valamennyi rendszer nagyjából a következő általános tulajdonságokkal jellemezhető:

- elemekből, részekből áll, amelyek között funkcionális kapcsolat van;
- szerkezet és szervezethez jellemző;
- működése során anyagáramlás történik;
- az anyagáramlás létrehozásához és fenntartásához a rendszer energiaforrással rendelkezik.

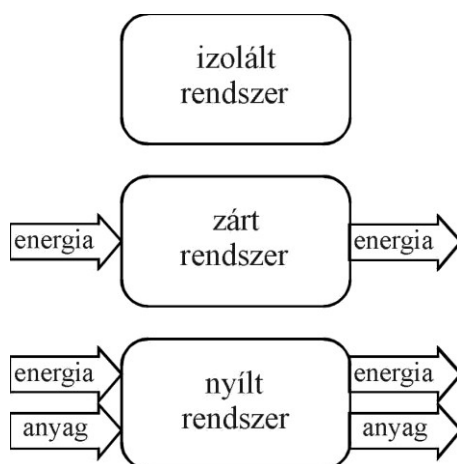
A rendszerekben tehát anyag- és energiaáramlás történik; komplex, magasabb szerveztségű rendszereknél ehhez még információáramlás is járul.

A környezeti rendszerek összetett termodinamikai rendszerek, amelyek működésének legáltalánosabb törvényeit a fizika fogalmazza meg. Másfajta szóhasználattal ezeket a rendszereket energia-rendszereknek is szokás nevezni, hangsúlyozva az energia fontosságát. Az alábbiakban a rendszerek néhány általános jellemvonását foglaljuk össze; az elemzések elsősorban környezeti rendszerekre érvényesek.

A rendszerek többsége jól körülhatárolható területen, vagy térfogatban foglal helyet. Ezt valamilyen határolás (más szóval a rendszer pereme) veszi körül, amelyen keresztül a rendszernek a környezettel való kapcsolata lejátszódik. Ilyen rendszer pl. egy sejt, egy vízgyűjtőterület, egy lombik a laboratóriumban, vagy akár egy felhő az égen (bár az utóbbi határolása meglehetősen bizonytalan).

A határoláson belül helyezkednek el mindeneke előtt a rendszer elemei, pl. atomok, molekulák, homokszemcsék, esőcseppek, vagy akár élőlények: nyulak, rókák stb., amelyek mind térben és időben léteznek. Minden elem rendelkezik egy sor tulajdonsággal és állapottal. Két vagy több elem között, vagy az elemek különböző állapotai között kapcsolatok, összefüggések állnak fenn, amelyek együttesen a rendszer szervezési sémáját alkotják. A rendszernek egy pillanatnyi állapotát úgy jellemezhetjük, hogy akkor annak összes elemei, azok egyes tulajdonságai és a közöttük lévő kapcsolatok függvényei meghatározott értékkel rendelkeznek.

Egy rendszerben lejátszódó folyamatok, illetve a rendszer minden egyes állapota erősen függ a határok tulajdonságaitól. Ebből a szempontból háromféle rendszert különböztetünk meg (**1. ábra**).



1. ábra

A rendszerek osztályozása környezetükkel való kapcsolatuk szerint

Izolált rendszereknél a rendszer és környezete között semmilyen kölcsönhatás nincs. (A termodinamikában az ilyen rendszereket gyakran zárt rendszereknek nevezik.) Ilyeneket csak laboratóriumban tudunk létrehozni, jelentőségük a tiszta, idealizált folyamatok vizsgálatában van.

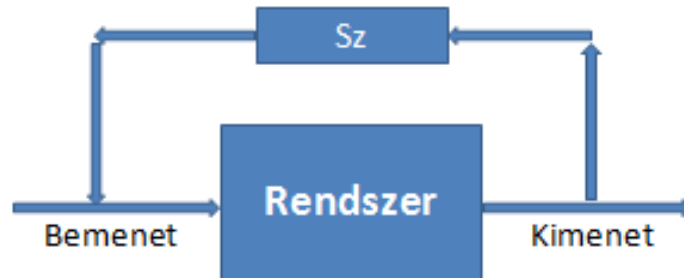
Zárt rendszerek határolásán át energia áramolhat a környezetbe és a környezetből a rendszerbe. Természeti rendszereknél szintén ritka.

Nyílt rendszerek esetén a környezet és a rendszer között energia- és anyagáramlás történhet a határoló felületen keresztül. Az anyagáramláson kívül itt kémiai energia, sugárzási energia és információ áramolhat. Lényegében az összes környezeti rendszer nyílt rendszer és működése az állandó energia- és anyagáramlás révén valósul meg.

A rendszerben bekövetkezett változások egy meghatározott *kezdeti állapotból* egy *végállapotba* való átmenet révén mennek végbe, eközben valamilyen *útvonalon* haladnak végig. A változásoknak ezt a sorozatát a rendszer *folymatainak* nevezzük.

A rendszerek irányítása

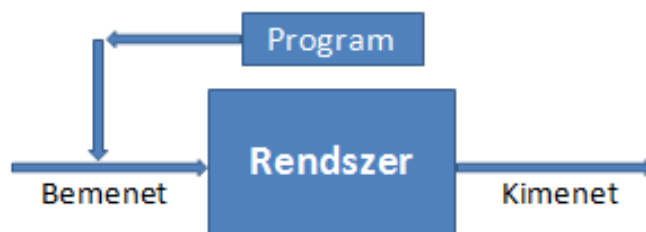
Az ember által létrehozott technikai rendszerek irányításának funkciói a következők: (a) döntés a rendszerben végbemenő folyamat további menetéről, (b) beavatkozás a rendszer működésébe, (c) az eredmény ellenőrzése. Az irányítás kétféle módon történhet.



2.ábra

Szabályozás (zárt hatásláncú rendszer-irányítás) Sz = szabályozó elem

Szabályozásnál (2. ábra) a rendszer bemenete és kimenete között a kapcsolatot egy szabályozó elem biztosítja és a kimeneti paraméterek változásától függően módosítja a bemenet paramétereit, ezen keresztül a rendszer működését. Ezt úgy is kifejezhetjük, hogy a kimenet és a bemenet között *visszacsatolás* van. Példa a szabályozásra a (rövidesen ismertetésre kerülő) termosztát és a forgalomirányító rendőr. Az útkereszteződésnél álló rendőr figyeli mindkét út forgalmát és szükség szerint egyik, vagy másik irányból jövő fogalmat engedi át.



3.ábra

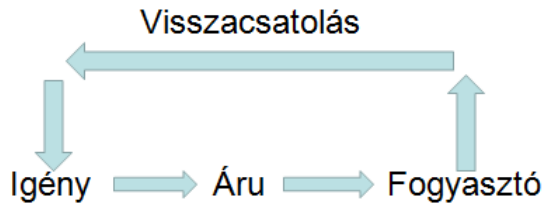
Vezérlés (nyitott hatásláncú rendszer-irányítás)

Vezérlésnél (3. ábra) egy meghatározott program irányítja a rendszer működését, de nem vesz tudomást a rendszer működésében bekövetkező változásról. A vezérlésre példa a számítógép-vezérlésű CNC esztergapad és a villanyrendőr. Az utóbbi az útkereszteződés forgalmának irányát előre megszabott időrendben váltogatja; ha a forgalomban jelentős változás következik be, nagy forgalmi dugók állhatnak elő. A vezérlés tehát csak addig működik jól, amíg a rendszer működése nem tér el jelentősen a programban feltételezett működéstől.

A 2. és a 3. ábra szemlélete alapján a szabályozást és a vezérlést zárt-, illetve nyitott hatásláncú rendszer-irányításnak is nevezik.

A fent elmondottak elsősorban technikai rendszerekre vonatkoztak, de hasonló, részint tudatos, részint spontán szabályozások és vezérlések, valamint azok hatásai megfigyelhetők egyes társadalmi és környezeti folyamatoknál is. Lássunk ezekre néhány példát.

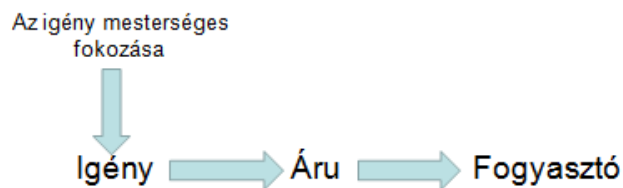
A hagyományos társadalmak fogyasztói szokásait a szükségletek reális felmérése általában megfelelő módon szabályozta. Az olyan józan megfontolások, mint pl. az „kell ez nekem?”, vagy „megengedhetem ezt magamnak?” visszacsatolást létesítettek az igény (a rendszer bemenete) felé és korlátozták a fogyasztást (4. ábra).



4. ábra

A szabályozás működése a régi társadalmak fogyasztási szokásaiban

A fogyasztói társadalomban a szabályozást vezérlés váltotta fel (**5. ábra**), amely kétféle módon működik. Egyrészt a reklámok, csábító hitel-ígéretet útján kiiktatják a fogyasztó józan megfontolását és szükségleteit, lehetőségeit meghaladó fogyasztásra ösztönzik. Másrészt a termékekbe beépített gyors tönkremenetel, vagy gyors technikai elavulás (pl. számítástechnikai eszközöknél) kikényszeríti az újabb vásárlást még akkor is, ha netán a fogyasztónál működik a józan megfontolás.



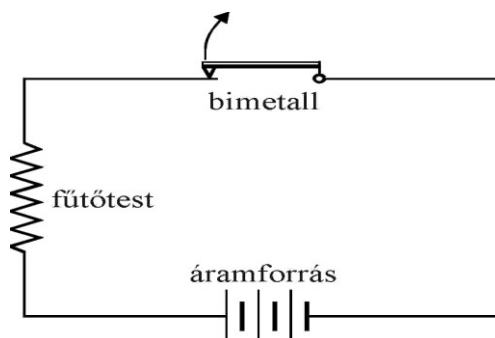
5. ábra

A vezérlés a modern fogyasztói társadalomban

A társadalmi-gazdasági folyamatokra általában szintén a vezérléses rendszer-irányítás a jellemző. Például a 2008-as válság idején a felelőtlen üzletpolitika miatt sok bank csődbe jutott. Az államok egy része nem hagyta, hogy a korábban érvényes tendencia érvényesüljön (vagyis hogy aki csődbe megy, az bezárhatja a bankját), hanem „tőke injekciókkal” kisegítette a bankokat a csődhelyzetből. Az eredmény: az államadósságok nagymértékű megnövekedése, miközben a bankok folytatták ugyanazt a felelőtlen működést.

Szabályozások a környezeti rendszerekben

A rendszerek többsége működés közben valamilyen viszonylag állandósult, egyensúlyi állapotokat valósít meg. A környezeti rendszerek esetében ez az egyensúly sohasem statikus (tehát állandó paraméterekkel jellemezhető), hanem egy ún. dinamikus egyensúlyi állapot, amely egy közelítőleg állandó közéérték körüli ingadozásokból áll. A közéértéktől történő szélsőségesen nagy eltérést a **negatív visszacsatolás** mérsékli.



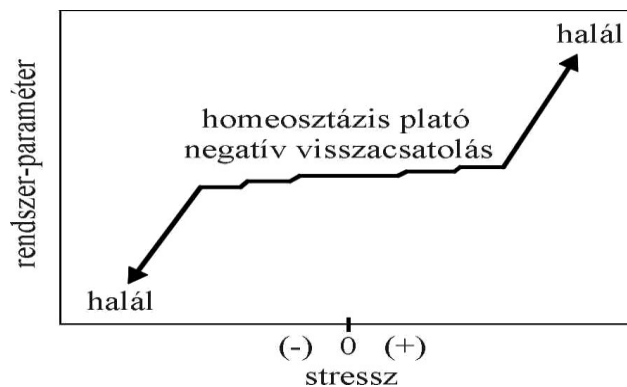
6. ábra

A negatív visszacsatolás modellje: a termosztát

A negatív visszacsatoláson alapuló szabályozás legegyszerűbb példája a termosztát (6. ábra). Az itt ábrázolt termosztát legfontosabb eleme egy bimetall, amely a hőmérséklet emelkedésekor meggörbül és a kapcsolót nyitja. Ha a hőmérséklet időközben lecsökken, a bimetall visszanyeri eredeti alakját, zárja az áramkört és a fűtés újra indul. A hőmérséklet tehát nem szigorúan állandó értéken áll, hanem egy állandó érték körül ingadozik.

A természetben is működnek ilyen termosztátok. A légkör hőmérsékletének növekedésével nő a párolgás. A pára egy idő után felhőt képez, a felhők viszont visszaverik a beérkező napsugárzás egy részét, ezáltal csökken a levegő hőmérséklete. Hosszabb időtávon az ún. biogeokémiai ciklus játssza a termosztát szerepét. A hőmérséklet növekedésével nő azoknak a reakcióknak a sebessége, amelyek szén-dioxidot vonnak ki a légkörből, ezáltal csökkentik az üvegházhatást és csökken a légkör hőmérséklete.

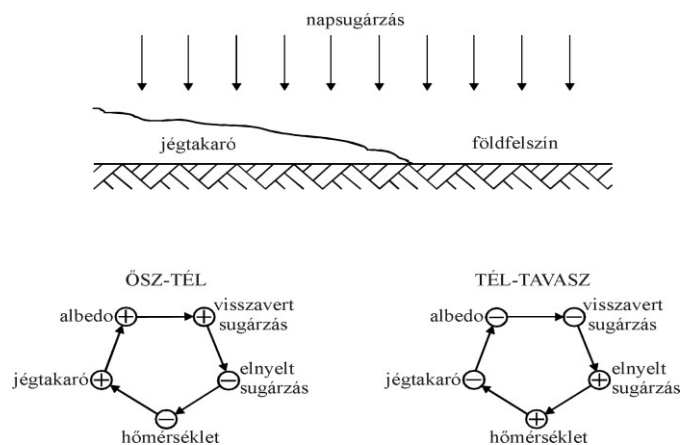
Egy másik példa a negatív visszacsatolásra az élőlények ún. homeosztázisa. (A *homeosztázis* az élőlényeknek az a képessége, hogy a külső paraméterek viszonylag tág határok közötti változása ellenére belső paramétereiket állandó értéken képesek tartani.) Az itt érvényesülő tendenciákat a 7. ábrán vázoltuk.



7. ábra

Az élőlények homeosztázisa

A koordinátarendszer vízszintes tengelyén egy külső stressz (pl. hőmérsékletváltozás, pH-változás, stb.) mértékét, a függőleges tengelyen az élő szervezet egy belső paraméterének (pl. testhőmérséklet, gyomorsav pH-ja, stb.) változását ábrázoltuk. A stressznek egy bizonyos intervallumában a működés a homeosztázis-platóval jellemezhető. Ebben az esetben a negatív visszacsatolás a stabilitást biztosítani tudja. A stressz szélsőséges értéke (pl. túlságosan magas, vagy alacsony hőmérséklet) esetén azonban a stabilitás már nem biztosítható tovább, a szervezet működése rohamosan eltávolodik a normálistól; szélsőséges esetekben ez az egyed halálát is jelentheti. Ebben a tartományban már **pozitív visszacsatolás** érvényesül, vagyis a működés paraméterei egyre nagyobb mértékben eltérnek az egyensúlyi állapotától.

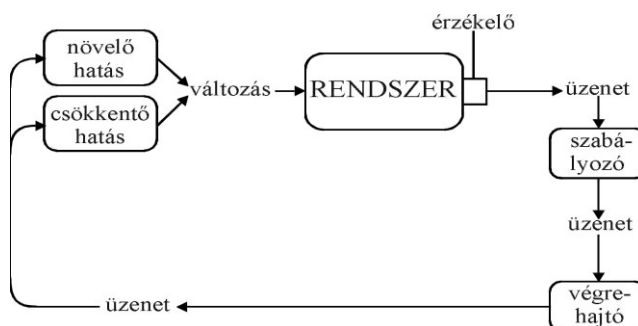


8. ábra

Jéggel borított területeken a hőmérsékletet pozitív visszacsatolás szabályozza

Jéggel borított felszín (pl. gleccserek) esetén a hőmérséklet mindkét irányban **pozitív visszacsatolással** változik, a ciklikus folyamat önmagát erősíti és a változás egyre nő (**8. ábra**). Tegyük fel, hogy kiinduláskor a légköri hőmérséklet csökken (pl. az ősztél évszakováltáskor). Ennek hatására a jégtakaró mérete nő. A jéggel borított területek növekedése az albedo növekedését eredményezi, vagyis nő a visszavert sugárzás hányada. Emiatt a hőmérséklet a felszínen tovább csökken, ami a jégtakaró további növekedését eredményezi (bal alsó ábra). Az ellenkező esetben (pl. a tél-tavas átmenetkor) ugyanez a folyamat fordított előjellel megy végbe: a hőmérséklet növekedésével a jégtakaró mérete csökken, ez az albedo csökkenését eredményezi, tehát csökken a visszavert, nő az elnyelt sugárzás mértéke, ami a hőmérséklet további emelkedését okozza. A jobb alsó ábrának megfelelő pozitív visszacsatolás jön létre jelenleg egyes sarkvidéki területeken – elsősorban az Északi-tengeren – a globális felmelegedés következtében.

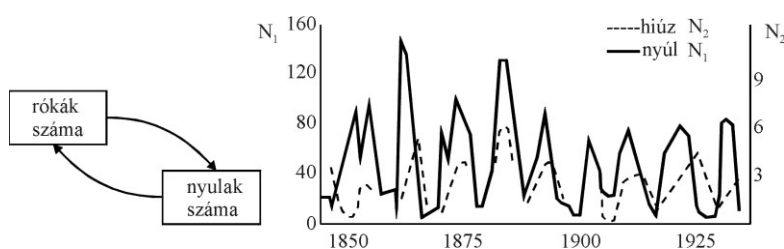
A környezeti rendszerek szabályozását a **9. ábrán** vázolt blokkdiagram alapján magyarázhatjuk. A rendszer részét képező receptor érzékeli a külvilág valamilyen jellemző paraméterét. Ennek értékétől függően üzenetet továbbít egy szabályozó elemnek, ahonnan további üzenet halad a végrehajtó elemhez. Ez utóbbi a változás jellegétől függően az adott paraméter növekedését, vagy csökkenését kezdeményezi a rendszeren belül.



9. ábra

A szabályozás működési diagramja

Bonyolult szabályozási folyamatok működnek egy ökoszisztémán belül, pl. két élőlénycsoport egymásra hatásakor. A **10. ábrán** egy ragadozó-zsákmány rendszer folyamatait mutatjuk be. A nyulak populációjának növekedése növeli a rókák populációját, a rókák számának növekedése viszont a nyulak számának csökkenését eredményezi (baloldali ábra).



10. ábra

Populációk egymásra hatása egy ragadozó-zsákmány rendszerben

Ha az egyedszámok változását az idő függvényében ábrázoljuk, a jobboldali ábra szerinti periodikus változást kapjuk (az ábra grafikonja Kanadában a prémvadászok által beszolgáltatott hiúz- és nyúlprémek számának ingadozását ábrázolja 1840-től 1930-ig). Nyilvánvaló a grafikonok menetéből a két faj szoros kölcsönhatása.

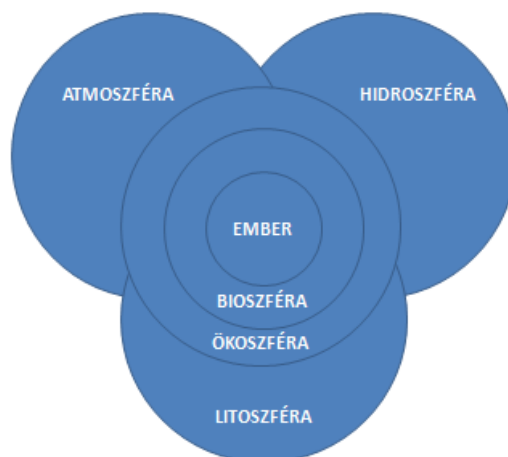
Összetett rendszerek

Egy rendszer a peremén keresztül kölcsönhatásban van környezetével. Egy épület, amelyet télen fűtenek, hőleadás révén megváltoztatja a környezet mikroklímáját. Egy gépkocsi peremét – látszólag – jól definiálja a kocsiszekrény. A szélcsatorna vizsgálatokból azonban isme-

retes, hogy a mozgó járművet körül veszi egy lamináris és egy turbulens határréteg, amelyek együtt mozognak a járművel. Ezek a határrétegek a rendszerhez és a környezethez is tartoznak. Tehát a rendszer pereme nem mindig definiálható pontosan.

Összetett rendszerek általában alrendszerekre bonthatók, az alrendszerek ismét további alrendszerekre és így tovább. Végül eljutunk a rendszer elemeihez, amelyek már nem bonthatók tovább.

Az emberi társadalom a természet része. Az élettelen környezet (atmoszféra, hidroszféra, litoszféra) alrendszere az ökoszféra, amely magában foglalja a bioszférát. Az emberiség a bioszféra része, annak alrendszere (11. ábra). A rendszerelmélet szerint a zavartalan működés feltétele, hogy egy rendszer és annak minden alrendszere azonos működési stratégia szerint működjön. A társadalmi folyamatok azonban – különösen az ipari forradalom óta – a természettől idegen elvek szerint működnek.



11. ábra

Az ember és a természeti rendszerek kapcsolata

A természeti folyamatokra a *szabályozás* jellemző, vagyis az események visszahatnak a kiváltó okokra; a változásokat csökkenteni igyekeznek a *negatív visszacsatolás*. A társadalom – abban a tévhitben, hogy az ember a természet fölött áll – a természettel való kapcsolatában szabályozás helyett a *vezérlést* valósította meg, vagyis az általa okozott hatásokat ellenhatásokkal igyekeznek mérsékelni. A számtalan lehetséges példa közül csak egyet említünk. A természet anyagforgalma *ciklikus*: a lebontó szervezetek révén minden újra hasznosul, nincs hasznavetetlen hulladék. A társadalmi termelést *lineáris* folyamatok jellemzik: a hasznos termékeken kívül mindig jelentős mennyiségű, hasznavetetlen hulladéktömeg jön létre. Az ellenhatások tipikus példája nyilvánul meg ennek kezelésében: ahelyett, hogy mérsékelnénk a hulladék mennyiségét, vagy újra hasznosítanánk, szeméttételeket építünk, amivel jelentős légszennyezést idézünk elő.

Rend, rendezetlenség, entrópia

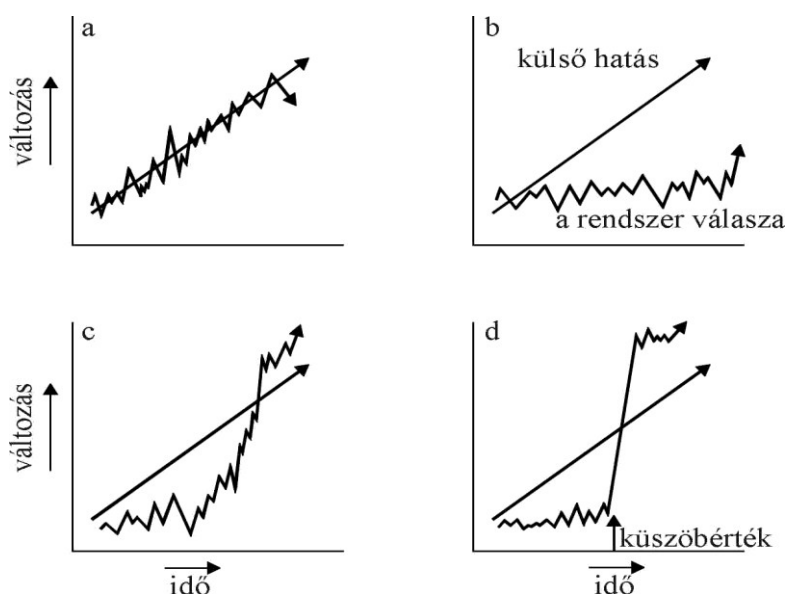
A sok elemből álló, összetett rendszerek elemeinek rendezett, vagy rendezetlen állapotát a fizikában az entrópia fogalmával fejezik ki. Minél rendezettebb egy rendszer, annál kisebb az entrópiája és fordítva: a rendezetlen állapotú rendszerek entrópiája magas. Most már csak a rendezettség, ill. a rendezetlenség fogalmát kell tisztázni. Ha egy rendszer rendezett, akkor érzékeny arra, ha két tetszőleges kis térfogatelemét felcseréljük; rendezetlen rendszerek az ilyen hatásra érzéketlenek.

Például képzeljünk el egy tartályba zárt homogén, állandó hőmérsékletű és nyomású gázt. A gázmolekulák a tartályban egyenletesen oszlanak el, tetszőleges két térfogatelem felcserélése a gáz állapotában semmilyen lényeges változást nem eredményez. Ebben a rendszerben a részecskék (a rendszer elemei) rendezetlenül helyezkednek el, véletlen jelleggel mozognak ide-oda, a rendszer entrópiája nagy. Ha egy élő sejt két kicsiny térfogatelemét cserélnék fel, pél-

dául a sejtfal és a sejtmag kicsiny részeit, akkor a sejt működésében igen nagy zavarok keletkeznek, a sejt akár el is pusztulhat. A sejt és az élő anyag igen magas fokon rendezett, alacsony entrópiájú rendszert alkot. Az ilyen rendszereknek igen nagy az információtartalma; ez csak energia befektetés árán valósítható meg. Az energiát a rendszer csakis a környezetéből képes felvenni, az alacsony entrópiájú, magas rendezettségű rendszerek ezért csakis nyílt rendszerek lehetnek.

Linearitás, nemlinearitás

Tartós külső hatásokra a rendszerek különbözőképpen reagálhatnak. Ha a rendszerben lejátszódó változások (a rendszer "válasza") arányos a külső hatás nagyságával, akkor a rendszert lineárisnak nevezzük (**12a** és **12b** ábra). Természeti rendszerek között ez igen ritka. A környezeti rendszereket általában a nemlinearitás jellemzi.



12. ábra

Lineáris és nemlineáris rendszerek

Már az olyan viszonylag egyszerű folyamatoknál, mint egy kiterjedt jégtakaró olvadása, jelentős nemlineáris hatások lépnek fel. Ha például mínusz 20 C°-ról indulunk, és a hőmérséklet nő, 0 C°-ig a jégtakaró tömege állandóan nő, az alatta lévő (a nagy nyomás miatt 0 C° alatt is keletkező) olvadék víz mennyisége nem változik jelentősen. 0 C° környezetében azonban a jégtakaró olvadás miatti méretcsökkenése egyre gyorsabbá válik és az olvadékvíz mennyisége rohamosan nő. A változás közelítőleg a **12c** ábra szerint játszódik le.

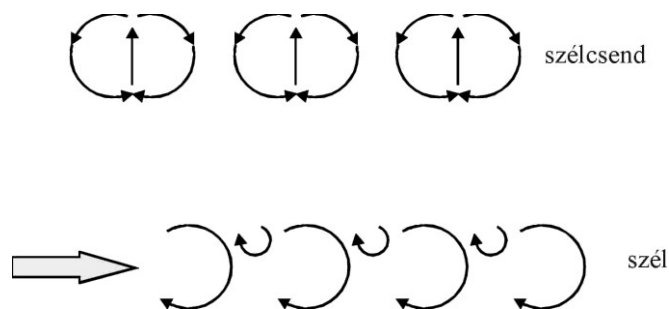
Az ilyen jellegű változások még markánsabban jelennek meg a **12d** ábrán. Az ott ábrázolt folyamatban a külső hatás növekedésére egy küszöbérték eléréséig a rendszer alig észrevehetően reagál. A küszöbérték elérésekor a rendszer valamely paramétere drámai módon megváltozik és egy, az előzőtől jelentősen eltérő állapot következik be. Hasonló folyamat játszódik le pl. savas esők által érintett területeken. A természetes vizek és a talaj ún. puffer-hatása miatt eleinte jelentős mennyiségű savas csapadék sem változtatja meg azok pH-értékét. Amikor azonban a puffer-kapacitás kimerült, a pH-érték rohamosan csökken (az ábra szerinti esetben a savasság nő), és rövidesen jelentkeznek ennek káros mellékhatásai. A környezeti rendszerek kémiai átalakulásaiban sok ilyen veszélyes, előre nem látható, hirtelen változás játszódhat le. Ezt a hatást váratlan jellege miatt gyakran kémiai pokolgép-effektusnak (chemical time-bomb) nevezik. Szomorú történeti példája a **12d** ábrával jellemezhető környezeti katasztrófának az a halpusztulás, amely az USA-ban lévő Clear-tóban játszódott le 1962-ben; ez egy-

ben a DDT által okozott környezeti károk egyik mintapéldája lett. Korábban a környező mezőgazdasági területeken nagy mennyiségű DDT-t használtak rovarirtó szerként. A vegyszer a természetes vizekkel a tóba szivárgott, majd a halak szervezetébe is bekerült (különösen gyorsan felhalmozódott a ragadozó halak testében). Kezdetben semmilyen hatás nem mutatkozott, mivel a DDT a test zsírszövetébe épül be. Később azonban - táplálékhiányos évszakok idején - a halak szervezete a zsírszöveteket kezdte felhasználni, ekkor a felhalmozódott DDT a szervezet anyagcsere-rendszerébe került és toxikus hatása következtében tömeges halpusztulás következett be.

Önszabályozó rendszerek

A természetben sokféle önszabályozó rendszer létezik. Ilyen például a homokdomb növekedése. Ha egy vízszintes felületre vékony függőleges csövön át homokot szórunk, kúp alakú homokdomb keletkezik, amely folyamatosan növekszik mindaddig, amíg a homok adagolását folytatjuk. Eközben a kúp felülete kisebb-nagyobb változásokon megy keresztül, átmenetileg lavinaszerű homokfolyások alakulnak ki, amelyek vándorolnak a felület mentén. A kúp szöge azonban állandó marad, bármilyen magasra építjük is a dombot.

A földfelület különböző fedettségű (vagyis különböző albedójú) területei a napsugárzás hatására különbözőképpen melegszenek fel. A felmelegedett felszínről induló konvektív légáramlás rendszere ilyenkor úgy alakul ki, hogy a felfelé áramlás mellett spontán módon lefelé irányuló áramlási sávok is kialakulnak és a rendszer önszabályozóvá válik. Az ily módon kialakuló cirkulációs cellákat Benard-féle celláknak nevezzük; a szélcsend és szél esetén kialakuló cellákat a **13. ábrán** ábrázoltuk. (Természetesen a valóságos cellák az ábrázoltnál jóval szabálytalanabbak.)



13. ábra

A Benard-féle instabilitások

Önszabályozó rendszer az élő sejt és az élő szervezetek – gondoljunk testünk különböző szabályozó funkcióira (testhőmérséklet, vércukorszint, a gyomorsav pH-ja, stb). A Föld bioszférája is önszabályozó rendszer, amely a Nap sugárzó energiájának felhasználásával biztosítja önfenntartó funkcióinak folyamatos működését. *James Lovelock* Gaia-elmélete szerint a bioszféra és az élettelen természeti környezet együttesen alkot egy grandiózus önszabályozó rendszert. Ennek működése során az élővilág és az élettelen környezet egymásra hatása stabilizál egy sor környezeti paramétert, amelynek eredményeképp az élővilág számára kedvező létfeltételek jönnek létre. Gaia szabályozó funkciói közül itt csak kettőt említünk meg: a légkör összetételének hosszú távú stabilitását és a tengerek sótartalmának állandóságát.

Kaotikus rendszerek

Edward Lorentz amerikai meteorológus néhány évtizede számítógépes időjárási előrejelzést készített a meglévő meteorológiai adatok alapján. Igen kismértékben megváltoztatva a bemeneti adatokat, a programot újra lefuttatta és meglepetve tapasztalta, hogy a végeredmény – a másnapra kapott előrejelzés – igen nagy eltérést mutat az előzőtől. Az olyan rendszereket,

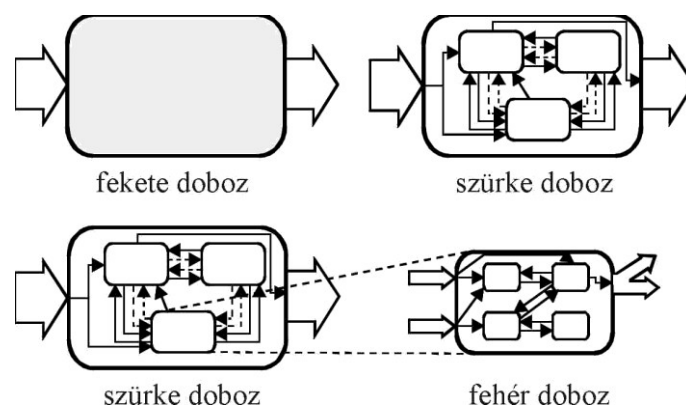
amelyek működése nagyon érzékeny a kezdeti feltételekre, kaotikus rendszereknek nevezzük. Ezek vizsgálata az utóbbi évtizedekben külön tudományággá szélesedett, egyre többet tudunk a kaotikus rendszerek tulajdonságairól. Bebizonyosodott pl. hogy egyes élő rendszerek, életközösségek is kaotikussá válhatnak, különösen hajlamosak erre a homogenizált (monokultúra) rendszerek; a heterogén, nagy biodiverzitású rendszerek sokkal kevésbé. Az önszerveződő rendszerek a rend és a káosz határán működnek.

(A kaotikus rendszerek működésének igen egyszerű és szemléletes példája a függőlegesen hegyére állított ceruza. Ebből a helyzetéből elengedve a ceruza – minden igyekezetünk ellenére – mindig más irányba dől el annak ellenére, hogy a kiinduló helyzet mindig közel függőleges.)

Modellek

A "modell" szó és a hozzá tartozó fogalom közismert és kiterjedten használjuk a köznapi életben. Általános jelentése szerint közelítőleg a "másolat", "idealizált kép", vagy "szemléltető eszköz" fogalmak a legközelebbi megfelelői. Tudományos szempontból a modell fogalom jelentése sok tekintetben ezekhez hasonló. A modell segítségével ui. a valóságot, vagy annak egy részét mindig leegyszerűsítjük, idealizáljuk, esetleg annak szemléletes képét adjuk. Pl. képzeljük el egy épület makettjét. Ez kizárólag a külső megjelenés szemléltetésére szolgál. Arra azonban már nem alkalmas, hogy az épület lengéseit vizsgáljuk vele különböző szélességek esetén. Építhetünk egy olyan modellt, amely geometriailag az épület pontos kicsinyített mása, és megfelelő konstrukció esetén ez a modell már alkalmas lehet a fenti feladat megoldására is. (Ugyanígy viszonylik egy match-box autómodell az autógyár szélszatórnájában vizsgált modellhez, amelyen egy új karosszéria-típus légellenállását vizsgálják.) A modelleket több szempont szerint osztályozhatjuk.

Teljesítőképessége szerint a modell lehet: fekete doboz modell, szürke doboz modell és fehér (vagy átlátszó) doboz modell (**14. ábra**).



14. ábra

A modellek típusai teljesítőképességük szerint

- A **fekete doboz modell** esetén nem ismerjük a modell (ill. az általa leképezett rendszer) belső felépítését, működését, csak a bemenetet és a hozzá tartozó kimeneteket. Ebben az esetben a modell segítségével a várható eseményekre csak ismert input-output empirikus kapcsolatok alapján tehetünk előrejelzéseket. (Ide sorolhatók az olyan régi időjárás-előrejelzések, mint pl. az, hogy ha az ég alja este vörös, akkor másnap szeles idő várható, vagy a periodikusan jelentkező természeti események előrejelzése, pl. egyes napfogyatkozások régebbi előrejelzése azok periódusidejének ismerete alapján.)

- A **szürke doboz modell** esetén a modell működéséről is vannak ismereteink, de azok még nem teljes körűek. Ide sorolhatók a különböző hidrológiai modellek, vagy a jelenlegi időjárás-előrejelzési modellek. A modell által kapható előrejelzések megbízhatósága elég nagy, de nem 100%.
- A **fehér (vagy átlátszó) doboz** modell a vizsgált jelenségről teljes körű ismeretet jelent, a modell által nyerhető előrejelzések megbízhatóak. Ilyen modellek általában csak technológiai berendezések esetén képzelhetők el. Itt sem 100% az előrejelzés megbízhatósága, mert nem lehet előre jelezni olyan váratlan eseményeket, mint pl. anyaghibából eredő törések, üzemzavarok stb. Egyesek szerint fehér doboz modellek csak abban az értelemben léteznek, amennyiben összetett **folyamatok** egyes részfolyamatairól tökéletes képünk lehet és akkor ennek a részfolyamatnak a modellje tekinthető fehér doboz modellnek, míg a folyamat egészét tekintve csak szürke doboz modellről beszélhetünk.

Működésük szerint megkülönböztetünk fizikai modelleket, és eszmei modelleket.

- A **fizikai modellek** valamilyen anyagokból felépített, kézzel fogható eszközök, berendezések, amelyek egy rendszer bizonyos folyamatairól megfigyelés, vagy mérés útján megbízható információkat adnak. Ilyenek pl. az autógyárakban használt karosszériamodellek, amelyeket szélesatornáknak vizsgálnak, vagy pl. egy folyószakasz kicsinyített áramlási modellje. A fizikai modellek egyik változata az ún. **analóg modellek**, amelyekben a vizsgálandó fizikai folyamatot egy másik, mérés technikailag könnyebben kezelhető folyamattal helyettesítünk. Ilyen pl. az áramlások vizsgálatára használt elektromos analóg modell, amelyben a valóságos áramlási probléma várható paramétereit egy elektromos modellben, a jóval könnyebben mérhető elektromos paraméterek alapján határozzuk meg.
- Az **eszmei modellek** olyan modellek, amelyeknek nincs kézzel fogható fizikai megjelenése. Két kategóriát különböztetünk meg:
 - a **kvalitatív modellek** valamely természeti folyamatra vonatkozó elvi magyarázatokat, a folyamatok minőségi értelmezését tartalmazzák. Számszerű előrejelzést nem adnak, legfeljebb a várható folyamatok trendjét és a paraméterek nagyságrendjét adják meg (pl. a légköri modellek);
 - a **kvantitatív modellek** segítségével pontos előrejelzést adhatunk a vizsgált folyamat paramétereit illetően (pl. egy korszerű számítógépes időjárási modell előrejelzi, hogy másnapra mekkora hőmérséklet, hány mm csapadék várható).

A vizsgált folyamat időbeli lefolyásától függően beszélhetünk időtől független, vagy **stacionárius modellekről**. Ezekben olyan jelenségek vizsgálhatók, amelyek végbemenetele az idő függvényében nem változik. Az olyan modelleket, amelyek időben változó jelenségek vizsgálatára alkalmasak, **nem-stacionárius** (tranzien) modelleknek nevezzük.

A vizsgált folyamat színterének geometriai kiterjedése szerint beszélhetünk **egy-, két- és háromdimenziós** modellekről.

- Ha a vizsgált jelenség csak az egyik (pl. az x) térkoordinátától függ, akkor modellünk egydimenziós, pl. abban az esetben, ha a szennyezettség alakulását egy folyó hossza mentén vizsgáljuk.
- Ha a paraméterek változását két térkoordináta (pl. x és y) függvényében vizsgáljuk, két-dimenziós modellre van szükségünk, pl. ha egy folyó szennyezettségét hossz- és keresztirányban is vizsgáljuk.
- Ha a változások mindhárom térkoordináta irányában jelentősek lehetnek, akkor vizsgálatuk háromdimenziós modellt igényel, pl. az előző eset azzal a különbséggel, hogy a szennyezés mértékét a mélység függvényében is vizsgáljuk.