NÁNAI LÁSZLÓ

A fizikai törvények univerzális jellegéről

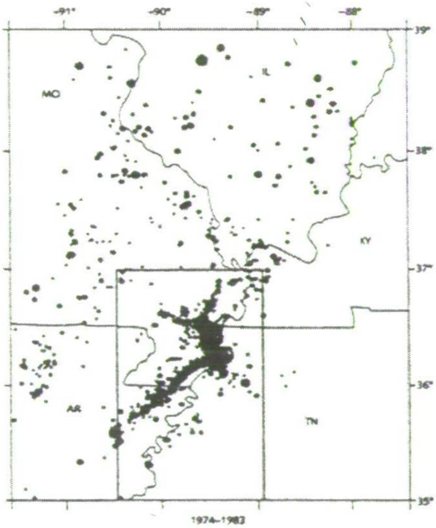
ALKALMAZOTT TERMÉSZETTUDOMÁNYI INTÉZET

önszerveződő, komplex, kritikus, fraktal, önhasonló

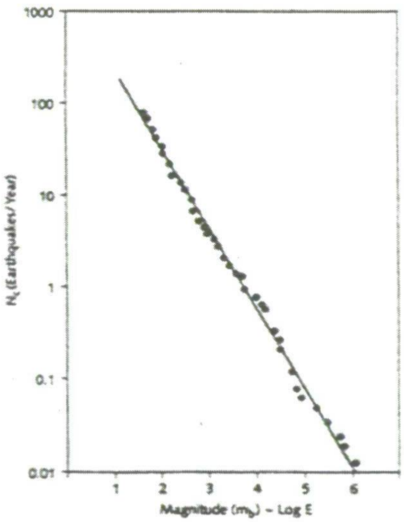
A körülöttünk levő világ a megfigyelhetőség szinte minden skáláján bonyolult, komplex, összetett képet mutat. Ugyanakkor néhány generális elemre alapozott fizikai törvény képes kielégítően leírni e rendszerek sokszor kritikus viselkedését. Az alábbiakban néhány példán keresztül bemutatjuk a törvények eme univerzális jellegét.

A fölrengések gyakorisága

Régi megfigyelés, mondhatnánk mindennapi tapasztalat, hogy a földrengések gyakorisága és erőssége (magnitúdója) között összefüggés van. Ritkák a nagyon pusztító földrengések, míg sokkal gyakoribbak a gyenge földrengések. Tekintsük az 1.a és 1.b ábrákat.



1.a ábra
A New Madrid (USA) környékén 1974–1983 között bekövetkezett földrengések amplitúdó szerinti eloszlása

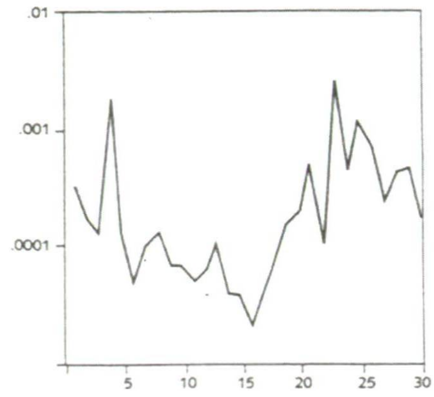


1.b ábra
Az adott tartományba eső földrengések eloszlása a magnitúdó függvényében a kétszeres logaritmikus skálán; Gutenberg–Richter-törvény

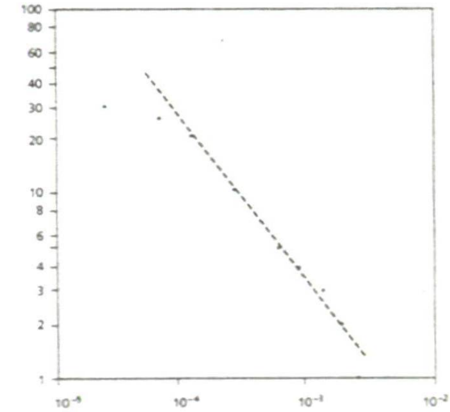
Az 1.a ábrán az USA-beli New Madrid környékén bekövetkezett földrengések eloszlását látjuk. A vizsgálat az 1974–83 időszakra korlátozódott. A fekete foltok mérete arányos a földrengés erősségével, magnitúdójával.

Láthatólag rendezetlen struktúrával van dolgunk. Azonban, ha ábrázoljuk egy adott magnitúdónál nagyobb erősségű földrengések számát a magnitúdó függvényében (1.b), csodálatosan egyszerű összefüggést kapunk a kétszer logaritmikus skálán, bizonyítván, hogy a földrengések eloszlása hatványtörvénynek tesz eleget, amely a szakirodalomban Gutenberg–Richter-szabály néven ismeretes. Elbűvölő az eredmény. Hogyan lehetséges az, hogy ez a bonyolult képződmény, a Föld, hegyeivel, völgyeivel, változékony geológiai struktúrájával ilyen végtelenül egyszerű összefüggést képes produkálni?

Másik példánkat egy teljesen eltérő területről vegyük. B. Mandelbrot, a fraktálelmélet atyja valaha azzal foglalkozott, hogy vajon a New York-i gyapot **tőzsde áringadozásaiban** felfedezhető-e valami szabályosság. Éveken keresztül, havi bontásban figyelte a gyapotárak alakulását. A 2.a ábra egy 30 hónapos időszakra vonatkozó megfigyelés eredményét tartalmazza.



2.a ábra
A gyapotár változása 30 hónap alatt

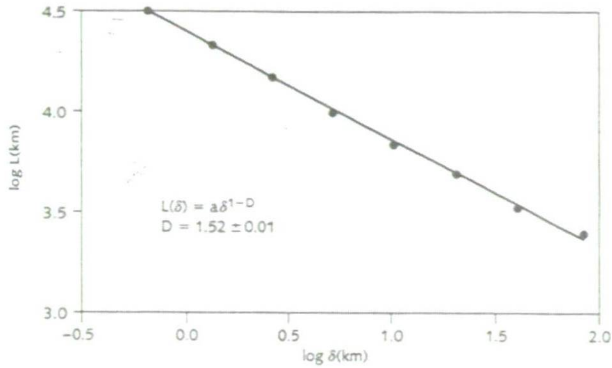


2.b ábra
A gyapotár relatív változása

Az ábra első pillanatra semmilyen szabályosságot nem árul el. Azonban, ha ábrázoljuk kettős logaritmikus skálán azt az összefüggést, amely megmutatja, hogy a vizsgált periódusban az árváltozás hányszor esett az 5–10, 10–20%-os tartományba (s így tovább), rendkívül egyszerű ábrát kapunk (2.b ábra). Az előzőhöz hasonlóan egy hatványtörvény áll elő, amely ráadásul „skálamentes", ugyanaz az összefüggés érvényes bármekkorára is választjuk az árváltozás mértékét.

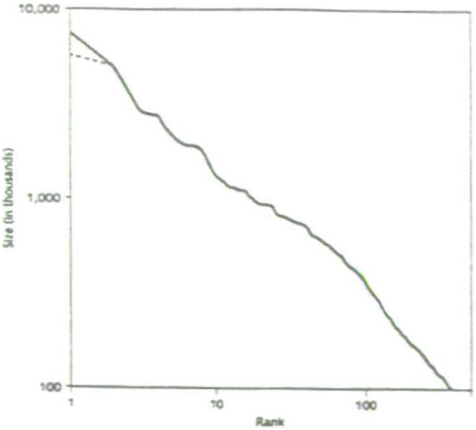
Következő példánk a **földrajz-geomorfológia** területéről származik. A 3.a ábra a fjordokkal szabdalt Norvégia nyugati-déli partszakaszának térségét mutatja. Annak becslésére, hogy mennyire szabdalt, szakaszos ez a partvidék, különböző (oldalélű) méretű négyzetrácsokkal fedték le a vizsgált szakaszt, majd megszámolták a lefedéshez szükséges *négyzetek* számát. Ezt az eljárást egyre kisebb oldalú négyzetekkel ismételve jutottak a 3.b ábrához. Csodálatosan egyszerű összefüggést kaptak. A D-vel jelzett mennyiség a hatványfüggvényben a partszakasz „fraktál" dimenziója ($D = 1,52$), ami azt mutatja, hogy e csodálatos összeszabdaltság eredményeképpen már nem vonallal, de még nem síkkal ($D_v = 1$ és $D_s = 2$) állunk szemben. Hasonló eredményt (nem egész fraktáldimenzió) kaphatunk, ha akár a felhők méreteloszlását, akár a hegyek-völgyek morfológiáját vizsgáljuk.

3.a ábra
A norvég Nyugat-Dél partvidék

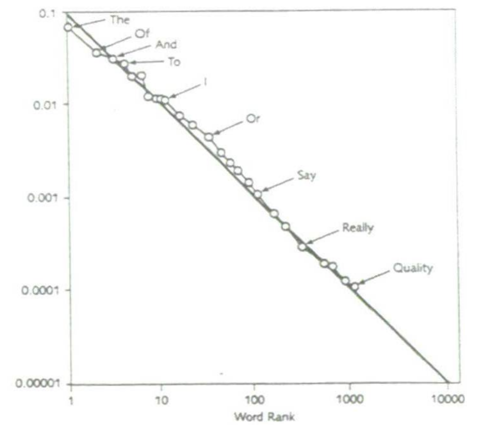


3.b ábra
Norvégia fjordjainak fraktáldimenziója

Egyik legegyszerűbb példa erre a következő. Ha ábrázoljuk a világ (1920-as állapot) városainak számát a lakosság függvényében, a 5. ábrához jutunk. Jól látható a hasonlóság a fentiekben közölt megállapításokkal. Az ilyen típusú függvényt tradicionálisan **Zipf-"törvénynek"** hívjuk. Teljesen hasonló eredményt hozott az a kutatás, amely az angol nyelv szógyakoriságát vizsgálta (6. ábra).



5. ábra
Zipf-törvény: A Föld városainak rangsora
(1920-as állapot)



6. ábra
Az angol nyelv szógyakorisága

Ha az előbb vázolt eredményeket egymás mellé helyezzük, akkor a jelenségek teljesen eltérő volta ellenére valami igazán közöset azért lehet látni, nevezetesen mindegyik görbe tipikusan hatványfüggvény

$$N(s) = s^{-\tau}$$
$$\lg N(s) = -\tau \log s$$

(s – mindig a vízszintes, N – a függőleges helyek paramétere, τ pedig az ábrázolt egyenes meredeksége).

A fent leírt jelenségek, tulajdonságok mindegyikére elmondható, hogy ***komplex***. A komplex jelenség leírására vállalkozó elméletnek tehát kellően *absztrakt*-nak kell lenni, hogy az egymástól teljesen eltérő jellegű jelenségcsoportokat egységesen tudja kezelni, s kellően statisztikusnak kell lenni, hogy a nagy elemszámok, széles skálát átölelő magnitúdók átfogják az egyedi jelenség probabilisztikus, statisztikus, egyedi voltát.

Mindezek mellett a rendszernek még nem egyensúlyinak is kell lennie. Tudniillik, ha egy egyensúlyi rendszer perturbációja esetén a relaxáció exponenciális függvény szerint valósul meg, az bizonyos, nagyon specifikus körülmények között a zárt egyensúlyi rendszer is mutathat komplex viselkedést (hatványfüggvény). A nyitott, nem egyensúlyi rendszerek képesek komplex viselkedésre (ahol megvan a lehetőség a rendszer és környezete közötti anyag/energia – és információ – cserére).

A fenti állítás alátámasztására elegendő arra utalni, hogy zárt rendszerekben – beleértve a biológiai, szociológiai és közgazdasági rendszereket – a kis perturbációk csak kis zavarokat okoznak, amelyek mindig anélkül lézengenek, hogy drámai változásokat okoznának. Másképpen szólva, ha a „lineáris tudomány" keretein belül maradunk (a rendszer válasza arányos a perturbációval), akkor a véletlenszerűség okozta drasztikus változás irreleváns.

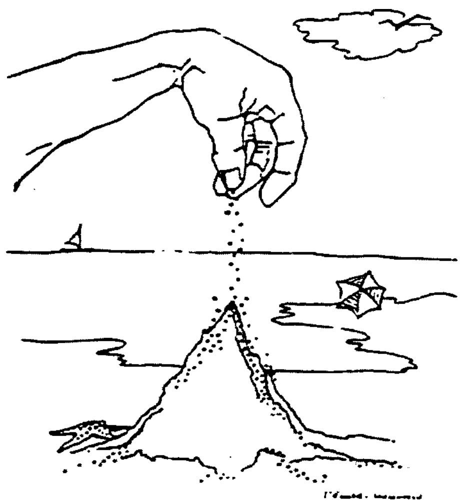
A szeszélyes, ámbár kicsi változások sohasem vezetnek drámai következményekhez. Tehát az „egyensúlyi" elmélet nem is lehet képes értelmezni pl. a tőzsdés árak fluktuációit.

Önszerveződés, kritikus állapot (SOC)

A fentiekben bemutatott jelenségek (katasztrófák, fraktál, 1/f zaj, Zipf-törvény, stb.) egy sokszínű világ sokoldalú arcát mutatja, de csodálatra méltóan egyszerű kvantitatív összefüggés hozza közös nevezőre őket; egy duplalogaritmikus skálán érvényesülő egyenes. Felmerül a kérdés, hogy milyen *elvet* akar a természet ebben a hatványtörvényben kifejezni?

A megoldás az önszerveződő kritikus rendszerállapot (self-organized criticality) elmélet. Ez az elmélet sikeresen leírja a komplex rendszerekben megfigyelhető kritikus viselkedést, anélkül, hogy külső környezet hatását figyelembe kellene vennie. Minden rendszert *dinamikai* szempontból figyel, s a rendszer önszerveződését egy hosszú, átmeneti, tranziens folyamatnak tekinti. A kritikus viselkedést akár a geológiában, akár a biológiában, s másutt is hosszú fejlődési folyamat előzi meg. S ez a folyamat nem tanulmányozható olyan időrelációban, amely rövidebb, mint az evolúciós folyamat maga.

Történelmi analógiával élve „a jelen nem érthető meg a múlt ismerete nélkül". A legegyszerűbben ezt a homokvárat építő gyerekek példáján érthetjük meg. A homokhegy nő, s mindaddig kvázi egyensúlyi állapotban van, amíg egy parányi homokszem, a körben kritikus állapotba (méret, dőlésszög stb.) jutott homokpiramis oldalán el nem indít egy katasztrofális leomlást.



7. ábra
Homokvárépítés

Egyik homokszem magával ragadva a másikat, láncreakciószerűen felgyorsul a folyamat. Majd a nyugalomba jutott rendszer egy hosszabb evolúciós folyamat révén kerül újból **„kritikus"** állapotba. A nagy „katasztrófaszerű" állapotváltozás olyan dinamikai eredmény következménye, amely a mindennapok szintjén normális jelenség, nem vezet nagy változásokhoz, s ezért érthető, hogy miért nem valósulhat meg a hosszú távú előrejelezhetőség.

Van még egy sajátosság, amit ki kell emelnünk. A hatványtörvény univerzalitása. Annyira különböző rendszerek, oly más partikuláris sajátosságai ellenére általános érvényű törvényt kapunk. Ezen univerzalitás megérzése vezetett Wilson Nobel-díjához (1982) a fázis-átalakulások értelmezésében.

A fenti példákból látható, hogy e különböző területről vett sokszínű folyamatok milyen egyszerű matematikai eszközökkel kezelhetők, s ez lehet a természet egyik csodája a sok közül.

LÁSZLÓ NÁNAI

On the universality of the laws of physics

The paper deals with general character of physical laws over a wide range of different even from pure physics through geography to stock exchange price variations. The complex-criticality of the dynamics of highly organized systems is emphasized.