

Dr. Kiss Ernő* és Dr. Kiss E. Ferenc**

Termoökonómia – hőtani és közgazdasági paradigmák és analógiák

Bevezetés

A szerzők már előjáróban a tisztelt olvasók figyelmébe ajánlják, hogy a tanulmány címében, és magában a tanulmányban, a paradigma szó alatt az egymásnak megfelelő, valamiképpen egyenértékű, ezért egymás között felcserélhető elemek, illetve fogalmak sorozatát értették; az analógia szó alatt pedig a különböző dolgok, illetve jelenségek közötti hasonlóságot, és a hasonlóságokon alapuló egyezést. Ugyanis a hőtant és a közgazdaságtant különböző tudományok csoportjába sorolják. A két tudományban tanulmányozott jelenségek és nagyságok igen gyakran hasonlatosságot és összefüggéseket mutatnak, noha ezek a jelenségek és összefüggések között közös eredetet még távolról is csak nehezen lehet mondani, és még kevésbé kimutatni. Az évtizedek hosszú multával bebizonyosodott, hogy a két tudományban jelentkező összefüggések hasonló matematikai arányosságot is mutatnak, tehát analógiákról is indokoltan lehet beszélni. A hőtani és közgazdasági analógiák keresése általánosságban visszavezethető a francia pozitivisták gondolkodóikig, kik a természetben fennálló törvényeket megkísérelték alkalmazni a társadalomtudományokban is. Tehát a termoökonómia alatt ebben a dolgozatban nem a klasszikus hőgazdálkodásról fogunk beszélni, hanem a hőtanban ismeretes nagyságok, fogalmak és törvényszerűségek alkalmazásáról a közgazdaságban. A dolgozatban a hőtani/termodinamikai fogalmakat és magyarázatokat csak a mai korban általánosan elfogadott formáiban adtuk meg, még annak közgazdasági/ökonómiai megfelelőit Kosta Stojanović 1910-ben megjelent munkáival kezdjük, és folytatjuk napjainkig, néhány ismert tudós munkáinak alapján.

* *Dr. Kiss Ernő, nyugalmazott egyetemi tanár, Újvidéki Egyetem, Technológiai Kar, Újvidék*

** *Dr. Kiss E. Ferenc, tudományos munkatárs, Újvidéki Egyetem, Technológiai Kar, Fizikai Kémia és Katalízis Laboratórium, Újvidék*

Természettudományi fogalmak

Az anyag (matéria), vagy a tudományos világban használt megfelelője, a szubsztancia, azt a tömeget jelenti, amiből a tárgyak állnak, és ez építi fel a Világegyetemet is. A matéria Arisztotelész (Αριστοτέλης) és Dalton (John Dalton) szerint atomokból, parányi oszthatatlan részecskékből van felépítve. Ezek az oszthatatlan anyagi részecskék egymással különböző kölcsönhatásban állnak, melynek a milyensége és nagysága meg van határozva az atomok helyzetével a térben és az időben, tehát mozgásban vannak. Az atomok társulásával klaszterek alakulnak ki, megfelelő esetekben pedig molekulák, kristályok és kristályrendszerek. Ezeknek az önállóan kialakuló képződményeknek a keletkezését a modern tudomány hullámmozgással vagy fázisátalakulással magyarázza meg.

Az említett bonyolult képződmények, összetett struktúrák, a fizikában akkor jelennek meg, amikor több anyagi részecske - helyzetük és sebességük alapján - kölcsönhatásba kerül, majd megfelelő körülmények között illeszkednek egymáshoz. A fizikában a struktúrák megjelenésének legfontosabb okozója a nemlinearitás, a heterogenitás. A kölcsönhatás a részecskék közötti távolság nagyságával exponenciálisan csökken. Így például a bolygók közötti kölcsönhatást a gravitációs erő határozza meg. E kölcsönhatás nagysága egyenesen arányos a bolygók tömegének szorzatával és fordítottan arányos a bolygók közötti távolság négyzetével.

A struktúra alatt tehát az elemek valamiféle összetételét kell érteni, melyek bizonyos körülmények között stabil/állandó tulajdonságokkal rendelkeznek, és mint ilyenek megfigyelhetők és tanulmányozhatók. A fizikában a struktúrák/szerkezetek jellemezhetők azok energiájával, tömegével, entrópiájával (rendezetlenségi fokával), állapotával (gáz, szilárd vagy egyéb halmazállapot), etc.

A fizikai paraméterek (hőmérséklet, T ; nyomás, p ; térfogat, V ; mágneses tér stb.) fontos meghatározói a különböző halmazállapotú anyagok megjelenésének, valamint az anyagokban lejátszódó fázisátmeneteknek. A hőmérsékletnövekedés hozzájárul a szilárd testek átalakulásához, folyadékká, majd gázokká – és végül a plazma megjelenéséhez. A fizikában a második fontos paraméter a nyomás. A különböző halmazállapotú anyagok kialakulására állandó hőmérséklet esetén a

nyomás csökkenése hasonló módon fog működni, mint a hőmérséklet-növekedés. Az egyetemes gáztörvény értelmében az ideális gázokra érvényes a következő egyenlet: $pV = RT$ melyben az R az univerzális/egyetemes gázállandót jelenti, ami egy mól ideális gáz munkájának felel meg, ha megnövekszik annak hőmérséklete 1°C -al.

Az ideális gázmolekulák térfogata elhanyagolhatóan kicsi (tehát tömegük is), vonzó- vagy taszítóerő a molekulák között nem létezik. Nem így van ez a reális gázoknál. A reális gázok tömege nem elhanyagolható, a molekulák között pedig jelen vannak a különböző vonzó- és a taszítóerők is. A gázmolekulák energiája nagy, míg a molekulák között fennálló vonzóerők kicsik. A folyadékoknál ez a két nagyság hasonló, ezzel szemben a szilárd halmazállapotú anyagoknál a vonzóerők jutnak kifejezésre.

Az alacsony hőmérséklet és a magas nyomás biztosítja a kristályos anyagok kialakulását. Tehát olyan anyagok kialakulását, amelyeket a magas fokú rendezettség jellemzi. Magas hőmérsékleten és alacsony nyomásnál, gáz halmazállapotú anyagok alakulnak ki, melyekben káosz uralkodik, tehát a rendezetlenség foka magas. A folyadékok mérsékelt hőmérsékleten és mérsékelt nyomás tartományban alakulnak ki.

Termodinamikai fogalmak és a klasszikus termodinamika főtételei

A termodinamika az energiaátalakulások vizsgálatának tudományterülete. A termodinamikai rendszer az anyagi valóság tetszőlegesen kiválasztott és elhatárolt része. A vizsgált rendszerek mindig valamilyen állapotban vannak. Az állapotok egyértelmű leírásához állapotjelzőket használhatunk, melyek az egész rendszerre vonatkozó fizikai mennyiségek. Ezek a fizikai mennyiségek lehetnek extenzív (összeadódó/additív) mennyiségek. Ilyen például a tömeg (m), a térfogat (V), vagy a belső energia (U). Lehetnek intenzív (kiegyenlítő) mennyiségek is. Ilyen például a nyomás (p), a sűrűség (ρ) vagy a termodinamikai hőmérséklet (T). A termodinamikai hőmérsékleti skála nullája az a hőmérséklet ahol a hőerőgép hasznossági foka 100% . Ez a hőmérséklet formálisan egyenlő az abszolút nullával, 0 K , ami megfelel $\sim -273^\circ\text{C}$ -nak. A rendszer állapotának teljes leírásához mindig annyi állapotjelzőt kell felhasználnunk, amennyi az adott vizsgálati szempont alapján még éppen szükséges az állapot egyértelmű meghatározásához. Az állapotjelzők között vannak konjugált állapotjelzők. A konjugált állapotjelzők párosával definiálhatók: egy extenzív és egy intenzív mennyiség konjugált állapotjel-

zöpárt alkotnak. Az intenzív mennyiség egy „általánosított erő”-nek, az extenzív mennyiség pedig egy „általánosított elmozdulás”-nak tekinthető. Az „általánosított erő” okozza az „általánosított elmozdulás” változását, és a kettő szorzatának energia dimenziója van. Ilyen konjugált állapotjelző pár például a nyomás–térfogat (p - V), vagy a termodinamikai hőmérséklet–entrópia (T - S). Inhomogenitás a nyomásban (p), térfogat-változást okozhat (dV); inhomogenitás a hőmérsékletben (T), entrópia-változást okozhat (dS) [1].

A termodinamika főtételei meghatározzák a hő (Q), a munka (W), és az energia (U , belsőenergia) közötti viszonyokat. A hő az energia egyik formája, ami átvihető az egyik testről a másikra (vagy az egyik termodinamikai rendszerről a másikra) a hőmérsékletkülönbség hatására (ΔT). A rendszeren végzett munka vagy a rendszer által végzett munka a rendszerben energiaváltozással jár. A munka végzése lejátszódhat visszafordítható/reverzibilis és visszafordíthatatlan/irreverzibilis körülmények között. Ha a változások gyorsan játszódnak le, akkor azok a termodinamikai rendszerben a rendezetlenség megnövekedéséhez vezetnek. A termodinamikában a rendezetlenség fokának a mércéje az entrópia.

Az entrópia (S), a $dS = \delta Q/T$, differenciális mennyiségként kerül meghatározásra, ahol a (δQ) az elnyelt vagy leadott hőenergia, melyben a rendszer az egyik állapotból a másikba megy át abszolút hőmérsékleten (T), visszafordítható körülmények közepette. A (δ) azt jelenti, hogy a hő, akárcsak a munka, nem állapotfüggvény.

A termodinamika nulladik főtétele a hőegyensúly beálltát határozza meg. Ha az egyik termodinamikai rendszer egyensúlyban van a másikkal, a másik pedig a harmadikkal akkor a harmadik termodinamikai rendszer is egyensúlyban van az elsővel.

A termodinamika első főtétele az energia-megmaradás elvén alapszik. A környezettől elszigetelt rendszerben, bármilyen folyamatok is mennek végbe a rendszeren belül, az energiák összege állandó. Ha a rendszer nem zárt, akkor a rendszer energiája pontosan annyival nő, amennyivel a környezeté csökken, és ez fordítva is érvényes. Véges változások esetében $\Sigma \Delta U = 0$, illetve az infinitezimális kis változások esetében a $\int dU = 0$ képlet használatos. A termodinamika első főtételét a $\Delta U = Q \pm W$ képlet közelebbről határozza meg. A rendszer belső energiájának megváltozása egyenlő a rendszerrel közölt hő és a rendszeren végzett munka összegével. A rendszeren végzett munka pozitív, a rendszerrel végzett munka pedig negatív előjelű (egyezményes/konvencionális előjel).

A termodinamika második főtétele a spontán folyamatok irányát szabja meg. Több megfogalmazása van. A Clausius-féle megfogalmazás (Rudolf Clausius, 1850) értelmében a természetben nincs olyan folyamat, amelyben a hő önként, külső munkavégzés nélkül hidegebb testről melegebbre menne át. Kelvin-Planck-féle megfogalmazás (William Thomson Kelvin, 1851; Max Planck, 1903) szerint a természetben nincs olyan folyamat, amelynek során egy test hőt veszítene, és ez a hő egyéb változások nélkül teljes egészében munkává alakulna át.

A termodinamika második alaptörvénye az entrópia segítségével a következőképpen fogalmazható meg: a spontán folyamatok esetében a magára hagyott rendszerek entrópiája csak növekedhet: $dS \geq \delta Q/T$, illetve $dS \geq 0$ vagy $\Delta S \geq 0$, és az egyensúlyi állapotban eléri maximális értékét. Mivel az entrópia a rendezetlenség fokának a mércéje, világos, hogy az entrópia statisztikai mennyiség. Spontánszerűen a természetben mindig olyan folyamatok játszódnak le, amelyek a rendezetlenség megnövekedéséhez vezetnek. Boltzmann (Ludwig Boltzmann) szerint, a rendezetlen állapot beállítására a statisztikai valószínűség mindig nagyobb, mint a rendezett állapot megjelenésére: $S = k \log \Omega$. Az egyenletben a k a Boltzmann állandót jelenti (munka melyet egy gázmolekula végez el tágulás esetén a hő hatására mikor a hőmérséklet 1°C -al megnövekszik), az Ω pedig az állapotszám (azon mikroállapotok száma, amelyek ugyanazon makroállapothoz tartoznak a megfigyelt rendszerben).

A termodinamika harmadik főtétele (Walther Nernst, 1906) ki mondja, hogy tökéletes kristályos anyag entrópiája abszolút nulla fok hőmérsékleten zérus. A tétel egyik legfontosabb következménye, hogy az abszolút zérus hőmérséklet (0 K) véges sok lépésben nem érhető el. Továbbá, hogy két olyan állapot entrópiájának a különbsége, amelyek kvázistatikusán átalakíthatók egymásba, $T \rightarrow 0\text{ K}$ -nál, nullához tart, azaz:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \Delta S = 0 \text{ vagy } S_{0,K} = 0$$

Másképpen szólva, az abszolút nullánál a rendezetlenség foka nullához tart.

A Helmholtz és a Gibbs-féle szabadenergia

A termodinamika főtételeinek alapján Helmholtz (Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz) összefüggéseket talált a szabadenergia, a belsőenergia és az entrópia között: $A(T,V) = U - TS$. Helmholtz sza-

badenergiája nem más, mint az izotermikus munka, melyet a rendszer nyújtani tud visszafordítható/reverzibilis folyamatok esetében, $\Delta A = -W_{\max}$. A Helmholtz egyenlet az $U = A + TS$ alakban rámutat arra, hogy a belsőenergia két részből áll, a szabadenergiából és a TS energiából. A TS energia mértékét a hőmérsékleten kívül az entrópia határozza meg. Ez a TS energia rendezetlensége miatt munka végzésére nem alkalmas.

A Gibbs-féle (Josiah Willard Gibbs) szabadenergiát a $G(T,p) = H - TS$ egyenlettel lehet meghatározni és a hasznos munka mértékéről beszél. Az egyenletben a (H) az entalpiát, a hőtartalmat jelenti, ami a belsőenergia és a tágulási munka összegével egyenlő, $H(S,p) = U(S,V) + pV$. A Gibbs-féle szabadenergia szerint a hasznos munka mértéke egyenlő az izotermikus-reverzibilis munka és a tágulási munka különbségével $\Delta G = -(W_{\max} - p\Delta V)$. Tehát az a munka, melyet a gáz saját tágulására végez el, a rendszeren kívül nem használható.

Termodinamikai, valamint a fizikai és kémiai egyensúlyi állapot

A termodinamikai rendszer egyensúlyi állapota a termodinamika nulladik főtételéből vezethető ki, és már a fent említett posztulátumon kívül, más posztulátumok is megfogalmazhatók, melyek közül a legismertebbek a következők:

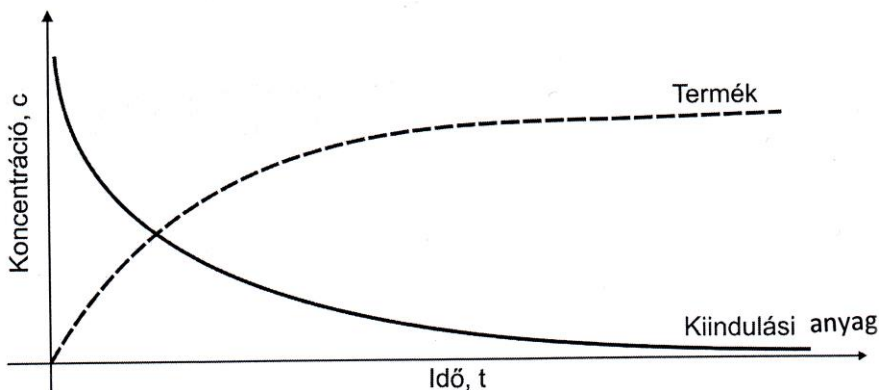
- bármely magára hagyott termodinamikai rendszer egy idő után egyensúlyi állapotba kerül, amelyből önmagától nem mozdulhat ki;
- egy egyensúlyban levő termodinamikai rendszer szabadságfokainak száma a környezetével megvalósítható kölcsönhatások számával egyenlő;
- a két testből álló magára hagyott termodinamikai rendszer egyensúlyban van, ha a testek között fellépő kölcsönhatásokat jellemző intenzív állapotjelzőik egyenlők.

A termodinamika második főtétele szerint a rendszerben csak olyan folyamat játszódhat le, amely a rendszer és a környezet együttes entrópiáját növeli. A termodinamikai egyensúly feltételei matematikailag a következőképpen írhatók le:

- Egyensúlyban az összentrópiának maximuma van: $\Delta S_r + \Delta S_k \geq 0$, ahol az S_r és S_k a rendszer, illetve a környezet entrópiáját jelenti.
- Zárt rendszerben állandó belső energia és térfogat esetén az egyensúlyt az entrópia segítségével így fejezhetjük ki: $\Delta S_{U,V} = 0$

- Zárt rendszerben az izoterm-izochor folyamatok irányát és az egyensúlyt a Helmholtz-féle szabadenergiával fejezhetjük ki: $\Delta A_{T,V} \leq 0$ (egyensúly esetében nincs munkavégzés, $\Delta A_{T,V} = 0$)
- Zárt rendszerben az izoterm-izobár folyamatok irányát és az egyensúlyt a Gibbs-féle szabadenergiával fejezhetjük ki: $\Delta G_{T,P} \leq 0$ (egyensúly esetében nincs hasznos munkavégzés, $\Delta G_{T,P} = 0$)

A fizikai egyensúlyi állapotokat attól függően, hogy a fizika melyik ágát tárgyaljuk sokféleképpen lehet megfogalmazni, így például a mechanikában az egyensúlyi állapot azt az állapotot jelenti, amelyben egy test minden pontjára ható erők és nyomatékok összege nullával egyenlő. A vízgőz nyomását a folyadék felületéről felszálló vízmolekulák valamint a lecsapódó vízmolekulák egyensúlya szabja meg. Az adszorpció fizikai-kémiai folyamat. Az egyensúlyi állapot állandó hőmérsékleten leírható az adszorpciós izotermával. Az adszorpciós gázizoterma meghatározza az adszorbens felületén adszorbeált gáz és a szabadgáz molekulák között fennálló egyensúlyi állapotot.



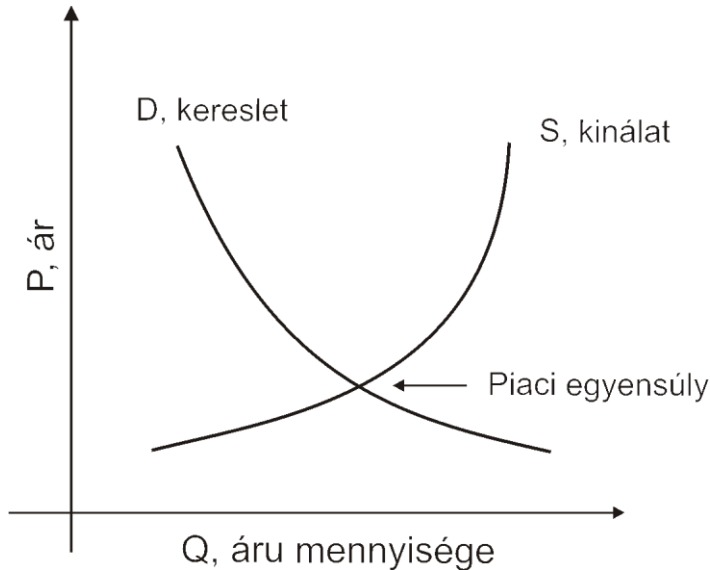
1. ábra

Kémiai egyensúlyi állapotot meghatározza a kiindulási anyag és a termék koncentrációjának a metszéspontja

Kémiai egyensúlynak nevezzük azt az állapotot, amely valamely megfordítható kémiai folyamat során jött létre, makroszkopikusan változatlan, és benne az ellentétes irányú reakciók sebessége valamint szabadenergiája egyenlő. A nem megfordítható reakciók esetében egyensúly állhat be a kiindulási anyagok és a termékek koncentrációja között. A kiindulási anyagok koncentrációja csökken, a termékeké nő az idő függvényében. A görbék meredeksége a pillanatnyi reakciósebességgel arányos, 1. ábra.

Árupiaci egyensúlyi állapot

A piaci egyensúly fogalma és ábrázolása Alfred Marshall (1842-1924) munkásságához és nevéhez fűződik. A fizikai egyensúly analógiájának a közgazdaságban jelentkező egyensúlyok ábrázolására nagyon alkalmasnak bizonyult a keresleti és a kínálati függvény. Ha a függőleges tengelyre a független változót (ár, P), a vízszintes tengelyre pedig a függő változót (áru mennyisége, Q) vesszük fel, akkor megrajzolható a keresleti (D), illetve a kínálati (S) függvény. Egy normál javak (áru) keresleti görbéje (D) negatív meredekségű, mivel a közönséges javaknál magasabb árhoz kisebb kereslet tartozik. Alacsonyabb árnál a termék iránt nagyobb a kereslet, az ár növekedésével viszont csökken az áru iránt megnyilvánuló kereslet. A piaci kínálat ugyanebben a koordináta rendszerben a kínálati görbével (S) ábrázolható. Alacsonyabb ár mellett a termelők nem kínálnak nagy mennyiséget. Az ár növekedését kíséri a kínálat növekedése is. A kínálati függvény pontjai azt mutatják meg, hogy a termelők, adott ár mellett, mennyit hajlandók, illetve mennyit tudnak a piacra bocsátani. A keresleti (D), illetve a kínálati (S) függvény közös metszéspontja a piaci egyensúlyt határozza meg, a két függvény pedig az úgynevezett Marshall-keresztet alkotja.



2. ábra

Piaci egyensúlyi állapot. A Marshall kereszt metszete a keresleti (D) és a kínálati (S) függvény közös metszéspontjában van

Az egyensúlyi ár az a piaci ár, amely mellett a kereslet és kínálat mennyisége kiegyenlített. Piaci egyensúly esetén, mint az eladók, mint a vásárlók elégedettek a kialakult piaci helyzettel. A Marshall-kereszt azon pontjainak halmaza, amelyek az egyensúlyi pont alatt helyezkednek el, a túlkeresletet jelenti. A Marshall kereszt azon pontjainak halmaza, amelyek az egyensúlyi ponttól magasabban helyezkednek el, a túlkínálatot jelenti. Túlkínálatok esetén a vállalat csökkenti az árakat, minek következtében növekszik a kereslet, így helyre áll a piaci egyensúly.

Társadalmi és közgazdasági fogalmak, mint termodinamikai paradigmák és analógiák

Sok bölcselő és tudós tett kísérletet a természettudományok alkalmazására a társadalomtudományokra. Ezen a téren a fizika valamint annak a termodinamikához tartozó része bizonyult a legalkalmasabbnak a közgazdaságtan tanulmányozására. A matematika pedig alkalmasnak bizonyult a dolgok számszerű értékelésére. A dolgozatban csak néhány kutatónak szentelhetünk helyet, úgy a pionír munkát végezőknek, mint a kortárs kutatóknak.

A termoökonómia a közgazdaságnak az az ága mely a közgazdasági kérdéseket a termodinamika törvényeinek segítségével törekszik megválaszolni (termelékenység, hatékonyság, költségek, hasznok, jövedelmezőség). A termoökonómia megnevezés Myron Tribus (1962, Massachusetts Institute of Technology) nevéhez fűződik [2,3]. A termoökonómisták szerint a gazdasági rendszereket hasonlóképpen lehet modellezni, mint a termodinamikai rendszereket. Ennek a feltevésnek alapján a termodinamikai nagyságoknak, illetve törvényeknek, megfelelő gazdasági fogalmakat és analógiákat fejlesztettek ki. Borisas Cimbleris (1923-2000) például azt állítja, hogy a pénznek hasonló szerepe van a közgazdaságban, mint az energiának a termodinamikában. Ha a termodinamikában az energia fogalma alatt olyan nagyságot értünk, ami munkát képes végezni, akkor a közgazdaságban a pénz, vagy a pénznek valamiféle megfelelője, képezi a hajtóerőt az emberi cselekvésre [4]. Az ilyen megközelítés azzal indokolható, hogy a gazdasági rendszerek is, akárcsak a termodinamikai rendszerek, leírhatók és meghatározhatók az anyaggal, az energiával és a munkával. A gazdasági rendszerekre is jellemző a rendezetlenség, akárcsak a termodinamikai rendszerekre, és így mind a két rendszert jellemezni lehet az entrópiával. A modern tanulmányokban

leggyakrabban a nemegyensúlyi termodinamikát alkalmazzák, a disszipatív (nem statikus) gazdasági struktúrák tanulmányozására.

Úttörők munkássága

Saslow [5] Irwing Fishert (1867-1947) tartja az első kutatónak, aki mechanikai analógiát látott a fizika és a közgazdaság között. Fisher szerint, ami a fizikában az erőt és a távolságot jelenti, annak a közgazdasági megfelelője az ár és az áru (javak) száma volna. Irwing Fisher a Yale Egyetemen végzett, ahol matematikát és közgazdaságtant tanult, és 1891-ben doktorált. Mentora Josiah Willard Gibbs elméleti fizikus és William Graham Sumner szociológusok voltak.

Kosta Stojanović munkássága

Kosta Stojanović (1867-1921) Irwing Fisherrel egy nemzedékhez tartozott. Stojanović (fizikus és matematikus) tudományos szemlélete megegyezett a francia pozitivizmus bölcseleinek elképzeléseivel, tehát ő is hitt a természet- és társadalomtudományok egységében. Ahogyan a matéria (szubsztancia) atomokból, úgy a társadalom egyénekből/emberekből épül fel. A matériában az atomok között erőviszonyok vannak, melyek pontosan leírhatók a fizika megfelelő törvényeivel. A társadalomban uralkodó viszonyok is meghatározhatók az emberek között fennálló viszonyokkal. Az emberek nem egyformák, hanem egymástól különböznek. Az emberek természetétől függően az életcéljaik is különböznek, ez határozza meg a társadalmi folyamatok dinamikáját. Ha a társadalmat fizikai közegnek tekintenénk, akkor az emberek a társadalomban az atomok és a molekulák szerepét töltik be. A társadalomban jelentkező kulturális különbségek pedig a materiális világban a halmazállapotokat jelentenék. A társadalom energiája meg van szabva a társadalomban élő emberek számával és minőségével. A társadalomban beálló egyensúly soha sem stabil mert az emberi társadalom heterogén [6, 7].

Stojanović a javak elosztását és a lakosság növekedése között fennálló viszonyokat tartotta a közgazdaság legfontosabb kérdéseinek. Ahhoz, hogy meghatározzuk, hogy milyen egyensúly fog beállni a legfontosabb gazdasági tényezők következtében, ismerni kell a gazdasági tényezők közötti viszonyokat [7].

Stojanović szerint a közgazdaságban az emberi munka és a tőke között olyan hasonlatosság van, mint a termodinamikában a munka és a hő között. A közgazdaságban az emberi munkát lehetne kiegyenlíteni a fizikai értelemben vett munkával. Ami képes hő, villamos vagy egyéb energia biztosítására a természetben, azt a közgazdaságban a tőke fogalmaként lehet értelmezni. A tőkét a társadalom különböző intézményekbe fekteti (gazdasági, kulturális, szociális stb.), ami nemcsak a tőke fogyasztását, hanem annak megújulását is jelenti. A tőke „kisugároz” akárcsak egy hőforrás és „felmelegíti” a gazdaságot, és ezzel kihat a gazdasági folyamatokra. A tőke szerepe a gazdasági folyamatokban, valamint a hő szerepe a termodinamikai folyamatokban a legfontosabb analógia a két különböző (társadalmi és fizikai) rendszer között.

Stojanovićnak, mint okleveles fizikusnak, jól ismertek voltak a termodinamikai fogalmak. A termodinamikában három állapotváltozó ismeretes, a térfogat (V), a nyomás (p), és a hőmérséklet (T). Ezek az állapotváltozók egymással függő viszonyban vannak, és ezeket a viszonyokat a fizika törvényei határozzák meg. Ezek a törvények matematikai képletekkel leírhatók, konkrét esetben a munkát végző gáz állapotfüggvényével [6]. Ha bármely két állapotváltozó ismeretes, akkor a harmadiknak a nagysága az állapotfüggvényből kiszámítható. Ideális gázok esetében ez az összefüggés felírható már a fenn ismertetett képlettel: $pV=RT$. Reális gázok esetében az (R) értéke változó, attól függően, hogy mennyire különbözik a reális gáz viselkedése az ideális gáz viselkedéséhez viszonyítva [8].

Stojanović a termodinamikában használatos állapot-meghatározók helyett, a következő megnevezéseket vezette be a közgazdaságba: kínálat (p), kereslet (T) és az érték (V). A kereslet a társadalmi környezet milyenségétől függ. Minél fejlettebb a társadalom annál nagyobbak a társadalom igényei a különböző termékek iránt és a különböző szolgáltatások iránt. Az elmondottak alapján a felsorolt termodinamikai nagyságoknak a közgazdaságban a következő megfelelő fogalmaknak felelnek meg (1. táblázat).

Termodinamika		Közgazdaság	
Fogalom	Megjelölés	Fogalom	Megjelölés
Nyomás	p	Kínálat	P
Hőmérséklet	T	Kereslet	T
Térfogat	V	Érték	V
Hőmennyiség	Q	Tőke	Q
Energia	E	Vagyon	E
Termodinamikai munka	W	Gazdasági munka	$R (W)$

1. táblázat

Termodinamikai és közgazdasági fogalmak Kosta Stojanović szerint

A fent említett egyetemes gázegyenlethez hasonlóan Stojanović felírta a közgazdaságban elképzelhető egyenlet analógiát, $pV=KT$. Az egyenletben a (p), (V), és (T) már a megfelelő közgazdasági fogalmakat jelentik, a (K) pedig egy gazdasági állandót, melynek az értéke a szóban forgó gazdasági objektum milyenségétől függ. Tehát a közgazdasági állandó (K) az érték (V) függvénye, vagyis az értéktől változó nagyság.

Gay-Lussac törvényéhez hasonlóan, mely szerint a térfogat nagysága meg van határozva a hőmérséklettel, a közgazdaságban a kereslet (T) a tőke (Q) függvényének tekinthető. A termodinamikában használatos abszolút hőmérsékleti skálához hasonlóan meg lehet szerkeszteni egy konvencionális közgazdasági skálát, amelynek a kiinduló pontja (nullája) annak a gazdasági állapotnak felelne meg, ahol megszűnne mindenféle gazdasági csereforgalom [9].

Stojanović szerint a gazdaság helyes működését a kínálat és a kereslet törvényei szabják meg, amelyeket annak idején „konkurencia törvénynek“ neveztek [7]. A konkurencia törvénye szerint az áru relatív értékét a kínálat és kereslet viszonya határozza meg. Ez a $V=KT/p$ transzformált egyenletből is jól látható. Az áru értéke (V) egyenesen arányos a kereslettel (T) és fordítottan arányos a kínálattal (p). Az egyenletben a (K) a megfelelő közgazdasági állandót jelenti. Mikor a kereslet nagysága kiegyenlítődik a kínálat nagyságával, akkor az áru abszolút értéke kiegyenlítődik annak relatív értékével. A „konkurencia törvénye“ nem csak az áru értékét szabja meg, hanem a kamatok, valamint a bérek értékét is [7].

A közgazdaságban Stojanović szerint a klasszikus termodinamika törvényei jól alkalmazhatóak. A termodinamika első főtétele, mint már említettük, az energia megmaradásának a törvénye. Stojanović szerint a

közgazdaságban a termodinamika első főtételét a következő képen lehet felírni és értelmezni: $E(\text{Vagyon})=Q(\text{Tőke})+W(\text{Munka})$. Innen következik, hogy a közgazdaságban a vagyont (E), a társadalom energiájaként kell értelmezni, de ettől meg kell különböztetni a tőkét (Q), akárcsak a termodinamikában az energia tágabb fogalom a hőmennyiségtől, noha mind a két esetben energiáról van szó. Stojanović a termodinamika első főtételét a közgazdaság számára „Első gazdasági-dinamikus törvénynek” nevezte el. E törvény értelmében minden pillanatban a tőke (Q), ami a közgazdasági munkával (W) megteremtődik az valójában a környezetből ered, és a kettőnek az összegét ki lehet egyenlíteni az energiával, ami a fentiek alapján a vagyont (E) jelenti [6]. Tehát a termodinamika első főtétele ugyanazt jelenti a közgazdaságban, mint a hőtanban.

A munka (W) és a tőke (Q) az idők folyamán periodikusan változó függvények, tehát ezeknek a függvényeknek a minimumai és maximumai is periodikusan váltakoznak. A munka (W) és a tőke (Q) az idők multával elhasználódnak, majd különböző formákban újra felértékelődnek. Mikor egy társadalom elvész, illetve kihal, akkor a munka (W), értéke nullával lesz egyenlő, de a társadalom tőkéje (Q) megmarad. A társadalom gazdagságát a tőke (Q) és a közgazdasági munka (W) határozza meg. Stojanović a közgazdasági munkát R-rel, jelölte meg. A társadalom gazdagsága gyarapodni fog a felhalmozott tőkével (Q) és a társadalomba fektetett közgazdasági munkával (W).

A termodinamika második főtétele, mint említettük, a spontán folyamatok irányát szabja meg. Stojanović szerint az entrópia elméletnek központi szerepe van a szociológiában és a közgazdaságban. Ha az energia a vagyont (E), a hőmennyiség a tőkét (Q), a hőmérséklet pedig a keresletet (T) jelentik a közgazdaságban, akkor Stojanović szerint ezeket a nagyságokat számszerűsíteni kell. Ez nélkülözhetetlen előfeltétele, annak hogy alkalmazhatók legyenek a társadalmi, illetve a közgazdasági entrópia meghatározásakor. Ez nem egyszerű feladat. Nem könnyebb feladat megtalálni a megfelelő paramétert a keresletre (T) sem, hiszen a kereslet nem csak a kínálattól függ, hanem a megfigyelt társadalom kulturális szintjétől is [6].

Stojanović szerint az entrópia a közgazdaságban a termelési tényezők leépülését jelenti. Ez a leépülés feltétel nélkül lejátszódik a társadalomban a gazdasági fejlődés folyamán. Tehát az entrópia közvetlen kapcsolatban áll a gazdasági folyamatok fejlődésével. A közgazdaságban Stojanović az entrópia növekedést a tőke (Q), illetve a vagyon (E) megnövekedésével magyarázza, az elvégzett munka (W) következménye-

ként. Az entrópia a társadalom megismerésének céljából azért fontos, mert rámutat, hogy a megfigyelt társadalmi aktivitás mennyit képes a tőkéből (Q) átruházni a vagyonba (E), illetve, hogy a lejátszódó folyamatban mekkora veszteségek fognak keletkezni. Az így megfogalmazott entrópia átveszi a „transzformáció tényezőjének“ a szerepét a gazdasági folyamatokban. Az entrópia valójában megfelelne egyfajta transzformációs együtthatónak mikor a tőke (Q) megteremti a vagyont (E) a munka (W) következtében. Ugyanakkor, tudatában kell lenni annak, hogy mindezt végsősorban a természetben rejlő energiák fedezik.

Stojanović munkájában [7] azt állítja, hogy az erkölcsi, intellektuális és szociális társadalmi környezet a fent tárgyalt folyamatokban degradálódik és átalakul gazdasági és végső sorban fizikai környezetté, mikor már megszűntek a lehetőségek, hogy a társadalom megmaradjon. E folyamatokban a minőségesebb energiák átalakulnak kevésbé minőségesebb energiákká. A heterogén rendszerek homogén rendszerekké válnak, beáll a teljes egyensúlyi állapot, amiből már befektetett munka (W) nélkül nem lehet visszatérni az előző állapotba. A homogén rendszer többé már nem heterogenizálódhat.

A termodinamikai megfontolások alapján az egyensúlyi állapotban az entrópia eléri maximális értékét. A rendszerben beáll a tökéletes káosz, és a rendszer képtelenné válik bármilyen hasznos munkát végezni. Tehát a teljes homogenizálódás végzetes lenne a társadalomra. Bővebben Kosta Stojanović munkásságáról magyar nyelven a következő irodalomban található [10].

Nicholas Georgescu-Roegen munkássága

Nicholas Georgescu-Roegennek (1906–1994) román származású matematikusnak és közgazdásznak, Yale Egyetem tanárának, elismert érdemei vannak a termodinamika tételeinek közgazdaságtanba bevezetésének terén. Georgescu-Roegen meglátásai idővel megteremtettek egy újabb tudományágot, a környezetvédelmi közgazdaságtant (ökológiai ökonómia/ecological economics). Amikor Georgescu-Roegen munkásságáról beszélünk, leginkább az entrópia törvényre gondolunk. Munkásságában rámutatott arra, hogy bolygónkon a hozzáférhető erőforrások abszolút értelemben korlátozottak [11]. A termodinamika első főtétele szerint, mint már említettük, az anyag és az energia mennyisége zárt rendszerekben állandó, abszolút értéke nem változik. Az emberi aktivitás (ipar, gazdaság) változásokat vált ki a természetben. Noha termodinami-

kai értelemben a mennyiségek összértéke a különböző folyamatok során állandó marad, megváltozik az anyag és az energia milyensége. Georgescu-Roegen megfigyelései azt mutatják, hogy a gazdaságban az alacsony entrópiájú alapanyagokból magas entrópiájú termékeket gyártanak, ami a természetes értékek degradációjához vezet. Az ilyen folyamatok csak növelik a természetes anyagok szétszórtságát, felhasználhatatlanságát és a végtermékek haszontalanságát [12, 13]. Tóth I. János úgy fogalmaz, hogy Nicholas Georgescu-Roegen az emberi gazdaságot egy entrópia-termelő gépezethez hasonlítja, melynek folyamatosan szabad energiát kell kivonni a természeti környezetéből saját fennmaradásához [14].

Tehát a gazdasági folyamatok entrópikus folyamatok, s nem lehet értelmesen beszélni a gazdaságról, ha nem vesszük figyelembe a rendszer, az erőforrások végességét. A gazdaság irreverzibilis folyamatokra épül, s ha egyszer elégetjük a fosszilis erőforrásokat, tüzelőanyagokat, akkor már nem térhetünk vissza a korábbi állapothoz. Az iparosodás következtében a legjobb szántóföldeknek nem csak a területe csökken, hanem a minősége is romlik, vagy teljesen terméketlenné válik. Az alacsony entrópia és a gazdasági érték közötti kapcsolat hasonló a gazdasági érték és az ár közötti kapcsolathoz. Egy tárgynak csak akkor lehet ára, ha gazdasági értéke van, és csak akkor lehet a tárgynak gazdasági értéke, ha alacsony az entrópiája.

Mivel az entrópiánövekedés a reális világban visszafordíthatatlan folyamat, az elértektelenedést nem lehet leállítani, de jól átgondolt termelési módszerekkel az entrópiánövekedés gyorsasága lelassítható. Megújuló energiaforrásokat kell alkalmazni az ipari termelésben (víz-és napenergia) és a mezőgazdaságban (igavonó állatok). A nyersanyagok felhasználását úgy kell beállítani, hogy az egyik gazdasági ciklus hulladéka egy másik gazdasági ciklus nyersanyaga legyen. Az ipari gazdaságnak valamint a mezőgazdaságnak le kell másolni a természetben lejátszódó körfolyamatokat, ahol semmi sem megy veszendőbe, hanem újra felhasználódik [12, 13].

Kortársak munkássága

Wayne M. Saslow munkássága

Saslow analógiákat keresett a gazdasági és a termodinamika rendszerek között. Dolgozatában rámutatott azokra a gazdasági mennyiségekre, amelyek a gazdasági rendszert jellemzik, mikor az egyensúlyi

állapotban van [5]. Mint ahogyan a termodinamikai egyensúlyi állapotban levő fizikai rendszer ábrázolására szükséges egy nem mechanikai változó, vagyis a hőmérséklet (T), ugyanez érvényes a gazdasági rendszerekre is. Ezen túlmenően, mindkét rendszerben szükséges egy megfelelő konjugált mennyiség. A termodinamikában ez lehet a hőmérséklet-entrópia (T-S). Ennek a konjugált állapotjelző párnak a termoökonómiában megfelelne a közgazdasági hőmérséklet-entrópia páros, formálisan szintén a (T-S) páros, ahol a hőmérséklet a gazdasági fejlettség mércéje volna. A munka rámutatott további gazdasági és termodinamikai analógiákra: a szabad energiára, a Maxwell és a Gibbs-Duhem kapcsolatokra. Feltételezve, hogy a gazdasági hasznosság mérhető, akkor kifejleszhető egy működő gazdasági hőmérsékleti skála is.

Akárcsak a termodinamikában, úgy a termoökonómiában is a termodinamikai kiértékeléseknek csak akkor van előrejelző értéke, ha a megfelelő termodinamikai nagyságok kiszámítása mérhető adatokon alapszik. Saslow az entrópia alatt azt a nagyságot érti, amely meghatározza a gazdasági rendszer belső állapotát. A közgazdasági hőmérséklet (T) a gazdasági fejlettség mércéje. A közgazdasági entrópia a gazdasági variációk mértéke. A közgazdaságban a közgazdasági hőmérséklet (T) és a közgazdasági entrópia (S) szorzata adja a gazdasági többletet (ψ), ami a fejletlen gazdaságokban nullával egyenlő. Innen következik, hogy egy zéro gazdasági hőmérséklet esetében zéro a gazdasági entrópia.

Termodinamika	T	S	F (A)*	E (U)*	TS	μ	N
Közgazdaság	T	S	W, vagyon	U, hasznosság	ψ , többlet	p, Ár	N, javak (áru) száma

*Az elméleti részben használt megjelölés

2. táblázat

Analógiák a termodinamikai és a gazdasági rendszerek között Saslow szerint [5]

A Helmholtz-féle szabadenergia a közgazdaságban. A közgazdaságtanban alapvető feltételezés, hogy a fogyasztó vásárlási szándéka megfogalmazható a hasznossági függvénnyel (U). A hasznossághoz valamilyen értéket kell fűzni ahhoz, hogy teljes analógiát fogalmazzunk

meg a termodinamikai fogalmakkal. Ilyen lehetne például az 1998-as évben használt dollár.

A haszon értéke (U) meghaladja a vagyon értékét (W) és gazdasági többlet keletkezik $TS=U-W$, ami a táblázatban (2. táblázat), mint $\psi=U-W$ van megjelölve.

$$\psi=U-\lambda M-pN$$

$$W=\lambda M+pN$$

ahol, a (W) a vagyont jelenti, az (λ) a pénz értékét jelenti, az (M) a pénz mennyiségét, a (p) a javak árát, az (N) pedig a javak számát jelenti.

A termodinamikai (PV) közgazdasági megfelelője az (λM) volna, a termodinamikai kémiai potenciál (μ) (parciális moláris Gibbs-féle szabad energia) közgazdasági megfelelője pedig a (p), azaz a javak (áru) ára.

A termodinamika második főtétele Saslow megfogalmazásában.
A statisztikus mechanika a valószínűség-számítás eszközeivel vizsgál mechanikai problémákat. A makroszkopikus rendszerek tulajdonságait a mikrovilág (atomok, molekulák) szabályszerűségeiből vezeti le. Így a termodinamika eredményei is a mikroszintű mechanikai és statisztikai törvények beteljesüléseként értelmezhetőek. Ludwig Boltzmann az entrópia (S) és az állapotszám (Ω) között a következő összefüggést fogalmazta meg: $S \sim \ln \Omega$. Fontoljunk meg egy közgazdasági mikroállapot (s) és a vagyon (Ws) közötti összefüggést. Ezt meglehetősen határozni a partíciós függvénnyel: $Z = \sum_{\text{állapot}} e^{W_s/T} = e^{U/T}$, innen az egyenlő lesz $U = T \ln Z$. Induljunk ki a megszokott feltevésből, hogy az a summa fog dominálni, ami megfelel a legvalószínűbb mikroállapotnak, amit a legvalószínűbb vagyon fog meghatározni, $Z \approx \Gamma e^{W/T}$, $\Gamma = \sum_{\text{állapot}} 1$, ahol a summa a gazdasági állapotot jelenti, mint mikroállapotok összességét, mikor a vagyon $W_s = W$. Ha kiegyenlítjük a $Z = e^{U/T}$ partíciós függvényt a $Z \approx \Gamma e^{W/T}$ függvénnyel a következő összefüggést kapjuk: $U = W T \ln \Gamma$. Mivel az $U - W = TS$, akkor a $TS = T \ln \Gamma$ lesz, azaz megkapjuk a gazdasági entrópia képletét $S = \ln \Gamma$, ami az ismert Boltzmann entrópia analógiájának felel meg. A gazdasági entrópia megfelel a gazdaságban jelentkező változásoknak, variációknak [5].

Yegorov [15] szerint a természettudományokból ismert anyagi elemi részecskéknél, az atomoknál, a társadalomtudományokban az egyének/ágensek felelnének meg. Egyszerűbb képződményeknek, a molekuláknak (mint atomok közösségének), a megfelelője a család és a kisvállalkozások.

A fizikában összetett struktúrák (bonyolult képződmények) akkor jelennek meg, ha több anyagi részecske, helyzetük és sebességük alapján, találkozik és valamiféle képződményt/készletet alkot. Ezeknek a képződményeknek a kimutatása mikroszinten nem lehetséges. Makroszinten ezeket a képződményeket jellemezhetjük egyes fizikai tulajdonságaikkal, mint például hőmérsékletükkel, térfogatukkal vagy más paraméterekkel. A közgazdaságban mikroszinten vállalatokról, makroszinten pedig gazdaságokról beszélhetünk.

Kölcsönhatások. A fizikában az anyagi részecskék kölcsönhatásban állnak a fizikai mezőnyben. Ez a kölcsönhatás exponenciálisan csökken a részecskék közötti távolság nagyságával. Így például a bolygók közötti kölcsönhatás meg van határozva a gravitációs erővel, a kölcsönhatás nagysága pedig a bolygók közötti távolság négyzetével csökken. Ki kell emelni, hogy a fizikában a struktúrák megjelenésének legfontosabb okozója a nemlinearitás, a heterogenitás. A közgazdaságban a gazdasági nagyságok közötti kölcsönhatást leginkább lineárisan lehet modellezni. A különböző ágensek adottságaikkal megjelennek a piacon és onnan más termékeket vesznek fel, beállítottságuktól függően. Ezzel magyarázható meg a piac önszerveződő tulajdonsága.

A fizikai, illetve a közgazdasági nagyságok jellemzői. A fizikai nagyságok jellemezhetők a részecske tömegével, sebességével, térbeni elhelyezésével. A Heisenberg-féle (Werner Heisenberg) határozatlansági tétel szerint a részecske sebessége és térbeni elhelyezése mikroszinten nem meghatározható. A közgazdaságban is megfogalmazható egy ilyen határozatlansági tétel, mert egyes mikroökonómiai paraméterek (például a hasznosság) nem figyelhetők meg közvetlenül. A közgazdaságban a fizikai koordináták és sebességek megfelelője a fogyasztási csomag dinamikus mintája lehetne, míg a "vagyon" (vagy a bevételt) az energia analógiája lehetne. Így a makrogazdasági állapotot meglehetősen határozni a javak eloszlásának függvényében. Ez pedig meghatározza az egyes társadalmi struktúrák stabilitását.

A fizikai, illetve közgazdasági struktúrák jellemzői. A fizikában az egyes struktúrák/szerkezetek jellemezhetők azok energiájával, tömegével, entrópiájával, mikrostruktúrájával. A közgazdaságtanban makroökonómia szinten a következő jellemzőkről lehet beszélni: GDP/Bruttó hazai termék, kamatráta, növekedési ütem stb.

A társadalom molekuláris szerkezete. A klasszikus mikroökonómiában molekuláknak a vállalatok tekinthetők. A valóságban ezek a vállalatok oszthatóknak, egyesülhetnek, újak alapíthatóak, illetve megszűnhetnek létezni. De ezek a folyamatok nem képeznek analógiát a kémiai reakciókkal. Mint a molekulák, a cégek is alkothatnak láncokat a helyi kölcsönhatás következtében. Így kialakulhat egy hasonló szerkezet, ami megfelelne a polimereknek a kémiában. Ez a hasonlat adta a "polimer társadalom" fogalmát. A struktúrák kialakulhatnak mesterségesen (állami határozatok alapján) vagy önszerveződés alapján. Az utóbbiak leginkább kis cégek, mintegy 10 főt alkalmaznak, amit főként rokonok, vagy barátok alkotnak. Hasonlóan alakulnak ki a mezőgazdasági szövetkezetek is. A fizikai analógia volna például a kényszerű kristályosítás mesterséges közegben, illetve a spontán kialakuló klaszterek természetes közegben.

Az egyensúly fogalma a közgazdaságban. Az egyensúly fogalma a mechanikában jól ismert. Az egyensúly fogalmának nagy jelentősége van a közgazdaságban is. Az egyensúlyt a közgazdászok nem fedezték fel, hanem hittek ebben a fogalomban [15].

A struktúra/szerkezet és annak jelentősége. A természettudományokban (fizika, kémia, biológia) a struktúra alatt elemek valamiféle összetételét kell érteni, melyek bizonyos körülmények között stabil/állandó tulajdonságokkal rendelkeznek, és mint ilyenek megfigyelhetők és tanulmányozhatók. A fajok és populációk biológiai struktúrák, szintén elemekből tevődnek össze. A társadalomtudományokban a struktúrák egyebek között a következő elemekből épülnek fel: vállalatok/cégek, klubok, országok, az emberiség.

A rend a közgazdaságban a piacon uralkodó erők következtében spontán módon alakul ki. A verseny szférában a termelés csökkenő hásszal jár ("láthatatlan kéz", Adam Smith).

Analógiák a hőmérséklet és a nyomás fizikai, illetve társadalmi szerepében Yuri Yegorov szerint

A termodinamika törvényei axiómákon, alaptételeken, alapigazságokon nyugszanak, aminek hitelességét senki nem vonja kétségbe. A fizikában a gáz hőmérséklete (T), összekapcsolható a gázmolekulák átlagos energiájával. Ez a fizikai paraméter fontos meghatározója a különböző halmazállapotú anyagok megjelenésének, valamint az anyagokban lejátszódó fázis átmeneteknek. A hőmérséklet növekedés hozzájárul a szilárdtestek átalakulásához, folyadékká, majd gázokká és végül hozzájárul a plazma megjelenéséhez. A fizikában a második fontos paraméter a nyomás (p). A különböző halmazállapotú anyagok kialakulására állandó hőmérséklet esetében a nyomás csökkenése hasonló módon fog működni, mint a hőmérséklet növekedése. Az egyetemes gáztörvény értelmében az ideális gázokra érvényes a fentiekben ismertetett egyenlet: $pV=RT$. A gázmolekulák energiája nagy, még a molekulák között fennálló vonzóerők kicsik. A folyadékoknál ez a két nagyság hasonló, ezzel szemben a szilárd halmazállapotú anyagoknál a vonzóerők jutnak kifejezésre.

A halmazállapotoknak megfelelő társadalmi analógiák. A hőmérséklet a közgazdaságban megfelelne a gazdagságnak (w), a nyomás fordított/inverz értékének a gazdasági szabadság felelne meg (f). A gazdasági szabadságot nehéz számszerű nagyságokban kifejezni, de az világos, hogy a demokratikus rendszerekben a gazdasági szabadság nagyobb, mint a diktatúrákban. A gazdagság növekedésével és a személyek szabadságának a növekedésével a diktatórikus rendszerek demokratikus rendszerekké fejlődnek. Természetesen ezen az úton kialakulnak köztes/intermediális állapotok. Tehát a szilárd/kristályos halmazállapotú anyagoknak a társadalomban a diktatúra fogalma, a gáz halmazállapotú anyagoknak a társadalomban a demokrácia fogalma felelne meg. A diktatúrákban az egyén energiája a társadalmi energiához viszonyítva alacsony (alacsony GDP országok), a demokratikus országok jellemzője a magas GDP.

Szilárd, cseppfolyós és gáz halmazállapotú társadalmak. Történelmi szemszögből nézve az idők folyamán az egyén szabadsága állandóan változott. A diktatúrákban az egyén aktivitása/kezdeményezése a társadaloméhoz viszonyítva alacsony, ez a "szilárd"/ kemény társadalom. A teljesen liberális társadalmakban az ország szerepe alacsony, úgyszólván elhanyagolható, és ezért az egyéni kezdeményezés mércéje

nagyon magas. A liberális társadalom hasonló a gázok halmazállapotához. A fent említettek alapján a cseppfolyós halmazállapotnak a köztes/intermediális társadalmak felelnének meg. A folyadékokra jellemző, hogy rövid távolságokon és nagyon rövid időtartalmakban bizonyos rendezett állapot is jelentkezhethet, de nagy távolságokon a rendezetlen állapot a jellemző. Tehát a korlátozottan gazdag társadalmakban jelentkezhethet egy bizonyos mértékben az egyén/individuum szabadsága. Ezekben a társadalmakban, mint nem hivatalos szervezetek megjelennek a maffiák, melyek nem jellemzők sem a nagyon szegény sem a nagyon gazdag társadalmakra.

John Bryant munkássága

Bryant [16] szerint az ezredfordulón megújult érdeklődés tapasztalható a termodinamika, az energia és a gazdasági kapcsolatok közötti összefüggések keresésére, amit kétségkívül a lehetséges klímaváltozás, a kőolaj, illetve földgáz árak kicsúcsosodása erősen ösztönzött. Könyvében a termoökonómiát részletesen tárgyalja a termodinamikai törvények függvényében. A 226 oldalas könyv bemutatása nem lehetséges a megszokott terjedelmű dolgozatokban. Azonban célszerűnek tartjuk a könyvben megjelenő szimbólumok listáját ismertetni, mert ez is eredményesen hozzájárul a hőtani és közgazdasági paradigmák és analógiák bemutatására (Lásd a 3. táblázatban John Bryant "Szimbólum listáját").

Enrico Sciubba munkássága

Sciubba [17] áttekintést ad a termoökonómia fejlődéséről, ahol akárcsak Tsatsaronis [18] megkülönbözteti a termoökonómiát az exergoökonómiától. Az exergia megmutatja, hogy mekkora energiát kell befektetni, hogy a megfigyelt termodinamikai rendszer az adott helyzetből egyensúlyi állapotba kerüljön a környezettel (az ökológiában a természettel). Az exergia koncepciónak különösen nagy jelentősége van, hiszen az így elvégzett elemzések figyelembe veszik a különböző energia fajták minőségét is az energiát konvertáló rendszerekben.

A fentiek alapján, a 3. táblázatban, összefoglaltuk a megfigyelt természettudományi és társadalomtudományi paradigmákat.

Természettudományi fogalmak, jelenségek	Társadalomtudományi fogalmak, jelenségek
<i>Irwing Fisher</i>	
Erő és a távolság	Ár és az áru (javak) száma
<i>Kosta Stojanović</i>	
Atom	Egyén (Ember)
A matéria lehet homogén vagy heterogén	A társadalom mindég heterogén
Halmazállapotok	Kulturális különbségek
Nyomás, p	Kínálat, p
Hőmérséklet, T	Kereslet, T
Térfogat, V	Érték, V
Hőmennyiség, Q	Tőke, Q
Belsőenergia, E	Vagyon, E
Termodinamikai munka, W	Gazdasági munka, R / (W)
Abszolút hőmérsékleti skála	Konvencionális gazdasági skála (kiinduló pontja, nullája, annak a gazdasági állapotnak felel meg, ahol megszűnik mindenféle gazdasági csereforgalom).
A termodinamika első főtétele: $E(\text{Belsőenergia})=Q(\text{hőmennyiség})+W(\text{munka})$	$E(\text{Vagyon})=Q(\text{Tőke})+W(\text{Munka})$
Az entrópia a termodinamikai rendszer rendezetlenségének a mércéje.	Az entrópia a gazdaságban a termelési tényezők leépülésének a mércéje
<i>Nicholas Georgescu-Roegen</i>	
A természetben lejátszódó spontán folyamatokat az entrópia növekedés jellemzi.	A gazdaságban az alacsony entrópiájú alapanyagokból magas entrópiájú termékeket gyártanak, ami a természetes értékek degradációját jelenti.
<i>Borisa Cimbliris</i>	
A termodinamikában az energia fogalma alatt olyan nagyságot kell érteni, ami munkát képes végezni.	A közgazdaságban a pénz nyújt lehetőséget arra, hogy az emberek dolgozhassanak. A pénz képezi a hajtóerőt az

Wayne M. Saslow

Termodinamikai hőmérséklet, T

Gazdasági hőmérséklet a gazdasági fejlettség mércéje
A gazdasági entrópia meghatározza a gazdasági rendszer belső állapotát

Entrópia a rendezetlenség fokának a mércéje

Konjugált állapotjelzők (Intenzív-
extenzív párok):

Termodinamikai hőmérséklet–entrópia
($T-S$)

Gazdasági hőmérséklet -
Gazdasági entrópia ($T-S$)
Ha a hasznosság mérhető,
akkor kifejleszhető egy
működő gazdasági hőmér-
sékleti skála.

Abszolút hőmérsékleti skála

$W(\text{Vagyon})=U(\text{Hasznosság})$
 $-\psi(\text{Többslet})$

Helmholtz-féle szabadenergia,
 $A=U-TS$

Termodinamika második főtétele:

Az entrópiát a legvalószínűbb
mikroállapotok száma határozza meg,
 $S \sim \ln \Omega$

A gazdaságban a legvaló-
színűbb mikroállapotot a
vagyon határozza meg
 $S \sim \ln \Gamma$.

Yuri Yegorov

Atomok

Egyének (ágensek)

Molekulák

Család (kisvállalkozások)

A Heisenberg féle határozatlansági tétel szerint a részecske sebessége és térbeni elhelyezése mikroszinten nem meghatározható.

A közgazdaságban a határozatlansági tétel szintén megfogalmazható, mert egyes mikroökonómiai paraméterek (például a hasznosság) nem figyelhető meg közvetlenül.

Szilárd halmazállapot (Az anyagi részecskék helyzete a kristályrácsban szigorúan meghatározott).

Diktatórikus társadalom (A diktatúrákban az egyén aktivitása/kezdeményezése a társadaloméhoz viszonyítva alacsony).

Gázhalmazállapot (A gázmolekulák szabadon mozoghatnak a térben, a

Liberális társadalom (A teljesen liberális társadalmakban

vonzó- és a taszítóerők nagysága jelentéktelen).	az ország szerepe alacsony, úgyszólván elhanyagolható, és ezért az egyéni kezdeményezés mércéje nagyon magas.
Cseppfolyós halmazállapot (A folyadékokra rövid távolságokon és rövid időtartalmakban rendezett állapot is jelentkezhet)	Köztes, korlátozottan gazdag társadalmak. Jelentkezhet az egyén korlátozott szabadsága.
John Bryant	
Nyomás, p	Ár, P
Térfogatáramlás, v	Volumen (mint termék) áramlás, V
Molekulák száma, N	Állomány egységek száma, N
Energia, mint konjugált állapotjelző, pV	Érték áramlás, G (=PV)
Boltzmann állandó, mint molekuláris munka, k	Egységenkénti termelékenység, k
Hőmérséklet, T	Kereskedési érték index, T
Entrópia, S	Entrópia, S
Szabadenergia (Helmholtz), A	Szabadérték-áramlás, F
Szabadenergia (Gibbs), G	Szabadérték-áramlás, X
Specifikus hő (állandó térfogat esetén), C _v	Specifikus érték (állandó volumen esetén), C _v
Specifikus hő (állandó nyomás esetén), C _p	Specifikus érték (állandó ár esetén), C _p
Izentropikus index, γ (=C _p /C _v)	Izentropikus index, γ (=C _p /C _v)
Felvett, illetve elvesztett hőmennyiség, ΔQ	Entropikus érték áramlás, Q
Elvégzett munka, W	Munkaérték áramlás, W
Belső energia, U	Állomány érték (belső érték), U

3. táblázat

Természettudományi és társadalomtudományi paradigmák

Záró következtetés

A bemutatott dolgozatok száma túl kevés ahhoz, hogy vitathatatlan megállapításokat vonhassunk le a termodinamika törvényeinek megbízhatóságáról a közgazdasági és az ehhez közelálló egyéb társadalmi tudományokban. A tudomány fejlődésének folyamán a különböző kutatók által megfogalmazott paradigmák igencsak eltérőek. A fizikai nyomásnak, mint termodinamikai állapotjelzőnek, a közgazdaságban a kínálat (Kosta Stojanović), illetve a javak ára (John Bryant) felelne meg. A fizikai hőmérséklet, ami a molekulák kinetikai energiájának mércéje, és mint ilyen ugyancsak termodinamikai állapotjelző, a közgazdaságban a keresletnek felelne meg (Kosta Stojanović). John Bryant a termodinamikai hőmérsékletet a közgazdaságban valamiféle kereskedési érték indexnek tekinti, még Wayne M. Saslow a termodinamikai hőmérséklet alatt a közgazdaságban/társadalomban a gazdasági fejlettség mércéjét véli látni.

A közgazdaságban gyakran hivatkoznak a termodinamika második főtételére, az entrópia törvényre. Termodinamikai értelemben itt valamiféle spontán folyamat irányának a meghatározásáról, vagy egy termodinamikai rendszer rendezetlenségének fokáról, illetve a termodinamikai rendszerben fellépő mikroállapotok valószínűségéről beszélünk. A megfelelő közgazdasági analógiák egymástól eltérőek. Kosta Stojanović az entrópia alatt a gazdaságban a termelési tényezők leépülését látja, míg Nicholas Georgescu-Roegen a közgazdaságban az entrópia fogalma alatt a természetes értékek elértéktelenedését érti. Ludwig Boltzmann a termodinamikai entrópiát a legvalószínűbb mikroállapotok számával határozta meg. Wayne M. Saslow a közgazdasági entrópiát a vagyon eloszlásával határozza meg.

A Wikipedia [2] a termoökonómiát a "heterodox közgazdászok" iskolájának tekinti, kik a termodinamika törvényeit alkalmazzák a közgazdaságban. Ez a megnevezés mégsem teljesen találó, különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a heterodox szó a magyar nyelvben tévhitet, illetve eretnekséget jelent.

Záró következtetésnek talán jobban megfelelnének a következő sorok, és egy irodalmi hivatkozás. A termoökonómia gyorsan fejlődő tudomány. Mivel két különböző tudományág (természet- és társadalomtudomány) ötvözetének a terméke gyakorlati alkalmazása nem egyszerű, hiszen a kutatótól megköveteli a fizika/termodinamika a társadalom/közgazdaság törvényeinek kitűnő ismeretét. A mai kutatásokban a termodinamikai és a közgazdasági nagyságok már számszerűsítve van-

nak, így a termoökonomia alkalmassá vált az energetikai rendszerek elemzésére, fejlesztésére és optimalizálására [19]. Azonban az idézet nem vonatkoztatható fenntartások nélkül a közgazdasági kérdések megoldására.

Felhasznált irodalom:

1. J. Litz: "Fizika II. ", Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2005, pp. 100-101.
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoeconomics>
3. M. Gong, G. Wall: "On Exergetics, Economics and Optimization of Technical Processes to meet Environmental Conditions", Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, 453-460, TAIES'97, June 10-13, 1997, Beijing, China.
4. <http://www.eoht.info/page/Borisas+Cimblelis>
5. W. M. Saslow: "An economic analogy to thermodynamics", Am. J. Phys. 67 (12) 1239-1247, 1999.
6. K. Stojanović: "Tumačenje fizičkih i socijalnih pojava", Štampano u Državnoj štampariji Kraljevine Srbije u Beogradu, 1910.
7. K. Stojanović: "Osnovi teorije ekonomskih vrednosti", Štampano u Državnoj štampariji Kraljevine Srbije u Beogradu, 1910.
8. V. Vučić, D. M. Ivanović: "Fizika 1", Naučna knjiga, Beograd, 1965.
9. B. Stojanović: "Ekonomija i termodinamika: primena matematičke fenomenologije u ekonomskoj analizi u Srbiji početkom 20. veka", Istorija 20. veka, 24, (1), 177-192, 2006.
10. E. E. Kiss, F.E. Kiss: "A termodinamika előfutára a közgazdaságban – Kosta Stojanović", LÉTÜNK, XLIII. évfolyam, 2013., 3. szám, 9-22. oldal.
11. Gy. Pataki: "Biofizikai közgazdaságtan és entrópia – Bevezetés Nicholas Georgescu-Roegen közgazdasági munkásságába", KOVÁSZ, VI, 1-4, 33-39, 2002.
12. N. Georgescu-Roegen: "The Entropy Law and the Economic Process", Harvard University Press, Cambridge, MA, 1971.
13. N. Georgescu-Roegen: "Energy and Economic Myths", Southern Economic Journal, 41 (3) 347-381, 1975.
14. J. I. Tóth: "Eltartóképesség és növekedés", *Bajmócy Zoltán – Lengyel Imre – Málovics György* (szerk.), Regionális innovációs képesség, versenyképesség és fenntarthatóság, JATE Press, 283-302, Szeged, 2012.
15. Y. Yegorov: "Econo-physics: A Perspective of Matching Two Sciences", *Evol. Inst. Econ. Rev.*, 4(1) 143-170 (2007).

16. J. Bryant. "Thermoeconomics – A thermodynamic approach to economics", VOCAT International Ltd, UK, 2011.

17. E. Sciubba: "Exergo-economics: thermodynamic foundation for a more rational resource use", International Journal of Energy Research, 29, 613-636, 2005.

18. G. Tsatsaronis: "Exergoeconomics: Is It Only a New Name?", Chem. Eng. Technol. 19, 163-169, 1996.

19. A. Valero, S. Usón, C. Torres, A. Valero: "Application of Thermoeconomics to Industrial Ecology", Entropy, 12, 591-612, 2010.

Összefoglaló

Termoökonómia–Hőtani és közgazdasági paradigmák és analógiák

A termoökonómia alatt a dolgozat nem a klasszikus hőgazdálkodást tárgyalja, hanem a hőtanban ismeretes nagyságok, fogalmak és törvényszerűségek alkalmazását a közgazdaságban. A dolgozat röviden bemutatja a hőtani/termodinamikai fogalmakat és törvényeket a mai tudományos ismeretek szellemében, valamint azok közgazdasági/ökonómiai megfelelőit. Az áttekintést a pionír munkásságokkal kezdi, és folytatja napjainkig, egy néhány ismert tudós munkájának bemutatásával. A hőtanban és a közgazdaságban tanulmányozott jelenségek és nagyságok igen gyakran hasonlatosságot és megfelelő összefüggéseket mutatnak. Mégis a két különálló tudomány fejlődésének folyamán a különböző kutatók által megfogalmazott paradigmák és analógiák meglehetősen eltérőek.

A Wikipedia a termoökonómiát a "heterodox közgazdászok" iskolájának tekintheti, kik a termodinamika törvényeit alkalmazzák a közgazdaságban. Ez a megnevezés mégsem teljesen találó, különösen, ha figyelembe vesszük, hogy a heterodox szó a magyar nyelvben tévhitet, illetve eretnekséget jelent.

Kulcsszavak: termoökonómia, hőtan, közgazdaság, paradigmák, analógiák

Summary

Thermoeconomics–Thermodynamical and economical paradigms and analogies

This paper does not discuss classical thermal management, but the thermodynamic laws and thermodynamical concepts in economics. After the presentation of thermodynamic laws a short review is given about the studies where thermodynamic laws and concepts were applied to resolve different problems in economics, starting from the pioneer works in the field until the works of present days. In thermodynamic and in economics the studied magnitudes and phenomena often show similarities and corresponding correlations. However, during the development of these two separate sciences the paradigms and the analogies formulated by various researchers are quite different.

According to the Wikipedia thermoeconomics is the school of the "heterodox economists", who the laws of thermodynamics apply in the field of general economy.

This term is not quite appropriate, especially if we consider that the word heterodox in broader sense means myth and heresy.

Keywords: Thermoeconomics, thermodynamics, economics, paradigms, analogies.

Извод

Термоекономија-Термодинамичке и економске парадигме и аналогije

Овај рад не разматра економију топлотне енергије у класичном смислу, већ примену термодинамичких закона и термодинамичке концепте у економији. Након прегледа основних закона термодинамике приказане су студије у којима закони термодинамике и термодинамички концепти примењени у решавању различитих проблема у економији, и то од пионирских до најновијих радова у овој области. У термодинамици и економији различите величине и појаве често показују сличности и одговарајуће корелације. Међутим, током развоја ове две науке запажа се да су коришћене парадигме и аналогije приказане са стране различитих истраживача врло различите.

Према Википедији термоекономија представља школу "хетеродоксних економиста", који примењују законе термодинамике у општој економији. Овај термин није баш прикладан, поготово ако се узме у обзир да је реч хетеродокс у ширем смислу значи и мит и јерес.

Кључне речи: термоекономија, термодинамика, економија, парадигме, аналогije.