

OTDK-DOLGOZAT

Berczi Edit

BA

2013

ELJÖN A VILÁG VÉGE?

A TERMELÉS TERMODINAMIKAI ALAPJAI

DOES THE WORLD END?

THERMODYNAMIC APPROACH OF PRODUCTION

Berczi Edit

Kézirat lezárva: 2011. december 20.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	1
2. A gazdálkodás fizikai korlátai.....	3
2.1. Gazdaság fizikai korlátai - lehetséges megközelítések.....	3
2.2. Ökológiai közgazdaságtan	4
3. A termelés.....	7
3.1. Termelés a közgazdaságtanban.....	7
3.2. Termelés a gyakorlatban.....	8
4. A termodinamika főtételei	11
4.1. A termodinamika elméleti háttere.....	11
4.2. Termodinamika a gyakorlatban	12
4.2.1. Exergia termelés	13
4.3. A termelés és a termodinamika kapcsolata.....	16
5. A kibővített termelési függvény.....	18
5.1. Termelés a technológia oldaláról.....	18
5.1.1. Technológiai helyettesítési határráta	19
5.1.2. Helyettesítési rugalmasság	20
5.1.3. A termelési tényezők optimálisan felhasznált mennyisége	21
5.2. Jellemzés a kereslet oldaláról.....	25
5.2.1. A keresleti görbék rugalmasságai.....	25
5.2.2. Termelési tényezőkre kivetett adók hatása.....	27
5.2.3. Termelési tényezők keresletek aránya.....	28
6. Összefoglalás	30
7. Irodalomjegyzék	32

Ábrajegyzék

1. ábra	9
2. ábra	14
1. táblázat	15
2. táblázat	26
3. táblázat	28

1. Bevezetés

„A fenntartható – harmonikus – fejlődés a fejlődés olyan formája, mely a jelen igényeinek kielégítése mellett nem fosztja meg a jövő generációját saját szükségleteik kielégítésének lehetőségétől.” Ez olvasható a Brundtland Bizottság 1987-ben kiadott Közös jövőnk című jelentésében. A jelentés a gazdasági növekedés olyan új korszakának lehetőségét vázolta fel, mely társadalmi fejlődést, környezetvédelmet, és gazdasági növekedést is egyszerre valósít meg. A fenntartható fejlődés definíciója egy olyan világot feltételez, ahol a gazdaság és a természet szoros kapcsolatban van egymással, így a gazdaság vizsgálatakor a természeti törvényeket is figyelembe kell venni.

Dolgozatomban a termodinamika egyetemes törvényszerűségeinek oldaláról vizsgálom a gazdaság kulcsfontosságú folyamatát, a termelést. Bemutatom, hogy az energia hasznos része, az exergia¹ szűkös erőforrás, mely minden termelési folyamathoz szükséges, és így a kibocsátás határát jelentheti. Vizsgálom, hogy az exergia beépítése a termelési függvénybe milyen következménnyel jár. Arra keresem a választ, hogy hogyan lehet az exergia felhasználását befolyásolni, így a termelés határát kibővíteni. A gazdasági növekedés megtorpanása, a kibocsátás csökkenése, és így a fogyasztási szint visszaesése az exergia szűkössége miatt bekövetkezik, vagy vajon elkerülhető a világ vége?

A gazdaság elé állított természeti korlátokat a közgazdasági elméletek különbözőképpen kezelik. A dolgozat első fejezetében ezeket a lehetséges módokat mutatom be. Részletesebb tárgyalom az ökológiai közgazdaságtan kérdéseit, mivel ez az irányzat kifejezetten a természeti erőforrások gazdaságával, és a természet-gazdaság bonyolult kapcsolat rendszerével foglalkozik.

A következő részben a termelés folyamatával foglalkozom részletesebben. Először vizsgálom, hogy a közgazdaságtanban ez hogyan jelenik meg és miért nem veszi figyelembe az exergiát, mint termelési tényezőt. Ezután a valóban megvalósuló termelés néhány sajátosságát mutatom be.

Miután a természet és a gazdaság összetett kapcsolatával, és a termeléssel is megismerkedett az olvasó, az ennek korlátul szolgáló természeti törvényeket mutatom be. A termodinamika, és ennek törvényszerűségei olyan egyetemes elvek, melyek alól a gazdaság sem bújhat ki. A legfontosabb elméleti fogalmak, mint az exergia, entrópia megismerése után ezek gyakorlati jelentőségét és alkalmazását ismertetem.

¹ Az exergia alatt az energia hasznos, felhasználható részét értjük. A fogalommal a 4. fejezetben részletesebben is megismerkedünk.

A dolgozat utolsó részében az exergiával kibővített Cobb-Douglas típusú termelési függvényt mutatom be. Először a technológia oldaláról jellemzem, így meghatározom a technológiai helyettesítési határrátákat, és a helyettesítési rugalmasságokat. Ezt követően egy költségminimalizálási feladaton keresztül az optimálisan felhasznált termelési tényezőmennyiségeket számolom ki. A tényezőkeresletek oldaláról is jellemzem a termelési függvényt. Vizsgálom a termelési tényezőkre kivetett adók hatását, és a tényezőkeresletek arányát meghatározó tényezőket.

2. A gazdálkodás fizikai korlátai

Tagadhatatlan, hogy a gazdaság termékeinek előállításához fizikai javakat használ fel. A klasszikus közgazdaságtan ezzel szemben nem igazán beszél a termelés lehetséges fizikai korlátairól. Figyelembe veszik a természeti javak szűkösségét, de ez nem központi kérdés, az Ember képességeibe vetett optimizmus még szinte határtalan. A népesség és a termelés növekedése egyre inkább szembesítette a közgazdászokat a korlátos természeti erőforrások problémájával, így létrejött a közgazdaságtannak egy olyan elmélete, amiben központi szerepet töltenek be a természeti erőforrások, és ami a gazdaság és természet kapcsolatát részletesen vizsgálja. Ez az ökológiai közgazdaságtan. Képviselői szerint a természet törvényeit a gazdaság vizsgálatakor sem szabad figyelmen kívül hagyni. A következőkben először az elméletben megjelenő lehetséges megközelítéseket mutatjuk be röviden, majd az ökológiai közgazdaságtan jellemzőit, központi kérdéseit ismertetjük részletesebben.

2.1. Gazdaság fizikai korlátai - lehetséges megközelítések²

Általános egyensúlyelméleti megközelítés: Ebben a megközelítésben a természeti erőforrások olyan termelési tényezők, amelyek növekedési üteme, szintje, külső gazdasági adottság, exogén jellemző. Abban a kérdésben, hogy az erőforrások szűkössége milyen mértékben jelent korlátot a termelésnek, már eltérnek egymástól a különböző iskolák. Lényeges, hogy a gazdálkodás a szűkös erőforrásokkal foglalkozik, így ha egy természeti erőforrás szűkösségét a modellező nem érzékeli, akkor elhanyagolja a természeti tényezőt.

A termelési lehetőségek értékelése során: A közgazdaságtani elméletekben lényeges az, hogy nincs termelés termelési tényezők felhasználása nélkül. Ebben az esetben ez a természeti erőforrás felhasználásának szükségességét jelenti. A termelés csak akkor megvalósítható, ha a szükséges inputok – itt természeti javak – és a technológia a rendelkezésre áll.

Praktikus növekedéseméleti megközelítés: Ez a megközelítés azt mondja ki, hogy a természeti erőforrások szűkössége mint a növekedés korlátja jelenik meg. Az erőforrások mennyisége figyelembe vehető a modellezésben. (Így például integrálható a termelési függvénybe, mint ahogy ez a dolgozat modelljében is megjelenik). Emellett a termelés során biztosan felmerülő környezetvédelmi költségek növekedése forrásokat von el a

² A fejezet Bartus Gábor Van-e a gazdasági tevékenységnek termodinamikai korlátja? (Közgazdasági Szemle, LV. évf., 2008. november (1010–1022. o.) című művének 1011-1012. oldalai alapján készült.

beruházásoktól és a technológiai fejlesztésektől, melyek a növekedés további lassulását eredményezhetik.

Optimalizációs megközelítés: Ez a lehetséges megközelítés azt mondja ki, hogy a természeti erőforrásoknak létezik egy fenntartható hozama. Ez a fenntartható hozam a biológiai úton megújuló erőforrások kitermelésének legnagyobb mértéke, ami adott populáció nagyság mellett éppen megegyezik az erőforrás gyarapodásának mértékével. Ekkor tehát a felhasználás mennyisége egyenlő a megújulás mennyiségével, az erőforrás állománya állandó.

2.2.Ökológiai közgazdaságtan

A természet és a gazdaság kapcsolatával, és ezen belül is az erőforrások korlátainak a gazdaságra gyakorolt hatásaival foglalkozik bővebben az ökológiai közgazdaságtan. Az ökológiai közgazdaságtant holisztikus, transzdiciplináris, és horizontális megközelítés jellemzi. A közgazdaságtan és az ökológia tudományágait egyesíti, a gazdaságot a természet részeként értelmezi.

Úgy gondolja, hogy a gazdaság nem vonhatja ki magát a természet törvényszerűségei alól. Egy véges természetben a gazdaság végtelen növekedése nem lehetséges. Ezt fogalmazta meg az ökológiai közgazdaságtan egyik neves képviselője, Kenneth Boulding a *Közeledő Föld-űrhajó gazdasági rendszere* (1973) című művében. Itt megkülönböztet két különböző típusú gazdaságot. Az egyik a Föld gazdaságát nyitottnak, az erőforrásokat tekintve korlátatlannak tekintő „cowboygazdaság”, míg a másik egy zárt földi rendszerrel számoló jövőbeli gazdaság, az „űrhajós gazdaság”. A cowboy jellemzője, hogy felelőtlen. Elsődleges célja a minél gyorsabb növekedés, minél nagyobb fogyasztás, mely el is érhető, hiszen az ő szemében a természet a forrásokat tekintve kimeríthetetlen, és elbírja a végtelen szennyezést is. Ez jellemzi a mai gazdaságot. Ezzel szemben a jövőben egyetlen űrhajóvá válik a Föld, ami mind a források, mind a lehetséges szennyezések tekintetében véges. Ebben az űrhajóban kell megtalálni a helyét az embernek, úgy, hogy az anyagok reprodukciója biztosított legyen (Szlávik, 2008). David C. Korten *A tőkés társaságok világalma* című munkájában ezzel a témával kapcsolatban így vélekedett: „Cowboyként élni egy űrhajóban tragikus következményekkel jár” (D. C. Korten, 1996, 29. oldal).

Az ökológiai közgazdaságtan szerint a természeti erőforrások szűkössége abszolút, „Malthusi” szűkösség. Malthus szerint a növekedés korlátja a termőföld, és ezen keresztül az élelmiszer. A Föld nem tudja majd elegendő élelmiszerrel eltartani a növekvő

populációt. (Malthus, 1946, 1798.) A természeti erőforrások szűkössége is ilyen, a felhasználható erőforrások abszolút mennyisége sosem növekszik, állandó maradhat, de általában csökken.

Az ökológiai gazdaságtan elemzéseiben a környezeti problémák deperszonalizálódtak. A környezetgazdaságtan elemzéseiben mindig jelen voltak a szennyezést elszenvedő egyedek. Gondoljunk csak a negatív externália klasszikus példájára, amikor egy folyó mellett két vállalkozás van. Fentebb egy cserzőműhely, lentebb pedig egy szálloda. A cserzőműhely a szennyező anyagokat a folyóba önti, ennek elszenvedője a szállodát vezető vállalkozás. A környezetszennyezésnek azonban nincs feltétlenül emberi elszenvedő fele. A szennyezés károsultja maga a természet. Felmerülhet a kérdés, hogy lehet-e Robinson Crusoe környezetszennyező már azelőtt is, hogy Péntek megérkezik. Erre az ökológiai gazdaságtan válasza egyértelműen igen. (Bartus, 2008)

A gazdaság és természet vizsgálatakor a tőkét két részre érdemes osztani. Meg kell különböztetni természeti tőkét, és művi tőkét. A művi tőkét az ember állítja elő, munka, és természeti és/vagy művi tőke segítségével. A neoklasszikus növekedésméletnek ez adja a központi részét. Az egy főre jutó művi tőke növekedése az egyik mozgatórugója a gazdasági növekedésnek. A két tőke lehetséges helyettesítőségéről a közgazdászok azonban eltérően vélekednek. (Szlávik, 2008)

A fenntartható növekedés a tőke állományának legalább szinten tartását célozza meg. Azonban ez két féleképpen értelmezhető. Lehetséges az, hogy a természeti és művi tőkének összesen kell állandó szinten maradnia. A természeti tőke csökkenhet, amennyiben a művi tőke nő. A két típus korlátlanul helyettesíthető, elképzelhető egy olyan világ is, mely természeti tőke nélküli, a természet funkcióját teljes egészében a gazdaság veszi át. Ez a *gyenge fenntarthatóság* elve. Ezzel szemben az ökológia közgazdaságtan szerint a természeti tőke és a művi tőke nem helyettesíthetők teljes mértékben, az erős vagy *szigorú fenntarthatóság* hívei. Szükséges, hogy a természeti tőke, és a művi tőke állományát is külön-külön állandó szinten tartsuk.

Az ökológiai közgazdaságtan három, szorosan összefüggő kérdéskört vizsgál. Egyik feladata, hogy a gazdaság optimális méretét meghatározza. Ehhez figyelembe kell venni a természetet is, hiszen a gazdaság ennek része. A természet egyetemes törvényszerűségeit, és az erőforrások korlátait nem hagyhatjuk figyelmen kívül.

Miután ismerjük a gazdaság optimális méretét, az erőforrások igazságos elosztása következik. Ennek vezérlő elve az erőforrásokhoz való egyenlő hozzáférés biztosítása.

A harmadik lépésben az optimális méret, és az igazságos elosztást eredményező hatékony allokáció megvalósítása a cél. Ezt a piac végzi.

Az ökológiai közgazdaságtan kritikája a neoklasszikus közgazdaságtannal szemben, hogy utóbbi csak az erőforrások és a termékek allokációjával foglalkozik. A javak elosztását még figyelembe veszi, de a méret kérdését csak a piac elemzésekor, a méretgazdaságosság témakörében vizsgálja. Ez a vizsgálat azonban a profit és gazdaságosság függvényében történik, és nem a természeti erőforrások szűkössége miatt.

3. A termelés

Nem kérdéses, hogy a termelés a való életben egy összetett, bonyolult folyamat. Sok lépésből áll, rengeteg hozzávaló szükséges, elengedhetetlen hozzá munkaerő, valamilyen tőke, és természeti erőforrás, vagyis az exergia. Ezzel szemben a közgazdaságtanban a termelés csupán egy szükséges lépés, amiben az inputokból, a termelési tényezőkből, az elérhető technológia segítségével előáll az output, a termék. A termelési tényezők többnyire a munka és a tőke. A természeti erőforrásokkal, a természeti tőkével a klasszikus közgazdaságtan nem nagyon foglalkozik. Ha annak szükségét a modellező nem érzékeli, akkor a modellben ez nem is jelenik meg.

Mi jellemzi a termelést az elméletben? Az exergia miért nem termelési tényező a közgazdaságtanban, mikor tagadhatatlanul minden termelési folyamat része? Ebben a fejezetben először ezekre a kérdésekre adunk választ, majd bemutatjuk a valóságban megvalósuló termelés jellegzetességeit. A fejezet végén az alapvető különbségeket gyűjtjük össze.

3.1. Termelés a közgazdaságtanban

Mikro-és makroökonómiából megtanultuk, hogy a vállalat termel, a háztartás pedig fogyaszt, és megtakarít. A termelés maga csak egy függvényként jelenik meg, amibe a termelési tényezők az inputok (tőke és munka), az output pedig a termék. A függvény meghatározza a szükséges inputok arányát, a technológiát képviseli. A termék mennyiségét a vállalat úgy határozza meg, hogy profitja maximális legyen, a készterméket pedig értékesíti a háztartások részére. Ezzel szemben a valóságban mindig szükség van exergiára, természeti tőkére a termeléshez.

Felmerülhet a kérdés: Miért ne jelenne meg az exergia? A tőkébe beletartozhat ez az erőforrás is, hiszen a tőke tágabb fogalma tartalmazza a természeti és művi tőkét is. Van azonban egy lényeges különbség a természeti tőke és művi tőke között. Míg a művi tőke állományának elvileg nincs korlátja, addig a természeti tőke állománya nem növekedhet a végtelenségig.

Érdekes módon a hagyományos termelési függvényben a termelési tényezők között nem is szerepel az exergia. A legtöbbször alkalmazott függvény a Cobb-Douglas típusú termelési függvény, melynek termelési tényezői –többnyire- a tőke, és a munka. Miért nem szerepel benne az exergia, mely, mint említettük a termeléshez szükséges erőforrás? Ezen

kérdés megválaszolásához először azt kell megvizsgálni, hogy a közgazdaságtan kezdeti idejében mit jelentett a termelés.

Akkoriban a gazdaság leginkább mezőgazdaságot jelentett, a megtermelt jószág pedig főként élelmiszer volt. Ennek termelésére munkát, tőkét (szerszámot) és földet alkalmaztak, melyek használásának adott költsége volt. Ezen kívül természetesen felhasználtak exergiát is, ez azonban még a napsugárzás formájában szerepelt, melyért nem kellett fizetni. Éppen ezért a termelés tényezői között sem volt szükséges hogy szerepeljen.

Az ipari forradalom következményeként azonban az ipar megerősödött a mezőgazdasággal szemben. Itt az exergia már fontos szerepet játszott, mivel a gépek, gyárak nem működnek exergia nélkül. (Ayres, 2010)

Általánosságban is elmondható, hogy a közgazdaságtanban használt termelés és a való életben megvalósuló termelés között különbséget kell tenni. Míg a modellekben emlegetett termelés szimbolikus, ahol a tőkéből és munkából a technológia segítségével terméket állítunk elő *egy lépésben*, addig a való élet termeléséhez először ki kell bányászni a nyersanyagokat, ezeket fel kell dolgozni, és több köztterméken keresztül, *számtalan fázisban* jutunk csak el a kész termékhez. Minden egyes lépésben exergiát használunk fel, amely nélkül a termék nem lenne megvalósítható. A következőkben részletesebben is bemutatjuk a termelés jellemző folyamatait.

3.2. Termelés a gyakorlatban

Elmondhatjuk, hogy rengetegféle termelési folyamat létezik, amelyek sok szempontból különböznek. Vannak azonban olyan elemek, amik minden esetben megtalálhatók a folyamatban. Az erőforrások, nyersanyag megkeresése, majd kibányászása az első lépése a termelésnek. Ez lehet akár a mezőgazdaság, vagy halászat, amely élelmiszert állít elő. Ide tartozik a bányászat is, ahol fémércet, szenet termelünk ki. Az olajfúró torony a kőolajat és a felette lévő földgázt teszi elérhetővé. Ezek az anyagok azonban gyakorlatilag mindig valami mással együtt találhatóak meg, így el kell őket különíteni.

Ezt követi a tisztítás, ahol a szennyezőket távolítjuk el. Sok esetben – többek közt az kőolaj esetén – a már tiszta anyagot kezelik, elegyítik, ezzel javítva a minőségét. A kibányászott, tisztított uránt például dúsítják, és később így használják fel. A kőolaj különböző minőségű részeit frakcionált desztillációval választják el egymástól, így kapnak többek közt kerozint, gázolajat, stb.. Ezeket a frakciókat tovább kezelik, összetett eljárásokkal javítják a minőségüket. Minden összetevőt felhasználnak, de más-más célra.

Ezek a már tiszta, elválasztott kiindulási anyagok azonban általában nem a megfelelő formában lelhetők fel. Különböző eljárásokkal kell átalakítani őket a számunkra értékes formájúvá. Ilyen lehet a fémércekből a fém kinyerése, a kohászat, ahol a fém-oxidot redukáljuk. Ehhez a folyamathoz is használunk fel exergiát, és hulladékok is keletkeznek. A következő ábra a bányanedves szén átalakításait, és az átalakítás során keletkező anyagokat mutatja.

Szén összetétele

Kiindulási anyag	Bányanedves szén					
Általános összetétel	éghető (é)	nem éghető ballaszt				
		ásványi anyag		nedvesség		
Szárítás vékony rétegben szobahőmérsékleten	légszáraz szén					durva nedvesség (n ^d)
Szárítás 105 C°-ra	nedvességmentes szén			higroszkópos nedvesség (n ^h)		
	éghető szerves		éghetetlen szervetlen			
Hevítés 850 C°-ra levegőtől elzárva	illó rész (i)		koksztmaradék (k _m)		Összes nedvesség (n ^ö)	
Tökéletes elégetés 850 C°-on			fixkarbon (f)	hamu (h)		
Kémiai vagy elemi analízis	éghető kén (S ^é)	nitrogén (N)	oxigén (O)	hidrogén (H)	össz. karbon (C ^ö)	hamu (h)

1. ábra: A bányanedves szén feldolgozása

Forrás: Fenntartható fejlődés és atomenergia előadás diasora (6. előadás, 23. dia, Dr. Aszódi Attila)
<http://bmekornyesz.hu/sqlatm/index.php?dir=silo%2FVC3%A1laszthat%C3%B3t%C3%A1rgyak%2FFenntarthat%C3%B3+fej%C5%91d%C3%A9s+%C3%A9s+atomenergia%2F> (2011.05.09)

Jól látszik, hogy a kiindulási anyagnak az éghető részek csak egy kis hányadát adják ki. Csupán ezekből nyerhető ki az exergia, a kibányászott szén nagyrészt az exergia termelés szempontjából haszontalan anyagokból áll. Ilyen például a szén nedvességtartalma, vagy a visszamaradó hamu. Ezekből a már használatra kész kiindulási anyagokból a termelés következő szakaszaiban exergia, munka, és tőke segítségével elkészítik a terméket. A

végző terméket ezután felhasználják. Miután ellátta a szerepét hulladékká válik. Lehetséges, hogy valamilyen módon újrahasznosítják, de 100%-osan sosem lehet újra felhasználni.

A neoklasszikus közgazdaságtan termelése és a valós termelés között a legfontosabb különbségeket két pontban lehet összefoglalni. Egyrészt a való életben egy termék előállításához mindig szükség van abszolút szűkösségű erőforrásra, exergiára. Másrészt a termelés folyamán hulladék keletkezik, mely értéktelen, és a környezetet terheli. Ez a két tényező jelentheti napjainkban a gazdasági növekedés korlátját.

A dolgozatban az exergia által állított korlátot tárgyaljuk részletesebben. A fogalom megértéséhez, és a gazdaságra gyakorolt hatásának ismeretéhez az energiához kapcsolódó törvényeket, a termodinamika törvényeit kell megismerni.

4. A termodinamika főtételei

Ebben a részben szeretnénk bemutatni azokat a legfontosabb természeti törvényeket, amelyeket a termelés vizsgálatakor nem szabad figyelmen kívül hagyni. Mivel a gazdaság a természet része, a kibocsátás a környezet zárt rendszerében nem lehet végtelen. Ennek korlátja az exergia szűkössége. Ennek megértéséhez bemutatjuk a termodinamika első és második főtételeit, valamint az exergia és entrópia fogalmait. Először az elméleti hátteret, majd ezek gyakorlati alkalmazását ismertetjük. A gyakorlati alkalmazások esetén megkülönböztetünk energia (pontosabban exergia) termelő, és exergia felhasználó folyamatokat.

4.1. A termodinamika elméleti háttere³

A gazdaság vizsgálatakor általában nem szoktunk természeti törvényekkel foglalkozni, pedig ezek sok esetben behatárolják a gazdaságot. A fenntartható fejlődés gondolata már kiemeli azonban, hogy a gazdaság és a természet egymással szoros kapcsolatban áll, egyik a másik nélkül nem működhet. Ilyen összefüggésekkel foglalkozik – többek között – a termodinamika. A termodinamika az anyagok, rendszerek, folyamatok energiájával és energiaátalakulásaival foglalkozik. Minden rendszer arra törekszik, hogy energiája a lehető legalacsonyabb legyen, így stabil állapotba kerüljön.

A termodinamika első főtétele kimondja, hogy *az energia nem vész el, csak átalakul*. Ennek értelmében tehát egy zárt rendszerben (például a világegyetem) az energia összmenyisége állandó. Felmerülhet ekkor az olvasóban a kérdés: De akkor miért kell nekünk egyáltalán foglalkozni az energia kérdésével, hiszen bármit csinálunk, mindig ugyanannyi lesz belőle?

Ekkor érdemes a termodinamika második főtételeivel megismerkedni. Az energiát ugyanis két részre oszthatjuk. Egyik része azaz energia, mellyel munkát tudunk végezni, fel tudunk használni. Ezt nevezzük *exergiának*, mely a hasznos munkavégző képességnek felel meg. Az energia maradék része pedig az *anergia*, vagy kötött energia. Ezt azonban már nem hasznosíthatjuk, értéktelen számunkra. A második főtétel kimondja, hogy *az energia átalakítása során a hasznos munkavégző képessége folyamatosan csökken*. Maga az energia tehát megmarad, csupán az exergiát használjuk el. Minden egyes átalakítás után

³ A termodinamika témaköre Atkins: Fizikai kémia I: Egyensúly (Nemzeti Tankönyvkiadó, 2002) című művében részletesebben is megismerhető.

a rendszer exergiája csökken, a rendszer hasznos munkavégző képessége egyre kisebb lesz. Amikor a rendszer egyensúlyban van, akkor energiája csak és kizárólag kötött formában található. Az exergia gyakorlatilag a rendszer egyensúlytól való távolságát adja meg.

A második főtétele legismertebb megfogalmazása: A hő sosem megy hidegebb helyről a melegebb felé. Ennek magyarázatára találták ki az entrópia fogalmát, a mely a termodinamika talán egyik legbonyolultabb fogalma, „mely még fizikusok számára sem könnyen érthető” (Harr, 1959, 37. o.). Az entrópia egy absztrakt fogalom, melyet legegyszerűbben úgy fogalmazhatunk meg, hogy a rendezetlenség mértékét adja meg. Egy rendszer pedig mindig a maximális rendezetlenség felé tart, magától lejátszódó, spontán folyamatban az entrópiája nő. Amikor a rendszer egyensúlyban van, akkor entrópiája maximális, exergiája pedig nulla. Az exergiát úgy is megfogalmazhatjuk, hogy alacsony entrópiájú energia.

A természetben minden folyamat ezen tételek értelmében zajlik. A rendetlenség mértéke tehát folyamatosan nő, lassan de biztosan egyensúlyhoz közelít a zárt rendszer, munkavégző képessége azaz exergiája pedig csökken. Éppen ezért mondhatjuk azt, hogy az alacsony entrópiájú energia, azaz az *exergia szűkös erőforrás*.

4.2. Termodinamika a gyakorlatban

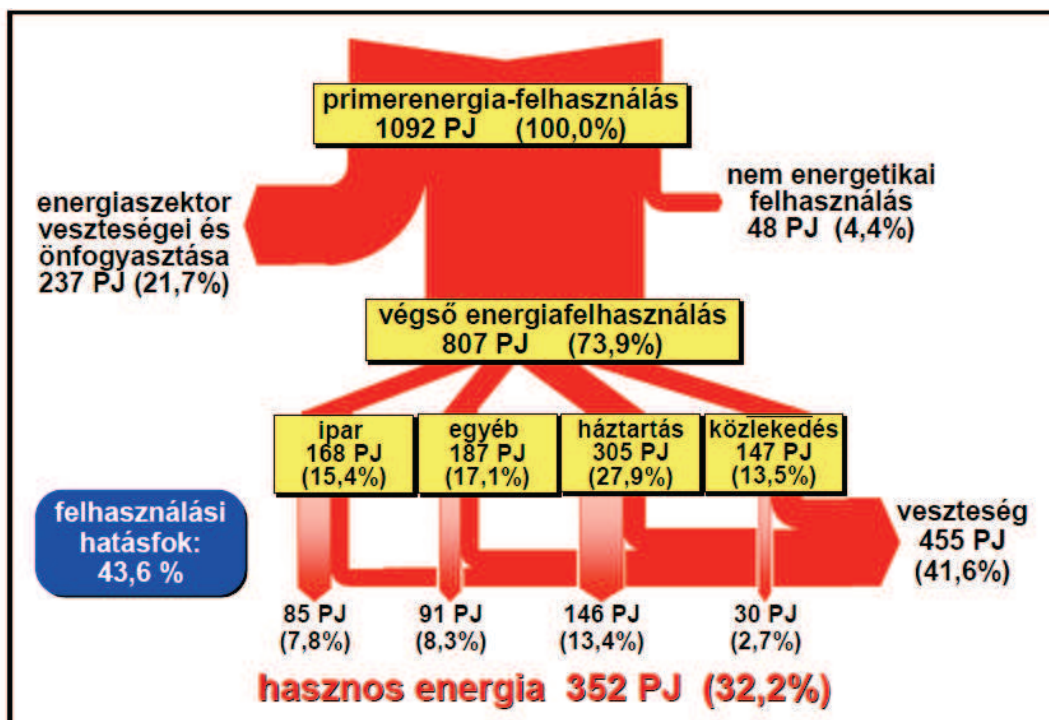
Hogyan valósul meg ez a gyakorlatban? Milyen jelentősége van a termodinamika főtételeinek a gazdaság, a termelés számára? Ezek azok a kérdések, amelyekre a dolgozatban többek közt választ szeretnénk adni. Ehhez meg kell vizsgálni az exergia-termelő és exergia-felhasználó folyamatokat.

Vannak olyan rendszerek, hordozók, amelyek az exergiát elérhetővé teszik számunkra. Ilyen a szén, földgáz, vagy kőolaj, amelyek fosszilis, nem megújuló hordozók. Léteznek megújulóak is, többek közt a biomassza, szél, napenergia, vagy vízenergia, geotermikus energia. Ezek a hordozók energia-termelő folyamatokban vesznek részt. El kell mondani, hogy az *energiatermelés* tulajdonképpen félrevezető kifejezés, hiszen energiát nem állíthatunk elő. Pontosabb lenne az *energiaátalakításról* beszélni. A dolgozatban főként a fosszilis, nem megújuló exergia gazdaságával, és a kibocsátásra gyakorolt hatásával foglalkozunk, így itt is főként azokról szólunk, mivel ezek a meghatározóak ma az energia átalakításban, a megújuló energia a technológia mai szintjén túlságosan költséges.

4.2.1. Exergia termelés

A fosszilis energiahordozók exergiáját felhasználjuk a termeléshez, a termékbe a tőke, a munka mellé ez is beépül. Ehhez először azonban hasznos munkává kell alakítani az exergiát. Ez azt jelenti, hogy a „benne lévő” potenciális munkavégző képességet ki kell nyernünk, számunkra felhasználható formájúvá kell alakítani. Mi azaz energiaforma, amelyet a mindennapokban használunk? A villamos energia.

A fosszilis energiahordozókból több lépésen keresztül juthatunk el a villamos energiáig. Ezeket először elégetik, és a felszabaduló hő segítségével vizet párologtatnak el. Ezt a gőzt használhatjuk melegítésre, vagy tovább alakíthatjuk. Ekkor a gőz meghajt egy turbinát, amely villamos áramot termel. Ezt az áramot használjuk fel nap mint nap különféle célokra. De ezeknél a folyamatoknál, sőt általánosságban is elmondható, hogy az exergia átalakítása sosem teljes. Csak egy adott hányadát tudjuk átalakítani árammá, hasznos munkává. Az átalakíthatóság mértékét a hatásfok adja meg, amely egy nullánál nagyobb, de egynél szigorúan kisebb szám. A következő ábra is ezt mutatja.



2. ábra: Magyar feltételezett energiahelyzet ábra (2003)

Forrás: Fenntartható fejlődés és atomenergia (9. előadás 9. dia, Dr. Csom Gyula)

<http://bmekornyesz.hu/sqlatm/index.php?dir=silo%2FV%C3%A1laszthat%C3%B3+term%C3%A1lok%2FFenntarthat%C3%B3+fejl%C5%91d%C3%A9s+%C3%A9s+atomenergia%2F> (2011.05.09)

Az ábrán a feltételezett magyar energiahelyzet látható. Az értékek a 2003-as évre vonatkoznak. Látható, hogy a kibányászott energiahordozóból származó energia, azaz a primer energia felhasználás csupán 32 %-ából lesz hasznos energia. A felhasználás hatásfoka is csak 43,6 %. Veszteség minden átalakítási lépésben keletkezik, legnagyobb a felhasználáskor.

Minden energiahordozónak meghatározható a potenciális hasznos munkavégező képessége, amely a fosszilis energiahordozók esetén közel egyenlő a fűtőértékével. A következő táblázatban néhány ismert fűtőanyag exergiáját és fűtőértékét látjuk.

1. táblázat: Energiahordozók fűtőértéke és exergiája

Forrás: Ayres (2009)

<i>Energiahordozó</i>	<i>Fűtőérték (kJ/kg)</i>	<i>Exergia (kJ/kg)</i>
Szén	21 680	23 588
Koksz	28 300	29 998
Benzin	39 500	42 383,5
Dízel olaj	39 500	42 265
Tűzifa	15 620	17 641

A 2. oszlop az egy kg anyag elégetésekor felszabaduló energiát mutatja, a 3. oszlop pedig az egy kg anyagban lévő elméletileg kinyerhető munkavégző képességet, az exergiáját adja meg. Látható, hogy bár a két érték közel azonos, de az exergia mindig nagyobb, mint a fűtőértéke, vagyis – ahogyan már utaltunk rá – a teljes exergiát sosem tudjuk kinyerni belőle.

Exergia-átalakító folyamat tehát például a fosszilis energiahordozók elégetése. Azonban más folyamatok során is alakul át exergia. Egy anyag vagy rendszer akkor van közelebb az egyensúlyi állapotához, akkor stabilabb, ha energiaszintje alacsonyabb. Amikor pedig a rendszer kedvezőbb energiaállapotba kerül a „nyereségét” hő formájában kisugározza. Ha ez gyorsan történik és a kisugárzott energia elég nagy, akkor ezt fel is tudjuk használni. Ilyen az energiahordozók esete, vagy az üzemanyag elégetése az autó motorjában.

Az is megtörténhet azonban, hogy az energia kisugárzása egy lassú folyamat. Amikor a vas tárgyak elrozsdásodnak, akkor is keletkezik hő, de olyan lassan és kis mértékben, hogy a keletkező hő disszipálódik, a környezetben szétoszlik.

Ha sót oldunk fel vízben, akkor hasonló folyamat játszódik le. A sós víz energiaszintje alacsonyabb, mint külön a sóé és a vízé. Így az oldás során az energiakülönbséget hő formájában kisugározza a rendszer. Ez azonban olyan kis mennyiség, hogy nem is érzékelhető.

4.3. A termelés és a termodinamika kapcsolata

Megismerkedtünk a termelés folyamatával, és termodinamika törvényszerűségeivel is. Elmondható, hogy a termelés folyamán exergiát használunk fel, de ennek hasznosítása, hasznos munkává alakítása soha sem teljes.

A termelés másik jellegzetessége, hogy ennek folyamán hulladék keletkezik, amely a környezetet szennyezi. Ez lehet akár az elhasznált csomagolás, vagy a gépjárművek által kibocsátott szén-dioxid és egyéb szennyező anyagok. Ezek csökkentése azonban növeli a költségeket és az exergia felhasználást is. Figyelembe kell azonban venni, hogy ha ma nem foglalkozunk velük, akkor a jövőben a környezetszennyezés következményei által okozott költségek jóval nagyobbak lesznek, és az ehhez szükséges exergia befektetés is jelentősen megnő. Ezen költségek csökkentését segítheti a technológia fejlődése. (Ayres, 2010)

Georgescu-Roegen szerint a termelés alacsony entrópiájú anyagból magas entrópiájút állít elő. Mivel az alacsony entrópiájú energia, az exergia véges erőforrás, ennek elhasználása tragikus következményekkel járhat.

„A végkimenetel világos. Minden alkalommal, amikor gyártunk egy Cadillacet, visszavonhatatlanul elpusztítunk egy adag alacsony entrópiát, amit egyébként eke vagy lapát előállítására is lehetne használni. Más szavakkal, minden alkalommal, amikor előállítunk egy Cadillacet, a jövőbeli emberi életek számának csökkentése árán tesszük. Az ipari bőséget nyújtó gazdasági fejlődés áldás lehet számunkra, akik most élünk, és azok számára, akik még élvezhetik a közeljövőben, ám határozottan az emberi fajnak mint egésznek az érdeke ellen való, amennyiben érdeke az, hogy olyan hosszú élete legyen, amilyen csak összeegyeztethető az alacsony entrópia hozományaival.” (Nicholas Georgescu-Roegen, 2002. 26. oldal)

Georgescu-Roegen igen pesszimista jövőt fest le. A fenntartható fejlődés, megjelenik itt is. Az alacsony entrópiájú energiát, azaz exergiát olyan mértékben kell felhasználni, hogy a természetet ne fosszuk ki. Érdemes azonban ekkor visszagondolni az ipari forradalom előtti gazdaságra. Ott a fő exergia forrás a napsugárzás volt, amelyet a növények az élőlények számára értékes formában megőriztek. A Nap ma is folyamatosan küldi az exergiát a Földre, amelynek egy részét a növények fotoszintézisen keresztül hasznosítunk. Egy másik része azonban kárba vész. Ezt is lehetne azonban hasznosítani, de ez a mai technológia szintje mellett még nem hatékony. A gazdaság számára az exergia szűkössége, a növekedésre gyakorolt korlát tehát a technológia fejlődésével kitágítható. (Ayres, 1998)

A termodinamika így az alacsony entrópiájú energia, az exergia véges mennyisége miatt a termelés egyfajta határát jelenti. Ez a határ azonban kétféleképpen is kiterjeszthető. Egyrészt az exergia hasznos munkává alakításának hatásfoka fejleszthető, amely ma csupán 40 % körüli. Másrészt a ma még nem hatékony, de nagy mennyiségben elérhető Napból érkező exergia hasznosítása is megoldás lehet erre.

5. A kibővített termelési függvény

Megismerkedtünk a termelés jellegzetességeivel mind az elméletben, mind a gyakorlatban. A termodinamika legfontosabb törvényei, és az exergia, entrópia fogalmának megismerése után pedig térjünk rá egy olyan termelési függvény vizsgálatára, amiben az exergia, mint termelési tényező is szerepel.

Azt feltételezzük, hogy az exergia állománya véges, és az exergia felhasználással folyamatosan csökken.

5.1. Termelés a technológia oldaláról

Ebben a fejezetben bemutatjuk a kibővített termelési függvényt, és a technológia oldaláról jellemezzük. Ehhez felírjuk a technológiai helyettesítési határrátát (MRTS), a helyettesítési rugalmasságot, és meghatározzuk az optimálisan felhasznált tényezőmennyiségeket.

A termelési függvény tényezőit kibővíthetjük: a munka mellett a T-vel jelölt tőkén belül megkülönböztetünk fizikai tőkét (továbbiakban tőke), és a már megismert exergiát. Minden termelési folyamatban szükség van az exergiára, így a termelési függvényből sem maradhat ki.

Bár a valóságban a termelésben nem az exergia, hanem az abból adott hatásfokkal átalakított hasznos munkavégző képesség az, ami a termékbe „beépül”, a továbbiakban itt exergiáról fogunk beszélni. Ennek oka az, hogy a hatásfokot egynek feltételezzük, így a hasznos munka mennyisége megegyezik az exergiáéval.⁴

A termelési függvény ekkor:

$$Q = L^\alpha T^{1-\alpha}, \text{ ahol } T = \gamma K^\beta E^{1-\beta} \quad (1.)$$

ahol α , β , nullánál nagyobb, de egynél kisebb számok. Az (1.) egyenletet felírhatjuk úgy is, hogy

$$Q = L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (2.)$$

Elmondható róla, hogy Cobb-Douglas típusú, így a termelési tényezők helyettesíthetik egymást. Mindegyek nélkülözhetetlen azonban, ha bármelyik tényező felhasználása nulla, akkor a kibocsátás is zérus, így az exergia elengedhetetlen tényező a termelés esetében,

⁴ Nem foglalkozunk a hatásfok alakulásával, mivel a következőkben a termelést egy időszakban vizsgáljuk csak. Itt a hatásfoknak nincs különösebb jelentősége. Egy dinamikus modellben viszont a hatásfok időbeli alakulása fontos tényező lehet.

mint azt az előző fejezetekben bemutattuk. Ez 2. fejezetben bemutatott szigorú fenntarthatóság fogalmának felel meg, mivel az exergia nem helyettesíthető teljes mértékben tőkével.

A függvényre jellemző a csökkenő határhaszon elve, így a termelési tényezők felhasználásának növekedése egyre kevesebbet tesz hozzá a kibocsátáshoz.

5.1.1. Technológiai helyettesítési határráta

Amennyiben a termelési tényezők határtermékét meghatározzuk, felírhatóak a két termelési tényezőhöz tartozó technológiai helyettesítési határráták.

A határtermékek:

$$MP_L = \alpha L^{\alpha-1} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (3.)$$

$$MP_E = (1 - \alpha)(1 - \beta) L^{\alpha} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} \quad (4.)$$

$$MP_K = \beta(1 - \alpha) L^{\alpha} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)-1} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (5.)$$

A technológiai helyettesítési határráta (MRTS) megadja, hogy ha például az exergia felhasználását csökkentjük, akkor mennyivel kell növelni ceteris paribus a munka felhasználását ahhoz, hogy a termelés szintje ne változzon.

$$MRTS_{EL} = \frac{MP_L}{MP_E} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)(1 - \beta)} \frac{E}{L} \quad (6.)$$

$$MRTS_{EK} = \frac{MP_K}{MP_E} = \frac{\beta}{(1 - \beta)} \frac{E}{K} \quad (7.)$$

$$MRTS_{KL} = \frac{MP_L}{MP_K} = \frac{\alpha}{\beta(1 - \alpha)} \frac{L}{K} \quad (8.)$$

Amennyiben a tőke – exergia pároshoz tartozó MRTS nagyobb, mint a munka – exergia pároshoz tartozó, akkor elmondhatjuk, hogy c. p. több tőkére van szükség egységnyi exergia helyettesítésére, mint munkára.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a modellben nem vettük figyelembe azt, hogy a tőke és exergia előállítása szintén egy összetett folyamat. A tőke előállításához is szükség van exergiára, így ha az exergiát tőkével helyettesítjük, a nettó exergiafelhasználás nőhet is.

5.1.2. Helyettesítési rugalmasság

A helyettesítési rugalmasság azt fejezi ki, hogy a bármely két termelési tényező arányának 1 %-os változása a technikai helyettesítési határrátát hány százalékkal változtatja meg.

A rugalmasság képlete (amennyiben a tőke és exergia arányára írjuk fel):

$$\sigma = \frac{d\left(\frac{K}{E}\right)}{\frac{K}{E}} \frac{MRTS}{dMRTS} = \frac{d\left(\frac{K}{E}\right)}{\frac{K}{E}} \frac{\frac{dK}{dE}}{d\left(\frac{dK}{dE}\right)} = \frac{d\left(\frac{K}{E}\right)}{\frac{d\left(\frac{dK}{dE}\right)}{\frac{K}{E}}} = \frac{d\left(\frac{K}{E}\right)}{d\left(\frac{dK}{dE}\right)} \frac{dK}{dE} \frac{E}{K} \quad (9.)$$

Ebből dK/dE -hez úgy jutunk, hogy

$$\frac{dK}{dE} = \frac{\frac{\partial Q}{\partial E}}{\frac{\partial Q}{\partial K}} = \frac{L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} (1-\alpha)(1-\beta)}{L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)-1} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \beta(1-\alpha)} = \frac{K(1-\beta)}{E\beta} \quad (10.)$$

Így

$$\frac{dK}{dE} \frac{E}{K} = \frac{K(1-\beta)}{E\beta} \cdot \frac{E}{K} = \frac{(1-\beta)}{\beta} \quad (11.)$$

A helyettesítési rugalmasság képletének első tagjának reciproka könnyen meghatározható a (10.) egyenletből:

$$\left[\frac{d\left(\frac{K}{E}\right)}{d\left(\frac{dK}{dE}\right)} \right]^{-1} = \frac{d\left(\frac{dK}{dE}\right)}{d\left(\frac{K}{E}\right)} = \frac{(1-\beta)}{\beta} \quad (12.)$$

A (11.) és (12.) egyenletből a helyettesítési határrátára a következő adódik:

$$\sigma = \frac{d\left(\frac{K}{E}\right)}{d\left(\frac{dK}{dE}\right)} \frac{dK}{dE} \frac{E}{K} = \frac{(1-\beta)}{\beta} \frac{\beta}{(1-\beta)} = 1 \quad (13.)$$

Ugyanez meghatározható az exergia és munka arányára is:

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dL} &= \frac{\frac{\partial Q}{\partial L}}{\frac{\partial Q}{\partial E}} = \frac{L^{\alpha-1} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \alpha}{L^{\alpha} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} (1-\alpha)(1-\beta)} \\ &= \frac{E\alpha}{L(1-\alpha)(1-\beta)}\end{aligned}\quad (14.)$$

$$\frac{dE}{dL} \cdot \frac{L}{E} = \frac{E\alpha}{L(1-\alpha)(1-\beta)} \cdot \frac{L}{E} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)(1-\beta)} \quad (15.)$$

$$\left[\frac{d\left(\frac{E}{L}\right)}{d\left(\frac{dE}{dL}\right)} \right]^{-1} = \frac{d\left(\frac{dE}{dL}\right)}{d\left(\frac{E}{L}\right)} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)(1-\beta)} \quad (16.)$$

Tehát

$$\sigma = \frac{d\left(\frac{E}{L}\right)}{d\left(\frac{dE}{dL}\right)} \frac{dE}{dL} \frac{L}{E} = \frac{(1-\alpha)(1-\beta)}{\alpha} \frac{\alpha}{(1-\alpha)(1-\beta)} = 1 \quad (17.)$$

Amennyiben a tőkére és munkára írjuk fel, ugyanerre az eredményre jutunk, a tőke és munka helyettesítési rugalmassága is egy.

Ez az eredmény teljes mértékben összhangban van azzal, hogy Cobb-Douglas típusú termelési függvényből indultunk ki, mivel az ilyen termelési függvényhez tartozó helyettesítési rugalmasság egységnyi.

5.1.3. A termelési tényezők optimálisan felhasznált mennyisége

A fent bemutatott termelési függvényhez felírhatunk egy költségfüggvényt. Ennek segítségével meghatározható a termelési tényezők felhasználásának optimális mennyisége adott kibocsátási szint mellett.

$$TC = p_L L + p_K K + P_E E \quad (18.)$$

A feladat a költség minimalizálása, adott $\hat{Q}$ termelési szint mellett. Ehhez felírható a Lagrange-függvény.

$$Z = p_L L + p_K K + P_E E + \lambda \left(\hat{Q} - L^\alpha (\gamma K^\beta E^{1-\beta})^{1-\alpha} \right) \quad (19.)$$

Ezt deriválva a munka, exergia, tőke, és λ szerint megkapjuk az optimalizáláshoz szükséges egyenleteket (20-23).

$$\frac{\partial Z}{\partial p_L} = p_L - \lambda \alpha L^{\alpha-1} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} = 0 \quad (20.)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial p_E} = p_E - \lambda (1-\alpha)(1-\beta) L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} = 0 \quad (21.)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial p_K} = p_K - \lambda \beta (1-\alpha) L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)-1} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} = 0 \quad (22.)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \lambda} = \hat{Q} - L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} = 0 \quad (23.)$$

Az (20.) egyenletből kifejezhető:

$$\lambda = \frac{p_L}{\alpha L^{\alpha-1} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)}} \quad (24.)$$

A (22.) egyenletből kifejezhető p_K , λ helyére pedig behelyettesíthető a kifejezett érték:

$$p_K = \frac{p_L}{\alpha L^{\alpha-1} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)}} \cdot \beta (1-\alpha) L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)-1} E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (25.)$$

Az egyenletet egyszerűsíthetjük,

$$p_K = \frac{p_L}{\alpha L^{\alpha-1} K^{\beta(1-\alpha)}} \cdot \beta (1-\alpha) L^\alpha K^{\beta(1-\alpha)-1} \quad (26.)$$

Az azonos alapú hatványok összevonva azt kapjuk, hogy:

$$p_K = \frac{p_L \beta (1-\alpha) L^{\alpha-(\alpha-1)} K^{\beta(1-\alpha)-1-\beta(1-\alpha)}}{\alpha} = \frac{p_L \beta (1-\alpha) L}{\alpha K} \quad (27.)$$

ebből, kifejezhető L:

$$L = \frac{p_K \alpha}{\beta (1-\alpha) p_L} K \quad (28.)$$

Amennyiben vesszük a (21.) egyenletet, átrendezzük, és λ helyére behelyettesítjük a (24.) egyenletben található kifejezést:

$$p_E = \frac{p_L}{\alpha L^{\alpha-1} \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)}} \cdot (1-\alpha)(1-\beta)L^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} \quad (29.)$$

Itt is egyszerűsíthetünk, és a hatványkitevőket rendezhetjük:

$$p_E = \frac{p_L(1-\alpha)(1-\beta)L^{\alpha-(\alpha-1)} E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1-(1-\beta)(1-\alpha)}}{\alpha} \quad (30.)$$

Amiből átrendezve azt kapjuk, hogy:

$$E = \frac{p_L(1-\alpha)(1-\beta)}{p_E \alpha} L \quad (31.)$$

L helyére behelyettesítve a (28.) egyenlet kifejezését:

$$E = \frac{p_L(1-\alpha)(1-\beta)}{p_E \alpha} \cdot \frac{p_K \alpha}{\beta(1-\alpha)p_L} K = \frac{(1-\beta)p_K}{p_E \beta} K \quad (32.)$$

A (23.) egyenletet átrendezve, és E helyére a (32.) egyenletet, L helyére pedig a (28.) egyenletet beírva azt kapjuk, hogy:

$$\hat{Q} = \left(\frac{p_K \alpha}{\beta(1-\alpha)p_L} K \right)^\alpha \gamma^{1-\alpha} K^{\beta(1-\alpha)} \left(\frac{(1-\beta)p_K}{p_E \beta} K \right)^{(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (33.)$$

Ebből K-t kifejezve megkapjuk az optimális fizikai tőke felhasználást, ami a költségminimumhoz tartozik adott kibocsátás mellett. Ez:

$$K^{\alpha+\beta(1-\alpha)+(1-\beta)(1-\alpha)} = K^{\alpha+\beta-\alpha\beta+\alpha\beta+1-\alpha-\beta} = K^* = \hat{Q} \cdot A \quad (34.)$$

ahol

$$A = \left(\frac{p_K \alpha}{\beta(1-\alpha)p_L} \right)^{-\alpha} \gamma^{1-\alpha} \left(\frac{(1-\beta)p_K}{p_E \beta} \right)^{-(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (35.)$$

Ennek segítségével meghatározható a munka (28. egyenlet), és az exergia (32. egyenlet) optimális mennyisége is:

$$L^* = \frac{p_K \alpha}{\beta(1-\alpha)p_L} \cdot \hat{Q} \cdot A \quad (36.)$$

$$E^* = \frac{(1-\beta)p_K}{p_E \beta} \cdot \hat{Q} \cdot A \quad (37.)$$

Az optimális felhasználás nagyságát tehát a tényezőárak, a kibocsátási szint, és a termelési függvény alakja határozza meg. Nagyobb kibocsátási szinthez értelemszerűen nagyobb tényezőfelhasználás tartozik, így a termelés növelése az exergia állomány csökkenését eredményezi.

Felírható a költségfüggvény is:

$$TC = p_L \frac{p_K \alpha}{\beta(1-\alpha)p_L} \cdot \hat{Q} \cdot A + p_K \hat{Q} \cdot A + p_E \frac{(1-\beta)p_K}{p_E \beta} \cdot \hat{Q} \cdot A \quad (38.)$$

Egyszerűsítések, és kiemelések után azt kapjuk, hogy

$$TC = p_K \cdot \hat{Q} \cdot A \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta(1-\alpha)} + 1 + \frac{(1-\beta)}{\beta} \right) \quad (39.)$$

A zárójelben lévő kifejezést közös nevezőre hozhatjuk:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha + \beta(1-\alpha) + (1-\alpha)(1-\beta)}{\beta(1-\alpha)} &= \frac{\alpha + \beta - \alpha\beta + 1 - \alpha - \beta + \alpha\beta}{\beta(1-\alpha)} \\ &= \frac{1}{\beta(1-\alpha)} \end{aligned} \quad (40.)$$

Így a költség függvény, amennyiben a zárójelben lévő tagot egyszerűsítve, A helyére pedig (35.) egyenletet írjuk be:

$$\begin{aligned} TC &= p_K \cdot \hat{Q} \cdot \left(\frac{1}{\beta(1-\alpha)} \right) \cdot \left(\frac{p_K \alpha}{\beta(1-\alpha)p_L} \right)^{-\alpha} \\ &\quad \cdot \gamma^{1-\alpha} \cdot \left(\frac{(1-\beta)p_K}{p_E \beta} \right)^{-(1-\beta)(1-\alpha)} \end{aligned} \quad (41.)$$

Ebből a termelési tényezők árait kiemelve a költségfüggvényre a következő kifejezés adódik

$$\begin{aligned} TC &= p_L^\alpha \cdot p_K^{1-\alpha-(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B \\ &= p_L^\alpha \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B \end{aligned} \quad (42.)$$

ahol

$$B = \hat{Q} \cdot \left(\frac{1}{\beta(1-\alpha)} \right) \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta(1-\alpha)} \right)^{-\alpha} \cdot \gamma^{1-\alpha} \cdot \left(\frac{(1-\beta)}{\beta} \right)^{-(1-\beta)(1-\alpha)} \quad (43.)$$

5.2. Jellemzés a kereslet oldaláról

Amennyiben a költség függvényt adott termelési tényező ára szerint deriváljuk a Shepard lemma értelmében megkapjuk az adott termelési tényező kereseti függvényét (Zalai: 2000, 322-323. o.)

A munka keresleti függvénye tehát az alábbi alakban írható fel

$$L^D = \frac{\partial TC}{\partial L} = \alpha \cdot p_L^{\alpha-1} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B \quad (44.)$$

A munka árának kitevője negatív, és egynél kisebb szám (mivel $0 < \alpha < 1$), tehát a munka árának növekedésével a kereslete csökken. Ezzel szemben a munka keresletét növeli, ha nő a fizikai tőke, vagy az exergia ára.

A tőke keresleti függvénye:

$$K^D = \frac{\partial TC}{\partial K} = \beta(1-\alpha) \cdot p_L^{\alpha} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)-1} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B \quad (45.)$$

Erre is elmondható, hogy a tőke árának kitevője negatív, így ennek növekedése a keresletét csökkenti. A munka, és az exergia árának emelkedése viszont növeli a tőke keresletét.

Az exergia keresleti függvénye:

$$E^D = \frac{\partial TC}{\partial E} = (1-\beta)(1-\alpha) \cdot p_L^{\alpha} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} \cdot B \quad (46.)$$

Az exergia kereslete tehát csökken, amennyiben az exergia ára nő. A tőke és munka árának csökkenése ugyanezt a hatást éri el.

5.2.1. A keresleti görbék rugalmasságai

Amennyiben meghatározzuk a keresleti görbék árrugalmasságait megmondhatjuk, hogy egy tényezőár változása a tényezők keresletére milyen hatással lesz. Így a keresleti görbék

keresztárrugalmasságai az exergia árára nézve megmutathatják, hogy az exergia árának változása a munka vagy a tőke keresletére lesz nagyobb hatással.

A munka keresletének keresztárrugalmassága:

$$\frac{dL^D}{dp_E} \cdot \frac{p_E}{L} = \frac{\alpha \cdot p_L^{\alpha-1} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} \cdot B \cdot (1-\beta)(1-\alpha) \cdot p_E}{\alpha \cdot p_L^{\alpha-1} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B} \quad (47.)$$

Ebből egyszerűsítések után arra jutunk, hogy

$$\varepsilon_{Lp_E} = \frac{dL^D}{dp_E} \cdot \frac{p_E}{L} = (1-\beta)(1-\alpha) \quad (48.)$$

Meghatározható a tőke keresletének keresztárrugalmassága is:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Kp_E} \\ = \frac{\beta(1-\alpha) \cdot p_L^{\alpha} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)-1} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} \cdot (1-\beta)(1-\alpha) \cdot B \cdot p_E}{\beta(1-\alpha) \cdot p_L^{\alpha} \cdot p_K^{\beta(1-\alpha)-1} \cdot p_E^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B} \end{aligned} \quad (49.)$$

Egyszerűsítések után a keresztárrugalmasság:

$$\varepsilon_{Kp_E} = \frac{dK^D}{dp_E} \cdot \frac{p_E}{K} = (1-\beta)(1-\alpha) \quad (50.)$$

Tehát az exergia árának változása a tőke és a munka keresletére ugyanolyan hatással lesz. Amennyiben az ár nő, a tőke és a munka keresleti is nőni fog (hiszen a rugalmasság pozitív, két egynél kisebb pozitív szám szorzata).

A termelési tényezők ára szerinti keresleti rugalmasságok meghatározása hasonló módon lehetséges, ezek a következő táblázatban láthatóak.

2. táblázat: A tényező keresleti görbék rugalmasságai

	L	K	E
p_L	$\alpha - 1$	α	α
p_K	$\beta(1-\alpha)$	$\beta(1-\alpha) - 1$	$\beta(1-\alpha)$
p_E	$(1-\beta)(1-\alpha)$	$(1-\beta)(1-\alpha)$	$(1-\beta)(1-\alpha) - 1$

A rugalmasságok alapján megállapítható, hogy adott keresleti görbe saját ár szerinti rugalmassága negatív, így az ár növekedése a kereslet csökkenését eredményezi. Ezzel

szemben a kereslet más termelési tényező ára szerinti rugalmassága pozitív, tehát a más termelési tényező árának növekedése a keresletet növeli. Ebből arra lehet következtetni, hogy a termelési tényezők helyettesítők.

5.2.2. Termelési tényezőkre kivetett adók hatása

Nézzük meg, hogy mi történik, amennyiben a termelési tényezőkre t_L , t_K , és t_E adót vetünk ki.

Ekkor a keresleti görbék a következőképpen módosulnak:

$$L^D = \alpha \cdot [p_L(1 + t_L)]^{\alpha-1} \cdot [p_K(1 + t_K)]^{\beta(1-\alpha)} \cdot [p_E(1 + t_E)]^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B \quad (51.)$$

$$K^D = \beta(1 - \alpha) \cdot [p_L(1 + t_L)]^\alpha \cdot [p_K(1 + t_K)]^{\beta(1-\alpha)-1} \cdot [p_E(1 + t_E)]^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B \quad (52.)$$

$$E^D = (1 - \beta)(1 - \alpha) \cdot [p_L(1 + t_L)]^\alpha \cdot [p_K(1 + t_K)]^{\beta(1-\alpha)} \cdot [p_E(1 + t_E)]^{(1-\beta)(1-\alpha)-1} \cdot B \quad (53.)$$

Amennyiben meghatározzuk a termelési tényezők adott adók szerinti rugalmasságát megmondhatjuk, hogy adott adó 1 %-os növekedési a termelési tényező keresletét hány százalékkal változtatja meg.

A munka keresletének munkára kivetett adó szerinti rugalmassága meghatározható úgy, hogy

$$\varepsilon_{Lt_L} = \frac{dL^D}{dt_L} \frac{t_L}{L} \quad (54.)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Lt_L} &= \frac{\alpha \cdot p_L^{\alpha-1} (\alpha - 1) (1 + t_L)^{\alpha-2} \cdot [p_K(1 + t_K)]^{\beta(1-\alpha)} \cdot [p_E(1 + t_E)]^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B}{\alpha \cdot [p_L(1 + t_L)]^{\alpha-1} \cdot [p_K(1 + t_K)]^{\beta(1-\alpha)} \cdot [p_E(1 + t_E)]^{(1-\beta)(1-\alpha)} \cdot B} t_L \quad (55.) \\ &= \frac{\alpha \cdot p_L^{\alpha-1} (\alpha - 1) (1 + t_L)^{\alpha-2} t_L}{[p_L(1 + t_L)]^{\alpha-1}} = \frac{(\alpha - 1) t_L}{1 + t_L} \end{aligned}$$

Mivel α egynél kisebb szám, a rugalmasság negatív. A munkára kivetett adó növekedése tehát a munka keresletét csökkenteni fogja.

A munka keresletének exergia, és tőke szerinti rugalmassága ugyanígy meghatározható, és a tőke és exergia minden termelési tényezőre kivetett adó szerint is meghatározható. A végeredmény hasonló formában írható fel.

A rugalmasságok a lenti táblázatban láthatóak.

3. táblázat: Keresleti görbék adó szerinti rugalmasságai

	L	K	E
t_L	$\frac{(\alpha - 1)t_L}{1 + t_L}$	$\frac{\alpha t_L}{1 + t_L}$	$\frac{\alpha t_L}{1 + t_L}$
t_K	$\frac{[\beta(1 - \alpha) - 1]t_K}{1 + t_K}$	$\frac{\beta(1 - \alpha)t_K}{1 + t_K}$	$\frac{\beta(1 - \alpha)t_K}{1 + t_K}$
t_E	$\frac{(1 - \beta)(1 - \alpha)t_E}{1 + t_E}$	$\frac{(1 - \beta)(1 - \alpha)t_E}{1 + t_E}$	$\frac{[(1 - \beta)(1 - \alpha) - 1]t_E}{1 + t_E}$

Megállapíthatjuk, hogy az exergia keresletére pozitívan hat a tőkére és a munkára kivetett adó. Amennyiben tehát a munkát terhelő adó 1%-kal csökken, akkor az exergia kereslete

$\frac{\alpha t_L}{1 + t_L}$ %-kal csökken. A tőkére kivetett adó 1%-os csökkenése az exergia kereslet $\frac{\beta(1 - \alpha)t_K}{1 + t_K}$ %-os csökkenésével jár.

Amennyiben tehát az exergia felhasználását, és így a keresletét szeretnénk csökkenteni, akkor ezt megtehetjük az exergiára kivetett adóval, vagy ennek növelésével. Szintén ezt a hatást érhetjük el a tőke és munka adójának csökkentésével. Ha

$$\frac{\alpha t_L}{1 + t_L} > \frac{\beta(1 - \alpha)t_K}{1 + t_K} \quad (56.)$$

akkor a munkára kivetett adó változtatása jobban hat az exergiára, mint a tőkére kivetett adó csökkentése/növelése.

5.2.3. Termelési tényezők keresletek aránya

A termelési tényezők keresletének arányát felírhatjuk az (51.) - (53.) egyenletek segítségével. Egyszerűsítések után azt kapjuk, hogy

$$\frac{L^D}{K^D} = \frac{\alpha}{\beta(1 - \alpha)} \frac{p_K}{p_L} \frac{1 + t_K}{1 + t_L} \quad (57.)$$

$$\frac{L^D}{E^D} = \frac{\alpha}{(1 - \beta)(1 - \alpha)} \frac{p_E}{p_L} \frac{1 + t_E}{1 + t_L} \quad (58.)$$

$$\frac{E^D}{K^D} = \frac{(1 - \beta) p_K}{\beta} \frac{1 + t_K}{p_E (1 + t_E)} \quad (59.)$$

A tényező keresletek arányát tehát meghatározza a technológia (a szorzat első tagja), mivel ez a termelési függvény paramétereit tartalmazza. Szintén függ a tényezőárak arányától, és a tényezőkre kivetett adók arányától is.

Az (59.) egyenlet azt mutatja, hogy az exergia keresletének aránya a tőke keresletéhez képest csökkenthető, amennyiben a tőke ára csökken, vagy az exergia ára nő. A tőkére kivetett adó csökkenése, és az exergiára kivetett adó növelése is ezt a hatást éri el.

6. Összefoglalás

A dolgozatban azzal foglalkoztunk, hogy a termodinamika törvényei milyen hatással vannak a gazdaság egyik meghatározó folyamatára, a termelésre. Az energia hasznos munkavégző képessége, az exergia szűkös erőforrás, és minden termelési folyamatban részt vesz, így a termelési függvény tényezői között is helye van.

Ismertettük az elméleti és a valós termelést, és a legfontosabb különbségeket is: az exergia felhasználás elengedhetetlen és a termelés folyamán hulladék keletkezik. Ezek közül mi az elsővel foglalkoztunk részletesebben.

A termodinamika törvényszerűségeivel is megismerkedtünk, főként az exergia fogalmával.

Ezt követően egy olyan termelési függvényt mutattunk be, amiben az exergia is szerepel, és ezen keresztül kerestük a választ arra, hogy az exergia szűkössége vajon milyen korlátot állít a kibocsátás elé, illetve ez a határ hogyan befolyásolható. Vajon eljön a világ vége, vagy ez elkerülhető?

A dolgozatban nem vettük figyelembe a megújuló exergiaforrásokat, mert ezek felhasználása kevés a mai technológia mellett a fosszilis forrásokhoz képest. A legnagyobb exergia forrás, a napsugárzás exergia termelésre való használata ma még nagyon költséges. Így azt feltételeztük, hogy a Föld felhasználható exergia állománya véges, és folyamatosan csökken. Mivel a termelési függvényben az exergia mint nélkülözhetetlen termelési tényező jelenik meg (nincs exergia, nincs kibocsátás, a szigorú fenntarthatóság eszméje érvényesül): a világ vége - azaz a kibocsátás csökkenése, a gazdasági növekedés megtorpanása, a fogyasztási szint csökkenése - egyszer eljön.

Azonban az exergia valamilyen mértékben helyettesíthető tőkével és munkával. Nem vettük azonban figyelembe, hogy a tőke előállításához is szükség van exergiára, így az exergia tőkével való helyettesítése a nettó exergia felhasználást növelheti is. Ez további vizsgálódást kíván.

Az exergia kereslete, és így a felhasználása is csökkenthető. Amennyiben az exergia árát növeljük, vagy a munka/tőke árát csökkentjük az exergia keresleti mérséklődni fog. Ugyanezt a hatást érhetjük el az exergiára kivetett adóval (vagy ennek növelésével), vagy a tőkét/munkát terhelő adók csökkentésével.

A világ végének kitolására tehát van lehetőség: adókkal az exergia állomány csökkenése lassítható. Egy másik lehetőség a Napból érkező exergia hasznosítása, a napenergia, ez

azonban a mai technológia szintjén még túlságosan költséges. A technológia fejlesztése, a kutatások tehát kulcsfontosságúak.

A világ vége tehát a mai tudásunk alapján eljön, de ki tudja, mit hoz a holnap.

7. Irodalomjegyzék

- AYRES, R. U. (1998): Eco-thermodynamics: economics and the second law. Ecological Economics, Vol. 26. 189–209. o. hivatkozva: Bartus Gábor: Van-e a gazdasági tevékenységeknek termodinamikai korlátja? (Közgazdasági Szemle, LV. évf., 2008. november (1010–1022. o.))
- AYRES, Robert U. és WARR, Benjamin (2010): The Economic Growth Engine (Edward Elgar Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA, 2010)
- BARTUS Gábor (2008): Van-e a gazdasági tevékenységeknek termodinamikai korlátja? (Közgazdasági Szemle, LV. évf., 2008. november (1010–1022. o.))
- GERORGESCU-ROEGEN, Nicholas (2002): Az entrópia törvénye és a gazdasági probléma (Kovács VI. évfolyam, 1-4. szám- 2002. Tavasz- Tél 19-31. oldal az eredeti mű: The Entropy Law and the Economic Process, University of Alabama Distinguished Lecture Series, No. 1. 1971 fordítás: Kacsuk Zoltán)
- HARR D. ter (1959): The Quantum Nature of Matter and Radiation; Blin-Stoyle, R. J. et al. (szerk.): Turning Points in Physics? North-Holland, Amsterdam hivatkozva: Nicholas Georgescu-Roegen: Az entrópia törvénye és a gazdasági probléma
- KORTEN David. C. (1996): A tőkés társaságok világuralma, Kapu, 1996 hivatkozva: Szilávik János (2008): Környezetgazdaságtan (Typotex kiadó 2008, Budapest)
- MALTHUS, Thomas Robert (1946): An essay on the principle of population as it affects the future improvement of society. (Original edition 1798), L.D. Abbott (szerk.) Masterworks of Economics Digest of Ten Great Classics. New York: Doubleday and Company hivatkozva: Ayres, Robert U. és Warr, Benjamin: The Economic Growth Engine (Edward Elgar Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA, 2010)
- SZILÁVIK János (2008): Környezetgazdaságtan (Typotex kiadó 2008, Budapest)
- ZALAI Ernő: Matematikai közgazdaságtan. KJK-KERSZÖV Jogi és Üzleti Kiadó Kft., Budapest, 2000