

A BIOMASSZA ENERGETIKAI HASZNOSÍTÁSÁNAK ÖKOLÓGIAI LÁBNYOMA

ECOLOGICAL FOOTPRINT OF BIOMASS ENERGY USE

Szlávik János¹, Sebestyénné Szép Tekla²

¹ az MTA doktora, egyetemi tanár, Eszterházy Károly Egyetem, Gazdaságtudományi Intézet, Eger
szlavik.janos@uni-eszterhazy.hu

² egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Világ- és Regionális Gazdaságtan Intézet, Miskolc
regtekla@uni-miskolc.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A világ energiaellátása átalakulóban van, egyre gyakrabban találkozhatunk a globális energiadilemma kérdéskörével, amely a növekvő energiaigények és az energiaforrások felhasználásával kapcsolatos egyre intenzívebb környezeti hatások közötti feszültséget vizsgálja, és lehetséges megoldási javaslatok után kutat. A központi kérdés az, hogyan tudjuk úgy növelni az energiafelhasználást, hogy közben nem növeljük az üvegházhatású-gázok kibocsátását (sőt a klímavédelmi célokkal összhangban csökkentjük azokat), tehát áttérünk egy alacsony szénfogyasztású gazdasági modellre, megszakítjuk a gazdaság hajtóerői és a környezeti terhelés közötti kapcsolatot. Nem csupán energiaátmenetről szükséges beszélni, hanem fel kell hívni a figyelmet a fenntartható energiaátmenet fontosságára. Tanulmányunk fő célja, hogy bemutassuk az ökológiai lábnyomot, rávilágítsunk az ökoszisztéma-szolgáltatások értékelésével kapcsolatos problémákra. Számszerűsítjük az egyes energiafajták karbonlábnyomát a villamosenergia-termelésben, kitérünk a biomassza ellentmondásaira, különös tekintettel a karbonsemlegességre. Eredményeink szerint az erőforrás-szétválásnak a hatás szétválásában is tükröződnie kell, melyet a Visegrádi Négyek ökológiai lábnyomának elemzésével vizsgálunk.

ABSTRACT

The world energy supply is in transition, the topic of global energy dilemma can be seen more and more often in the scientific literature. It focuses on the tensions related to the future availability of fossil fuel sources and the environmental impact of their exploitation, and it searches for potential solutions. The central issue is how we can meet the rapidly growing energy demand without increasing the greenhouse gas emission (moreover we decrease this emission with regard to the climate protection goals), so we manage the transition to a low-carbon energy system and breaking the link between the environmental pressure and economic driving forces. We should focus not only on energy transition, but we should draw attention to sustainable energy transition. The main objective of this study is to show the ecological footprint and to highlight the problems related to the estimation of the economic value of ecosystem services. We quantify the carbon footprint of energy sources in the electricity production, and the contradictions of biomass regarding the carbon neutrality hypothesis of biomass are also discussed. In our view the consequences of resource decoupling should be reflected in the impact of decoupling as well, and our analysis utilized the concept of the ecological footprint.

Kulcsszavak: ökológiai lábnyom, karbonlábnyom, zöld energia, biomassa

Keywords: ecological footprint, carbon footprint, green energy, biomass

A MEGÚJULÓ ENERGIÁK SZEREPE A FENNTARTHATÓ GAZDÁLKODÁSBAN

A fenntartható gazdálkodás felé tett lépések között meghatározó az energiagazdálkodás, amelyben egyre jelentősebb a megújuló energiaforrások szerepe. Az energiagazdálkodás ökoszisztémára gyakorolt hatásának követése nagy kihívást jelent, és viszonylag jó mutatóként használható erre az ökológiai lábnyom.

Mi az ökológiai lábnyom, és mire jó?

Az ökológiai lábnyom viszonylag új fenntarthatósági mutató. Fogalmát a szerzők a következőképpen fogalmazzák meg: „Ökológiai lábnyom az a föld- (és víz-) terület, amelyre egy meghatározott emberi népesség és életszínvonal végtelen ideig való eltartásához lenne szükség. Annak mértéke, hogy mennyi termékeny földre és vízre van szüksége egy személynek, városnak, országnak vagy az emberiségnek az összes elfogyasztott erőforrás megtermeléséhez és az összes megtermelt hulladék elnyeléséhez, az uralkodó technológia használatával. Ez a föld bárhol lehetne a világon. Az ökológiai lábnyomot területegységekben mérik” (Wackernagel et al., 2002).

Az ökológiai lábnyom fogalma azon a felfogáson alapszik, hogy az anyag- vagy energiafogyasztás minden tételénél szükség van egy vagy több ökológiai rendszerben bizonyos mennyiségű földre a fogyasztás erőforrásáramaihoz és a hulladék elnyeléséhez. Ily módon egy bizonyos fogyasztási osztály földhasználatát fel kell becsülni. Mivel nincs mód a világon fellelhető fogyasztási cikkek mindegyikének az életciklus-elemzésére, ezáltal a szükséges föld felmérésére, így a számítások a főbb osztályok meghatározására és néhány egyedi cikk kiválasztására korlátozódnak.

Az ökológiai lábnyom összetevői

Az ökológiai lábnyom számítása során hat fő összetevővel számolnak. Ezek a legeltetés, az erdőszet, a beépített területek, a szántóföldek, a halászati területek és a szén-dioxid. Ezek közül az energiával összefüggésben kiemelkedően fontos összetevő a karbonlábnyom (CO₂). A karbonlábnyom adatok a statisztikában súlymértékben vannak megadva, az ökológiai lábnyom mértékegysége azonban a globális hektár. Az átszámításra az egyik jellemzően alkalmazott módszer,

amikor a szén-dioxid-kibocsátás „elnyelésére” elegendő erdőterület nagyságával számolunk.

A Global Footprint Network (2016) adatait alapul véve, a Föld ökoszisztéma-szolgáltatásai alapján számolva a globális biokapacitás nagysága 2012-ben 1,7 globális hektár volt, egy főre vetítve. Az emberiség ezt a szintet, vagyis a Föld „fenntartható” ökoszisztéma-szolgáltató kapacitásának határát 1970 körül érte el. Jelenleg ott tartunk, hogy közel 50%-kal használjuk túl az ökoszisztéma-szolgáltatások önmegújuló kapacitását. Mivel, mint látjuk, az ökológiai lábnyom összetevői között közel 50%-kal szerepel a karbonlábnyom, és a lábnyom nagyságát jelentősen befolyásolja az energiagazdálkodás nagysága és milyensége, indokolt az energiafajták ökológiai lábnyomának vizsgálata. Ismeretes, hogy míg a fosszilis energia felhasználása jelentős, addig a megújuló energia felhasználása sokkal kisebb CO₂-kibocsátást eredményez. A kérdés az, hogy pontosan mekkora a potenciális környezeti terhelés megújulókkal elérhető csökkenése.

Mielőtt a fenti mutatóval történő részletes nyomon követést elkezdenénk, megemlítünk néhány kritikai észrevételt az ökológiai lábnyom mint mutató számításával kapcsolatosan. Itt van rögtön az ökoszisztéma-szolgáltatásokkal kapcsolatos eltérő megközelítés az ökológusok és az ökonómusok között. A megértéshez Richard B. Norgaard (2011) alábbi gondolatait idézzük, aki egy nagy hatást kiváltó tanulmányában kételyeit írja le az „ökoszisztéma-szolgáltatások” eredeti megfogalmazásának elferdítésével kapcsolatban. Kifejező a tanulmány alcíme is: „Hogyan vált egy szemléletes metafora a lényeg elhomályosítójává”. A metafora a következő: „A természetre úgy is tekinthetünk, mint egy meghatározott méretű tőkeállományra, amely az ökoszisztéma-szolgáltatások korlátozott áramát tudja csak eltartani” (Norgaard, 2011, 61.). Ez a metafora az ökológiai közgazdászok részéről azért került megfogalmazásra, hogy feltárja a gazdaság „mindenhatóságát” hirdető uralkodó közgazdasági nézetekkel szemben az emberiség valódi viszonyát a természettel, kifejezve vele a környezeti fenntarthatóság lényegét. A fenti metafora azonban a millenniumi ökoszisztéma-felmérés (Millennium Ecosystem Assessment 2003–2005) központi keretrendszerévé vált. Az ökológusokkal szemben pedig elvárás lett, hogy a korábbiaknál pontosabb elméleti és gyakorlati eljárást adjanak arról, hogy a természeti tőke miként biztosítja az ökoszisztéma szolgáltatások áramát. A fő gond azonban az, hogy az ökoszisztéma nagyon összetett rendszer, amely nem illeszthető be egy vagy akár néhány tényezőként a világgazdasági modellekbe. Ugyanakkor, amint azt Norgaard megállapítja, „Az ökológia tudománya jelen pillanatban nem rendelkezik olyan előrejelző képességgel, amellyel meg lehetne határozni, hogy mikor tekinthető fenntarthatónak egy-egy ökológiai szolgáltatás használata” (Norgaard, 2011, 64.). Ennek gyakorlati illusztrálására leírja, hogy a millenniumi ökoszisztéma-felmérés készítői gyakran olyan eseteket sem

tudnak dokumentálni, amikor az ökológusok között egyetértés lett volna abban, hogy egy populáció mikor fog összeomlani, vagy hogy egy ökológiai rendszer mikor lép át egy meghatározott állapotából egy másikba (lásd részletesen Szlavik, 2013, 53–58.).

Nem Norgaard az egyetlen, aki bizalmatlan a közgazdászok számos esetben leegyszerűsítő számításaival szemben. Számos ökológus foglal állást a természet gazdasági értékelése ellen. Ernst F. Schumacher is nagyon bizalmatlan ezzel kapcsolatban, amikor kijelenti, hogy ha árat adunk a természeti javaknak, eláruljuk a természetet. Ennek a vállalkozásnak (mármint a természet piaci értékelésének) mégsem a logikai képtelensége a legnagyobb hibája: ennél is rosszabb, és a civilizációra nézve pusztítóbb hatású, hogy mindennek ára van, vagy más szóval, hogy a pénz minden érték között a legnagyobb (Schumacher, 1991, 45.).

A fenti kijelentés elgondolkodtató. Azonban azoknak is igazuk van, akik azt mondják, hogy a fejlődés érdekében ki kell használni a piac lehetőségeit, „intelligenciáját”. Például Kenneth E. Boulding vélekedése szerint sok probléma abból adódik, hogy számos természeti erőforrásnak nincs reális ára, és az emberek nem fizetik meg a szennyezésük által okozott károkat. Ha az embereknek meg kellene fizetniük azokat a károkat, amelyek az általuk okozott kellemetlenségek miatt következtek be, sokkal több erőforrást lehetne ezeknek a kellemetlenségeknek a megelőzésére fordítani (Boulding, 1993, 18.).

Noha az ökológiai lábnyom nem jut el a pénzben történő értékeléshez, hiszen a mértékegység ebben az esetben a globális hektár, de a súlyok megadásával alkalmas lehet gazdasági kalkulációk alapjául szolgálni, bár ez esetben már fennáll a torzítás veszélye. Igen ám, de a megőrzésről vagy a fejlesztésről történő döntések gazdasági kalkulációk alapján születnek. A tapasztalat pedig az, hogy a gazdasági és politikai döntéshozók nem tudják kezelni a végtelen fogalmát (végtelen nagy érték, végtelen nagy kár). Hajlamosak a végtelent nullával helyettesíteni. Többnyire kihagyják a kalkulációból. Természetesen vannak olyan kérdések, amelyek monetárisan valóban nem meghatározhatók. Ezek a szigorú fenntarthatóság sarokkövei, amelyek fejlesztési korlátként, mintegy a hosszú távú jövő áthatolhatatlan sziklafalaként kell hogy álljanak a rövid távú gazdasági döntések (érdekek) előtt. Esetünkben ilyen sziklafal az, hogy a fenntarthatóság megvalósítási folyamatában a nem megújuló (fosszilis) erőforrások nem jelentenek hosszú távú alternatívát.

A megújuló energiaforrások elemzésekor (az idézett viták figyelembevételével is) azonban használhatunk olyan mutatókat, mint például az ökológiai lábnyom. A továbbiakban az egyes energiafajtákat és a Visegrádi Négyek ökológiai lábnyom-adatait elemezzük.

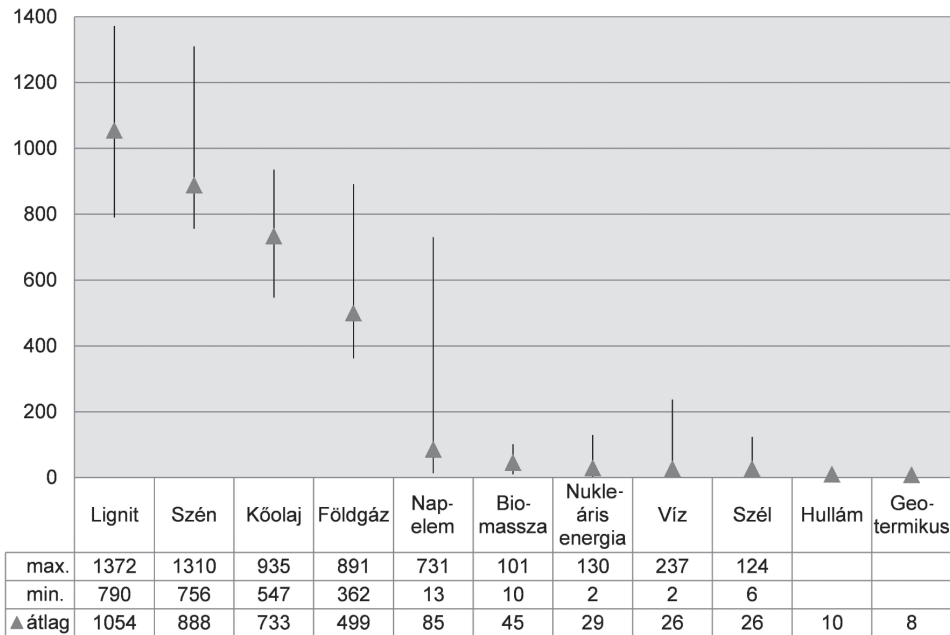
AZ ENERGIAFAJTÁK ÖKOLÓGIAI LÁBNYOMA

A nem megújuló és megújuló energiaforrások ökológiai terhelése

Az egyes energiaforrások karbonlábnyomát vizsgálva a nem megújuló (fosszilis) energiaforrások és a megújuló energiaforrások között számottevő különbségek vannak. A World Nuclear Association több mint húsz tanulmány eredményeit vizsgálta meg, arra keresve a választ, hogy a meglévő (az ISO 14040:2006 és 14044:2006 alapján végzett) életciklus-elemzések szerint mekkora az egyes energiaforrások karbonlábnyoma a villamosenergia-termelésben (az eredményeket összegzi az 1. ábra). Eszerint a megújuló energiaforrások nagyságrendekkel hatékonyabbak az emisszióintenzitás szempontjából, mint a fosszilis energiaforrások. Míg a legszennyezőbbnek számító lignit és kőszén esetében a szén-dioxid-kibocsátás átlagosan 1054, illetve 888 tonna $\text{CO}_2\text{e}/\text{GWh}$, addig a biomassza esetében ugyanez az érték mindössze 45. A legkisebb környezeti terhelést a szél- és vízenergia felhasználása jelenti (legalábbis a klímaváltozás szempontjából). Ez nem meglepő, például a napelemek esetében csak az előállítás folyamatánál számolhatunk emisszióval, míg a húsz-harminc évnyi működési időtartam alatt nem. Az IPCC (2012) adatai szerint a geotermikus, illetve a hullámenergia még ennél is kedvezőbb, esetükben mindössze 8, illetve 10 tonna $\text{CO}_2\text{e}/\text{GWh}$ a szén-dioxid-kibocsátás átlagosan. Így joggal nevezhetjük az alacsony karbonlábnyommal bíró megújuló energiaforrásokat zöld energiának, míg a magas karbonlábnyomú fosszilizéseket barna energiának (Van Heddeghem et al., 2012). Az atomerőművek ebben az összehasonlításban igen zöldnek számítanak, esetükben a szén-dioxid-kibocsátás átlagosan 29 tonna $\text{CO}_2\text{e}/\text{GWh}$, bár a nukleáris energia megítélése igen széles skálán mozog.

Mint az az 1. ábrán is jól látszik, a minimális és maximális értékek között nagyságrendi különbségek fedezhetők fel. Ez elsősorban az alkalmazott technológiától, a felhasznált energiaforrás minőségétől (például jelentősen eltér a nemzetközi árutőzsdéken jegyzett WTI-, Dubai vagy Brent-típusú kőolaj összetétele, így nyilván az elégetése során keletkező károsanyag-összetétele is), továbbá helyi vagy regionális jellemzőktől függ.

Úgy tűnhet, hogy a megújuló energiaforrások alkalmazása tökéletes megoldást jelent a környezeti problémákra. Vitathatatlan előnyeik mellett azonban néhány hátránnyal is számolnunk kell. Mint arra Ward Van Heddeghem és szerzőtársai (2012) is felhívják a figyelmet, jelentős terhelést jelentenek a meglévő energetikai rendszerekre, sok esetben a megújuló felhasználására alkalmas területek periferiákon helyezkednek el (például *off-shore* szélenerőművek), így meg kell oldani az energia szállítását, ami igen magas beruházási költségeket eredményezhet, továbbá megnöveli az energiaátalakítás veszteségét. Problémát jelent továbbá, hogy a megújuló energiaforrások környezeti terhelésénél a legtöbb esetben nem veszik



1. ábra. Energiafajták karbonlábnyoma a villamosenergia-termelésben (tonna CO₂e/GWh) World Nuclear Association (2011) és az IPCC (2012) adatai alapján saját szerkesztés

figyelembe, hogy tartalék fosszilis energiaforráson alapuló erőművi kapacitásra is szükség van. Szarka László (2010) szerint a szélenergia esetében 1 kW szél-erőművi kapacitás fosszilis tartalékigénye 0,7 kW.

A megújuló energiaforrások között talán a legellentmondásosabb a biomassza. Az IPCC (2014) becslése szerint a megújuló energia 2030-ig elérhető termelésében rejlő szén-dioxid mitigációs potenciál nagysága nagyjából 4070–6390 Mt CO₂eq, amelyből a biomassza részesedése 1220 Mt CO₂eq. Ennek költsége átlagosan kevesebb, mint 100 USD/tCO₂eq, a biomassza esetében pedig 19,5 USD/tCO₂eq. Ez alapján a biomassza olcsónak és nagy mennyiségben felhasználhatónak tűnik, ráadásul – a meglévő módszertanok szerint – erőn felül járul hozzá a CO₂-ki-bocsátás csökkentéséhez, amelyet a későbbiekben részletesen megmagyarázunk. Ugyanakkor a szén-dioxid mitigációs potenciál nagyságát nagymértékben befolyásolja az az alapfeltevés, hogy minek adunk nagyobb prioritást a termelésben: a bioenergetikai célú növényeknek vagy az egyéb, ugyanazon terület műveléséből származó mező-, illetve erdőgazdasági termékeknek (például élelmiszer, takarmány, fűrészáru). Ezt számos tényező befolyásolja: természetföldrajzi adottságok (például talajminőség, meglévő gyakorlatok, klímaváltozás, vízzel való ellátottság), meglévő termelési rendszerek, a helyi lakosság hozzáállása, beállítottsága, a biodiverzitás védelme, technológiai fejlődés.

A biomassza intenzívebb felhasználása számos negatív következménnyel járhat, fokozódhat a termőföldekért, a vízért, illetve egyéb termelési tényezőkért folyó verseny, amely az egyes erőforrások túlhasználatát és degradációját okozza (IPCC, 2014). A biomassza környezeti hatásának értékelésére számos módszertan alkalmazható, így az SPI (Sustainable Process Index), a környezeti LCA-elemzés, illetve a karbonlábnyom-számítás (Lam et al., 2010). Ez utóbbi számításánál a legtöbb esetben karbonsemlegességet tételeznek fel a biomassza esetében, ami azt jelenti, hogy a biomassza elégetése során keletkező szén-dioxidot nem veszik figyelembe a lábnyom számításakor, ez pedig a lábnyom alulbecsléséhez vezet (Johnson, 2009). A különbséget a karbonsemleges feltételezés függvényében az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat. A biomassza karbonlábnyoma a karbonsemlegesség függvényében (g CO₂eq/MJ)

Tétel	Biomassza		Földgáz
	karbonsemleges	nem karbonsemleges	
termesztéstől a betakarításig	2,5	2,5	3,6
feldolgozás	0	0	3,5
szállítás	0,25	0,25	7,8
elégetés	2,15	2,15	0,1
szénraktárak csökkenése		164,25	55
összesen	4,9	169,15	70

Johnson, 2009, 166. alapján saját szerkesztés

Ez a módszertani megközelítés az elmúlt években viták tárgyát képezi, tekintettel arra, hogy a karbonsemlegességnek nincs általános, mindenki által elfogadott definíciója. A WBCSD (2015) a következők szerint határozza meg azt: „a fotoszintézis során a napfény energiája és a légkörben található CO₂ tulajdonképpen növényi szövetekben tárolt kémiai energiává válik, amelyet biomasszának nevezünk. [...] Amikor a biomassza elég, elpusztul vagy egyéb módon oxidálódik, a kémiai energiája és a benne tárolt CO₂ felszabadul, és visszajut a légkörbe, bezárva ezzel a természetes szén ciklus folyamatát.” Amennyiben a felszabaduló CO₂-ot teljes mértékben megköti az újonnan növekvő biomassza, akkor a szén ciklus egyensúlyban van. Hosszú távon tehát a megkötött szén-

dioxid visszatér a légkörbe, függetlenül attól, hogy felhasználják-e a gazdasági folyamatok során vagy sem. A probléma akkor kezdődik, amikor megbomlik ez az egyensúly. Mind az IPCC (2017), mind az Európai Bizottság (European Commission, 2014) elismeri, hogy a karbonsemlegesség csak akkor teljesül, ha a szóban forgó biomassa fenntartható gazdálkodásból származik, és a feldolgozás során keletkező pótlólagos CO₂-kibocsátást abban a gazdasági szektorban számolják el, ahol keletkezik. Ugyanakkor a kritikusok (például Johnson, 2009) szerint – kicsit leegyszerűsítve – ez alapján nincs különbség egy élő erdő vagy ugyanolyan mennyiségű tűzifa között.

Elsődleges fontosságú tehát a szénraktárak (carbon pool) bevonása az elemzésekbe (ezek változásának mérése), amely magában foglalja a föld alatti és feletti biomasszát, az elpusztult növényzetet (például korhadó fatörzsek), a talajt, a növényi hulladékot és a betakarított faanyagot (European Commission, 2014).

A fenntarthatósági hatás becslése

Az ökológiai lábnyom számításánál több lehetőséget biztosít a környezeti hatások átfogó elemzése, illetve a komplex fenntarthatósági vizsgálat. A környezeti hatások komplex értékelésének elfogadott metodikája van, és Magyarországon is alkalmazzák mint stratégiai környezeti vizsgálatot. Ez utóbbi a jövőbeni fejlesztések alapjául szolgáló tervek és programok összessége, a területi tervek környezeti hatásának értékelése (lásd Szlávik et al., 2007). A fenntarthatósági vizsgálat ennél komplexebb, de elméleti kidolgozottsága kezdetlegesebb. A fenntarthatósági elemzés során a fenntartható fejlődés mindhárom dimenziója (természet, társadalom, gazdaság) tárgya az elemzésnek. Ugyanakkor vizsgálati szempont a fenntarthatóság hármas értelmezése (erős fenntarthatóság, gyenge fenntarthatóság, környezeti fenntarthatóság) is. Különösen a hosszú távú hatásokkal járó energiafejlesztéseknél elengedhetetlen az idődimenzió helyes kezelése. Ehhez kapcsolódóan komoly feladatot jelent a diszkontálás valós rátájának a kiválasztása. Ez utóbbi kérdés különösen a nagyon hosszú távon ható nukleárisenergia-termelés esetében kritikus. Ez esetben ugyanis a szokásos gazdasági beruházások esetében használt diszkontárta az atomerőművekhez kötődő hosszú távú negatív externáliák és kockázatok jelen értékét irreálisan alacsonynak mutatja (lásd Szlávik, 2013).

A megújuló energiaforrások komplex környezeti hatásának rangsorát Dombi Mihály (2014), valamint Robert Costanza és szerzőtársai (1997) alapján a 2. táblázat tartalmazza (1-es sorszám jelöli azt a megújuló energiaforrást, melynek a legkisebb a komplex környezeti hatása, 5-ös sorszám a legnagyobbat). Megjegyezzük, hogy a sorrendet a helyi feltételek és hatások, továbbá a hihetetlen mértékű technológiai fejlődés (különösen a napenergia vonatkozásában) módosíthatja.

2. táblázat. A megújuló energiaforrások komplex környezeti hatásának rangsora, emelkedő sorrendben

Világ	Magyarország
○ vízenergia	• szélenergia
○ geotermikus energia	• napenergia
○ napenergia	• geotermikus energia
○ szélenergia	• vízenergia
○ biomassa	• biomassa

Dombi (2014) és Costanza et al. (1997) alapján saját szerkesztés

A SZÉTVÁLÁS KÖZELÍTÉSE ÖKOLÓGIAI LÁBNYOMMAL – A VISEGRÁDI NÉGYEK PÉLDÁJA

A fenntartható fejlődés egyik központi kérdése és elérésének célja, hogy a gazdasági fejlődés csökkenő mértékű erőforrás-felhasználás és környezeti terhelés mellett valósuljon meg. Századunk egyik legnagyobb kihívása az alacsony karbonintenzitású, az erőforrásokat hatékonyan használó zöld gazdaság felé történő elmozdulás megvalósítása. Az ENSZ környezetvédelmi programjának (UNEP, 2011) adatai szerint, ha a fogyasztás jelenlegi – fenntarthatatlan – szintje nem változik, akkor 2050-ig háromszorosára nőhet az erőforrás-felhasználás a világon. Ezt figyelembe véve, a gazdaság hajtóerői (gazdasági növekedés, GDP) és a környezeti terhelés közötti kapcsolat megszakítása, vagyis a szétválásra törekvés még sürgetőbb, kulcsfontosságú lehet a fenntartható gazdálkodás megvalósításában.

Korábbi tanulmányunkban (Szlávik–Sebestyén Szép, 2018) megvizsgáltuk a végső energiafelhasználás és a gazdasági növekedés 1990 és 2015 közötti szétválását a Visegrádi Négyek országai esetében. Eredményeink szerint döntően többségben voltak azok az évek, amikor megvalósult a szétválás abszolút vagy relatív formája. Elméletünk szerint az erőforrás-szétválás eredményeinek a hatás szétválásában is tükröződnie kell, ezt a továbbiakban az ökológiai lábnyom elemzésével közelítjük.

Az ökológiai terhelésről írtakból következően egy adott ország ökológiai lábnyomának alakulását nagymértékben befolyásolja az, hogy milyen az energiaszerkezet, és milyen dinamikával változik a növekedési és a szerkezeti hatást tekintve. Ebből a szempontból kiemelendő, hogy Európa karbonlábnyoma (Global Footprint Network, 2016) az 1990 utáni két évtizedben 22%-kal csökkent. Ezen belül közel 20%-kal csökkent az energiával kapcsolatos szén-dioxid-kibocsátás is, amit azonban közömbösített a közlekedés növekvő CO₂-kibocsátása (ez a vizsgált időszakban több mint 20%-kal nőtt). Megjegyzendő, hogy a közlekedést kivéve minden szektorban a szén-dioxid-kibocsátás csökkenése következett be.

A továbbiakban áttekintjük, hogyan alakult a Visegrádi Négyek országaiban az ökológiai lábnyom, illetve a biokapacitás. Az Európai Unió huszonegy országára számított ökológiai lábnyom 2010-ben közel 5 globális hektár volt. A vizsgált négy országból Csehország ökotérhelése volt a legnagyobb, 6 globális hektár (gha) egy lakosra vetítve, a legalacsonyabb Magyarországé (~ 3,5 gha). Lengyelország és Szlovákia ökológiai lábnyoma közel azonos (~ 5 gha).

Vizsgáljuk meg ezeket az adatokat az energiatermeléssel és a szétválással összefüggésben! (Megjegyzendő, hogy mivel ezek az adatok a teljes gazdasági és társadalmi hatást tükrözik, csupán közelítéseink lehetnek az energiatermelésre vonatkozóan. A pontos kép felvázolásához további kutatások szükségesek.)

Mivel *Lengyelországban* még mindig 80% a szilárd tüzelőanyagok aránya, a karbonterhelése is igen nagy, valószínűsíthetően ez a hatás az egyik okozója a fejlettségénél nagyobb ökológiai lábnyomnak.

Csehország Európai Unió átlagot meghaladó ökológiai lábnyoma a viszonylag magas fejlettségi szintje (GDP/fő) mellett magyarázható a szilárd tüzelőanyag még mindig magas felhasználási arányával is. Ugyanakkor pozitív tendencia is megfigyelhető, hiszen ezen tüzelőanyag dinamikus fajtakiváltása megújuló energiákkal, illetve atomenergiával folyamatosnak tekinthető a vizsgált időszakban.

Magyarország ökológiai lábnyoma a rendszerváltás után a nehézipar összeomlásával és a szénfelhasználás csökkenésével összefüggésben érzékelhetően javult (Szigeti, 2016). Pozitívan hat a megújuló energiaforrások részarányának növekedése és a viszonylag jelentős nukleáris kapacitás is. Amennyiben azonban a tervezett Paks II beruházás úgy lép be, hogy még működnek a jelenlegi blokkok is, az a nukleáris energia akkora túlkínálatát jelenti majd, hogy az korlátozza a megújuló energia termelésének növelését (annak ellenére, hogy a nukleáris energia növelése csökkenti a karbonlábnyomot). Megjegyzendő, hogy a karbonlábnyom által determinált ökológiai karbonlábnyom elemzése mellett egyre inkább szükség van a fenntarthatósági versenyképesség komplex elemzésére, ezen belül fenntartható régió-elemzésre. A megújult regionális versenyképesség piramismodellje is azt mutatja, hogy az energiaszektor fenntarthatósági elemzése feltételezi a gazdasági szerkezet, regionális elérhetőség és infrastruktúra, foglalkoztatottság stb. elemeket (Lengyel, 2016, 75.). Addig ugyanis, amíg egy gigaerőmű (például atomerőmű) a centrumot erősíti, a megújuló erőforrások fejlesztése a helyi erőforrások felhasználását segítheti, csökkentve a regionális egyenlőtlenségeket is.

Szlovákia viszonylag magas ökológiai lábnyoma az energiaszerkezetéből önmagában nem magyarázható, a szilárd tüzelőanyagok alacsony felhasználási aránya és a nukleáris, illetve megújuló energia magas felhasználási aránya alacsonyabb ökológiai lábnyomot indokolnának. Az eltérés okainak feltárása további kutatást igényel.

Az ökológiai lábnyomra (illetve karbonlábnyomra) vonatkozó elemzésünk azt mutatja, hogy az erőforrás-elemzésre alapozva célszerű megkíséríteni hatáselem-

zést is, hiszen a fenntarthatósággal kapcsolatos kérdésekre csak így remélhető válasz. A szétválás folyamatának vizsgálata fontos visszajelzés az adott ország döntéshozói számára a környezetpolitika hatásosságára vonatkozóan. Az energiafelhasználás és a gazdasági növekedés szétválasztásának lehetséges eszközei közé tartozik egyrészt az ipari termelés újrastrukturálása, másrészt az energiahatékonyság, illetve a megtakarítás ösztönzése (például energiahatékonysági szabványok előírásával).

ÖSSZEGZÉS

Az emberi eredetű szén-dioxid-kibocsátás az IPCC (2014) adatai szerint 2010-ben elérte a $49 \pm 4,5$ GtCO₂-eq/év értéket. Ennek nagyjából a 25%-áért a hő- és villamosenergia-termelés a felelős. 2040-re a világ energiafelhasználása a jelenlegi szinthez képest körülbelül 30%-kal nő az előrejelzések szerint (IEA, 2016). Ugyanakkor biztató, hogy 2040-ig az újonnan létrejövő villamosenergia-termelő kapacitásnak már a 60%-a megújuló energiaforrásokra fog épülni, és az a legnagyobb környezeti terheléssel működő olaj- és széntüzelésű erőművek részarányának jelentős csökkenését eredményezi. Egyes tevékenységeknél – például a háztartási szektorban, a lakossági fűtés, illetve a hűtés esetében – a jelenleg is rendelkezésre álló technológiák (decentralizált energiatermelés) segítségével már teljesen kiválthatóak lennének a fosszilis energiaforrások.

A megújuló és ezen belül a bioenergiák részarányának növelése általában, így Magyarországon is, csökkentheti az energiaellátás centralizált jellegét, és segítheti a helyi előnyök kihasználását. A megújuló energiák mint helyi termékek hozzájárulhatnak a regionális egyenlőtlenségek csökkenéséhez is.

IRODALOM

- Boulding, K. E. (1993): *The Economics of the Coming Spaceship Earth, Valuing the Earth* (ed. H. E. Daly), Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press
- Costanza, R. – d'Arge, R. – de Groot, R. et al. (1997): The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*. 387, 5, 253–260. <https://bit.ly/2JaesVv>
- Dombi M. (2014): *Villamos és hőenergia előállítását szolgáló megújuló energetikai technológiák fenntarthatósági értékelése*. Debrecen, https://dea.lib.unideb.hu/dea/bitstream/handle/2437/177015/DombiM_nyilvanos_final-t.pdf?sequence=8&isAllowed=y
- European Commission (2014): *Carbon Accounting of Forest Bioenergy. Conclusions and Recommendations from a Critical Literature Review*. 88. http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC70663/eur25354en_online.pdf
- Global Footprint Network (2016): *National Footprint Accounts*. <http://www.footprintnetwork.org/resources/data/>
- Van Heddeghem, W. – Vereecken, C. D. – Pickavet, M. – Demeester, P. (2012): Distributed Computing for Carbon Footprint Reduction by Exploiting Low-footprint Energy Availability.

- Future Generation Computer Systems*. 28, 405–414. <https://pdfs.semanticscholar.org/cf4b/2312904c8394a250e54a1c1284d29635029d.pdf>
- IEA (2016): *World Energy Outlook 2016, Fact sheet*. <https://www.iea.org/media/publications/weo/WEO2016Factsheet.pdf>
- IPCC (2012): *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, <http://www.ipcc.ch/report/srren/>
- IPCC (2014): *Climate Change 2014, Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- IPCC (2017): *FAQs. Frequently Asked Questions*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/faq/faq.html>
- Johnson, E. (2009): Goodbye to Carbon Neutral: Getting Biomass Footprints Right. *Environmental Impact Assessment Review*. 29, 165–168. DOI: 10.1016/j.eiar.2008.11.002, https://www.researchgate.net/publication/222840338_Goodbye_to_carbon_neutral_Getting_biomass_footprints_right
- Lam, H. L. – Varbanov, P. – Klemes, J. (2010): Minimising Carbon Footprint of Regional Biomass Supply Chains. *Resources, Conservation and Recycling*. 54, 303–309. DOI : 10.1016/j.resconrec.2009.03.009
- Lengyel I. (2016): A kutatás-fejlesztés és versenyképesség térbeli összefüggései a visegrádi országokban. *Tér és Társadalom*, 30, 4, 71–88. <https://tet.rkk.hu/index.php/TeT/article/download/2808/4903/>
- Norgaard, R. B. (2011): Ökoszisztéma szolgáltatások – Hogyan vált egy szemléletes metafora a lényeg elhomályosítójává? *Kövász*, XV, 1–4, 61–93. <http://kovasz.uni-corvinus.hu/2011/norgaard.php>
- Schumacher, E. F. (1991): *A kicsi szép* (Small is Beautiful). Budapest: KJK
- Szarka L. (2010): Szempontok az energetika és környezet kapcsolatához. *Magyar Tudomány*. 8, 979–989.
- Szigeti C. (2016): *Az ökológiai lábnyom határai*. Budapest: Typotex Kiadó
- Szlávik J. (2013): *Fenntartható gazdálkodás*. Budapest: CompLex Kiadó
- Szlávik J. – Csete M. – Zöldy M. (2007): Regional Development Perspectives of Production and Utilization Renewable Fuels in Hungary. In: Kiss P. – Székely Á. – Németh B. (eds.): *IYCE 2007*. Budapest: BME, 161–176.
- Szlávik J. – Sebestyén Szép T. (2018): Energiafelhasználás és gazdasági növekedés a Visegrádi Négyekben: abszolút vagy relatív szétválás? *Tér és Társadalom*, 32, 1, 113–130. DOI: 10.17649/TET.32.1.2862, <https://tet.rkk.hu/index.php/TeT/article/view/2862>
- UNEP (2011): *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*. <https://www.unenvironment.org/resources/report/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>
- Wackernagel, M. – Schulz, N. B. – Deumling, D. et al. (2002): Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 99, 9266–9271. DOI: 10.1073/pnas.142033699, <http://www.pnas.org/content/99/14/9266>
- WBCSD (2015): *Recommendations on Biomass Carbon Neutrality*. <http://www.wbcd.org/Projects/Forest-Solutions-Group/Resources/Recommendations-on-Biomass-Carbon-Neutrality>
- World Nuclear Association (2011): *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*. http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf