

IRODALOM

- Bartle, Alison (2008): The Role of Hydropower Continues to Increase Worldwide. In: *2008 World Atlas & Industry Guide of the International Journal of Hydropower & Dams*. Aqua-Media International, Surrey, UK
- Brown, Paul David (2006): *Evaluation of Integration of Pumped Storage Units in an Isolated Network*. FEUP, Porto
- Energy Information Administration (2009): *International Energy Outlook 2009*. U.S. Department of Energy, Washington
- Gerse Károly (2007): Miért kell tározós vízerőmű? MVM Közlemények. 1–2, 10–20.
- Giesecke, Jürgen – Mosonyi Emil (2003): *Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb*. Springer, Berlin–Heidelberg
- Haga, Ingvald (1999): *Coordinating Hydropower and Thermal Power*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim
- International Hydropower Association (2003): *The Role of Hydropower in Sustainable Development, IHA White Paper*. IHA, Sutton, Surrey, UK
- Kerényi A. Ödön (2003): Az EU és a megújuló áramtermelés. MVM Közlemények 2003/3, 40–42.
- Kundur, Prabha (1993): *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York–Toronto
- Mosonyi Emil (2007): A hazai vízgazdálkodás távlati feladatai. Javaslatok tervezési munkák megkezdésére a klímaváltozásnak és Magyarország sajátos földrajzi helyzetének figyelembevételével. MVM Közlemények. 1–2, 63–67.
- Nicolet, Christophe (2007): *Hydroacoustic Modelling and Numerical Simulation of Unsteady Operation of Hydroelectric Systems*. EPFL, Lausanne
- Országos Vízügyi Hivatal (1984): *Országos Vízgazdálkodási Keretterv*. Vízügyi Dokumentációs Szolgáltató Leányvállalat, Budapest
- Spanish Association of Renewable Energy Producers (APPA) (2000): *Environmental Impacts of the Production of Electricity. Comparative Study of Eight Technologies of Electrical Generation*. ESHA, Bruxelles
- Vuorinen, Asko (2007): *Planning of Optimal Power Systems*. Ekoenergo Oy, Helsinki–Espoo



SZEMPONTOK AZ ENERGETIKA ÉS KÖRNYEZET KAPCSOLATÁHOZ

Szarka László

az MTA doktora, tudományos igazgatóhelyettes,
MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron
az MTA Kutatóintézeti Főosztály vezetője, MTA Titkárság
szarka.laszlo@office.mta.hu

Környezeti hatásnak az emberi tevékenység természeti következményeit nevezzük. Mivel a természeti folyamatokba való emberi beavatkozás következményei nemlineárisak és beláthatatlanul hosszú távúak, ezért a környezeti hatás helyett inkább az emberi tevékenység, a természeti folyamatokba történő beavatkozás mértéke, intenzitása becsülhető. Az emberi beavatkozás három lényeges összetevője: (1) a geo-, hidro- és atmoszféra szennyezése (amelyek közül a figyelem manapság – alighanem túlzó mértékben – a CO₂-kibocsátásra összpontosul); (2) az a terület, amit az adott energiatípus kiaknázása a természet-től elvesz; (3) a természeti erőforrások kiaknázásának mértéke, ugyanis míg az egyes energiatermelési módok a természeti folyamatokba történő emberi beavatkozás mértékét illetően specifikusak, az energiafelhasználás az energia mennyiségével arányos emberi beavatkozást: hőszennyezést és felszínátalakító munkát jelent.

Bevezetés

Az MTA Környezettudományi Elnöki Bizottság (MTA KÖTEB) Energetika és Környezet Albizottság tanulmányokat készíttetett az ún. megújuló energiatípusok Magyarországon re-

leváns fajtáiról: a bioenergia, geotermika, szél-, víz- és napenergia helyzetéről és azok környezeti hatásairól (lásd a többi tanulmányt e cikkgyűjteményben). Az MTA KÖTEB vitáján kirajzolódott a szintézisszerű összehasonlítás igénye, és ehhez különféle (gazdasági, szociális, helyi, regionális, nemzetpolitikai, valamint európai uniós) szempontok figyelembevételét ajánlották. E komplex megközelítés helyett azonban egy jóval egyszerűbb összehasonlítást talál itt az olvasó. Az egyszerűsítésnek több indoka van. Egyfelől az egyes energiatípusokról szóló tanulmányok már a bonyolult hazai és nemzetközi feltételrendszerbe ágyazottan tárgyalják az adott energiatípus helyzetét, és ennek a sokféle – időben és térben változó – szempontnak az együttes figyelembe vétele kezelhetetlen. Másfelől azt lehet tapasztalni, hogy még az alapkérdések is tisztázatlanok. Ezért ez a tanulmány – a tényekből és a jelenlegi helyzetből kiindulva – az energiatípusok helyzetét kizárólag természettudományi nézőpontból tárgyalja.

Energetika és környezet

Globális körkép • Bio- és geoszakemberek egybehangzó véleménye szerint a legnagyobb globális probléma a Föld természeti tőkéjének

felélése. Ökológusok az ökoszisztéma-szolgáltatások fenntarthatóságát látják veszélyeztetve (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Török, 2009); a Föld Bolygó Nemzetközi Éve (2007–2009, 2008-ban ENSZ-év) szerint pedig – a felszín alatti víz és a talaj (azaz a biodiverzitás kérdéseivel szorosan összefüggő élelmiszer-ellátás), valamint egyes ásványi nyersanyagok, elsősorban a ritkaföldfémek fogyasztása mellett – az energiakérdés megoldatlansága jelenti a legnagyobb fenyegetést az emberiség számára. A lényeg ugyanaz, csak a nézőpont más.

Richard Smalley (2003) – és annak alapján Dinya László (2008, és e cikkgyűjteményben közölt tanulmánya) – szerint az emberiség előtt álló globális kihívások hierarchikus rendjében az energia áll az első, az ivóvíz a második, az élelmiszer-ellátás a harmadik, az élhető környezet pedig a negyedik helyen. A magyarázat kézenfekvő: (1) energia nélkül nincs ivóvíz (még a tengervíz sem sóatlanítható); (2) energia és víz nélkül nincs élelmiszertermelés; (3) energia, ivóvíz és élelem hiányában az egyéb környezeti kérdések értelmezhetetlenek. Hasonló érveléssel (nevezetesen az energiakérdés megoldatlanságával) indokolta a kiotói egyezmény aláírásának mellőzését Bush elnök tudomány- és technológiaügyi tanácsadója egy tudományos világkonferencián (Marburger, 2007). A biztonságos energiaellátás az európai akadémiai tudományos tanácsadó testületét is erősen foglalkoztatja (EASAC, 2009).

A világ ugyanakkor a legnagyobb környezeti problémának – a fő döntéshozók (többek között az Európai Unió) és a média nyomán – nem a várható energiahiányt (és nem is a felszín alatti víz, valamint a talaj fogyasztás), hanem az éghajlatváltozást tekinti. A megújuló, avagy közvetlen természeti energiákat

eredetileg a *sustainable development* (*développement durable, dauerhafte Entwicklung*, azaz inkább *fenntartható fejlesztés*, mint „*fejlesztés*”), azaz a fenntarthatóság követelménye állította előtérbe. Manapság azonban az indoklás az ún. „gyorsuló globális melegedés” elleni védekezés szükségességére egyszerűsödött. Míg az eredeti fenntarthatósági kérdésfeltevés korrekt, a túlzóan leegyszerűsítő megközelítés sajnálatosan elfedi a lényegi összefüggéseket. Nem is szólva arról, hogy esetleg megállhat a melegedés (Kerr, 2009), vagy netán kiderülne, hogy a földi üvegházhatás és a légkör CO₂-koncentrációja nincs is olyan szoros összefüggésben, mint ahogyan azt általánosan feltételezik.

Tény, hogy a világ – a Föld lélekszámának és a fogyasztói társadalom igényének szinte megállíthatatlan növekedése következtében – évről évre egyre több energiát igényel (bár 2008/2009 a gazdasági válság miatt megtorpanást jelez [World Energy Outlook, 2009]). A 21. század közepéig a Föld népessége elérheti a kilencmilliárd főt, ami új helyzetet alakít ki az energiafelhasználásban és a környezet védelmében. Az ismert kőolajkészletek további termelése a jelenlegi szinten mintegy negyven évre, a földgáz kb. hetven évre, a kőszén legalább kétszáz évre, a hasadóanyagok mennyisége az eddigi technológiával nyolcvan évre (új eljárásokkal azonban több ezer évre) elegendő (Desmarest, 2008). A szénhidrogén-termelés üteme tovább már nemigen fokozható, a világ elért a szénhidrogén-termelési csúcspont közelébe. Az ún. „nemkonvencionális” szénhidrogéntelepek – valamint a szénhidrogén abiotikus és mélybeli eredetéről és folyamatos utánpótlódásáról („megújulásáról”) felröppentő hírek – ellenére a szénhidrogénkészlet nagyjából felét már tényleg el fogyasztotta az emberiség.

A felteendő kérdések egyike az, hogy az ún. megújuló energiák mekkora szerepet játszhatnak a lehetséges energiaforrások között. Ha nem tudnak a mai – meglehetősen felfokozott – várakozásnak megfelelni (az Európai Unió például „tisztá, olcsó, kimeríthetetlenül rendelkezésre álló” energiát óhajt), az energiaszegénység elkerülhetetlen lesz, ha csak a tudományos-technikai fejlődés valamilyen módon – magfúzióval, vagy ma még nem látható más megoldással – meg nem oldja ezt a kérdést. Ugyanakkor az is tény, hogy a környezetszennyezés döntő része az energiatermelésből és -felhasználásból származik.

Hazai helyzet • Hazánkban a konvencionális szénhidrogén nagy részét letermelték, a nemkonvencionálisak majdnem kitermelhetősége meglehetősen bizonytalan. A szénkészletek viszonylag nagyok, de újabb hagyományos szénérőművek nyitása fokozott környezeti kockázatot (légszennyezést, CO₂-kibocsátást) jelentene. Energiaigényünk nagy részét (több mint kétharmadát) importból (nagy részt orosz gázból) fedezzük. Miközben a média szerint geotermikus és biomassza-nagyhatalom lehetnénk, az energetikusok az energiahordozó-szegénységre és kiszolgáltatottságunkra figyelmeztetnek (Reményi, 2009). Ez az ellentmondásos helyzet megköveteli a megújuló energiaforrások hazai lehetőségeinek és hatásainak átgondolását.

Az idehaza elérhető ún. „megújuló” energifajták, azaz a természeti folyamatok megcsapolt energiái között a nap- és szélenergia, a vízenergia, a geotermikus energia és a biomassza-energia veendő figyelembe. Egyéb ismert energifajta-lehetőségek Magyarországon vagy nincsenek (például tengeri árapály és hullámzás), vagy jelentéktelenek. (Elvileg létezhetnek másféle megújulók is, csupán az

energiamegmaradást sértő hipotéziseket kell kizárni.) Egyre több szó esik az ún. metanol- és hidrogéngazdaságról is. A metanol és a hidrogén az energiátárolás és -elosztás egy-egy módszere: előállításukhoz úgyszintén energia szükséges.

Az energetika alapvető összefüggéseiről Vajda György művei (Vajda, 2001, 2004, 2006, 2009) széles körű áttekintést adnak.

Célkitűzés • A Nemzetközi Energetikai Ügynökség, és ennek nyomán a kormányzatok általában az „ellátásbiztonság, gazdaságosság, környezetvédelem” hármas követelményét tekintik követendőnek. E követelmények egymásnak ellentmondók, azaz az egyik előtérbe állítása a másik kettő rovására történhet csak. Magyarország számára a lehető legtermészetesebb cél a takarékoskodás, illetve a minél nagyobb mértékű önellátás biztosítása. Ennek különböző lehetőségei vannak. Az energiával, ezen belül a fosszilis energiával való takarékoskodás eszköze a különféle megújuló energiák fokozott mértékű bevonása. A mi feladatunk pedig az, hogy összevessük a különféle energifajták lehetőségeit és lehetséges környezeti hatásait.

Ebben az összehasonlításban – a tanulmányok és a róluk folytatott viták ismeretében – összefoglaljuk a specifikus környezeti hatásokat, majd az egyes energifajták eltérő energiasűrűségének következményeit. Az energifajták környezeti szempontú összehasonlítása eddig jobbra csak az ún. klímavédelmi előírások (elsősorban a CO₂-emisszió) szempontjából történt meg (Sawin – Moomaw, 2009; Láng, 2008).

Az alapvető energetikai mértékegységek

Az összevethetőség alapfeltétele a különféle erőművi energiamennyiségek pontos értelmezése és átszámíthatósága. Köztudott, hogy az

elektromosenergia-ellátást a teljesítmény (wattóra, Wh), azaz az energia (nem csak az elektromos energia) előállításának vagy fogyasztásának az üteme (joule/másodperc, watt, W) segítségével fejezik ki. 1 watt teljesítmény másodpercenként 1 joule (J) energia keletkezésének, illetve fogyasztásának felel meg.

A W, Wh vagy esetleg a J előtti betűk (k, M, G, T, P) különféle nagyságrendeket jelölnek:

- k (kilo): ezer ($10^3=1000$)
- M (mega): millió ($10^6=1\ 000\ 000$)
- G (giga): milliárd vagy ezermillió ($10^9=1\ 000\ 000\ 000$)
- T (tera): billió, vagy milliószor millió ($10^{12}=1\ 000\ 000\ 000\ 000$)
- P (peta): billiárd vagy ezerbillió ($10^{15}=1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$)
- E (exa): trillió vagy milliószor milliószor millió ($10^{18}=1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$).

Az 1. táblázat a különféle energia- és teljesítmény-mértékegységeket hasonlítja össze.

Magyarország éves primerenergia-felhasználása kb. 1100 PJ, azaz kb. 305 TWh, illetve 26 Mtoe („millió tonna olajegyenérték”) körüli érték, teljesítményben kifejezve mintegy 35 GW. A hazai energiatermelés a felhasználásnak csupán kb. negyede. A hazai villamosenergia-termelő kapacitás 7,8 GW, amelyből az atomerőművi kapacitás 1,84 GW. Egy ház-

tartás 1–3 MWh villamos energiát fogyaszt. Néhány további energiamegnyiség: 1 Btu (British Thermal Unit) = 1055 J, 1 cal = 4184 J.

A légkörbe kibocsátott üvegházhatású gáz mennyiségét szénegyenértékben (C), esetleg CO_2 -egyenértékben adják meg. Egymillió tonna szén mennyiségének jelölése például: 1 MtC. A szén és szén-dioxid $12/(12+2\cdot 16)$ tömegarányából következik, hogy a MtCO_2 nagyjából 0,27 MtC-nek felel meg. A többi üvegházhatású gáz a CO_2 -höz viszonyított időintegrált üvegházhatása alapján veendő figyelembe. Százéves időtartományon egy molekula metán húszszorosan, egy molekula dinitrogén-oxid háromszázszorosan számítódik.

Az elektromos teljesítményt kis „e” alsó indexszel, a hőteljesítményt pedig „t” alsó indexszel szokás ellátni. A MW_e tehát elektromos, a MW_t pedig hőteljesítményt jelent.

Emberi beavatkozás és a környezeti hatás

A környezeti hatás (*environmental impact*) lényegében az emberi beavatkozás természeti következményeinek összességét jelenti. A beavatkozás mértéke és annak következményei azonban egy ilyen bonyolult rendszerben nemlineáris kapcsolatban vannak egymással, úgyhogy a beavatkozás különféle hosszú távú következményei valójában kiszámíthatatlannak. A környezeti hatás csak egy egyszerű

lineáris kapcsolat esetén lenne – úgy-ahogy – becsülhető, ezért inkább a természeti folyamatokba történő emberi beavatkozás mértékét célszerű meghatározni. A CO_2 -kibocsátás (amely a természeti folyamatok közül az üvegházhatásba való emberi beavatkozás mértékét kívánja becsülni) például egyike a lehetséges mérőszámoknak, de a víz-, talaj- és levegőszennyezés összes módozatát célszerű lenne figyelembe venni. A természeti körfolyamatból kivont energia aránya (Vajda, 2009), de a természettől elvett terület is jellemzi a beavatkozás mértékét. A fosszilis energiahordozók – a közvetlen természeti (megújuló) energiahordozókkal szemben – természeti körfolyamatban már nem vesznek részt. Intenzív kibányászásuk azonban jelentős víz-, talaj- és légszennyezéssel, CO_2 -kibocsátással jár, és természeti folyamatokat zavar meg. Megállapítható tehát, hogy végső soron mindenféle energiatermelés – óhatatlanul – beavatkozást jelent a természeti folyamatokba.

Bármilyen forrásból nyertük is, az energia – tekintet nélkül az eredetére – vagy hővé alakul, vagy átalakítja a Föld felszínét. Mark Myers (2008) szerint az ember egy nagyságrenddel több üledéket mozgat meg a Föld felszínén, mint a természeti folyamatok együtvéve. Az ember tehát nem csupán az energiatermelés különféle módjaival, de az energia felhasználásával is beavatkozik a természeti folyamatokba. Az összes emberi tevékenység közül a legnagyobb környezeti hatása minden bizonnyal az energiatermelésnek és -felhasználásnak van.

Klasszikus összehasonlítás

Az energiatermelés gazdaságossága és a környezeti hatások (azaz inkább az emberi beavatkozás) összehasonlításának becslésére több klasszikus módszer létezik. Az *összköltség* (a

beruházás + üzemeltetés + karbantartás + elbontás együttes költsége), a *nettó energianyerés* (a felhasználható és a teljes életciklus során – bányászattól a rekultivációig – ráfordított energia különbsége), az *anyagigény* (egységnyi teljesítmény előállításához szükséges anyag mennyisége), valamint mindezek az ún. belső költségeken túlmenő ún. külső (meg nem fizetett, externális) költségek jelentik a legfontosabb összehasonlítási alapot. Az egyik legrészletesebb magyar nyelvű összehasonlítás Kádár Péter (2009) munkájában található.

Összehasonlító paraméterek • *Nettó energianyerés*: ez a paraméter a felhasználható (E_f) és a ráfordított energia (E_r) különbsége. Ismereteink szerint az E_f/E_r hányados értéke gázerőművek esetén – a mai árakon – mintegy 150, a szél- és napenergia esetén mintegy 7–10. A nap- és szélenergia esetén ezért a megtérülési időt (payback time) szokták figyelembe venni, ami a technológiától függően 1–3 év között van. A fosszilis erőművek élettartama lényegesen hosszabb (40 év).

Anyagigény: 1 MW elektromos teljesítmény előállításához szélenergia esetén 460 t vas és 870 m³ beton kell, míg például atomenergia esetében egy nagyságrenddel kisebb anyagmennyiség: 40 t vas és 190 m³ beton szükséges. A vízenergiánál az anyagigény a nagyobb vízenergia esetén kedvezőbb mértéket mutat, mint a kisebbeknél, de az anyagigény a nagy vízenergia esetén is tekintélyes. Egyes megújuló energiatípusoknak korlátja lehet, hogy a hatékony működtetéshez csakis bányászattal kinyerhető különleges anyagok szükségesek (szélturbinákhoz csapágyak és tekeresmagok, napenergiahoz ugyanazok a különleges ritkaföldfémek, amelyek az informatikában is kulcsfontosságúak).

Belső és külső költségek: a megújítható energiák a konkrét (belső) költség szempontjából

	TJ/év	PJ/év	Mtoe/év	GWh/év	TWh/év	GW
1 TJ/év	1	10^3	$2,388\cdot 10^5$	0,2778	$2,778\cdot 10^4$	$3,17\cdot 10^5$ (31,7 kW)
1 PJ/év	10^3	1	$2,388\cdot 10^2$	277,8	0,2778	0,0317 (31,7 MW)
1 Mtoe/év	$4,1868\cdot 10^4$	41,868	1	11630	11,63	1,33
1 GWh/év	3,6	$3,6\cdot 10^3$	$8,6\cdot 10^5$	1	10^3	$0,114\cdot 10^3$ (114 kW)
1 TWh/év	3,600	3,6	$8,6\cdot 10^2$	1000	1	0,114 (114 MW)
1 GW	31536	31,536	0,754	8760	8,78	1

1. táblázat • Az évi energiafelhasználás mennyiségeinek összehasonlítása

nem versenyképesek a fosszilis energia költségeivel. A külső (nem megfizetett) költségek vonatkozásában a fosszilisok – környezeti károsításuk, elsősorban CO₂-kibocsátásuk révén – az EU ExternE szerint többé kerülnek. A számítások eredménye azonban ellentmondásos, mert a megújulók érdekében végzett környezeti beavatkozás nem vagy csak pozitív előjellel szerepel. Például – amint arra Kerényi A. Ödön (személyes közlés, 2009) felhívja a figyelmet – a szél erőművek beruházásánál a mai számítások nem veszik figyelembe, hogy a villamosenergia-rendszerbe beépített minden egyes kW szél erőművi kapacitáshoz kb. 0,7 kW tartalék fosszilisenergia-bázisú erőmű tartálékolására van szükség, hogy szélcsend idején pótolják a kiesést. Levonható tehát az a következtetés, hogy a külső költségek, a külső hatások bevonása a megújuló energiaforrások megítélését nem egyértelműen előnyösen befolyásolja, és minden efféle számítás eredménye meglehetősen vitatott.

Specifikus környezeti hatások • A hagyományos energiafajták környezeti hatása ismert. A megújuló energiafajták specifikus hatásai cikkgyűjteményünk öt további tanulmányában szerepelnek. A *Future Energy* című könyv (Letcher, 2008) adataival kiegészítve ezek nagyjából a következők:

Vízenergia: a vízerőmű csupán járulékos hasznosítása az egyéb okokból szükséges duzzasztásnak. Eláraszt szárazföldi élőhelyeket, megváltoztatja a vízjárást, megváltoztat vízi élőhelyeket. Minden egyes vízlépcsőterv egyedi hatástanulmányt kíván.

Geotermika: igazából „hőbányászat”: összesen mintegy 5%-ban megújuló csak. Gáz kibocsátása esetleg nagyobb lehet, mint a gáz-tüzelésű erőműveké; környezetidegen anyagok kerülnek a felszínre; vízkövesedés és felszíni vizek hőszennyezése jelentkezik; a

túlzott hővíztermelés felszíni süllyedéseket okozhat és veszélyeztetheti az ivóvízbázist; az aktív vízbesajtolás kisebb földrengéseket indukálhat; zajártalom is felléphet (különösen gőzkutaknál).

Szélenergia: zavaró a látványa (kevesebb nagy, de lassan forgó lapáttal; felszín alatti kábelezéssel, színek alkalmazásával mérsékelhető e zavaró hatás); reggel és este hosszú árnyék keletkezhet; nagy a területigény (de a szélturbinák által elfoglalt terület részlegesen – például mezőgazdasági célra – hasznosítható); aerodinamikai zajok keletkeznek (a megengedett legnagyobb zaj a legközelebbi településen 45 dB, és már a projekt megvalósítása előtt eldönthető, hogy ez tartható-e); elektromágneses interferencia jöhet létre, mivel a szélturbinák visszaveri, elnyeli az elektromágneses jeleket; madarak alkonyatkor nekirepülhetnek, és a táplálékul szolgáló élőlényeket is megzavarhatja; esetleg jegesedés is bekövetkezhet, és a jégdarabok messzire repülhetnek. A szélturbinák előállításához különleges anyag kell. Szeszélyessége energia-tározással (például könnyen szabályozható víztározókkal) mérsékelhető.

Napenergia (jelenleg napkollektor és fotoelektromos átalakítás): a napenergia kémiai energiává való átalakításának technikai feltételei még kidolgozatlanok (Papp Sándor, személyes közlés, 2009). Ritka és kellemetlen fémek (pl. kadmium) kerülnek a felszínre; hatékony fotovoltaiikus átalakítók előállításához intenzív ritkafém-bányászat szükséges. Területigénye kizárólagos. Kritikus pont a ritkaföldfém-bányászat. Komolyan felmerült, hogy ritkaföldfémeket a távoli jövőben a Holdról és a Marsról lehetne beszerezni (Hultqvist, 2003).

Biomassza: a legkisebb energiasűrűségű, következésképpen igen területigényes megújuló energiafajta. Az élet alapját hordozó

szerves anyag nélkülözhetetlen a környezeti folyamatok stabilitásának biztosításában; a biomassza-alapú energiatermelés élelmiszertől veszi el a helyet; elkerülhetetlenné teszi az intenzív kemikália-használatot; biodiverzitáscsökkenést és talajdegradációt okozhat; a kinyert energia alig több a befektetettnél; az energiafű mély gyökérzetétől nemigen lehet majd megszabadulni (Gyulai, 2006). A túlzott mértékű bioenergia-termelés környezeti hatásaira a European Energy Agency is felfigyelt (EEA Signals, 2009).

Energiasűrűség

A 2. táblázat különféle anyagok energiatartalmát mutatja. Az energiahordozók többnyire nem állnak készen rendelkezésre a felhasználás helyén: összegyűjtésükhöz és a közvetlen felhasználásra alkalmassá tételükhöz is szükséges energia és anyag (a napenergia esetén például fotoelektromos átalakító, szélenergia esetén szélturbinák). A gazdaságosságot ezek költségei is nyilvánvalóan befolyásolják (János, 2009). A kis sűrűségű energiát a felhasználáshoz nagy területről kell összeszedni, ami önmagában is anyag- és energiaigényes folyamat. Kiterjedt területi energia esetén az összenergiamennyiség a távolsággal négyzetesen arányos, míg a szállítási energia a távolsággal köbösen (l. i. ábra), úgyhogy energiafajtatól függetlenül beleütközünk egy – az adott energiafajtatól függő – kritikus méretbe, amikor a felhasználható energiamennyiség pusztán a szállítás következtében elemésződik. Ha

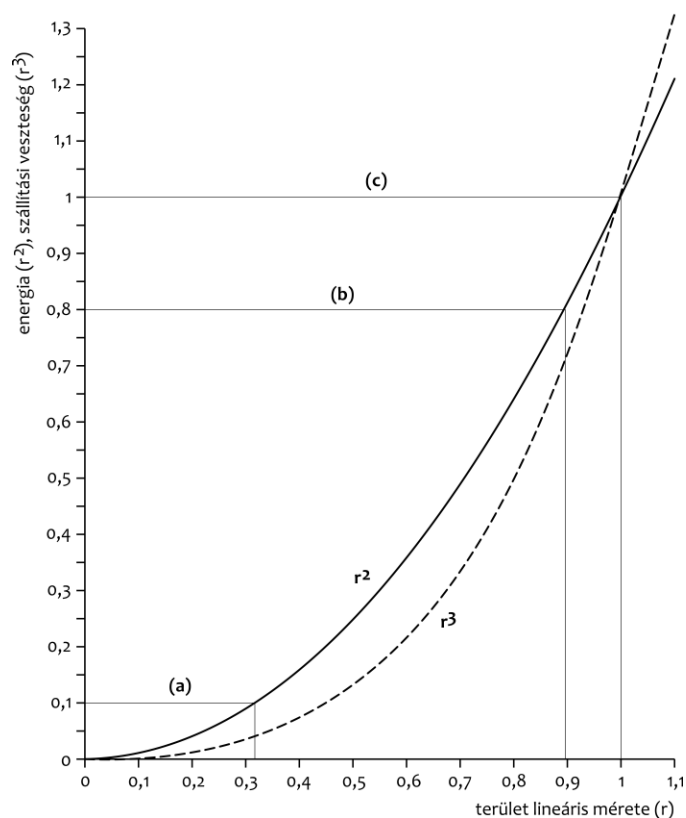
Energiahordozó anyag	Fajlagos energiatartalom (MJ/kg)
tömeg-energia ekvivalencia	89 876 000 000
hidrogénfúzió	645 000 000
urán (235)	80 250 000
folyékony hidrogén	130
földgáz	50
nyers kőolaj	40
kőszén	30
metanol	20
száritott faanyag	20
lignit	15
száritott növény	15
szalma	13
nyers tűzifa	8
háztartási hulladék	8
víz, párolgáshő	2,257
víz (100–0 °C között)	0,418
víz, olvadáshő	0,334
telepek (ólomtól lítiumig)	0,1–2,5
1 kg tömeg, 100 m-ről leesve	0,001
10 m/s sebességű 1 kg tömeg	0,0005

2. táblázat • 1 kg energiahordozó anyag energiatartalma (tájékoztató adatok)

egy bizonyos energiaigény kis területről is kielégíthető, a szállítási veszteség elhanyagolhatóan kicsiny (1. ábra, a eset). Ha kis energiasűrűséggel nagy energiaigényt akarunk koncentráltan kielégíteni, a veszteség meglehetősen nagy (1. ábra, b eset), mígnem elérkezik egy olyan méretig, amely már elvileg veszteséges (1. ábra, c eset).

Magyarország egy évnyi energiaellátásához (1100 PJ-hoz, ami 35 GW folyamatos teljesítménynek, azaz $0,4 \text{ W/m}^2$ -nek felel meg) az einsteini tömeg-energia ekvivalencia

szerint évi 12 kg tömeg elég lenne, míg helyzeti energiából az évi energiaszükséglet annyi, mint amennyivel a teljes talajréteg évi másfél kilométerrel (napi 4 m-rel) lenne megemelhető az ország teljes területén (vö. a 2. táblázat első és utolsó előtti sorát). Nyilvánvaló, hogy az einsteini tömeg ún. „környezeti hatása” összemérhetetlenül kisebb, mint annak az energiatípusnak, amelyik a teljes felszínre kihat. A hallatlan mértékben koncentrált energia működtetésének azonban természetesen nagyobb a hirtelen katasztrófa-kockázata.



1. ábra • A szétszórt területi energia mennyiségének (r^2) és egy pontba gyűjtésére jellemző energia (r^3) elvi alakulása. (a): nagy energiasűrűség, illetőleg kis energiaigény esetén a szállítási veszteség kicsiny, (b): kis energiasűrűség, illetve nagy energiaigény esetén a szállítási veszteség nagy, (c): egy bizonyos – energiaigénytől és energiasűrűségtől függő – távolságon túl a szállítási veszteség meghaladja a kinyerhető energia mennyiségét

A 3. táblázat első sora áttekintést ad arról, hogy az egyes energiatípusoktól négyzetméterenként mekkora teljesítmény várható. A második sor egy atomerőmű-blokknyi (1 GW) teljesítmény előállításához szükséges területigényt mutatja, a harmadik sor pedig azt, hogy Magyarország teljes energiaszükségletéhez mekkora területre lenne szükség az adott energiatípusból. Az adatok fő forrása: Letcher (2008). A víz- és geotermikus energia esetében az alkalmas helyek száma korlátozott, ezért a 3. táblázatban az átlagos energiasűrűség zárójelben szerepel. Az elsőként megadott szám egy igen kedvező helyen tapasztalt érték.

A 3. táblázat az adott területen elérhető bruttó energia mennyiségét mutatja. A koncentrált felhasználáshoz szükséges (ún. begyűjtési) anyag- és energiaigény nem szerepel a táblázatban. Levonható tehát a következtetés, hogy nagy energiaigény koncentrált kielégítéséhez a lehető legnagyobb energiasűrűségű anyagot érdemes előnyben részesíteni, és minél kisebb az adott energiatípus energiasűrűsége, annál inkább lokális felhasználás az ajánlott. A megújuló energiatípusok az energia kínálatot az erőművi szinten csak kis mértékben szélesíthetik. Koncentrált erőművi hasz-

nálatus mértékten erőltetése – pusztán azzal, hogy elveszik a természet elől a helyet – kifejezetten környezetkárosító.

Amennyiben a különböző energiatípusok azonos területhasználatot biztosítanak, akkor a 3. táblázat alapján a következő portfólió adódik: atom + gáz + geotermika együttesére: 66,1%, szénre: 21,2%, vízenergiára: 7,4%, napenergiára: 4,5%, szélenergiára: 0,6%, bioenergia-ültetvényből származó alaperőművi energiára: 0,2%. A fosszilis erőművek részesedése (a geotermikával együtt) eszerint tehát 87,3%, a megújulóké pedig 12,7%. Figyelemreméltó, hogy a fosszilis-megújuló energiatípusok 2005-ös aránya e számítási eredményhez igen közeli értékű (87%:13%) volt.

Energetika és környezet

A természeti (fosszilis vagy megújuló) erőforrás kiaknázása érdekében befektetett teljesítménynek, az összes hő (a hulladékhő és az ún. „hasznosított”, de a természet számára ugyancsak hulladék hő) teljesítménye, a természetátalakító munka teljesítménye és a melléktermékekkel (és azok mennyiségének csökkentésével) kapcsolatos teljesítmény a természet szempontjából egyaránt emberi beavatkozást

	Víz*	Bioenergetikai ültetvény	Szél	Nap	Geotermika*
W_e/m^2 (MW_e/km^2)	13,9* (0,01)	0,4	1,2 (30% kapacitás)	7–10 (10% hatásfok)	125* (0,1)
km^2/GW	72*	2,500	770	100–150	8*
km^2 -igény Magyarország ellátásához	nincs értelmezve	87 500	26 950	3500–5300	nincs értelmezve

3. táblázat • Az egyes megújítható energiatípusok teljesítménysűrűsége, illetve területigénye a felhasználható energia előállításához (Szarka – Ádám, 2009) (A vízenergia és a geotermikus energia esetén a csillag korlátozott helyen és mértékben elérhető tapasztalati értéket jelent, a nagy területre vonatkozó zárójelben átlagértékekkel szemben.)

jelent. Ezek összege a természeti erőforrástól „elvett” teljesítmény. A szennyezés és a terület-használat mellett az ember környezetátalakító tevékenységének intenzitását energetikailag végeredményben a felhasznált természeti erőforrás teljesítménye jellemzi.

Összefoglalás

Az eredeti feladat – a különféle energiatípusok környezeti hatásának összehasonlítása – megoldhatatlan, ugyanis a környezeti hatás nem határozható meg, csakis az ember természeti folyamatokba történő beavatkozásának mértéke becsülhető valamelyest. Ez jellemezhető a (1) felszín alatti térség, a hidro- és az atmoszféra különféle szennyezésének mértékével, (2) a természettől elvett területtel, valamint (3) magával az energiatípus felhasználás mértékével.

A CO₂-kibocsátás csupán egyike a lehetséges szennyezéseknek. A területigény alapján egyértelmű, hogy egy bizonyos energiaigény kielégítéséhez a legnagyobb területi energiasűrűségű anyagot érdemes előnyben részesíteni, és minél kisebb az adott energiatípus

energiasűrűsége, annál inkább ajánlott a lokális felhasználás. Az energiatípus felhasználás pedig azért jó jellemző, mert bárhogyon állították elő az energiát, annak felhasználása pontosan ugyanazzal a környezeti hatással: hőszennyezéssel és a felszín átalakításával jár. A legjelentősebb környezetátalakító tényező az ember által termelt és felhasznált energia. A környezeti hatások mérséklésének leghatékonyabb módja ezért az energiatípus felhasználás és -termelés lehető legnagyobb mértékű visszafogása.

Az energiaigények és a lehetőségek hosszú távon fenntartható összeillesztése a jövő talán legnagyobb kihívása. Az ember természeti folyamatokra gyakorolt hatását csökkentendő, kívánatos lenne az energiaigény jelentős csökkenése, de ehhez alapvető szemléletváltás (a fogyasztói társadalom visszaszorulása) lenne szükséges. Az emberiség jövője az energiaellátás – ma még nem tudni, hogy mekkora – lehetőségeitől függ.

Kulcsszavak: környezeti hatás, energiatermelés, energiatípus, emberi tevékenység, természet

IRODALOM

- Desmarest, Thierry (2008): *World Energy Prospects According to Total*. IYPE Global Launch Event <http://www.yearofplanetearth.org/content/GLE/ThierryDesmarest.pdf>
- Dinya László (2008): *Biomassza-alapú fenntartható energiagazdálkodás*. Korreferátum a Magyar Tudomány ünnepén. <http://vod.niif.hu/player/index.php?q=1587/500K>
- EEA SIGNALS (2009): *If Bioenergy Goes Boom. Key Environmental Issues Facing Europe*. 1831–2772.
- EASAC (2009): *Transforming Europe's Electricity Supply – Full Report of European Academies Science Advisory Council*. <http://royalsociety.org/EASAC-Transforming-Europe-Electricity-Supply-summary/>
- Gyulai Iván (2006): *A biomassza-dilemma*. Magyar Természetvédők Szövetsége. ISBN-10: 963-86870-8-8; ISBN-13: 978-963-86870-8-1 <http://www.mtvz.hu/dynamic/biomassza-dilemma2.pdf>

- Hultqvist, Benqt (2003): *Space, Science and Me*. ESA Publications Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands
- Jánosi Imre (2009): *Megújuló energia. Számoljunk utána!* *Természet Világa*. 140, 11, 502–505.
- Kádár Péter (2009): *Erőművi technológiák összehasonlítása*. <http://www.energiaklub.hu/dl/merlin/kadarpeter.pdf>
- Kerr, Richard A. (2009): *News of the Week. Climate Change: What Happened to Global Warming? Scientists Say Just Wait a Bit*. *Science*. 326, 5949, 28–29.
- Láng István (2008): *Megújuló energiatípusok pro és kontra*. Nap-, szél-, geotermikus, bioenergia – környezet és gazdaságosság. In: Szentgyörgyi Zsuzsa (szerk.): *Tanulmányok a magyarországi energetikáról*. MTA, Budapest, 191–198.
- Letcher, Trevor M. (ed.) (2008): *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet*. Elsevier <http://books.google.hu>

- Marburger John H. (2007): *Reflections on the Science and Policy of Energy and Climate Change*. American Geophysical Union, 2007 Fall Meeting, U15A-01 Invited
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005, <http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>
- Myers, Mark (2008): *Earth Resources: Threat or Treat? Science, Society, and the Future of Earth's Resources*. IYPE Global Launch Event, http://www.yearofplanetearth.org/content/GLE/Session2_Myers.pdf
- Reményi Károly (2009): *Az energiastratégia sarokpontjai*. *Magyar Tudomány* 170, 3, 323–333.
- Sawin, Janet L. – Moomaw, William R. (2009): *A fenntartható energiaellátás jövője. A világ helyzete 2009. Úton egy melegedő világ felé*. Worldwatch Institute. Magyar változat: Föld Napja Alapítvány
- Smalley Richard E. (2003): *Top Ten Problems of Humanity for Next 50 Years*. Energy & Nano Technology Conference, Rice University, May 3, 2003.

- Szarka László – Ádám József (2009): *A megújuló energiatípusok környezeti hatásainak összehasonlíthatóságáról*. Környezet és Energia Konferencia (Debrecen, 2009. máj. 8–9.) k., ISBN 978-963-7064-20-3, 7–12.
- Török Katalin (2009): *A Föld ökológiai állapota és perspektívái*. *Magyar Tudomány*. 1, 48–53.
- Vajda György (2001): *Energiapolitika. Magyarország az ezredfordulón. Stratégiai tanulmányok a Magyar Tudományos Akadémián 2001*. MTA, Budapest
- Vajda György (2004): *Energiaellátás ma és holnap. Magyarország az ezredfordulón. Stratégiai tanulmányok a Magyar Tudományos Akadémián 2004*. MTA Társadalomtudományi Központ
- Vajda György (2006): *Energia és környezet*. *Ezredforduló*. 2, 3–7.
- Vajda György (2009): *Energia és társadalom*. MTA Társadalomkutató Központ
- World Energy Outlook 2009. http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/fact_sheets_WEO_2009.pdf

