

*Vaclav Smil****Energia-válaszút előtt**Háttérjegyzetek egy konferencia-előadáshoz[†]

Bernard Frois arra kért, hogy néhány rendhagyó, sőt vitatható megjegyzést tegyek. Kérésének nagyon szívesen teszek eleget, mivel az intellektuális provokátor szerepe mindig is a kedvencem volt. Néhány következtetésem, így meggyőződésem is ellenkezik számos elvárással, ígérettel és előrejelzéssel, melyeket a következő két napban hallanak majd: megrögzött szkeptikusként egyelőre nem vagyok meggyőződve a fényes kilátásokról, azoknak az eljárásoknak és újításoknak a lehetséges léptékéről és üteméről, amelyeket a következő előadások majd fölmagasztalnak. Szeretnék megérteni Önökkel fél tucat alapvető tény, amelyek egytől-egyig axiómákon, nem pedig hiú ábrándokon alapulnak, és amelyek nem egy-egy előnyben részesített megoldás pártolásáról szólnak. Minden esetben szolgálok legalább egy vagy két egyszerű, és reményeim szerint megjegyezhető szám-szerű adattal annak érdekében, hogy a legfontosabb pontokat kiemeljem.

Először is, mint technikai újításokkal foglalkozó történész, hangsúlyoznom kell: hihetetlenül valószínűtlen, hogy bármilyen hosszú távú terv, technikára vagy árakra vonatkozó előrejelzés, illetve globális vízió – képviseljék azt akár rendkívüli elmék vagy a fokozatosan kialakuló szakértői egyetértés – akár csak megközelítse a mindig megjósolhatatlan valóságot. A hosszú távú történelmi áttekintések azt is megmutatják, hogy az energiaátmenetek lassú, elhúzódó történések: a nagyléptékű energia-átalakításokat még mindig ugyanazok az erőgépek és folyamatok határozzák meg, amelyeket az 1880-as években (gőzturbinák, belső égésű motorok, hő- és vízerőművek) vagy az 1930-as években (gázturbinák, maghasadás) találtak föl. A jelenleg fejlődésben lévő technológiák egyike sem kelhet versenyre ezekkel az elkövetkezendő két-három évtizedben.

Axiómákra támaszkodó kutatóként hangsúlyoznom kell a közelgő átmenet rendkívüli méretét: a nem-fosszilis energiahordozókra történő váltás egy nagyságrenddel nagyobb feladat, mint a fosszilis üzemanyagokról

* Vaclav Smil a világ egyik legelismertebb energiaszakértője. 1968-ban hagyta el Csehszlovákiát, már hosszú ideje a kanadai University of Manitoba professzora. További információk róla: <http://home.cc.umanitoba.ca/~vsmil>

[†] Eredetileg *Energy at the Crossroads: Background notes for a presentation at the Global Science Forum Conference on Scientific Challenges for Energy Research* (Háttérjegyzetek az OECD Globális Tudományos Fórum az energetikai kutatások tudományos kihívásairól szóló konferenciáján elhangzott előadáshoz), Párizs, 2006. május 17–18. Fordította: Demeter Katalin, Döry Magdolna, Feigel Norbert, Kapos Bálint, Mag Zsuzsa, Takács-Sánta András, Virág Petra.

a fitomasszára* való átállás volt, minőségi különlegességei pedig tovább nehezítik a feladatot. Következésképpen lehet, hogy sokkal lassabban fog végbemenni, mint ahogy azt általában feltételezik. Ugyanakkor a sok megújuló energiaforrás közül csupán egyetlen olyan van, amelynek a természetes árama messze fölülmúlja a várható igényeket. A többi lehetőség egyáltalán nem olyan ragyogó, mint ahogy azt a bennük hívők, az elfogult támogatók és a mindenütt jelenlevő aktuál-energiaszakértők látják. Továbbá a maghasadás továbbra is törékeny és igen bizonytalan lehetőség marad, valamint valószínűleg nem én vagyok az egyetlen, aki vitatja a magfúziót mint reális lehetőséget. És végül, ha a jövő nemzedékek legfőbb energia-kérdése nem a fosszilis energiaforrások bősége vagy szűkössége lesz, hanem egy elfogadhatatlanul nagy valószínűséggel bekövetkező jelentős és gyors globális felmelegedés, akkor a kibocsátások nagymértékű elrejtése sem jelenthet megoldást.

Történeti áttekintés

(1) *Az energiával és egyéb tényezőkkel kapcsolatos előrejelzések.* Az energiával kapcsolatos előrejelzések még annyit sem igen érnek, mint a legolcsóbb papír, amelyre nyomtatták őket. Hiszen még a legrosszabb papír is évtizedekig kitart, miközben a legtöbb előrejelzés néhány év, sok esetben néhány hónap alatt érvényét veszti. Ez az állítás a technológiai kérdésekkel, az energiaárakkal és a kereslet változásaival kapcsolatos előrejelzések esetében egyaránt megállja a helyét. Harmincöt évvel ezelőtt egy hasonló találkozón bizonyára hallhattunk volna egy magabiztos felszólalást az akkori világ egyik vezető kutatójától, az Egyesült Államok Atomenergia Bizottságának (*United States Atomic Energy Commission – USAEC*) Nobel-díjas elnökétől, aki arról biztosított volna bennünket, hogy 2000-re a maghasadásból származó energia a világ meghatározó áramfejlesztési formája lesz (ezen belül is a gyors tenyészreaktorok[†] egyre nagyobb arányú részesedésével). Sőt mi több, nagyban fogunk építeni a magfúzióból származó energiára is, valamint atommeghajtású űrhajók szállítanak embereket a Marsra (Seaborg, 1972). Más ragyogó elmék arra hívták volna föl a figyelmet, hogy atomrobbantások kiválóan alkalmazhatóak lennének a bányászatban, illetve új kikötők és csatornák építéseinél (Kirsch, 2005). Az USAEC 1974-es előrejelzése 1,2 millió megawatt nukleáris teljesítményt jósolt 2000-re az Egyesült Államokban. A tényleges érték 2000-ben 81 500 megawatt volt, ami az előrejelzésben szereplő mennyiségnek még a 7%-át

* A fitomassza az adott földterületen, illetve víztérfogatban található növényi anyag mennyisége (valamilyen súlymértékben kifejezve). (A szerk.)

† Az atomerőművek típusairól tömör áttekintés: www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz9802/kulatemu.html (2009. február 3-i állapot szerint.) (A szerk.)

sem éri el, tehát egy nagyságrenddel kevesebb. A magfúzió pedig – ahogy már említettük – egy egyre távolodó délibáb marad.

Egy huszonöt évvel ezelőtti hasonló találkozón minden bizonnyal föl-szólalt volna Amory Lovins, a megújuló energiák atomenergia-ellenes guruja. Lovinst – az atomenergia híveihez hasonlóan – vakbuzgalom és a kritikus gondolkodás hiánya jellemezte, amikor fölmagasztalta a kisléptékű megújuló energiákat, miszerint azok kimeríthetetlenek, nem szennyeznek és rendkívül olcsók. Lovins (1976) előrejelzései azt mutatták, hogy 2000-re az Egyesült Államok teljes energia-felhasználásának mintegy 30%-át (kb. 32 billiárd kilojoule) ezek a megújuló energiaforrások fedezik majd. Ezzel szemben 2000-ben az Egyesült Államok energiaellátásában csak 3,2 billiárd kilojoule-t adtak az új megújuló energiaforrások (a nagyléptékű víz-energiát figyelmen kívül hagyva), ami Lovins becslésének csupán 10%-a. Újfent nagyságrendnyi előrejelzési hibával állunk szemben mindössze nemzedéknyi idő leforgása alatt. (Megmagyarázhatatlan módon, baklövésai ellenére, Lovinsra még ma is sokan guruként tekintenek.) Sørensen (1980) Lovinsnál is nagyobbat tévedett, mivel azt jósolta, hogy a megújuló energiaforrások aránya az Egyesült Államok energiaellátásában 2005-re eléri majd a 49%-ot. Ezen belül a biogáz és a szélenergia részesedését 5-5%-ra, míg a napelemekét 11%-ra becsülte. Mivel a valós részesedés a biogáz esetében 0%, a szélenergia esetében 0,04%, míg a napelemeknél 0,08% volt, a becslés a legjobb esetben is legalább két nagyságrendet tévedett.

Ezek a tévedések nem voltak hatással azokra, akik manapság előrejelzéseket készítenek: szorgalmasan ontják a nevetséges jóslatokat. Már jó ideje felhagytam a hasonló tévedések gyűjtögetésével, de nem tudom megállni, hogy két újabbról ne tegyek említést. Az IPCC* (2006) szénelnyeléstől szóló jelentéséből kiderül, hogy 2095-ben egy tonna szén-dioxidtól 130 amerikai dollárért fogunk tudni megszabadulni. Hogy jól érzékelhessük ennek a becslésnek a pontosságát, képzeljük el, hogy 1917-ben vagyunk, és teljesen elméleti alapokon próbáljuk meg előre jelezni egy meghatározó, nagyléptékű technológia 2006-os árát. Az OPEC† nyilvánosságra hozta azt az előrejelzését, amely a kőolaj árának alakulását mutatja a következő két évtizedben (OPEC, 2004). Eszerint az ár folyamatos csökkenést mutat majd, 2025-re elérve a hordónkénti 20 dolláros szintet. Épp pár hónappal ezelőtt az olajárak elindultak fölfelé, hogy mostanra meghaladják a 70 USD/hordó értéket.

(2) Az 1940 előtti energia-átalakítások dominanciája és az energia-átmenetek lassú üteme. A technikai haladásnak két típusát különböztetjük meg. Az egyik a meglévő technológiák hatékonyságát fokozó, megbízhatóságát

* Intergovernmental Panel on Climate Change – Éghajlatváltozási Kormányközi Testület.

† OPEC: Organization of the Petroleum Exporting Countries – Olajexportáló Országok Nemzetközi Szervezete (*A szerk.*)

növelő és költségeiket csökkentő fokozatos fejlődés. A másik pedig a nagy ugrások, meglepő fejlődések időszaka, amely a folyamatos fejlesztések időszakát visszatérően (és rendszertelenül, megjósolhatatlanul, valamint gyakran megmagyarázhatatlanul) tarkítja. E nagy ugrások megdöntik a régi paradigmákat és új, olykor nem is csak néhány nemzedéken, de több évszázadon keresztül fennálló utakat nyitnak. Az újkori történelem legnagyobb technikai vízváltója 1867 és 1914 közé esik. Ebben az időszakban az elektromosság, a gőz- és vízturbinák, a belső égésű motorok, az olcsó acél, az alumínium, a robbanószerkezetek, a műtrágyák és az elektronikus alkatrészek összekapcsolódva lefektették a nagy energiaigényű civilizáció tartós technikai alapjait (Smil, 2005). A második figyelemre méltó (kiseb, ám még mindig elképesztően fontos) ugrás az 1930-as és 1940-es években következett be a gázturbinák, a maghasadás, a számítástechnika, a félvezetők, a kulcsfontosságú műanyagok, a rovarirtó szerek és a gyomirtók megjelenésével.

Az új energiatechnológiák túllelkesült, kritikátlan támogatóinak figyelembe kellene venniük, hogy (1) a gőzturbinát, a modern világ legfontosabb folyamatosan működő nagy teljesítményű erőgépét Charles Parson százhusz éve találta föl, és ez azóta alapvetően nem változott: a fémipar fokozatos fejlődése révén mindössze nagyobbá és hatékonyabbá vált. (2) A benzinüzemű belső égésű motor – a modern világ legfontosabb közlekedési erőgépe – ugyanabban az évtizedben jelent meg először (korábbi, helyhez kötött modellekre alapozva), mint Parson gépe. A belső égésű motor egyetlen nemzedék alatt figyelemre méltó érettségre tett szert: 1885 és 2006 közötti teljesítménynövekedésének több mint 80%-át már 1910-re elérte. Ez olyan, piaci forgalomban lévő motorokat jelentett, amelyek alacsony tömeg/teljesítmény arányúak, gyorsak és igen megbízhatók. (3) A Benz–Daimler–Maybach-modellt hamarosan Diesel eredendően hatékonyabb motorja követte, amely szinte azonos gyorsasággal tett szert érettségre. (4) A gázturbina, a modern repülés legjelentősebb erőgépe már a negyedik nemzedéket szolgálja, miután rendkívül gyorsan fejlődött Frank Whittle és Pabst von Ohain típusú turbómodelljeiből a nagy kétáramúsági fokú turbófan sugárhajtóművekig.

Bár a második világháború befejezése óta számos új energia-átalakító rendszert vezettünk be, egyetlen új erőgépet sem fejlesztettünk ki, és – eltekintve a maghasadási reaktorok első generációjának elkapkodott és hibás modelljétől – nem tudtunk egyetlen új energiaforrást sem kellő mértékben megcsapolni ahhoz, hogy abból világméretű változás következzen. Nem számít, hogy mennyi meglepő jóslatot közölnek lelkes dán és német támogatók a szélenergia lehetőségeiről, a tény az, hogy a szélturbinák éppen azért tudnak olyan kiválóan hozzájárulni a nagy, összekapcsolt villamosenergia-előállító rendszerekhez, mert sosem lesznek képesek garantált, nagymennyiségű alapterhelést biztosítani. A Parson-féle gőzturbi-

nák (valamint némely országokban a hasonlóképpen tiszteletreméltó eredetű, Francis-, Pelton- és Kaplan-féle hatalmas vízturbinák) továbbra is az egyetlen gépezetek, amelyek képesek erre. Ugyanígy az sem számít, hány polgármester iszik kísérleti hidrogén-meghajtású buszok által kipufogott vizet, vagy hogy hány népszerű tudományos cikk jósolja, hogy a világot 2010-re elárasztják az üzemanyagcellás autók. Egész nyugodtan fogadhatunk arra, hogy az elkövetkezendő évtizedekben az Otto- és a Diesel-motorok fogják uralni az autópiacon.

A technikai és gazdasági fejlesztések hosszú távú kilátásainak megítéléséből egyre inkább hiányoznak a helyes történelmi távlatok. Ám az egyre feledékenyebb civilizáció e vaksága nem kényszerít ki másféle eredményt: a jövőbeli technikai fejlesztések nem igazodnak majd olyan leegyszerűsítő fogalmakhoz, mint amilyen a felgyorsult fejlődés vagy az új energia-átalakítások exponenciálisan csökkenő költségei. Számos megújulóenergia-technológia költsége jelenleg éppen hogy emelkedik (Makower–Pernick–Wilder, 2006). A napelemekhez szükséges szilícium ára több mint kétszeresére növekedett, a szélturbinákhoz fontos szerkezeti acél, alumínium és műanyagok árai emelkedtek, akárcsak az etanol kukoricából történő erjesztésének költségei, mivel mindezen technológiák nagymennyiségű, drágább fosszilis energiát igényelnek. A szilícium rézzel, galliummal, indiummal vagy szelénrel történő helyettesítése aligha jelenthet megoldást: a réz ára történelmi csúcsot ért el, és a világnak nincs elég indiuma ahhoz, hogy fenntartsion egy olyan civilizációt, amely több ezer négyzetkilométernyi, ilyen ritka fémből készült panelen alapszik.

Megcáfolhatatlan történelmi tény: a modern elsődlegesenergia-rendszereket rendkívül (és az infrastrukturális beruházás miatt eredendően) nagy tehetetlenség jellemzi, emiatt pedig az alapvető energia-átmenetek elhúzódó folyamatok. Minden esetben inkább évtizedek, mintsem évek kellene ahhoz, hogy új energiaforrások nagyléptékű felhasználása elterjedjen, és hogy az új elsődlegesenergia-átalakítók odáig fejlődjenek, amikor már jelentős szereplők lehetnek (15–20%-osnál nagyobb részesedéssel a saját piacukon), vagy amikor egy bizonyos energiaszolgáltatás legnagyobb ellátóivá válnak. Az energia-átmenetek nemzedékeket ölelnek fel, és nem pedig éveket vagy hónapokat, amint azt a mikroprocesszoroknál is láthatjuk: nem létezik Moore-törvény* az energiarendszerekre. Jusson ez eszünkbe, amikor egy újabb, mellékesen odavetett állítást olvasunk arról, hogy 2020-ra vagy 2025-re egy földrészt szélenergiával látunk el, vagy hogy járműveit gabonaeredetű etanollal hajtjuk meg.

* Moore-törvénynek nevezzük azt a tapasztalati megfigyelést, mely szerint az integrált áramkörök összetettsége – a legalacsonyabb árú ilyen komponenst figyelembe véve – körülbelül tizennyolc hónaponként megduplázódik. (A szerk.)

Az axiómákból eredő kényszerek

(3) *A közelgő energia-átmenet nagyságrendje és jellegzetességei.* A legjobb visszatekintő statisztikai elemzések azt mutatják, hogy globális szinten a fosszilis energiahordozók fogyasztása nagyjából az 1890-es években haladta meg a fitomasszáét (Smil, 1994). Az 1890-es évek végére, amikor a fitomassza aránya a világ teljes elsődlegesenergia-ellátásában 50% alá süllyedt, a szén- (és kismennyiségű olaj-) fogyasztás 600 ezer megawatt volt, míg 2005-ben a világ 12 millió megawattnyi fosszilis energiahordozót használt, ami húszszoros különbség. Így a fitomassza teljes helyettesítése évenként további 20 billiárd kilojoule energiát igényelt volna az 1890-es évek végén, míg napjainkban a fosszilis energiahordozók teljes cseréje évente közel 400 billiárd kilojoule energiát igényelne más forrásokból. Természetesen a fitomassza használata folyamatosan megmaradt: a XX. század során felhasználása durván a kétszeresére nőtt, és a tűzifa, a faszén és a mezőgazdasági termésmaradványok a világ teljes elsődlegesenergia-ellátásának mintegy 10%-át biztosítják még napjainkban is.

A nagyságrendeket egy sor unalmas összehasonlítással lehet bemutatni: a következő példa célja, hogy a megalapozatlan lelkesedést kissé letörje. A gabonaeredetű etanol racionálisabb gondolkodású támogatói egyetértenek azzal, hogy ez az átalakítás nem a legésszerűbb felhasználási módja egy ehetséges fotoszintetizáló szervezetnek. Ugyanakkor fenntartják, hogy minden meg fog változni a cellulózalapú etanollal, amelyet biotechnológiai úton termelt enzimek segítségével nyert cukrokból állítanak elő erjesztés útján. 2005-ben a vezető enzimefejlesztő cég, az ottawai Iogen napi 40 tonna etanolt állított elő (búzaszalmát és nyárfapépet felhasználó) bemutató üzemében – miközben Kanada napi folyékony energiahordozó-igényének 10%-a 28 000 tonna volt, ami 700-szoros különbség. Ugyanebben az évben a világ napi folyékony energiahordozó-igényének 10%-a több mint egymillió tonnát tett ki, ami közel 26 000-szeres különbség: nyilvánvalóan beletelik egy kis időbe, amíg a cellulózeredetű etanol (az erjesztés költségeitől függetlenül) bármiféle jelentős szerepre tesz szert.

Ugyanakkor félrevezető volna azt gondolni, hogy a közelgő energia-átmenet csupán nagyságrendi kérdés, amely az uralkodó energiaforrásoknak egy nagyságrenddel nagyobb mértékű helyettesítését igényli, mint a legutóbbi nagy energia-átmenet esetében. Az akkori energia-átmenet magasabb energiasűrűségű energiahordozók megjelenésével is járt: még a rossz minőségű bitumenes szén is 50%-kal több energiát tartalmaz, mint a levegőn szárított fa, a legjobb antracitok energiasűrűsége kétszerese a fáénak, a nyersolajból finomított folyékony energiahordozók energiasűrűsége pedig közel háromszor akkora. Ráadásul ezeket az energiahordozókat

három nagyságrenddel nagyobb teljesítménysűrűséggel* lehet előállítani, mint a fát, a faszenet vagy a szalmát. A fotoszintézis eredendően kis hatékonysága azt jelenti, hogy a fitomassza terméseredményei nem haladják meg az 1 W/m^2 -t, míg a fosszilis energiahordozók kinyerése általában 1 kW/m^2 fölötti szinten zajlik. A jelenlegi átmenet esetében épp az ellenkező kihívással nézünk szembe: a nyersolaj-eredetű energiahordozók alacsonyabb energiasűrűségű bio-energiahordozók általi helyettesítéséhez általában ezerszer, de gyakran tízezerszer nagyobb gabona-termőterületre volna szükség, mint az a terület, amit az olajmezők infrastruktúrái igényelnek. Ahhoz pedig, hogy széntüzelésből származóról szélenergia által előállított villamos áramra térjünk át, a legjobb esetben is tízszer akkora, de gyakran százszor akkora helyre volna szükség.

Egy napenergia-alapú civilizációnak annak érdekében, hogy energiával lássa el a meglévő, a fosszilis energia korából örökölt háztartási, ipari és közlekedési infrastruktúrát, össze kellene sűrítene a diffúz energiaáramot a két-három nagyságrendnyi teljesítménysűrűség-különbség áthidalása érdekében (Smil, 2003). Az eredendően alacsony teljesítménysűrűségű megújuló energiaáramok és a viszonylag magas teljesítménysűrűségű modern végső energiafelhasználások tehát nehezen egyeztethetők össze. Ez azt jelenti, hogy egy napenergia-alapú rendszerhez komoly térbeli átrendezésre lesz szükség, amely pedig jelentős környezeti, társadalmi és gazdasági következményeket von majd maga után. Mindenekelőtt jelentősen megnövekedne az elsődleges átalakításokhoz szükséges állandó terület, különösen mindazon átalakítás-típusok esetében, amelyek az eredendően kis hatékonyságú és alacsony teljesítménysűrűségű fotoszintézisen alapulnak: a jégmentes területek átlaga 450 mW/m^2 , és még a legproduktívabb energianövények vagy faültetvények bruttó hozama is kisebb 1 W/m^2 -nél, ami pedig az ezt követő, elektromos árammá és folyékony energiahordozókká történő átalakítások során $0,5 \text{ W/m}^2$ alá csökken.

A XXI. század első éveiben a benzin- és dízelolaj-fogyasztás a szárazföldi és tengeri közlekedésben, valamint a kerozinfogyasztás a légi közlekedésben globálisan körülbelül 75 billiárd kilojoule volt. Még ha a leghatékonyabb napenergiára épülő megoldást ($0,45 \text{ W/m}^2$ -es hozamú, cukornádból előállított brazil etanol) alkalmaznánk is az egész trópusokon, a közlekedési etanol gyártásának teljes területigénye akkor is mintegy 550 millió hektár volna. Ez kevéssel több, mint a világ megművelt földjeinek a harmada, illetve majdnem annyi, mint a teljes trópusi mezőgazdasági terület. Ennek következményeképpen a világ üzemanyagigényét nem lehet kielégíteni még a leghatékonyabb alkohol-előállítással sem. A kukorica-etanol $0,22 \text{ W/m}^2$ -es teljesítménysűrűsége azt jelenti, hogy 390 millió

* A teljesítménysűrűség az az ütem, amellyel az energia termelődik vagy elfogyasztásra kerül – egységnyi területre vetítve. (A szerk.)

hektárra (kicsivel több, mint az ország teljes megművelt földterületének kétszeresére) lenne szükség az Egyesült Államok folyékonyüzemanyag-igényének kielégítésére. Egy tisztán napenergiára épülő rendszer (amelyben a gépek üzemanyaga etanol lenne, a desztillálás pedig mezőgazdasági termésmaradványok elégetéséből származó hővel történne) teljesítménysűrűségei még a legmagasabb elérhető energiabefektetés-megtérülés esetén is körülbelül $0,07 \text{ W/m}^2$ -re esnének vissza.

Ebben az esetben az Egyesült Államoknak 1,2 milliárd hektár fermentációs célú kukoricával beültetett területre, teljes művelhető területének több mint hatszorosára, illetve a világ megművelt területeinek mintegy 75%-ára lenne szüksége. A kilátások nem változnak gyökeresen, ha cellulózeredetű etanolt szeretnénk előállítani mezőgazdasági termésmaradványok felhasználásával: ezeknek a maradványoknak csak egy részét lehet eltávolítani a szántókról, mivel azok olyan kulcsfontosságú ökoszisztéma szolgáltatások* fenntartásához szükségesek, mint a szerves anyagok és a nitrogén visszaforgatása, a nedvesség megtartása vagy a talajerózió megakadályozása (Smil, 1999). Ráadásul még az alkoholerjesztés vagy az autók nagymértékű hatékonyság-javulása sem kompenzálja a növénytermesztés eredendően alacsony teljesítménysűrűségét: ha a közlekedési ágazat az Egyesült Államokban háromszor olyan hatékony volna, mint amilyen 2000-ben volt, még akkor is mintegy 75%-át igényelné az ország mezőgazdasági területeinek, amennyiben a járművek kizárólag a 2005-ös hatékonysággal előállított etanollal működnének.

Szintén nem lenne egyszerű helyettesíteni a fosszilis energiahordozókat a vas- és acélgégyártásban, ami a legfontosabb fémkohászati szerepük. A faszénhez való visszatérés lenne az egyetlen praktikus megoldás. A legjobb brazil olvasztási technológiák (0,725 tonna faszén révén 1 tonna nyersvas) használatával és évi 10 tonna trópusi eukaliptusz termesztésével (Ferreira, 2000) nagyjából 250 millió hektár faültetvényre lenne szükség (mivel közel 600 millió tonna nyersvasat olvasztottak évente a XXI. század első éveiben). Vagyis a világ fémkohászatának faszénnel való ellátásához Brazília teljes erdőterületének felét kellene fatermesztésnek szentelni (a 2000-es állapotot tekintve), ami igen valószínűtlen javaslat. Még nehezebb volna napenergiával fedezni a nitrogénműtrágyák előállítását. A Haber–Bosch-szintézis főként földgázt használ mind hidrogén-, mind

* Az ökoszisztéma szolgáltatások olyan folyamatok és állapotok, melyeket maguk az élőlényközösségek vagy bizonyos fajaik hoznak létre. Ezek közül egyesek nélkülözhetetlenek az emberi élethez, mások gazdagítják azt. Továbbá biztosítják a biológiai sokféleséget és az élőlényközösségek, illetve azok tagjai által termelt anyagok (például élelem, faanyag, ipari alapanyagok, gyógyszeralapanyagok) folyamatos elérhetőségét. Az élőlények szolgáltatásai lényegében létfenntartó funkciók, mint a tisztítás, anyagvisszaforgatás. Ezen felül sok, kevésbé megfogható esztétikai és kulturális értéket is magukba foglalnak. (A szerk.)

pedig energiaforrásként (a kőolaj és a szén nehezkesebb megoldások), és kereskedelmi forgalomban nem érhető el nagyléptékű, nem fosszilis alternatívája ennek a technológiának (Smil, 2001).

(4) *Megújuló energiaforrások – nagyságrendek és bonyodalmak.* A napsugárzás (122 milliárd MW-os értékével) az egyetlen olyan megújuló energiaforrás, amely csaknem négy nagyságrenddel haladja meg a világ teljes elsődlegesenergia-felhasználását, amely 2005-ben majdnem 13 millió MW volt. Nem kevésbé lényeges, hogy a közvetlen napsugárzás az egyetlen megújuló energiaforrás, amelynek teljesítménysűrűsége 100 W/m^2 -es nagyságrendű (globális középértéke 170 W/m^2). Ez azt jelenti, hogy átalakításának növekvő hatékonyságával (mindenekelőtt jobb napelemekkel) kihasználható lenne akár néhányszor 10 W/m^2 -es tényleges teljesítménysűrűséggel is (2005-ben a legjobb egész napra vetített értékek nagyságrendileg 30 W/m^2 körül voltak). Ám a közvetlen napsugárzásnak a többi megújulóhoz hasonlóan két kulcsfontosságú hátránya lenne: egyrészt a villamos energiát előállító erőművek elhelyezése a mainál kevésbé volna rugalmas, másrészt pedig maga az energiaáramlás kiküszöbölhetetlenül valószínűségi eloszlást követne. Ez utóbbi különösen nagy kihívás bármely olyan átalakító-rendszer számára, amely a modern ipari, kereskedelmi és háztartási infrastruktúrák által igényelt egyenletes, nagy megbízhatóságú energiaellátást tűzi ki céljául.

A szárazföldi nettó primer produkció (NPP)* 55–60 millió MW-os értéke majdnem ötször nagyobb a teljes elsődlegesenergia-felhasználás 2005-ös értékénél. Ám a nagymértékű biomassza-felhasználásra épülő energiaellátási tervek különösen sajnálatos példái a vágyálmoknak, illetve annak, hogy mennyire figyelmen kívül hagyjuk az ökológiai rendszerek szükségleteit és a velük kapcsolatos tényeket. Támogatóik nem ismerik (vagy szándékosan figyelmen kívül hagyják) a modern bioszféra-kutatás három alapvető meglátását. Először is, ahogy a *Millennium Ecosystem Assessment* (2005) kimutatta, az alapvető ökoszisztéma-szolgáltatások (amelyek nélkül nem működhet életképes gazdaság) már így is megváltoztak, csökkentek, illetve aggasztó mértékben veszélyeztetettek. Az energianövények bármilyen nagymértékű, intenzív, monokultúrás termesztése csak felgyorsítaná hanyatlásukat.

Másodszor, az emberek már így is kisajátítják a teljes NPP 30–40%-át táplálék, takarmány, rostanyagok és energiahordozók nyerése céljából, miközben a fa és a mezőgazdasági termésmaradványok a teljes elsődlegesenergia-szükséglet mintegy 10%-át elégítik ki (Rojstaczer–Sterling–Moore,

* A nettó primer produkció döntően a fotoszintézis nyomán a fotoszintetizáló élőlények testében felhalmozott energia; az az energia-mennyiség, amely a heterotrófok, vagyis a tápláléklánc magasabb szintjein található élőlények (köztük az ember) rendelkezésére áll életfolyamataik fenntartásához (a szekunder produkcióhoz). (A szerk.)

2001). Ráadásul az emberi NPP-felhasználás rendkívül egyenlőtlen eloszlása azt jelenti, hogy a fitomassza-kisajátítás aránya Kelet-Ázsiában több mint 60%, Nyugat-Európában pedig 70% fölött van (Imhoff et al., 2004). Azok az állítások, melyek értelmében az egyszerű és költséghatékony biomassza-energia a világ teljes elsődlegesenergia-felhasználásának felét fedezhetné 2050-re, vagy amelyek szerint 1-2 milliárd tonna mezőgazdasági hulladékot égethetnénk el minden évben (Breeze, 2004), az emberi fitomassza-kisajátítást a szárazföldi fotoszintézis 50%-a közelébe vagy a fölé helyezné. Ez tovább csökkentené a mikrobák és a vadon élő heterotrófok számára elérhető fitomassza mennyiségét, megsemmisítene vagy visszafordíthatatlanul gyöngítene számos ökoszisztéma-szolgáltatást, valamint csökkentené a szerves anyagok újrahasznosulását a mezőgazdaságban: csak olyasvalaki javasolhat ilyet, aki teljesen járatlan a biológiában.

Végül pedig a nitrogén majdnem mindig a kritikus növekedéskorlátozó makrotápanyag mind az intenzíven művelt mezőgazdasági ökoszisztémákban, mind az erdőművelésekben. A fitomassza tömegtermelése folyékony üzemanyaggá, gázzá vagy elektromos árammá történő átalakítás céljából megkövetelné, hogy jelentősen megnöveljük ennek az elemnek a folyamatos alkalmazását. Úgy tűnik, a nagyszabású bioenergia-tervek hívei nincsenek tudatában annak a ténynek, hogy az emberi beavatkozás a globális nitrogénkörforgásba máris jóval nagyobb mértékű, mint a szén-ciklus emberi eredetű megváltoztatása. Továbbá láthatóan azzal sincsenek tisztában, hogy a reaktív nitrogén túltengése – feloldódva a csapadékban, szárazon lerakódva, kiterjedt szennyeződések és eutrofizációt* okozva édesvizekben és az óceánok partmenti területein, N₂O-ként a légkörbe kerülve a denitrifikációt† követően, valamint megváltoztatva az érzékeny ökológiai rendszerek összetételét – már így is nemkívánatos változások okozója bioszféraszerte (Smil, 2002). Emiatt erősen kívánatos, hogy a lehető legkisebbre csökkentsünk minden további beavatkozást a globális nitrogénkörforgásba. Ez a bölcs döntésünk pedig elkerülhetetlenül korlátozná a nagyléptékű, energetikai célú fitomassza-termesztés bármiféle jövőbeni hozzájárulását az energiaellátáshoz.

Ám ahelyett, hogy csupán a mezőgazdasági termésmaradványok többletének körültekintő felhasználását, illetve faültetvényeknek az erdőtüntetett területeken vagy rossz minőségű földeken történő létesítését javasolnák, a bioenergia hívei abszurd állításokat terjesztenek a fitomasszáról, mint a világ energiaproblémáinak megoldásáról. Sőt, a fitomasszán is túlme-

* Tápanyagok feldúsulása vizekben, amelynek nyomán néhány alga- és baktériumfaj tömegesen elszaporodik. Ez többek között azzal a problémával járhat, hogy bomlásuk nyomán jelentősen csökken a vízben oldott oxigén mennyisége, ami sok élőlény pusztulásához vezet. (A szerk.)

† Baktériumok által végzett folyamat, amelynek során a nitrátból elemi nitrogén, illetve különféle melléktermékek (például N₂O) képződnek. (A szerk.)

részkedve az állati zsiradékok fölhasználását szorgalmazzák. Mostanra már olyan javaslat is létezik, hogy lazacolajat használjunk bioüzemanyagként (Reyes–Sepúlveda, 2006). Azok kedvéért, akik semmit sem tudnak a lazacféle halakról, elmondanék két dolgot. Egyrészt a vadon élő lazacok számát jelentősen megtizedelte a túlhalászat, ennél fogva a lazacfogás bármilyen mértékű további növelése üzemanyag-olaj céljából a túlélésért küzdő fajok kihalásával járna. Másrészt a tenyésztett lazac nagyjából 3,1–3,9 egységnyi halhúst és halolajat igényel (amit csak olyan vadon élő fajok nagymértékű halászatával lehet beszerezni, mint a szardínia, a szardella és a garnélarák) ahhoz, hogy egységnyi ehető szövetet előállítson (Tacon, 2004). Következésképpen a lazacolaj-üzemanyag előállítása az elképzelhető legörültebb módja annak, hogy vagy kiirtsunk egy egykoron nagyon gyakori tengeri fajt, vagy rendkívül negatív energiamérleget produkáljunk.

Sajnálatos módon az ilyesféle téveszméket közpénzekből támogatják, néhányat akár dollár-százmilliók erejéig évente. A legbizarrabb ötletek egyike (ez nem vicc) az IEA-nak* az a programja, amely értékeli „*az olyan állati zsiradék felhasználásának kockázatát, amely bizonyos veszélyes anyagokat, elhullott haszonállatokat és lábra állásra képtelen, beteg állatokat használ nyersanyagként biodízel előállításához*” (IEA, 2005, 39. o.). Képzeljük csak el: „veszélyes anyagból” származó bioüzemanyagra támaszkodni, például BSE (kergekóros) marhákra! Hová vezetne ez!? Van olyan javaslat is (szerencsére ezt nem az IEA jegyzi), hogy „*kapcsoljunk össze egy biodízel-erőművet plasztikai sebészetekkel*”. Az új-zélandi Peter Bethune, aki annak az Earthrace projektnek az alapítója, amely azt tűzte ki célul, hogy új, világkörüli motorcsónak-sebességrekordot állít föl egy olyan hajóval, melyet részben emberi zsírból előállított biodízel-üzemanyag hajt, így vélekedik: „*Aucklandben körülbelül 150 kilogrammnyi zsírt nyerünk hetente zsírleszívásból, ami körülbelül 182 liter üzemanyagot adna.*” (Schouten, 2005)

A közvetlen napsugárzást és a globális NPP bénítóan nagymértékű kihasználását leszámítva nincs más olyan megújuló energiaforrás, amely 10 millió MW-nál többet biztosíthatna: nagylelkű becslések szerint a technikailag megvalósítható maximumértékek kevesebb mint 10 millió MW a szél, kevesebb mint 5 millió MW az óceáni hullámozgás, kevesebb mint 2 millió MW a vízenergia és kevesebb mint 1 millió MW a geotermikus energia, az árapály-energia és a tengeráramlások esetében. Ezeknek a becsléseknek mindegyike bizonytalan alapokra épülő maximumérték, és a gazdaságilag, illetve környezetvédelmileg elfogadható ráták jó eséllyel csak töredékei a technikailag megvalósítható teljes értékeknek.

A kutatási pénzek ésszerű elosztásánál figyelembe kellene venni ezeknek az áramlásoknak a nagyságrendjét éppúgy, mint e források jellem-

* IEA: International Energy Agency – Nemzetközi Energiaügynökség. (A szerk.)

ző teljesítménysűrűségét: ez esetben a napsugárzás közvetlen átalakítása akár alacsony, akár magas hőmérsékletű hővé, vagy akár elektromos árammá olyan vetélytárs nélküli kedvezményezettjévé válna az energikus kutatás-fejlesztésnek, amelynek kereskedelmi sikere hosszú távú, globális alapot adhatna a nem-fosszilis gazdaságoknak.

(5) *Maghasadás és magfúzió.* A nukleáris energia továbbra is fizeti az árát az 1945 utáni rohamos fejlődésének. Az elsődleges villamosenergia-termelés semelyik másik típusa nem került kereskedelmi forgalomba olyan gyorsan, mint az elsőgenerációs vizes reaktorok: alig huszonöt év telt el az első önfenntartó láncreakció (*University of Chicago*, 1942. december 2.) és az új atomerőművek iránti megrendelések 1965 utáni exponenciális növekedése között. E rohamos fejlődés következtében az 1970-es évek elején a szakértők egyöntetűen úgy képzelték, hogy 2000-ben világszerte az olcsó maghasadás fogja uralni az elektromos áram előállítását. Ehelyett azonban stagnálás, majd visszaesés következett be az ágazatban. Visszatekintve nyilvánvaló, hogy a nukleáris energia kereskedelmi célú fejlesztése túlon belül gyors volt, az eljárás társadalmi elfogadottságára pedig nem helyeztek kellő hangsúlyt (Cowan, 1990). Az atomenergia gazdaságossága mindig is vitatható volt, mivel a nyilvánosságra hozott számok nem tartalmazzák sem a kutatás-fejlesztésre fordított hatalmas állami támogatásokat, sem pedig az erőművek üzemén kívül helyezésének vagy az erősen radioaktív hulladék biztonságos hosszú távú tárolásának költségeit.

Weinberg (1994, 21. o.) szerint „*ha a tervezésnél a biztonság lett volna az elsődleges kritérium [az atom-tengeralattjárók tervezésének útmutatójaként szolgáló kompaktság és egyszerűség helyett], úgy vélem, már az első atomkorszak kezdetén ráleltünk volna arra, amit ma biztonságos reaktornak nevezünk...*” Továbbá a nukleáris energia támogatói figyelmen kívül hagyták Enrico Fermi figyelmeztetését, miszerint a nagyközönség nem biztos, hogy elfogad egy olyan energiaforrást, amely nagy mennyiségű radioaktív hulladékot termel, valamint hasadóanyagot, ami terroristák kezébe kerülhet. Az 1986 áprilisában bekövetkezett csernobili katasztrófa következtében a helyzet még rosszabbá vált. Bár a burkolattal ellátott és szigorúbb szabályozás alatt üzemeltetett nyugati típusú nyomottvizes reaktoroknál nem következhetne be olyan nagymértékű radioaktív szivárgás, mint a burkolattal nem rendelkező szovjet reaktor esetében, a baleset csak megerősítette az embereknek azt a széles körben osztott nézetét, miszerint a nukleáris energia minden formája természeténél fogva veszélyes.

Mindehhez hozzátartozik a gyors tenyészreaktorok sorozatos kudarcja: az 1970-es években a 2000-re atomenergizált világ csodás igáslovaiként tartották őket számon, ezért számos országban merészen támogatták őket. Ám a három legjelentősebb programot hamarosan hirtelen leállították, először az Egyesült Államokban, aztán Franciaországban, majd végül Japánban. 1967-ben az amerikai demonstrációs célú reaktor befejezését

1975-re tervezték 100 millió dolláros költségvetéssel, ám 1972-re a várható elkészülést 1982-re tolták ki, a becsült költség pedig elérte a 675 millió dollárt (Olds, 1972). 1983-ban végül az egész programot leállították. Ahogy a franciák közeledtek a Superphénix befejezéséhez, Vendryes (1984, 279. o.) úgy gondolta, elérkezett a folyékony fémhűtésű gyors tenyészreaktorok kora, és „*most már minden szükséges biztonsági garancia rendelkezésre áll*”. Ám a reaktort éppen biztonsági megfontolásokból állították le 1990-ben.

Japán atomprogramjának története különösen sokatmondó az ország egyébként irigylésre méltó technikai teljesítményeit figyelembe véve. 1991-ben Mihamánál tapasztaltak radioaktív szivárgást; 1995-ben be kellett zárni az ország kísérleti folyékony fémhűtésű gyors tenyészreaktorát, miután 640 kilogramm folyékony nátrium folyt ki a másodlagos hűtőhurokból. 1997-ben Tokaimuránál került radioaktív anyag a légkörbe tűz és robbanás következtében; 2004. augusztus 9-én négy munkás meghalt, heten pedig megsebesültek a mihamai erőműben egy szétrepedt csőből előtörő forró gőz miatt. Továbbá az ország legnagyobb szolgáltatója, a *Tokyo Electric Power Company* kénytelen volt mind a 17 reaktorát ideiglenesen leállítani, miután felfedezték, hogy meghamisította a biztonsági vizsgálat adatait.

A maghasadás terén rendkívül kicsi az esélye egy új, hatékonyabb eljárás kifejlesztésének: a nukleáris energia társadalmi elfogadottsága és a radioaktív hulladék végső elhelyezése továbbra is a legfőbb akadályai a nagymértékű terjedésnek. Az is rendkívül valószínűtlen, hogy a magfúzió része lehet egy korai (2050 előtti), vagy egyáltalán bármilyen megoldásnak. Az életképes erőmű-dizájn mérnöki kihívásai (a hő elvezetése, a burkolat mérete és sugárzás általi károsodása) azt jelenti, hogy ennek a technológiának gyakorlatilag semmi esélye arra, hogy a következő ötven évben globálisan jelentős mértékben járuljon hozzá a teljes elsődleges-energia-ellátáshoz (Parkins, 2006). Ennek dacára továbbra is óriási összegeket juttatnak az adófizetők pénzéből erre a délibábra: az Egyesült Államokban az utóbbi ötven évben átlagosan évi negyedmilliárd dollárt költöttek magfúzióra, ám cserébe semmilyen gyakorlati eredményt nem tudnak felmutatni. Kétségtelenül másként alakult volna a helyzet, ha a magfizikusok helyett több biológus részesedhetett volna a kutatás-fejlesztésre szánt keretből.

A nukleáris energiával kapcsolatos kutatások minden formájára túlzott összegeket fordítottak: az amerikai atomenergia-ipar kapta a Kongresszus által folyósított 145 milliárd dollárnak (1998-as árfolyamon számolva) több mint 96%-át 1947 és 1998 között (NIRS, 1999). Továbbá 1954-ben a Price–Anderson törvény csökkentette az egyéni felelősséget azáltal, hogy garantálta a lakosság kártalanítását egy, a kereskedelmi célú atomenergia-termelés során bekövetkező katasztrófa esetén (DOE, 2001). Egyetlen másik iparágnak sem volt része ilyen hatalmas állami védelemben. De nem

az Egyesült Államok az egyetlen olyan ország, amely előnyben részesíti az atomenergiát: az IEA-országokban* 2004-ben kb. 9,4 milliárd dollárt költöttek az energiaszektorban kutatás-fejlesztésre, ebből 3,1 milliárd jutott maghasadásra, de még fúzióra is majdnem kétszer annyit (kb. 700 millió USD-t) szántak, mint a fotovoltaiikus technológiára† (IEA, 2006). Ez az egyenlőtlenség indokolhatatlan, tekintetbe véve a napsugárzás mértékét és teljesítménysűrűségét, valamint annak lehetőségét, hogy a napenergia hosszú távon szénmentesen, felmelegedést nem okozva elégíthetné ki a világ energiaigényét.

Ha valami csoda folytán az atommaghasadást kihasználó reaktoroknak olcsó, biztonságos és megbízható új nemzedéke jelenne meg, akkor ez alapjául szolgálhatna a hidrogénalapú energiarendszerre való áttérésnek. Ám rövid távon ez sem volna megvalósítható. Az energia-átmenetek tagadhatatlanul folyamatosan egyre inkább szénmentessé tették a globális energiaellátást, mivel az átlagos hidrogén/szén arány fa esetében 0,1; szénnél 1, nyersolajnál 2, metán‡ esetében pedig 4. Ennek eredményeképp a logisztikus növekedési folyamat 2030 utánra metán uralta globális gazdaságot jósol, ám a hidrogén uralta gazdaság – amely e gáz nagymértékű előállítását fosszilis energia nélkül követelné meg – csak a XXI. század utolsó évtizedeiben valósulhatna meg (Ausubel, 1996).

Az energiarendszerek történetének szorgos tanulmányozójaként egyet kell értenem azokkal, akik szerint a hidrogénre való gyors átállás csupán hiú remény (Mazza–Hammerschlag, 2004). Nem létezik olcsó eljárás e nagy energiasűrűségű hordozóanyag olcsó előállítására, és az agyonreklamozott „hidrogéngazdaság” létrejöttére még évtizedekig nincs reális esély (Service, 2004). Mindenesetre a metanolalapú gazdaság egy jobb, habár szintúgy nagyon bizonytalan alternatíva lehet (Oláh–Goepfert–Prakash, 2006). Az üzemanyagcellás járművek ugyanígy nem fognak gyorsan és széles körben elterjedni, mivel a hatékonyság terén nem rendelkeznek számottevő előnnyel a hibridautókkal szemben a városi autózásban (Demirdöven–Deutch, 2004).

(6) *Miért nem kívánatos a szén-dioxid föld alá nyeletése?* A szén-dioxid föld alá nyeletése – amelyet mostanság rutinszerűen a globális felmelegedés elkerülésének megvalósítható és hatékony lehetőségeként népszerűsítenek (Socolow, 2005; IPCC, 2006) – kitűnő példája annak, amit úgy nevezhetünk, mint egy kívánatos változás mérnöki megvalósításának General Motors-féle szemlélete. Az 1970-es évek elején, amikor a cég szembesült azzal a törvényrendelettel, miszerint csökkenteni kell a gépjárművek által kibocsátott CO, NO_x és illékony szerves vegyületek

* Magyarország is IEA-tagország. (A szerk.)

† E technológia a napenergiát alakítja elektromos árammá. (A szerk.)

‡ A metán (CH₄) a földgáz fő összetevője. (A szerk.)

mennyiségét, a világ legnagyobb vállalata nem e gázok kibocsátásának visszafogását, hanem költséges és erőforrásigényes háromutas katalizátorok felszerelését választotta. Ezzel szemben Soichirō Honda, a neves és mára már legendás műszaki részvénytársaság alapítója ezt a kihívást ökológusként közelítette meg, s fölvetette a kérdést: „*Mi fog történni, ha nagyszámú gépkocsiba katalizátorokat építünk be, melyek platínát, palládiumot és egyéb nehézfémeket bocsátanak ki, amely anyagok aztán bejuthatnak az emberi testbe? Túl sok itt az ismeretlen.*” (Sakiya, 1982, 181. o.). A Honda mérnökei ezért az egyedülálló ún. összetett örvényvezérlésű égés* (*compound vortex controlled combustion* – CVCC, ebből adódott a Honda Civic) kifejlesztésére összpontosítottak, és az övék volt az első motor, amely megfelelt azoknak a szigorú szennyezőanyag-kibocsátási követelményeknek, amelyeket az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége szabott a gépjárművekre.

A Honda módszere – a lehető legalacsonyabb szintre csökkenteni a nem kívánatos égéstermékek keletkezését, semmint utólag kezelni őket – kellene legyen a vezérlőelvé bármely intelligens, előrelátó és ésszerű tervezésnek. Nincs szükség arra, hogy túlzottan részletezzem e két vállalat példájának tanulságait. Három évtizeddel azután, hogy meglepetést okozott innovatív motordizájnjával, a Honda a világ vezető, és komoly profitra szert tevő gépjármű-innovátora, amelynek két fő típusa, az Accord és a Civic, irányadó a *compact* és *sedan* osztályú gépjárművek gyártásában. Eközben a General Motors gyakorlatilag becsődölt (dollárezreket veszít minden gépjármű-eladáson), termékei között olyan nevetséges szörnyetegeket is találunk, mint a Yukon (24 literes fogyasztással 100 kilométeren) vagy a H1, egy 4700 kilogrammos katonai rohamjármű. Tudjuk, hogy szoros összefüggés mutatható ki az *anorexia nervosa* és a magas jövedelmek között, így nem egyszer láthatunk amerikai városok gazdag környékein közel 5000 kilogrammos járművek volánjánál 50 kilogrammos, anorexiás nőket, miközben 500 grammos kiszerezésű fogyasztókészítményeket mennek vásárolni. Ilyen helyzetekben mindig megpróbálom elképzelni, vajon milyen véleménye lehet egy igazán bölcs földönkívülinek, amikor tudomást szerez a jómódú földlakók e szokásáról.

Sietve hozzá kell tennem, hogy a másodlagos kőolajkinyerést szolgáló föld alatti széndioxid-elnyeletés igenis kívánatos, mint ahogy bármely, növényekhez kapcsolható elnyeletés is, a talajbeli szerves anyagok fokozatos felépítésétől kezdve a nagyszámú fa ültetéséig. Ám ezeket az egyértelműen kívánatos tevékenységeket leszámítva a hangsúlyt a kibocsátások csökkentésére kell fektetni, nem pedig elrejtésükre bizonytalan és

* A technológia lényege, hogy a szennyező anyagokat a motorban kell elégetni, ahelyett, hogy a kipufogórendszerben semlegesítenénk, vagy a katalizátorban ejtenénk csapdába azokat. (*A szerk.*)

költséges módszerekkel. Egyszerűen túl sok az ismeretlen, semhogy óriási befektetést igénylő vállalkozásokat valósítsunk meg, melyek eredményeit számos más, előnyösebb módszerrel is elérhetnénk. Ráadásul ha figyelmen kívül hagyjuk az elkerülés elvét – amely elvnek minden józan mérnöki és környezetvédelmi cselekedetnek vezérelnie kellene –, az sem tenné gyakorlatiasabb javaslatná az elnyeletést: még ha fel is karolnánk ezt a másodosztályú lehetőséget, a valódi változást eredményező vállalkozás nagyságrendje megoldhatatlan feladat elé állítana bennünket.

Egy kulcsfontosságú összehasonlítás jól szemlélteti a kihívás csüggesztő méretét. 2005-ben a világszerte kibocsátott CO₂ össz mennyisége közel 28 milliárd tonna volt. Ha csupán szerény célt kitűzve e mennyiség 10%-át szeretnénk elnyeletni, az évenkénti 6 milliárd m³ elhelyezését jelentené (feltételezve, hogy a gáz teljes mennyiségét legalább a kritikus pontjáig sűríténénk, ahol sűrűsége 0,47 g/ml). A jelenlegi nyersolaj-kitermelés (közel 4 milliárd tonna 2005-ben) térfogatra átszámolva kevesebb mint 5 milliárd m³. Így pusztán a napjainkra jellemző globális CO₂-kibocsátás 10%-ának (nem egészen 3 milliárd tonna CO₂) elnyeletése olyan iparág létrehozását tenné szükségessé, amelynek nagyobb, vagy – erőteljesebb sűrítés esetén – egyenlő mennyiségű sűrített gázt kellene évente a föld alá préselnie, mint a globális olajipar által kitermelt nyersolaj mennyisége, amely iparág infrastruktúráját és kapacitását egy egész évszázad fejlesztései hozták létre. Mondani sem kell, hogy egy ilyen technikai eredmény megvalósíthatatlan egyetlen nemzedék alatt.

Nyilvánvaló a kérdés: miért is kellene egyáltalán az elnyeletéssel próbálkozni annak ismeretében, hogy a széndioxid-kibocsátás 10%-os csökkentése számos ésszerűbb, kiérleltebb és már rendelkezésre álló módszerrel véghez vihető? A legradikálisabb lépés az Egyesült Államok átlagos évi fejenkénti energiafogyasztásának – mely kb. 330 millió kJ évente, durván a jómódú európai uniós szint kétszerese – nagyjából 40%-os csökkenése volna: ez az átalakítás önmagában legkevesebb 2,5 milliárd tonna CO₂-dal csökkentené a világ szénkibocsátását. Természetesen ez a javaslat mindig gúny tárgyává válik, és egy ilyen váltást teljesen lehetetlennek ítélnék. Ám mielőtt sietve csatlakoznának ehhez az elutasító hőzöngéshez, idézzük emlékezetünkbe, hogy midőn a birodalmak fölbomlanak, energiafelhasználásuk összezsugorodik. A legutóbbi tökéletes példa a Szovjet Birodalom kimúlása: 1989 és 1997 között a Szovjetunió utódállamaiban az elsődlegesenergia-felhasználás a harmadával esett vissza. Majd tekintsük az óriási felhalmozódott költségvetési és kereskedelmi hiány pályagörbéjét az Egyesült Államokban, a közel kétszerte nagyobb, fedezetlen egészségügyi és társadalombiztosítási terheket, a háztartások további megtakarításainak hiányát, az ország kizsigerelt iparát, az oktatás lehangelő állapotát, valamint a bénító függést az energia-behozattól (sőt, 2005-ben a nettó élelmiszer-behozattól is)! Ezután már nem lesz szükségünk túl sok kép-

zelőerőre ahhoz, hogy felvázoljuk egy nagyobb gazdasági – választhatunk: válság, visszaesés, összeomlás – forgatókönyvét, melynek velejárója az energiafogyasztás jelentős visszaesése.

Ajánlás

Az alapvető tanulságok egyszerűek: az előrejelzések tudatlanságunk tükrői, nem pedig tudásunk megtestesítői; a hosszú távú történelmi távlatok felbecsülhetetlen értékűek; az energia-átmenetek hosszú, nemzedékeken át tartó folyamatok; a kisléptékű, kísérleti, demonstrációs méretű technológiákon alapuló kétséges állítások nem helyettesítik az axiómákon alapuló, könyörtelenül kritikus értékeléseket; a nagyszabású elméleti megoldások elfogult népszerűsítése ritkán éli túl a brutális találkozásokot a való világban folyó nagyléptékű, megbízható működéssel.

És mindenekfelett: az innovációk és a technológiai megoldások nem adhatnak nekünk tartós feloldozást. A történelem azt mutatja, hogy az energiaigény folyamatosan nő még a leginkább energia-telített jómódú társadalmakban is: e trend világméretű terjedésének bátorítása (most Kína, aztán India igyekszik másolni az Egyesült Államokat) és az igények kielégítésének megkísérlése a tudományos és mérnöki találékonyság segítségével nem olyan formula, amely összeegyeztethető az életképes bioszféra fönntartásával. Világos, hogy a szegény országoknak több energiára van szükségük; ám a gazdagoknak inkább előbb, mintsem később el kellene gondolkodniuk energiafelhasználásuk ésszerű csökkentésén. Minden gazdaság csupán alrendszere a bioszférának, és az ökológia első törvénye, hogy a fák nem nőnek az égig. Ha nem az átgondolt, fokozatos csökkentést választjuk, jelentős kockázatot vállalunk, mert könnyen lehet, hogy a bioszféra fogja kikényszeríteni a csökkentést, ám sokkal kevésbé kívánatos, talán katasztrofális módon.

Georgescu-Roegen (1975, 379. o.) tökéletesen foglalta össze az előtünk álló választást: *„Hallgatni fog-e az emberiség bármiféle olyan programra, amely exoszomatikus kényelmének* zsugorodását vonja maga után? Meglehet, az ember sorsa az, hogy rövid, ám izzó, izgalmas és extravagáns életet éljen...”* A választás még mindig a miénk, ám nincs meg már az a kényelmünk, hogy sok nemzedékkel később tegyük meg.

* Külső, emberi testen kívüli tényezők (tárgyak, gépek) által nyújtott kényelem. (A szerk.)

HIVATKOZÁSOK

- Ausubel, J. H. (1996): *Can technology spare the Earth?*; American Scientist 84, 166–178.
- Breeze, P. (2004): *The Future of Biomass Power Generation*; Business Insights, London
- Cowan, R. (1990): *Nuclear power reactors: a study in technological lock-in*; Journal of Economic History 50, 541–567.
- Demirdöven, N. – J. Deutch (2004): *Hybrid cars now, fuel cell cars later*; Science 305, 974–976.
- DOE (US Department of Energy) (2001): *Price-Anderson Act*; http://www.gc.energy.gov/price-anderson_act.htm (2009. február 3-i állapot szerint.)
- Ferreira, O. C. (2000): *The future of charcoal in metallurgy*; Energy & Economy 21, 1-5.
- Georgescu-Roegen, N. (1975): *Energy and economic myths*; Southern Economic Journal 41, 347–381.
- Hoffmann, P. (1981): *The Forever Fuel*; Westview Press, Boulder
- IEA (International Energy Agency) (2005): *Energy Technologies at the Cutting Edge*; IEA, Paris
- IEA (International Energy Agency) (2006): *RD&D Budgets*; IEA, Paris
- Imhoff, M. L. – L. Bounoua – T. Ricketts – C. Loucks – R. Harriss – W. T. Lawrence (2004): *Global patterns in human consumption of net primary production*; Nature 429, 870–873.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006): *Carbon Dioxide Capture and Storage*; IPCC, Geneva
- Kirsch, S. (2005): *Proving Grounds: Project Plowshare and the Unrealized Dream of Nuclear Engineering*; Rutgers University Press, New Brunswick, NJ
- Lovins, A. B. (1976): *Energy strategy: the road not taken*; Foreign Affairs 55 (1), 65–96.
- Makower, J. – R. Pernick – C. Wilder (2006): *Clean Energy Trends 2006*; Clean Edge, Inc., San Francisco <http://www.cleandedge.com/reports-trends2006.php> (2009. február 3-i állapot szerint.)
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): *Our Human Planet*; Island Press, Washington, DC

- NIRS (Nuclear Information and Resource Service) (1999): *Background on nuclear power and Kyoto Protocol*; <http://www.nirs.org/climate/background/cdmnukesnirsbackground.htm> (2009. február 3-i állapot szerint.)
- NRC (National Research Council) (2004): *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*; National Academies Press, Washington, DC
- Oláh, G. A. – A. Goepfert – G. K. S. Prakash (2006): *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*; Wiley-VCH, Weinheim
- Olds, F. C. (1972): *The fast breeder: schedule lengthens, cost escalates*; Power Engineering 76 (6), 33–35.
- OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries) (2004): *Oil Outlook to 2025*; OPEC, Wien
- Parkins, W. E. (2006): *Fusion power: will it ever come?*; Science 311, 1380.
- Reyes, J. F. – M. A. Sepúlveda (2006): *PM-10 emissions and power of a Diesel engine fueled with crude and refined biodiesel from salmon oil*; Fuel 2006, 1–6.
- Rojstaczer, S. – S. M. Sterling – N. J. Moore (2001): *Human appropriation of photosynthesis products*; Science 294, 2549–2551.
- Sakiya, T. (1982): *Honda Motor: The Men, the Management, the Machines*; Kodansha International, Tokyo
- Schouten, H. (2005): *Earthrace biofuel promoter to power boat using human fat*; CalorieLab Calorie Counter News, 2005. november 11., <http://calorielab.com/news/2005/11/11/> (2009. február 3-i állapot.)
- Seaborg, G. T. (1972): *Opening address*; in. *Peaceful Uses of Atomic Energy*; International Atomic Energy Agency, Vienna, 29–35.
- Smil, V. (1994): *Energy in World History*; Westview, Boulder, CO
- Smil, V. (1999): *Crop residues: agriculture's largest harvest*; BioScience 49, 299–308.
- Smil, V. (2001): *Enriching the Earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*; The MIT Press, Cambridge, MA
- Smil, V. (2002): *The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics, and Change*; The MIT Press, Cambridge, MA
- Smil, V. (2003): *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*; The MIT Press, Cambridge, MA

Smil, V. (2005): *Creating the 20th Century: Technical Innovations of 1867–1914 and Their Lasting Impact*; Oxford University Press, New York

Socolow, R. H. (2005): *Can we bury global warming?*; *Scientific American* 293 (1), 49–55.

Sørensen, B. (1980): *An American Energy Future*; Solar Energy Research Institute, Golden, CO

Tacon, A. G. J. (2004): *State of Information on Salmon Aquaculture Feed and the Environment*; University of Hawaii, Honolulu, HI, http://www.westcoastaquatic.ca/Aquaculture_feed_environment.pdf (2009. február 3-i állapot szerint.)

Vendryes, G. A. (1984): *The French liquid-metal fast breeder reactor program*; *Annual Review of Energy* 9, 263–280.

Weinberg, A. (1994): *The First Nuclear Era*; American Institute of Physics, Washington, DC