

FENNTARTHATÓSÁG – FENNTARTÁSOKKAL

SUSTAINABILITY–WITH RESERVATIONS

Bársony István

villamosmérnök, kutatóprofesszor, az MTA rendes tagja

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

MTA Kiváló Kutatóhely

barsony.istvan@energia.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a napjainkban tapasztalható klímaváltozás tükrében a megcélzott globális „karbonsemleges” gazdaság és társadalom ellátását biztosító megújuló energiai eszközpark megteremtése kapcsán tárgyal pár elgondolkodtató szempontot a „fenntartható fejlődésről”.

ABSTRACT

The paper suggests a few aspects to be considered on the way of creating the means for renewable energy supply towards a global ‘carbon-neutral’ economy and society targeting a ‘sustainable development’ in view of the climatic changes experienced today.

Kulcsszavak: üvegházhatás, karbonsemlegesség, megújuló energiaellátás, nyersanyagbázis

Keywords: greenhouse-effect, carbon-neutrality, renewable energy supply, raw materials

BEVEZETÉS

A Covid–19 koronavírus megjelenéséig a világháborúk után született generációk joggal mondhatták magukról, hogy a történelem eddigi legszerencsésebb korszakában éltek Európában. Az emberiséget korábban megtizedelő járványok, éhínség, háborúk az életükben jobbra már csupán politikai-gazdasági kihívást jelentettek, amelyek nemzetközi egyezményekkel kordában tarthatók voltak. Mindennapi életükben valamennyi területen élvezhették a globalizált világ teljes individuális szabadságot biztosító technológiai vívmányait az internettől a személyes mobilitásig. Ennek azonban ára volt és van! A *Global Footprint Network* szervezet évente kiszámítja, hogy a Föld lakossága mely naptári dátumig

fogyasztja el bolygónk erőforrásaiból azt a hányadot, amely egy naptári év alatt megújulni képes, azaz amelyet a természet pótolni tud. Ezt követően már az évmilliók alatt „elraktározott” erőforrások felélése folyik. A legaggasztóbb, hogy ez a nap, amely 2019-ben már június 28-ra esett, egyre közelebb kerül az évkezdethez (GFN, 2019). A „rablógazdálkodás” – elsősorban a vízzel és az energiaforrásokkal, de a bányakincsekkel, a környezetkárosító anyagok termelésével is – tehát egyre gyorsuló ütemű.

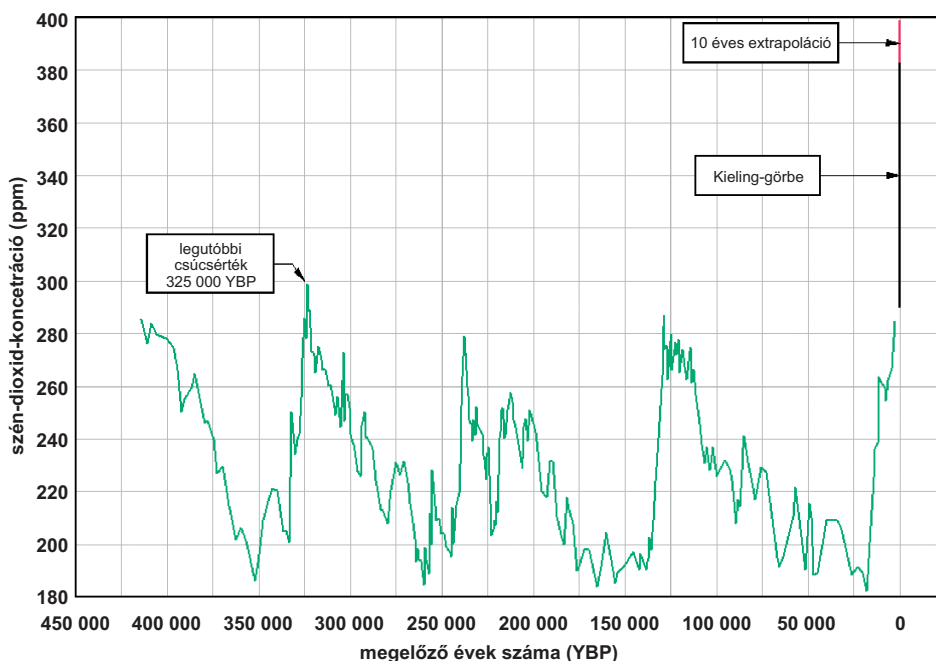
Közhelyszámba megy, hogy a technológia robbanásszerű fejlődése közepette az emberiség jószerivel tudomást sem vesz arról, hogy bolygónk erőforrásai nem végtelenek. A technológiai vívmányokhoz való hozzáférés eredményeképpen a megtermelt javak 80%-át csupán a népesség 15-20%-a élvezi, ami óriási egyenlőtlenségek forrása a Földön. Az igazságtalan eloszlás akkor is kezelhetetlen társadalmi-gazdasági feszültségekhez vezetne, ha a lokális és globális politikai érdekérvényesítők gátlástalan profitszerzésük érdekében nem aknáznák ki ezeket saját hasznukra. Túlnépesedett bolygónkon ráadásul pont az elmaradott, természetileg is hátrányos helyzetű földrajzi régiókban növekszik robbanásszerűen a népesség. A legkritikusabb veszély a túlfogyasztás, a mértéktelen pazarlás és a hulladéktermelés. Ha a világon valamennyien a svájci állampolgárok mai életszínvonalán szeretnék élni, ahhoz a Föld tartalékainak mintegy három és félszeresére lenne szükség.

HŐMÉRSÉKLETEMELKEDÉS, KLÍMAVÉDELEM

A Föld eltartó képessége szervesen összekapcsolódik a természeti környezet védelmével és a klimatikus viszonyokkal. Az időjárási ciklikusságok földünk történetében természetes jelenségnek tekinthetők, az üvegházhatás természetes folyamat. A Föld ökoszisztémájában a Nap sugárzási spektrumából elnyelt, illetve a világűrbe lesugárzott energiahányad között évmilliók alatt alakult ki az egyensúly, ezt befolyásolta az ember a „konzervált” energia nagyléptékű hasznosításával. A karbonkibocsátás növekedésében tehát a fosszilis energia felszabadítása, az erdőirtás, az intenzív mezőgazdálkodás és állattenyésztés, a bányászat hatása mind-mind tetten érhető. Uralkodó felfogás szerint a kozmológusok a tapasztalt globális hőmérséklet-emelkedést, a klímaváltozást döntően a szén, kőolaj, földgáz elégetésével a légkörbe juttatott szén-dioxid-többség több száz évig érvényesülő üvegházhatásának számlájára írják.

Kétharmad részben vízzel borított bolygónk hőmérsékletének szabályozásában döntő befolyással bírnak a víz halmazállapot változásai; a termikus egyensúly kialakulásában a kulcsszerepet a víz–vízgőz–felhő–csapadék-körforgás játssza. A leghatékonyabb üvegházhatású gáz maga a vízgőz, elpárolgásával a felszínről hatalmas hőmennyiséget juttat a légkörbe. A kondenzált pára felhőket alkot,

amelyek a besugárzás elől leárnyékolják a felszínt, és a kondenzációs hőt nem földközélszinten, hanem a magasabb lég rétegekben adják le. Az ember által termelt, nem kondenzálódó üvegházgázok (köztük a CO_2) kibocsátásának hatása erre a folyamatra szuperponálódik. A víz természetes körforgásában működik egy negatív visszacsatolási mechanizmus, amely ennek az addicionális emisszióknak a hőmérséklet-emelő hatását a hidrológiai körforgás felgyorsításával folyamatosan kompenzálja. Ennek a ciklusnak a lokális felgyorsulásával szembesülünk az extrém időjárási körülmények kialakulásakor. Ezért a szkeptikus klímakutatók (Miskolczi, 2014) óvatosságra intenek abban, hogy mennyiben írható a klímaváltozás kizárólag az emberiség számlájára. Még ha nem is teljes mértékben, ahogy azt ma a zöld politikai szereplők sugallják, az emberi tevékenység szerepe tagadhatatlan a lokális szélsőséges természeti folyamatok triggerelésében.

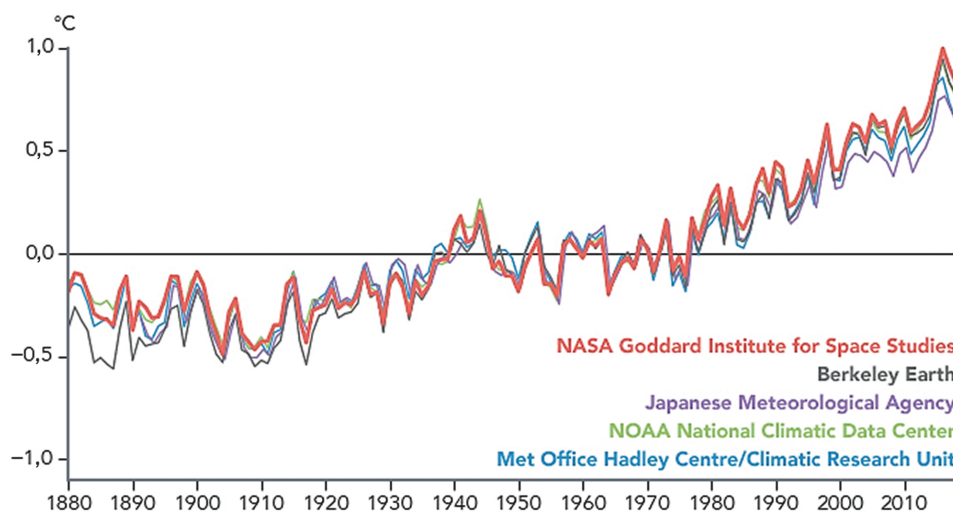


1. ábra. A légköri szén-dioxid-koncentráció értékének (ppm) változása az elmúlt 450 000 év során az Antarktisz jégébe zárt légbuborékok analízise és napjaink megfigyelései alapján (NOAA, 2018) a következő tíz évre extrapolált értékekkel (Kieling-görbe), aminek az érvényességét sokan vitatják

Az emberi tevékenység káros hatását a légköri CO_2 -koncentráció változásával szokás igazolni. Az 1. ábrán látható, hogy a sarki jégbuborékokban mért szén-dioxid-koncentráció értéke az elmúlt négyszázezer évben ciklikusan változott ugyan mintegy 50%-nyit, de nagyjából 1950-ig nem haladta meg a 300 ppm

maximális szintet. Az iparosodás és a mobilizáció általánossá válása következtében ez idő tájt viszont megindult egy máig töretlen emelkedés, ami inkább exponenciális, mintsem reverzibilis folyamatnak látszik. Ma 416 ppm-nél járunk. A légkör összetételének ilyen változása hosszabb távon az intenzívebb fotoszintézises biomassza-termelés révén akár még pozitív hatással is lehetne a földi vegetációra. Rövid távon azonban az utóbbi évek szélsőséges időjárási katasztrófái, melyekről a mindent behálózó internetes híradások jóvoltából napi szinten értesülünk, ráirányították a figyelmet a fejlett országok ipari tevékenységéből származó szennyezés globális hatására.

A NASA szerint eddig az éves globális középhőmérséklet alapján 2016 volt a legmelegebb év az emberiség történetében, bár 2019-ben ez a rekord is igencsak megdőlt. A 140 év egymástól független, megbízhatónak feltételezett mérései átlaghőmérsékleti adataiból szerkesztett görbéken (a 2. ábrán) az utóbbi harminc évben valószínűsíthető egy emelkedési tendencia. Klímakutatók a fenti jelenségekre épülő, de rendkívül divergáló klímamodelljeik alapján erre hivatkozva konstatják a vészharangot, és prognosztizálják még súlyosabb természeti katasztrófák bekövetkeztét, amennyiben nem cselekszünk azonnal a „klíma” védelmében.



2. ábra. A globális éves középhőmérséklet anomális eltérése az 1961–1990 közötti időszak átlagától, 160 év „megbízhatónak, függetlennek tekintett” műszeres mérései alapján (Williams, 2018). Ez a „hoki-görbe” néven elhíresült adatsor, amelyre a klímakutatók a vészforgatókönyveket alapozzák

A technológiai fejlődés lokálisan és globálisan is mindig növekvő energiafelhasználás mellett valósult meg. Így van ez még akkor is, ha racionális fogyasztás-csökkentéssel helyel-közzel sikerül javulást is elérni. A *BP Statistical Review of*

World Energy 2019-es tanulmánya szerint a világ energiafelhasználása 2018-ban például már 2,9%-kal nőtt, ami a 2010 óta mért átlagos 1,5% növekedés duplája. Az energiafelhasználás növekményét csak kisebb részben fedezték a megújulók, a növekmény javarészt földgáz égetéséből származik. A legnagyobb fogyasztók – Kína, az Egyesült Államok és India – együtt az energianövekmény több mint kétharmadáért felelősek. Az USA energiafelhasználása harminc év óta most nőtt a legnagyobb mértékben.

A felmelegedés egyik nem elhanyagolható mellékhatása, hogy a Föld egyre nagyobb részén válik elkerülhetetlenné a klímaberendezések tartós használata. Márpedig felmérések szerint (Bryant, 2019) a légkondicionáló berendezések áramfogyasztása már jelenleg is a világ teljes elektromosenergia-felhasználásának 9%-át teszi ki, és 2050-re a légkondicionálás az energiafogyasztás 12,5%-át emésztí majd fel. A világszerte várható 140%-os növekedés összemérhető az Európai Unió teljes elektromosenergia-igényével! Ennek a többletnek csak egy részét állítják majd elő napenergiával. Így nem meglepő, hogy az üvegházhatásért 80%-ban felelősnek tartott globális szén-dioxid-terhelés is hétéves rekordot jelentő mértékben, 2%-kal nőtt 2018-ban (BP, 2019). Az Eurostat kimutatása szerint hazánk részesedése az összeurópai szén-dioxid-kibocsátásban csupán 1,4% (URL1). Az egy főre jutó fajlagos CO₂ kibocsátásunk elsősorban a nukleáris energiafelhasználás miatt pedig csaknem 47%-nyival marad el a világátlagtól.

Az elsivatagosodás, az eltartóképesség lokális eróziója, a járványok és a szegénység elől milliók kelhetnek útra, hogy a fejlett országokban keressenek megélhetést. Ilyen, Európát érintő tömeges „menekültáradat” lehetőségével például az Európai Unió által már bő évtizede megrendelt tanulmányban is számoltak (URL1). A jelenség politikai-gazdasági-társadalmi hatásait napjainkban tapasztaljuk.

A szükségszerűség mellett a „klímaváltozás elleni harc” valódi lehetőség úgy mond a „karbonsemlegesség” (low carbon society) megvalósítására! Ez a politika által erősen preferált fejlődési irány a tőke számára kiemelkedően profitábilis új piacok megnyitásával kecsegtet, bár befektetésintenzív innovációt, új termelési struktúrák meghonosítását igényli. Viszont az új munkahelyek teremtésétől, az innovációtól elvileg nagyobb társadalmi igazságosság megvalósulása is remélhető. Az eddigi érvek alapján is nyilvánvaló, hogy az energiafogyasztás racionalizálása mellett tehát forradalmi változásokra van szükség az energiaellátásban. A következő évtizedekben mind az energiatermelésben, mind a közlekedésben le kell építeni a fosszilis tüzelőanyagok felhasználását. Ehhez az elektromos energia-szolgáltatásban és a mobilitásban is át kell térni a szén-dioxid-kibocsátás-mentes (karbonsemleges) energiafelhasználásra. A fenti érvrendszer tehát mind a gazdasági, mind a társadalmi elvárások szempontjából vonzó. Így marketing céllal ezekre a – jobbára szimpatikus – érvekre hivatkozva tudnak a feltörekvő zöld politikai pártok és civil mozgalmak növekvő mértékben teret nyerni.

A „klímavédelemben” mint általános társadalmi célban mára közmegegyezés van, anélkül hogy kellő mélységben ismernénk a háttérben meghúzódó bonyolult összefüggésrendszert. Márpedig ez korunk talán legégetőbb tudományos kihívása! A tudományos viták lefolytatása és korrekt bizonyítékok nélkül a „fenntartatható fejlődés” hangoztatása sajnos csupán üres szlogen marad.

A MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK NYERSANYAGHÁTTERE

A „tisztá” energiatermelés, -tárolás és -továbbítás csúcstechnológiai megoldásai a periódusos rendszer tekintélyes elemkészletét tartalmazó ásványkincsek nagyléptékű bányászatára, feldolgozására vannak utalva. Ebben a cikkben csupán a fenti, nem lebecsülendő kihívásban rejlő veszélyeket próbáljuk felvázolni – főleg a University of Technology Sydney Institute for Sustainable Futuresnek az Earthworks számára készített *Responsible Minerals Sourcing for Renewable Energy* című tanulmánya (Dominish et al., 2019) adatai alapján (3., 5–9. ábra, illetve 1–5. táblázat). A teljes tanulmány letölthető az alábbi címről: URL2.

Az energiamixben az 1. táblázat szerint ma a legjelentősebb energiahordozók a szén, a földgáz, a nukleáris energia és a vízenergia. Részarányuk kisebb mértékben növekszik 2050-ig, viszont a kőszén szerepe tovább nő! A megújuló energiaforrások közül a *jelenlegi növekedési ráta mellett* a fotovoltaikus (PV) naperőművek, illetve a szélerőművek részesedése a mai 23%-ról csupán 34%-nyi prognosztizálható 2050-re.

Az e-mobilitás rohamos elterjedésével számolva a 2. táblázat alapján a mai 1–6 millió közötti elektromos járműállománnyal szemben 2050-re 281 milliónyi elektromos gépjármű lesz üzemben világszerte. A kétszázszoros növekedés alapján értelemszerűen a jelenlegi 100 GWh körüli értékről 20 TWh-ra nőne a gépjárművekbe épített energiatároló kapacitás is. A nagyléptékű energiatárolás kérdése tehát az érdeklődés homlokterébe került, amit mi sem bizonyít jobban, mint a lítium-akkumulátor kutatás-fejlesztésért odaítélt 2019-es kémiai Nobel-díjak.

Amennyiben a Föld átlagos légköri hőmérsékletében a jelenlegi, meglehetősen divergáló klímamodell-számítások alapján (IPCC, 2017) maximum 1,5 °C emelkedést engednénk meg, 2050-re valamennyi fosszilis tüzelőanyagot, azaz CO₂-emissziót számúznunk kellene a rendszerből. Mivel politikai nyomásra a nukleáris erőműveket is ki kellene iktatni az energiatermelésből, az energia-előállítás összetétele a megújulók részarányának drasztikus ütemű növelésével alakulna ki (lásd 3. táblázat). Az ehhez szükséges technológiai fejlesztés becslés szerint 13%-os globális energiafelhasználás-növekedéssel jár! Az energiamix valószínűleg még így sem lenne teljesen karbonmentesnek tekinthető – például a biomassza mint „megújuló energiaforrás” elégetése miatt, de a légkörben elvileg minimalizálható lenne az emberi tevékenység számlájára írható üvegházhatású gázok aránya.

1. táblázat. A világ elektromosenergia-termelésének becstült összetétele a jelenleg érvényesülő trendek, a megújuló növekvő szerepének figyelembevételével TW/h-egységekben (Dominish et al., 2019 nyomán)

Áramtermelés TW/h/év	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kőszén (és nem megújuló hulladék)	7 662	8 334	8 942	10 237	11 389	12 495	13 083	13 589
Lignit	1 780	1 767	1 773	1 803	1 832	1 901	1 962	1 982
Földgáz	5 743	6 179	6 998	8 159	9 294	10 428	11 422	12 285
Olaj	877	739	633	512	446	382	330	287
Dízel	122	122	125	131	137	141	148	153
Nukleáris	2 545	2 991	3 218	3 452	3 638	3 825	4 018	4 218
Hidrogén	0	0	0	0	1	1	1	1
Megújuló előállítású H ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
Vízenergia	3 888	4 299	4 684	5 202	5 583	5 964	6 320	6 667
Biomassza (és újratermelőző hulladék)	471	649	785	953	1 082	1 211	1 354	1 514
Geotermikus	80	104	130	178	230	281	344	426
Szolaris termikus	9	25	38	58	94	130	183	260
Óceáni ár-ápany	1	2	4	7	16	25	37	53
Szél	838	1 394	1 948	2 431	2 894	3 358	3 856	4 389
Fotovoltaikus energia	247	662	1 057	1 460	1 826	2 192	2 645	3 209
Összes megújuló	5 534	7 133	8 645	10 290	11 725	13 160	14 740	16 517
Összes megtermelt	24 262	27 266	30 333	34 584	38 461	42 332	45 702	49 032
Megújulók aránya	23%	26%	29%	30%	30%	31%	32%	34%

2. táblázat. A táblázat az elektromos („karbonmentes”) meghajtású globális járműpark adatait, valamint az ehhez igényelt akkumulátorkapacitás változását mutatja (Dominish et al., 2019 nyomán)

Járművek száma (ezer db)	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Akkumulátoros hajtású (BEV)	1 074	5 596	12 952	27 619	47 396	72 691	144 325	218 591
Hálózatról tölthető hibrid (PHEV)	56	441	1 377	3 759	8 326	16 070	28 221	46 683
Haszonjármű (CV)	102	432	1 209	3 001	4 800	6 004	7 016	7 480
Autóbusz	184	368	1 061	2 429	4 283	5 991	7 067	7 914
Összes elektromos hajtású	1 416	6 837	16 600	36 807	64 805	100 756	186 628	280 668

Akkumulátorkapacitás (GWh)	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Akkumulátoros hajtású (BEV)	41	224	557	1 326	2 465	4 143	8 659	13 553
Hálózatról tölthető hibrid (PHEV)	0	3	11	38	100	209	395	700
Haszonjármű (CV)	26	130	423	1 200	2 160	3 002	3 859	4 488
Autóbusz	9	22	61	128	227	311	382	453
Összes akkumulátorkapacitás	76	378	1 053	2 691	4 951	7 665	13 295	19 194

3. táblázat. A táblázat azt a drasztikus energiaösszetétel-változást szemlélteti, amit 1,5 °C globális középhőmérséklet-emelkedés megengedése esetén a következő három évtizedben el kellene érünk a kibocsátásmentes energiaszolgáltatáshoz – beleértve a nukleáris erőművek leállítását (Dominish et al., 2019 nyomán)

Áramtermelés TWh/év	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Kőszén (és nem megújuló hulladék)	7 662	8 334	8 942	10 237	11 389	12 495	13 083	13 589
Lignit	1 780	1 767	1 773	1 803	1 832	1 901	1 962	1 982
Földgáz	5 743	6 179	6 998	8 159	9 294	10 428	11 422	12 285
Olaj	877	739	633	512	446	382	330	287
Dízel	122	122	125	131	137	141	148	153
Nukleáris	2 545	2 991	3 218	3 452	3 638	3 825	4 018	4 218
Hidrogén	0	0	0	0	1	1	1	1
Megújuló előállítású H ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
Vízenergia	3 888	4 299	4 684	5 202	5 583	5 964	6 320	6 667
Biomassza (és újratermelődő hulladék)	471	649	785	953	1 082	1 211	1 354	1 514
Geotermikus	80	104	130	178	230	281	344	426
Szolaris termikus	9	25	38	58	94	130	183	260
Óceáni ár-apály	1	2	4	7	16	25	37	53
Szél	838	1 394	1 948	2 431	2 894	3 358	3 856	4 389
Fotovoltaikus energia	247	662	1 057	1 460	1 826	2 192	2 645	3 209
Összes megújuló	5 534	7 133	8 645	10 290	11 725	13 160	14 740	16 517
Összes megtermelt	24 262	27 266	30 333	34 584	38 461	42 332	45 702	49 032
Megújulók aránya	23%	26%	29%	30%	30%	31%	32%	34%

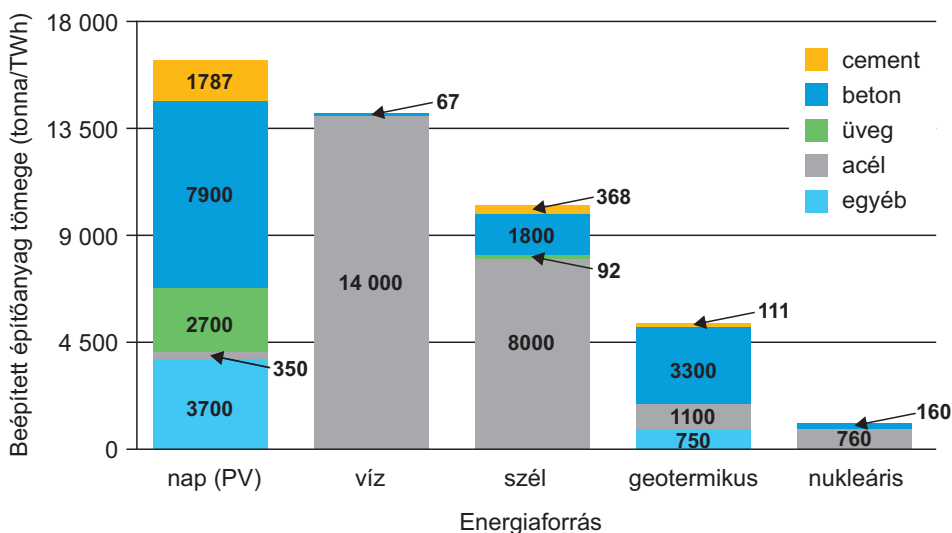
4. táblázat. A táblázat a 1,5 °C globális középhőmérséklet-emelkedési korlát betartásához szükséges elektromos járműfejlesztés és energia-tárolókapacitás felfutását mutatja a következő három évtizedben az egyes járműkategóriákban (Dominish et al., 2019 nyomán)

Járművek száma (ezer db)	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Akkumulátoros hajtású (BEV)	1 345	10 158	102 132	284 926	495 630	677 357	772 588	916 469
Hálózatról tölthető hibrid (PHEV)	85	2 889	55 147	129 023	183 240	158 563	92 885	56 932
Haszonjármű (CV)	102	1 333	10 673	40 600	81 416	87 430	90 078	91 248
Autóbusz	184	368	1 061	2 429	4 283	5 991	7 067	7 914
Összes elektromos hajtású	1 716	14 748	169 014	456 978	764 570	929 341	962 618	1 072 563

Akkumulátorkapacitás (GWh)	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Akkumulátoros hajtású (BEV)	51	406	4 392	13 676	25 773	38 609	46 355	56 821
Hálózatról tölthető hibrid (PHEV)	0	17	441	1 290	2 199	2 061	1 300	854
Haszonjármű (CV)	26	400	3 736	16 240	36 637	43 715	49 543	54 749
Autóbusz	9	29	229	782	1 148	1 354	1 497	1 595
Összes akkumulátorkapacitás	87	852	8 797	31 989	65 757	85 740	98 695	114 019

A tárgyalóasztalon lévő klímaegyezmények, az ENSZ és az EU ilyen radikális átállást sürgetnek, aminek azonban komoly ára van. A központosított energiatermelés és -elosztás aligha járna energiamegtakarítással. Bár a városiasodó ipari társadalmakban egy ilyen gyorsütemű fejlesztés a javuló levegőtisztaság következtében pozitív hatással lenne a lakosság egészségi állapotára, a szükséges technológiai fejlesztés egyértelmű nyertesei a tőkeerős gazdaságok lesznek. A megfelelő kutatás-fejlesztési potenciál és gyártási *know-how* birtokában ők lesznek képesek az egész világpiacot ellátni a szükséges eszközökkel. Kárvalottjai lesznek viszont azok a társadalmak, melyek a fosszilis energiahordozók bányászatára, nyersanyagkincsük kiaknázására, az ezeket hasznosító ipar fejlesztésére építették gazdaságukat.

A 2. táblázat adataihoz képest egy ilyen drasztikus „kibocsátásmentes” energia-szcenárióval az ausztrál kutatók szerint 2050-re optimálisan egymilliárd járművel kellene számolnunk az e-mobilitásban. A darabszám növekedése miatt a szükséges tárolókapacitást (lásd a 4. táblázat alsó fele) is 250-szeresére kellene növelni. Ezek óriási számok, jöllehet a vázolt fejlesztés aligha hozná jobb helyzetbe a fejletlen, harmadik országbeli milliárdokat.



3. ábra. Az egyes energiaellátási megoldásokkal egy-egy TWh-nyi kapacitás létesítésénél fellépő fajlagos anyagszükséglet ábrázolása (DOE, 2015 nyomán).

Meglepő a megújuló energiaforrások (napelem, szélkerék) telepítésének tetemes cement, beton, acél, üveg és egyéb hagyományos építőanyag-szükséglete a nukleáris energia-előállítás anyagigényével szemben.

A napelem-erőműveknél az anyagfelhasználás a nukleáris technológiához képest csaknem 18-szoros!

A napenergia közvetlen, illetve közvetett „valós idejű hasznosítását” jelentő két legfontosabb fajtája a fotoelektromos energiaátalakítás és a szélgenerátorok alkalmazása. Egy új német tanulmány szerint a szélerőművek – megfelelő támogatási politika esetén – elvileg egész Európa ellátását megoldhatnák (Rydberg et al., 2019). A fotovoltaiikus energia-előállításban is vannak arra mutató jelek, hogy a jelenlegi 22–36%-os energiaátalakítási hatékonyság a Rice University újabb szén nanocsöves kutatási eredményei szerint (Gao et al., 2019) az infravörös hányadnak a látható fotonspektrumba konvertálásával elvileg akár 80%-ra is emelhető.

A 3. ábrán szembevetendő, hogy ma az azonos energiamennyiség előállítására képes energiaforrások létesítésének fajlagos anyagigénye (t/TWh) a hagyományos (cement, beton, acél, üveg és egyéb) anyagokból milyen óriási eltérést mutat! A megújuló előállítása csupán jóval nagyobb anyaghányaddal lehetséges, például ugyanazt az energiamennyiséget napelem-erőművekből az atomerőművek fajlagos anyagigényének csaknem 18-szorosával lehet kinyerni. Ezzel párhuzamosan nő a területigény is!

5. táblázat. A tölthető elektrokémiai telepek, a napelemek és a szélerőművek gyártásában igényelt kémiai elemválaszték áttekintése. Az alapvető félvezető és ritkaföldfém anyagigényen túl tetemes átmeneti fém, nemesfém-, valamint réz- és alumíniumszükséglet mutatkozik (Dominish et al., 2019 nyomán)

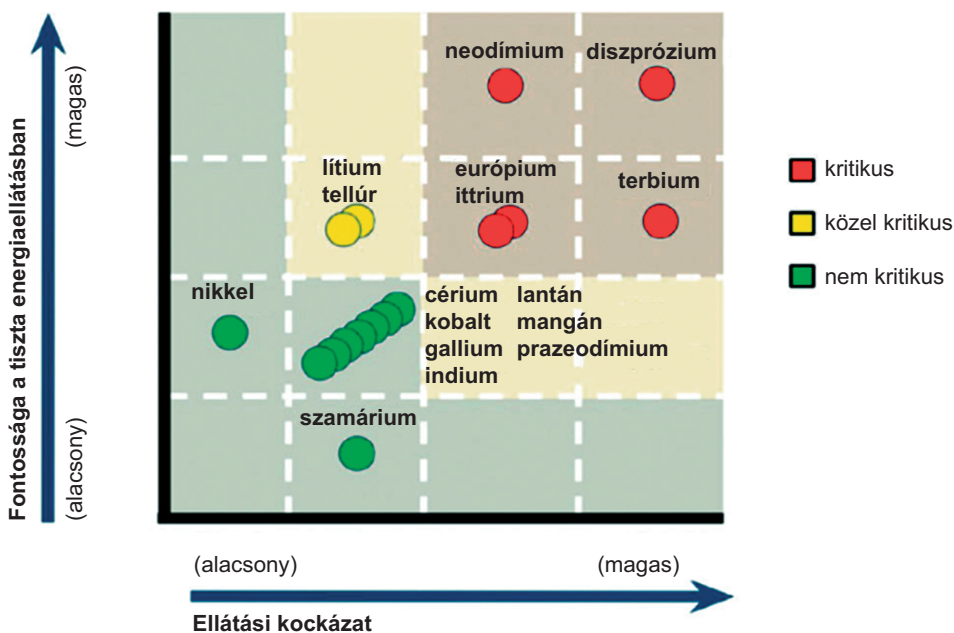
(EV: elektromos jármű; PMG: permanens mágnesgenerátor; Non-PMG: teljesítménykábelezés)

	 Elektrokémiai elemek			 Napelemek			 Szélérőművek	
	Li-ion	Li-S	EV	c-Si	CuInGaSe	CdTe	PMG	Non-PMG
alumínium	×	×		×	×	×	×	×
kadmium						×		
kobalt	×							
réz	×	×		×	×	×	×	×
diszprózium			×				×	
gallium					×			
indium					×			
lítium	×	×						
mangán	×							
neodímium			×				×	
nikkel	×							
ezüst				×				
szelén					×			
tellúr						×		

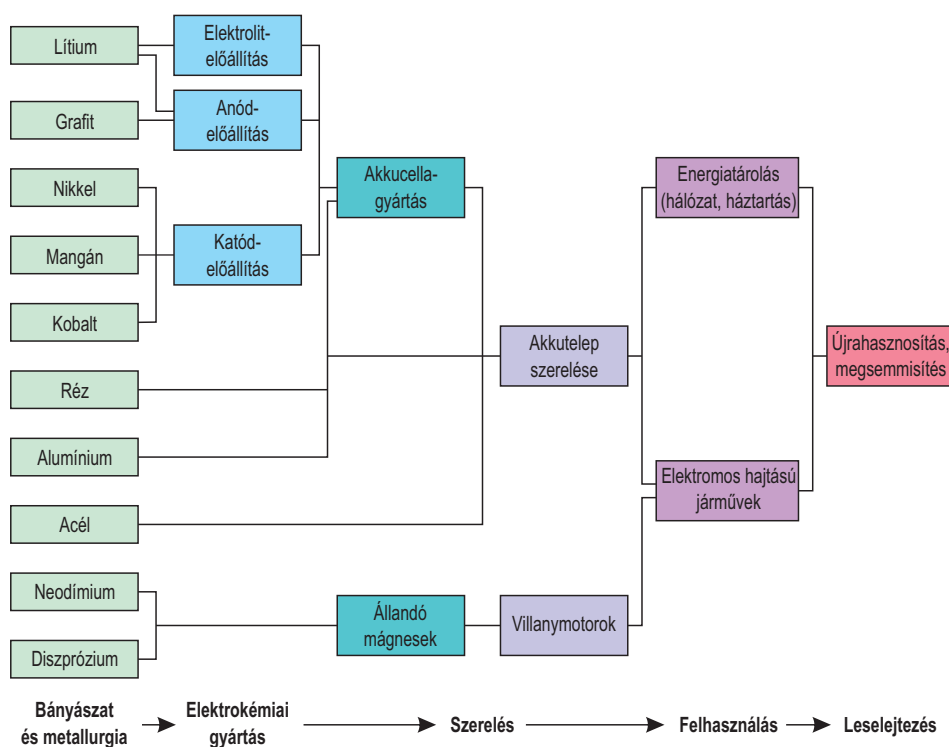
A fenti két fő megújuló energiaforrás közismert hendikepje, hogy az időjárás, illetve a napszakok függvényében szakaszos, ingadozó teljesítményű energiaszolgáltatást tesznek csak lehetővé, azaz a folytonos ellátáshoz a felhasználás idejéig szükség van átmeneti energiatárolásra.

Nagy léptékben az energiatárolást víztározók feltöltésével potenciális energia formájában, illetve kémiai energiatárolással, tölthető akkumulátorokkal oldják meg. Utóbbiak egyben az elektromobilitás kulcseszközei. Ezért tehát elegendő, ha az energiatároló akkumulátorok, a fotovoltaiikus napelemek (PV) és a szélerőművek gyártása során felhasznált anyagválasztékra fókuszálunk (5. táblázat).

A ma legnagyobb volumenben gyártott eszköztípusokat figyelembe véve a tekintélyes elemválasztékban a vezető fém (Al, Cu, Ag) és átmeneti fém (Co, Ni, Mn), félvezető PV-anyagok (Si, Ga, Cd, Te, In, Se, S, Ce) mellett számos ritkaföldfém (Nd, Dy, Eu, Y, Tb, Sm, Ce, La), valamint a Li szerepel. Ahogy a 4. ábra mutatja, ezek folyamatos biztosítása nem kis probléma elé állítja a gyártóipart az ambiciózus tervek megvalósításában már középtávon is (2015–2025).



4. ábra. A tiszta energiaforrások gyártásában felhasznált nyersanyagok, kémiai elemek fontossága az ellátási biztonság kockázatosságának függvényében (DOE, 2015 nyomán)

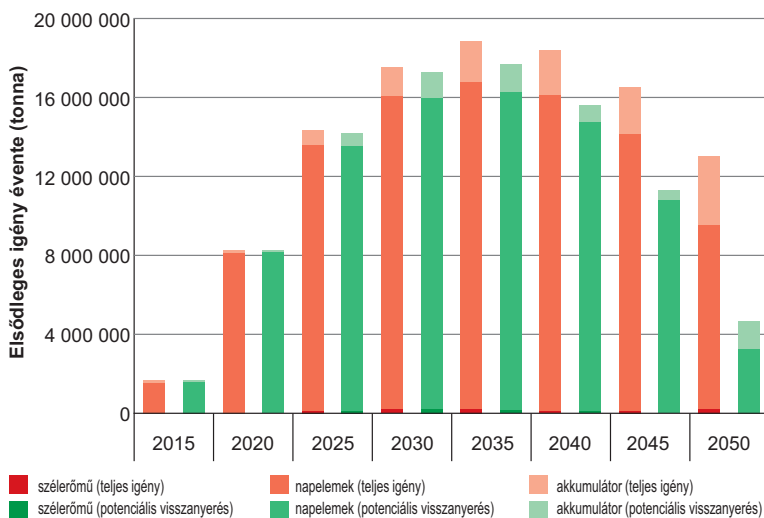


5. ábra. A lítium-ion akkumulátor előállítási folyamata és életciklusa a nyersanyagbányásztól a leselejtezésig, illetve újrahasznosításig (Dominish et al., 2019 nyomán)

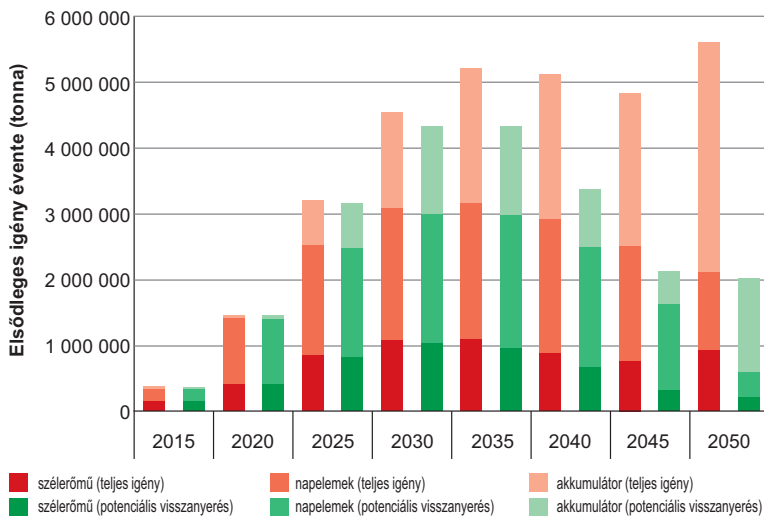
Az 5. ábrán a Li-ion akkumulátort felépítő nyersanyagok bányászatától és feldolgozásától kezdve követhető az eszköz életciklusa az elektrokémiai megmunkáláson, a végtermék gyártásán át a felhasználásig, majd a kapacitáscsökkenés során elért végső élettartam utáni megsemmisítésig. Az e-mobilitás követelményeinek már nem megfelelő, csökkent kapacitású akkumulátorok üzemben tartása hálótároló alkalmazásban akár a 30%-os tárolókapacitási szintig is indokolt és rentábilis lehet. Ezt követően a leselejtezett termékekből is vissza kell nyerni az értékes anyagokat. Az egyik legnagyobb Li-ion akku gyártó, a Tesla elkezdte egy recikláló üzem építését, amely a Gigafactory 1 gyáruk számára állít elő kritikus másodlagos nyersanyagot (URL3). Az American Manganese cég új szabadalmazott eljárással, újra felhasználható formában vonja ki a Li-ion telepek katódjának összes összetevőjét, beleértve az eddig vissza nem nyert lítiumot is (URL4).

A két legközzönségesebb vezető fém, az alumínium és a réz esetében is óriási igénynövekedéssel kell számolnunk a három alapeszköztípus gyártása esetében, nem is beszélve az energiatovábbításban jelentkező felhasználásról. A 6. ábra mu-

tatja a szélgenerátor-, a napelem-, illetve akkumulátorgyártással kapcsolatos éves alumíniumigényt tonnában a primer forrásból (sötét oszlopok) és a szekunder nyersanyag-járulékkal (világos adalékok) kiegészített mennyiségben. A mintegy tízszeres mennyiségi növekedés indokolja a másodlagos nyersanyag visszanyerését.

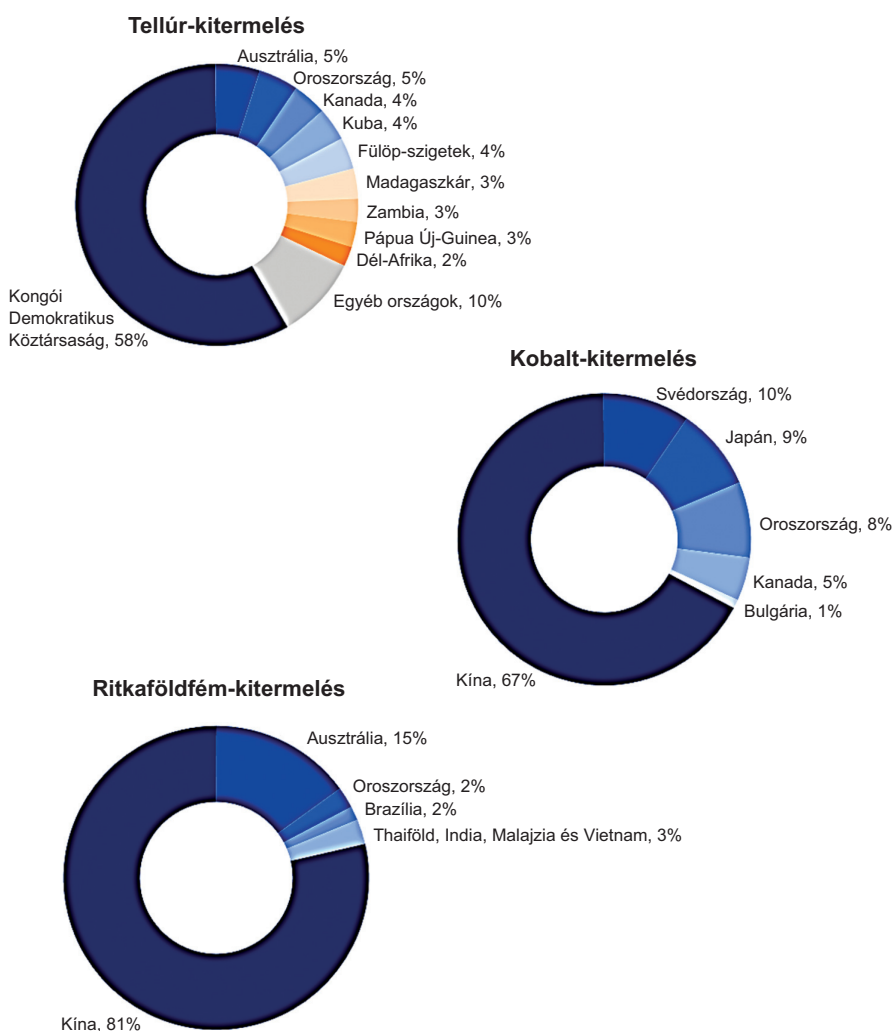


6. ábra. Az éves alumíniumfelhasználási igények várható alakulása az elsődleges és a másodlagos nyersanyagforrások figyelembevételével (Dominish et al., 2019 nyomán)



7. ábra. Az éves rézfelhasználási igények várható alakulása az elsődleges és a másodlagos nyersanyagforrások figyelembevételével (Dominish et al., 2019 nyomán)

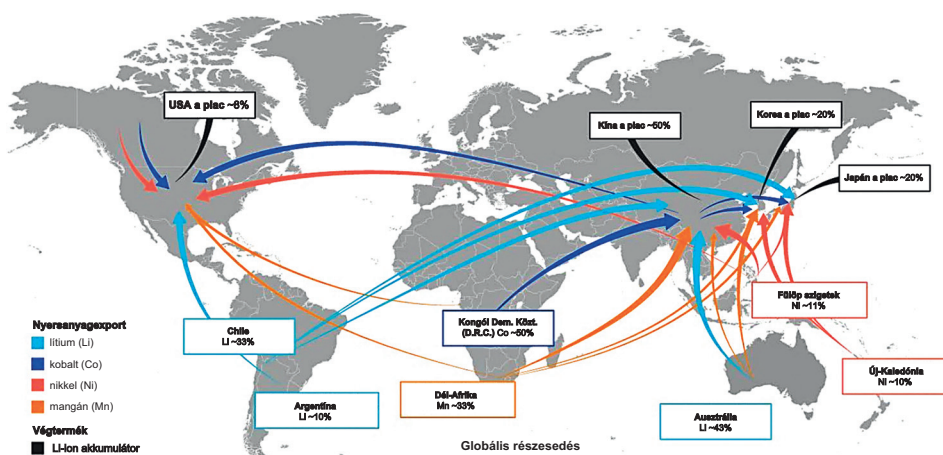
A prognosztizált 14-szeres rézigény-növekedés a 7. ábra grafikonja szerint viszont mindhárom eszköztípusnál, a szélerőművek generátorainál, a napelem- és akkumulátorgyártásban is jelentős, ami indokolja a feltétlen visszanyerést. Nem lebecsülendő az energiaelosztó hálózat bővítésének nyersanyagigénye sem, különös tekintettel az akkumulátorok töltéséhez szükséges teljesítményelosztásra. A gazdag skandináv országokban (Norvégia, Svédország) az elektromos gépjárművek túlhajtott elterjesztése már ma is okoz ellátási zavarokat az elosztóhálózat túlterheltsége miatt.



8. ábra. A kobalt-, tellúr- és ritkaföldfém-lelőhelyek, illetve beszerzési források megoszlása országok szerint 2017-ben (Dominish et al., 2019 nyomán)

Ami az egyéb komponenseket illeti, a 8. ábra alapján megállapítható, hogy le-
lőhelyük és előállításuk zömmel Kínában és a fejletlen vagy fejlődő afrikai, ázsiai
és dél-amerikai országokban van. Egyes komponensek esetében szinte monopol-
helyzettel állunk szemben.

Egy pillantást vetve a globális nyersanyaglelőhelyek geográfiai megoszlására,
a 9. ábrán világossá válik a fentiekben rejlő drasztikus ellentmondás. Az USA,
Kína és Délkelet-Ázsia a fő nyersanyagfelvevők, de ezzel együtt természetesen
a legnagyobb energiafelhasználók is. Kína a saját nyersanyagforrásokhoz való
kizárólagos hozzáférése folytán az északi félteke késztermékpiaját is uraló ipa-
rosodott, gazdag országok között privilegizált helyzetben van. A feltörekvő tá-
vol-keleti nagyhatalom és a volt gyarmattartó európai országok között a nyers-
anyagbázis biztosítása, és a piacszerzés területén kibontakozó érdekütközések
óriási geopolitikai biztonsági kockázatot is jelentenek, elsősorban a gyarmati
szerződések máig ható korlátozásai miatt (lásd: *Franceafrique*; „...sans l’Afrique
il n’y aura pas d’histoire de la France au XXI^e siècle” [Afrika nélkül Franciaor-
szágnak nem lesz 21. századi történelme!] François Mitterrand, 1957).



9. ábra. A lítium-ion akkumulátorok táplálékláncában szereplő kritikus nyersanyagok globális kereskedelme. A szállítási útvonalak a kitermelő országokból a piacokra, azaz a Li-ion-cellák előállítási színtereire (Kína 50%, Dél-Korea 20%, Japán 20%, USA 8%) (Dominish et al., 2019 nyomán)

A fejlődő országok a 8. és 9. ábra tanúsága szerint viszont egy vonatkozásban igencsak közelről érintettek a folyamatban. Ők csupán a kritikus nyersanyagok energiafálgó és rendkívül környezetkárosító bányászata és feldolgozása révén jutnak bevételhez. Ez fokozza egyoldalú kiszolgáltatottságukat, és konzerválja

gazdasági-társadalmi elmaradottságukat. Ráadásul pont ezeket a nagy demográfiai szaporodási rátájú déli földrajzi területeket sújtja leginkább a vízhiány, ami nemzetközi politikai feszültségek forrása is. A megélhetés fizikai veszélyeztetése a klímaváltozás és a politikai instabilitás következtében fokozza a migrációs kényszert.

ÖSSZEFOGLALÁS

Évszázadunkban az emberiség túlélési dilemmáját az alábbi két szélsőséges opcióval jellemezhetjük:

- *a folytonos gazdasági növekedés ökológiai indokolt feladása* – ami akár gazdasági és szociális összeomlással fenyegethet, vagy
- *a gyorsuló technológiai fejlesztés töretlen folytatása* – még létezésünk alapfeltétele, a globális ökoszisztéma lerombolásának a kockázata árán is.

Nyilvánvaló, hogy a gyakorlatban egyik szélsőség sem járható. Egyesek a rövid távú szavazatszerzés érdekében lekicsinylik a veszélyt, és a második opciót helyezik előtérbe. Mások, például a Green New Deal keretében (Cortez, 2019) a klímaváltozást féken tartó nagyléptékű technológiai megoldások támogatására követelnek állami beavatkozást.

Modus vivendit csakis a „fenntartható fejlődés” jelenthet mind gazdasági, mind társadalmi téren, amit természetesen a nagypolitika is felismert. Csakhogy, mint láttuk, a voksok megszerzéséért folytatott versenyben a rendkívül komplex globális ökoszisztéma egy-egy elemének tudományosan megalapozatlan, „kampányszerű” fejlesztésével a környezetben is nagyobb kárt okozhatunk, mint a kezelni kívánt probléma maga. Az üdvözlendő napenergia-hasznosító nanotechnológiai fejlesztések mellett (Gao et al., 2019) a technológiai lehetőségek mindenhatóságának túlhangsúlyozása a káros folyamatok megfékezésében, például nanorendszerek fejlesztése a légköri CO₂-koncentráció globális megkötésére (Han–Zhien, 2019), sokszor a legkézenfekvőbb természetes megoldásokat szorítja háttérbe.

A *Science* 2019-ben ismertetett (Bastin et al., 2019) egy tudományos körökben sokat hivatkozott „felfedezést”, hogy *erdősítéssel is meg lehetne kötni (időszakosan) a szén-dioxid-felesleget!* Böven van még hasznosítható terület a globuszon, hiszen gyakorlatilag már csak Amazónia egy része borított 100%-ban őserdővel. Egymilliárd hektárnyi erdő ültetése a klímafélők szerint is akár már középtávon kezelhetővé tenné a CO₂-kibocsátás okozta globális felmelegedés eszkalációját.

A „klímavédelmi megoldások” globális léptékű alkalmazásánál tehát helyénvaló a tudományosan megalapozott, megfontolt előrehaladás, a fenntartható fejlődés érdekében indokoltak az óvatos fenntartások.

IRODALOM

- Bastin, J-F. – Finegold, J. – Garcia, C. (2019): The Global Tree Restoration Potential. *Science*, 365, 6448, 76–79. DOI: 10.1126/science.aax0848, https://www.researchgate.net/publication/334244294_The_global_tree_restoration_potential
- BP (2019): *Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Bryant, C. (2019): Air Conditioning Is the World's Next Big Threat. *Bloomberg*. <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2019-06-28/air-conditioning-is-the-world-s-next-big-threat>
- Cortes, O. (2019): *Recognizing the Duty of the Federal Government to Create a Green New Deal*. February 5, 2019. <https://apps.npr.org/documents/document.html?id=5729033-Green-New-Deal-FINAL>
- DOE (2015): *An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities*. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/Quadrennial-Technology-Review-2015_0.pdf
- Dominish, E. – Florin, N. – Teske, S. (2019): *Responsible Minerals Sourcing for Renewable Energy*. Report prepared for Earthworks by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney. https://earthworks.org/cms/assets/uploads/2019/04/MCEC_UTS_Report_lowres-1.pdf
- European Commission, Directorate General Home Affairs (2010): *Study on the Feasibility of Establishing a Mechanism for the Relocation of Beneficiaries of International Protection*. https://ec.europa.eu/home-affairs/sites/homeaffairs/files/e-library/docs/pdf/final_report_relocation_of_refugees_en.pdf
- Gao, W. – Doiron, C. F. – Li, X. et al. (2019): Macroscopically Aligned Carbon Nanotubes as a Refractory Platform for Hyperbolic Thermal Emitters. *ACS Photonics*, 6, 7, 1602–1609. DOI: 10.1021/acsp Photonics 9b00452, <https://arxiv.org/pdf/1903.06063.pdf>
- GFN – Global Footprint Network (2019): <http://data.footprintnetwork.org/#/>
- Han, Y. – Zhien, Z. (2019): Nanostructured Membrane Materials for CO₂ Capture: A Critical Review. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19, 6, 3173–3179. DOI: 10.1166/jnn.2019.16584, https://www.researchgate.net/publication/330899697_Nanostructured_Membrane_Materials_for_CO2_Capture_A_Critical_Review
- IPCC – UN Intergovernmental Panel on Climate Change (2017): *Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C, 2017*. An Indepth Report, Written by 2 500 Scientists from around the World. <https://www.ipcc.ch/sr15/about/>
- Miskolczi F. M. (2014): The Greenhouse Effect and the Infrared Radiative Structure of the Earth's Atmosphere. *Development in Earth Science*, 2, <http://www.seipub.org/des>
- NOAA – National Centers for Environmental Information (2018): *Ice Core*. http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/vostok/vostok_co2.html
- Rydberg, D. S. et al. (2019): The Future of European Onshore Wind Energy Potential: Detailed Distribution and Simulation of Advanced Turbine Designs. *Energy*, 182, 1222–1238. DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.052, https://www.researchgate.net/publication/329736422_The_Future_of_European_Onshore_Wind_Energy_Potential_Detailed_Distribution_and_Simulation_of_Advanced_Turbine_Designs
- Williams, B. (2018): Global Warming Still a Threat. *The Oracle*, 18 January 2017. <http://www.usforacle.com/news/view.php/1026643/Global-warming-still-a-threat>

URL1: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/9779945/8-08052019-AP-EN.pdf/9594d125-9163-446c-b650-b2b00c531d2b>

URL2: https://earthworks.org/cms/assets/uploads/2019/04/MCEC_UTS_Report_lowres-1.pdf

URL3: <https://electrek.co/2019/04/16/tesla-battery-recycling-system/>

URL4: <https://americanmanganeseinc.com/news-publications-2/press-releases-2/>