

Klíímaváltozás
a kémia
és a határ-
területek
szemszögéből



MAGYAR KÉMIKUSOK LAPJA

Különszám

2020. DECEMBER

MEGJELENIK A KÉK BOLYGÓ ALAPÍTVÁNY TÁMOGATÁSÁVAL



Magyar Kémikusok
Egyesülete

KÉK BOLYGÓ

KLÍMAVÉDELMI ALAPÍTVÁNY



Bevezetés

A Meteorológiai Világszervezet és az ENSZ számos, a klímaváltozással foglalkozó nemzetközi szervezet (WMO, GCP, IPCC, UNEP) közreműködésével a közelmúltban jelentette meg „United in Science 2020” című, a klímatudomány legújabb eredményeit összefoglaló jelentését.¹ Ebben leírják, hogy a 2016 és 2020 közötti időszakban 1) a Föld felszínének átlaghőmérséklete 1,1 °C-kal haladta meg az 1850 és 1900 között mért átlagértéket, 2) folytatódott a sarkvidéki jégtakaró minden korábbinál nagyobb mértékű olvadása, aminek hatására emelkedett a világtengerek szintje és 3) gyakoribbá váltak az extrém időjárási és klimatikus események, melyeknél számos esetben kimutathatók az emberi tevékenységből származó hatások.

A globális klímaváltozás immár meg nem kérdőjelezhető valóság, hatásainak egy része pedig közvetlenül is befolyásolja életünket. Mind a szűkebb szakmai közösséget, mind a szélesebb közvéleményt egyre inkább foglalkoztatják az olyan kérdések, mint a klímaváltozás okai és mozgatórugói, beleértve a humán beavatkozások szerepét, a várható környezeti hatásokat és ezek következményeit, a kedvezőtlen folyamatok megelőzésének módjait, valamint a változásokhoz való alkalmazkodás lehetőségeit. Különszámunkban ezekhez a problémákhoz és kérdésekhez próbálunk néhány szakmai adalékot szolgáltatni.

Betekintünk a klímaváltozással kapcsolatos ismeretek jelenlegi állásába, különös tekintettel ezen ismeretek keveredésére egyéb globális problémákkal, így a túlnépesedéssel, a fenyegető élelmiszer- és vízhiánnyal, a környezet szennyezésével és egyes természeti erőforrások várható kimerülésével. Mértékadó vélemények szerint a klímakutatás mindig is a Big Data-ra épült. Bemutatjuk ezért az adattudomány alkalmazási lehetőségeit a klímaváltozás kihívásainak azonosításában és kezelésében. Az emberiséget érintő kardinális kérdések közé tartoznak az ivóvízellátás problémái és azok kezelési lehetőségei, valamint az élelmiszeripar klímaváltozással összefüggő kihívásai; ezekkel is foglalkozik kiadványunk. Olvasóink különös érdeklődésére tarthatnak számot a zöld kémia éghajlatváltozásra adott válaszával, a szerves kémia környezetbarátabbá tételével, valamint a műanyagipar és a műanyag-felhasználás környezeti hatásainak csökkentésével foglalkozó írások. Egészségi állapotunkat jelentősen befolyásolhatják a klímaváltozással összefüggő légkörkémiaili folyamatok, míg életvitelünket a jövőbeli energiaellátás problematikája, többek között a mobilitás és a klímaváltozás kapcsolata határozza meg hangsúlyosan. Két közlemény is érinti ezeket a kérdéseket. Áttekintjük továbbá a körforgásos gazdaság, a fenntarthatóság egyik nélkülözhetetlen eszközének szerepét a klímaváltozás hatásainak kezelésében.

Amikor 2019 végén e különszám összeállításának gondolata felmerült, még nem voltak nyilvánvalók a Covid19 járványra utaló jelek. Azóta a járvány ugyan alapvetően megváltoztatta mindennapjainkat, de nem befolyásolta a klímaváltozás sebességét. Van azonban a világjárványnak néhány olyan tanulsága,² amelyet majd hasznosítani lehet a klímaváltozás kezelésében is. Idetartozik, hogy a késleltetve meghozott döntések komoly anyagi, környezeti és társadalmi következményekkel járnak, hogy csak az érintettek bevonásával és támogatásával hozott intézkedések lehetnek igazán hatékonyak, hogy figyelni kell a gazdasági és a szociális egyenlőtlenségekre, hogy a problémák megfelelő kezeléséhez együttműködésekre van szükség és ennek különböző szintjei vannak, továbbá hogy a tudás mindenkor különleges értéket képvisel nemcsak egy-egy kritikus helyzet megoldásában, hanem a félrevezető, téves információk megfelelő kezelésében is.

Különszámunk nem jöhetett volna létre a Kék Bolygó Környezetvédelmi Alapítvány nagyvonalú támogatása nélkül. Különös köszönettel tartozunk Sítányi Lászlónak, az Alapítvány szakmai és gazdasági vezetőjének, hogy felkarolta és elősegítette kiadványunk megjelenését.

Szép-völgyi János
az MKL szerkesztőbizottságának elnöke

¹ United in Science 2020. World Meteorological Organization, 2020.

² Klenert D. et al., Five Lessons from COVID-19 for Advancing Climate Change Mitigation. Environmental and Resource Economics, 2020.

Jánosi Imre

■ ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék | imre.janos@ttk.elte.hu

Klímaváltozás: hol tartunk most?

Egy 2019-es tanulmány [1] kb. 200 000 tudományos publikáció és mintegy 100 000 angol nyelvű digitális és nyomtatott sajtóközlemény átvizsgálása alapján arra az eredményre jutott, hogy az Egyesült Államokban a globális klímaváltozás tagadói legalább akkora nyilvánosságot kapnak, mint azok a tudósok, akik megpróbálják elmagyarázni a jelenségek tényeit, valamint proaktív cselekvést sürgetnek. Alapvető mintázatként azonosították, hogy ha a klímaváltozás témája előkerül egy interjúban, akkor a kissé félreértelmezett

„hallgattassék meg a másik fél is” elv alapján megszólaltatnak vezető tudósok mellett olyan „klímaszkeptikus” egyéneket, akiknek vagy semmi közük a klímatudományhoz, vagy a tudományos reputációjuk még az átlagosnál is sokkal kisebb [1]. Érdekes társadalmi jelenség ez, hasonló a „laposföld”-hívók számának utóbbi pár évben bekövetkezett látványos gyarapodásához [2]. Egyébként nem kell ilyen messzire menni, az USA közvéleményének jó része még mindig demokrata álhrínek tartja a koronavírus-járványt, a világszerte majd-

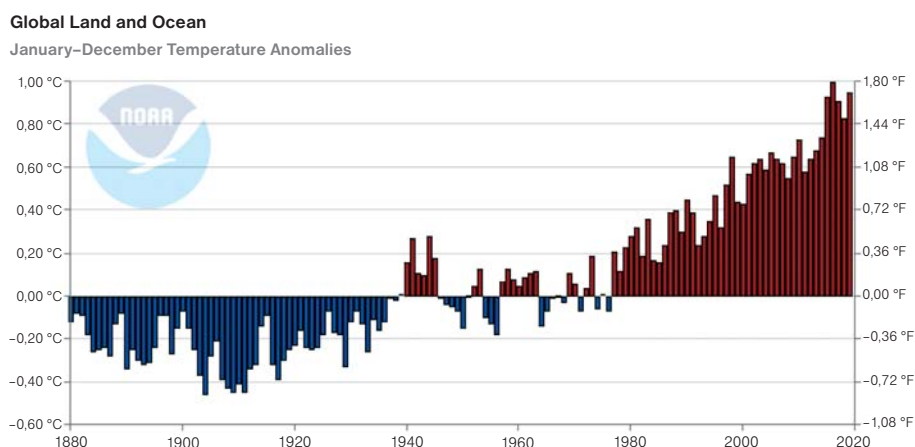
nem 12 millió fertőzött és több mint fél-millió halálos áldozat ellenére. (2020. július 8.)

Ami a klímaváltozást illeti, mérési adatok tömkelege támasztja alá például a globális felmelegedés tényét (1. ábra). Ezt a felmelegedést egyébként személyesen is megtapasztalhattuk: míg a hetvenes években telente legalább két hónapon át vastag hótakaró borította az országot, manapság a Kékestetőre kell zarándokolni, hogy ki lehessen próbálni egy szánkót (ott is jobbra műhavon). Közismert tény az is, hogy a melegedési trendek nagyon inhomogén módon jelentkeznek különböző földrajzi területeken. Elsősorban az északi félteke átlaghőmérséklete nő, ezen belül is kiemelten a sarki területeken, Grönlandon, Szibériában, Alaszkában. A szárazföldek jobban érintettek (a felmelegedés mértéke kb. 1,5 °C), az óceánok lassabban követik a tendenciát (0,8 °C) köszönhetően a víztömegek lényegesen magasabb hőkapacitásának [3]. A manapság már több évtizedes műholdas észlelések, valamint a globálisan csatolt óceán-atmoszféra numerikus modellezések alapján valamelyest értjük ennek okát: a felelős a nagy légköri mintázatok átrendeződése.

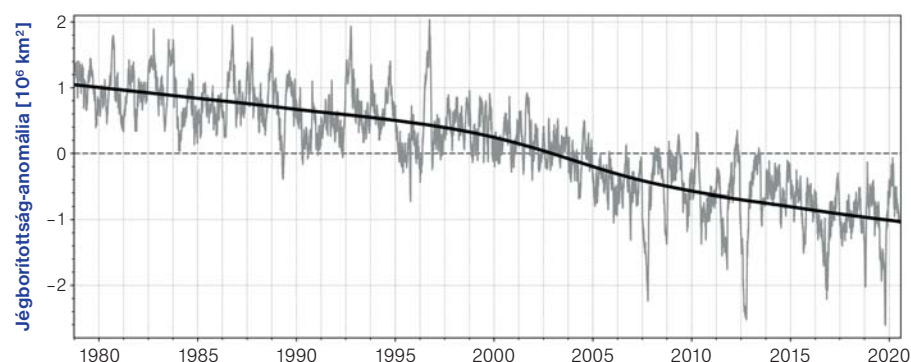
A felszíni felmelegedésnek nyilvánvaló következménye a jégtakaró zsugorodása (2. ábra). Az északi-sarki jég és Grönland látványosan olvadozik, de ugyanez igaz több tízezernyi gleccserre (a Földön teljes számuk kb. 160 000) és a permafroszt területekre (ahol a talaj legalább két éven keresztül fagyott állapotban van/volt). Ami az északi-sarki jégtakaró kiterjedését illeti (2. ábra), az elmúlt négy évtizedben, azaz a műholdas mérések időszakában, átlagosan 2 millió km² volt a zsugorodás mértéke (a kiterjedés évente a 4 millió és 16 millió km² között ingadozik, az évszakoknak megfelelően).

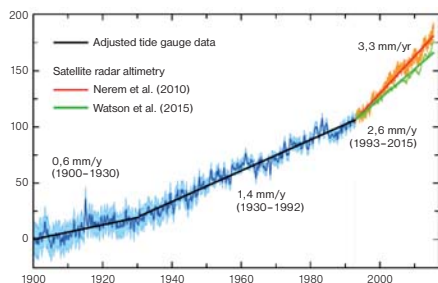
Az északi-sarki jég úszik a tenger felszínén, emiatt teljes felolvadása sem érinti a globális óceáni vízszintet. Ezzel szemben

1. ábra. Éves globális átlaghőmérséklet-anomáliák 1880-tól 2020-ig (az utolsó évben májusig történt a kiértékelés). A referenciaérték a teljes 20. évszázadra vett átlag [3]



2. ábra. A napi jégborítottság-anomália értékei az Északi-sarkon az 1978/10/26. – 2020/07/02. közötti időszakban. A fekete vonal az illesztett hosszú távú trendet illusztrálja Forrás: https://nsidc.org/data/seaice_index





3. ábra. Globális átlagos tengerszint-magasság az 1990/01/01. referencia-értékhez képest. A kék görbeszakasz adatai klasszikus „vízmércés” leolvasásokon alapulnak, a piros és zöld görbék műholdas méréseket ábrázolnak. A függőleges tengely mm egységekben értendő [4]

a szárazföldről eredő olvadékvíz szükségképpen emeli a vízréteg vastagságát (3. ábra). A műholdas mérések szerint ennek mértéke kb. 3,3 mm/év jelenleg, ráadásul a tendencia gyorsuló: az előző évszázad adatai alapján akkoriban lényegesen lassabb volt az emelkedés (3. ábra). Az óceánok globális vízszintjének emelkedése három komponensből adódik össze. Az első a víztömeg gyarapodása, a második a globális felmelegedés miatt bekövetkező térfogatitágulás, a harmadik pedig a lokális tektonika. Az első két komponens nagyjából 50–50%-ban járult hozzá a teljes 20 cm-es múlt századi vízszintemelkedéshez, a harmadik egyelőre még nem igazán mérhető. Mindenesetre ha többméternyi jég réteg leolvad például Grönland középső részéről,

számítani lehet rá, hogy a sziget felemelkedik valamelyest. Az viszont tény, hogy a vízszintemelkedés mértéke is erősen függ a földrajzi területtől.

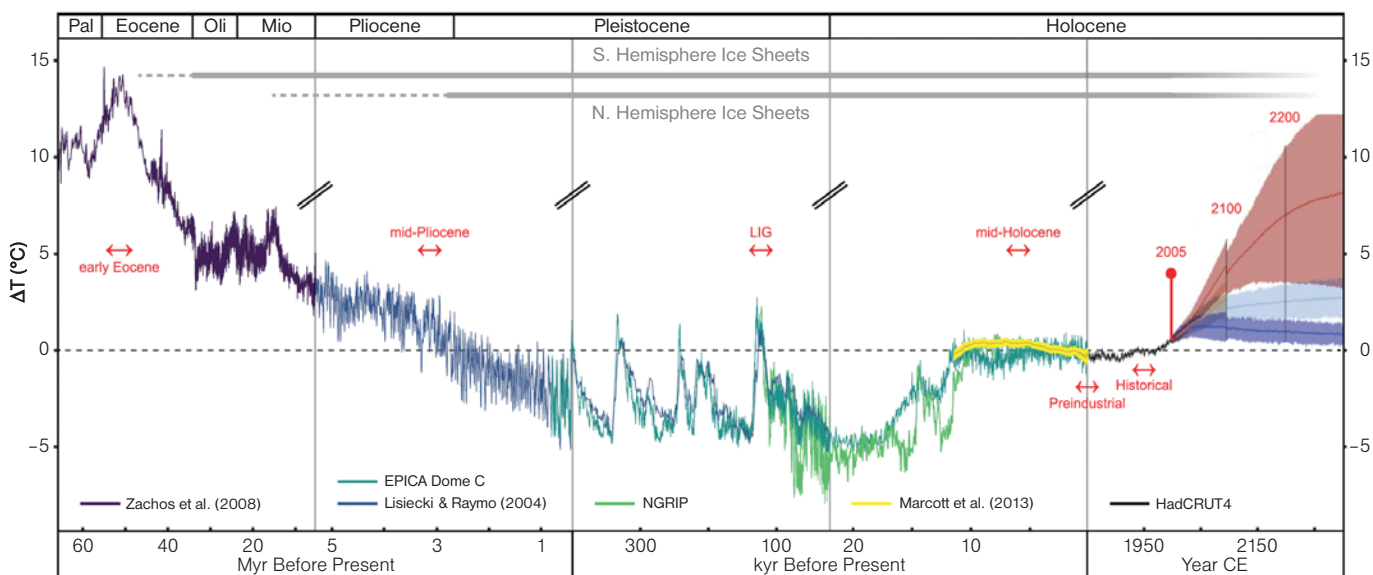
Míg a közfigyelem élénkülése üdvözlendő, az már kevésbé, hogy a médiában a „klímaváltozás” és „klímakatasztrófa” kifejezések szinte szinonimává váltak. Szélsőséges időjárási események néha valóban katasztrófális következményeit szinte automatikusan kötik össze a globális felmelegedéssel. Eközben nem említik, hogy az utolsó kb. ötven évben a Föld népessége a duplájára nőtt (jelenleg 7,8 milliárd fő, 2020. július 8.). Márpedig a közel négy milliárdnyi „új” embernek lakóhely kell, élelmiszer-ellátásukhoz termőterület, a közlekedéshez út- és vasúthálózat és egyéb infrastruktúra. Jelentősebb viharok, áradások olyan területeken pusztítanak manapság, ahol korábban a szélsőséges eseményeket még csak fel sem jegyezték, ott élő lakosság hiányában. Arról nem is beszélve, hogy az extrém események definíció szerint ritkák és véletlenszerűek, így számos statisztikai probléma merül fel a trendek becslésénél. Valójában egy melegedő klíma esetén a hőmérsékleti szélsőségek (extrém hideg és meleg napok) kézenfekvő változásán kívül a többi katasztrófális jelenség (áradások, szárazságok, viharok stb.) gyakoriságának növekedése statisztikailag nem bizonyított.

A globális klímaváltozás esetleges antropogén okainak vizsgálatához fontos, hogy képünk legyen a természetes változékonyság mértékéről. A ma már önálló tudományterületnek tekinthető paleoklimato-

lófia fő célkitűzése a régmúlt idők klímájának megismerése. A módszertan elképesztően sokat fejlődött az utóbbi évtizedekben, rengeteg mintavételezés alapján Földünk éghajlatának megbízható rekonstrukciója mintegy 65 millió évre visszamenőleg rendelkezésünkre áll (4. ábra). Az információ alapvető része kémiai vizsgálatokból származik. A jégmintákba zárt levegőbuborékok tömegspektrometriás analízise a légkör kémiai összetétele mellett a hőmérsékletről is fontos információt hordoz, ugyanis a ^{18}O nehéz oxigénizotópot tartalmazó vízmolekulák magasabb hőmérsékleten párolognak, mint a normál ^{16}O -tartalmúak. Megfelelő kalibráció után ez az izotóparány jó becslést ad az óceán felszíni vízhőmérsékletére kb. 1 millió évre visszamenőleg. Ennél távolabbi múltba az óceáni üledék kémiai vizsgálatával tekinthetünk. A likacsoszóúaknak nevezett egysejtű eukarióta élőlények (*Foraminifera* törzs) többségének kalcium-karbonátból álló héja vagy váza van, méretük általában nem nagyobb, mint 1 mm. Életük befejezése után ezek a vázak lassan az óceánok fenekére süllyednek, és a felszín közeli fajok maradványai magukkal viszik a hőmérsékleti információt, ugyanis a Mg/Ca arány vázukban rendkívül érzékenyen függ a hőmérséklettől (magasabb hőmérsékletekhez nagyobb tartozik) [5].

Ha földtörténeti időtávlatba tekintünk vissza a paleoklimatológia segítségével, akkor képet kaphatunk a régmúlt idők klímájáról, messze az emberi faj (*Homo*) mindössze 2,8–3 millió évre tehető létrejötté

4. ábra. Becsült globális felszíni átlaghőmérséklet az elmúlt 65 millió évben. A vízszintes tengely időben visszafelé, szegmensenként különböző egységekben értendő: 1–2. szegmens millió-, 3–4. szegmens ezer-, 5. szegmens egyéves skálán. A függőleges tengely $^{\circ}\text{C}$ egységekben jelzi az 1961–1990 időszak referenciaátlagához (0 érték, pontozott vonal) képest becsült eltérést. Az ábra tetején a szürke sávok jelzik a két pólus állandó jégtakarójának a megjelenését (Antarktis: 35–38 millió év, Arktisz: 3–4 millió év) [6]



előtti korokban is. Bár a **4. ábra** igen összetettnek tűnik, érdemes kissé belemenni a részletekbe. Az ábrán látható szegmensек vízszintes időtengelye más egységekben értendő a jó láthatóság miatt: az első két szegmensben millió-, a második kettőben ezer-, míg az utolsóban egyéves időskála található. A becslött globális felszíni átlaghőmérséklet igen széles sávban változik, maximuma mintegy 55 millió évvel ezelőtt a jelenleginél 14–15 °C-kal magasabb, az utolsó egymillió év jégkorszakainak mélypontján 10–12 °C-kal alacsonyabb volt. A jelentősebb változások okainak egy részét érteni véljük, míg egy csomó részlet nem világos, legfeljebb hipotézisek fogalmazódtak meg. Menjünk végig sorra röviden a földtörténeti korokon.

Az eocén időszak (55,8–33,9 millió év visszafelé) korai szakaszában található lokális hőmérsékleti maximum az ún. eocén optimum klímához tartozik (**4. ábra**, 1. szegmens). A közel 15 °C-kal magasabb globális felszíni átlaghőmérséklet azt jelentette, hogy állandó jég sehol sem volt a bolygón (a **4. ábra** tetején a szürke sávok), az Antarktiszon majdnem mediterrán éghajlati körülmények uralkodtak. Ezt bizonyítja az a nagyszámú növényi fosszília (örökzöldek, tűlevelű fák, kisebb tobozos növényfajok, páfrányok stb.), amit a déli-sarki kontinensen felleltek. A sarki tél (akkoriban kb. 70 nap állandó sötétség) hideg és sötét időszakát túlélte a növényzet, mert maga a kontinens elég hőt tárolt, a szomszédos földrészek is sokkal közelebb voltak, és a mai Dél-Amerikát még egy földnyelv kötötte össze az Antarktisszal, ami megakadályozta az Antarktisz körüli hideg köráramlás felépülését. A lokális maximumból kiindulva egy hosszú lehűlési fázis kezdődött. A legvalószínűbb ok tektonikus eredetű: a földrészek vándorlása erősen átrendezte az óceáni és légköri áramlásokat, ami a globális lehűléshez vezetett. Olyan események zajlottak ezekben a korai időkben, mint a Drake-szoros és ezáltal az Antarktisz megkerülő köráram, valamint az állandó jégtakaró fokozatos kialakulása. Dél-Amerika lassan leszakadt a déli-sarki kontinensről az eocén-oligocén időszakban, vagy a ma Indiai-félszigetként ismert, akkor még sziget beleütközése az eurázsiai kontinensbe, ami felgyűrte a Himalája 7 km-nél is magasabb csúcsait (a folyamat kb. 45 millió évvel ezelőtt kezdődött, de a Himalája még mindig emelkedik).

Az 5,5 millió évvel ezelőtt kezdődött pliocén idősakra (**4. ábra**, 2. szegmens) jelenleg különösen nagy figyelem irányul,

ugyanis a feltevések szerint az évszázad végére olyan lesz a Föld éghajlata, mint ami akkor volt (3–5 millió évvel ezelőtt). A globális átlaghőmérséklet 2–3 °C-kal, az óceáni vízszint 25 m-rel volt magasabb, és a CO₂-koncentráció kb. a maihoz felelt meg (kb. 400 ppm). A trópusi övezet hasonló volt a maihoz, viszont a pólusokon sokkal magasabb volt a felszíni átlaghőmérséklet, nagyjából 7–10 °C-kal. A hűlési tendencia magyarázatára számos elmélet létezik, de általánosan elfogadottá egyik sem vált még. Az ábrán jól látható, hogy kb. 3 millió évvel ezelőtt a korábbi nagy frekvenciás, kis amplitúdójú ingadozást felváltotta egy –5 °C-os tartományt lefedő, 41 ezer éves karakterisztikus periódusidejű oscilláció. A pliocén időszak vége felé hűlt le annyira az éghajlat, hogy az Északi-sarkon is megjelent az állandó jég.

Az utolsó 1 millió évben (**4. ábra**, 3–4. szegmens) kialakultak a kb. 100–110 ezer éves jégkorszakok, amelyeket rövid interglaciális periódusok szakítottak meg a maihoz hasonló éghajlattal (**4. ábra**, 3. szegmens, szaggatott vonal feletti csúcsok). A jégkorszakok magyarázatára elterjedt a Milankovitch-elmélet, ami a Föld Nap körüli pályájának és a forgástengely dőlésszögének reguláris változásaival magyarázza. Eszerint rezonanciaszerűen, 100–110 ezer évenként az északi földrajzi szélesség 65°-án az átlagnál erősebb lesz a Napból érkező besugárzás [7]. Ez vezet aztán a jégtakaró összeomlásához és a gyors felmelegedésekhez. Bár egyes adatelemzések látszólag összhangban vannak az elmélettel, született egy sor olyan eredmény is, amely ellentmond annak; a lényeges kérdésekre nincs válasz [7]. Az egyik legfontosabb a „bekapcsolás” kérdése: mi történt 1 millió évvel ezelőtt, ami a százezer éves oscilláció felléptéhez vezetett, amikor is a földpálya változásai sok száz millió évre visszamenőleg stabilak a Naprendszerben?

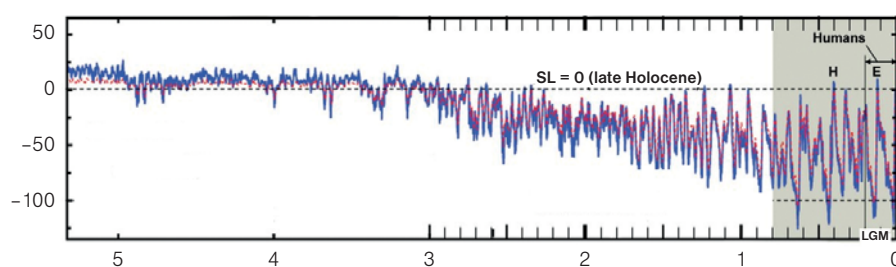
Az utolsó jégkorszak mélypontja kb. 15–17 ezer évvel ezelőtt volt (**4. ábra**, 4. szegmens), aminek egy gyors felmelegedés ve-

tett végét. A melegedési tendencia nagyjából 6 ezer évvel ezelőtt véget ért, utána egy lassú hűlés indult be megint [8], az Európában „kis jégkorszak” néven ismert mélyponttal (16–19. század). Nem volt sokkal hidegebb, mint manapság, de a téli évszak mindkét irányú „megnyúlása” (korai kezdet, kései tavasz) elég volt ahhoz, hogy a gabonafélék termésátlaga drasztikusan visszaessen, több hullásban éhínségeket kiváltva.

A **4. ábra** 5. szegmensében a modern idők globális átlagos felszíni hőmérséklete látható, kiegészítve a csatolt óceán-atmoszféra numerikus modellek projekcióival 2240-ig. Ez utóbbiak meglehetősen bizonytalanok, ami a modell-gyengeségek mellett annak is köszönhető, hogy persze a jövőt nem ismerhetjük. Ezért a numerikus számolások bizonyos „scenáriók” alapján történnek. A pesszimista forgatókönyv szerint csak lassan csökken a fosszilis energiaforrások felhasználása (nagyjából a források kimerülésének ütemében), a légköri CO₂ tovább növekszik erősen (**4. ábra**, 5. szegmens, barna sáv). Az optimista forgatókönyv szerint gyors lesz az energiaátmenet, a felmelegedés a 2–3 °C tartományban marad (**4. ábra**, 5. szegmens, világoskék sáv). A harmadik forgatókönyv csak referenciának használatos, a 2000-es év rögzített légköri összetételével készült (**4. ábra**, 5. szegmens, sötétkék sáv), ami persze nem történt meg. Arra viszont jó illusztráció, hogy a hosszú élettartamú nyomgázoknak mi a hatása (egy CO₂-molekula tartózkodási ideje a légkörben 100–110 év).

A melegedés–jégolvadás–tengerszint-emelkedés csatolt folyamatsorát a paleoklimatológiai rekonstrukciókon is nagyon jól látjuk. Az **5. ábra** illusztrálja a globális óceáni vízszint változásait az utolsó 5,5 millió évben, méter egységekben. A görbe tökéletesen követi a globális átlagos hőmérsékleti adatokat, ebből sejthetjük, hogy például a tengerszint teljes emelkedése elérheti majd lassan a 25 métert, ami a pliocén korszakra volt jellemző. Az utolsó jég-

5. ábra. Globális átlagos tengerszintmagasság a jelenlegihez képest (szaggatott vonal a 0 szintnél) az elmúlt 5,5 millió évben. A vízszintes tengely visszafelé millió éves egységekben, a függőleges tengely méter (!) egységekben értendő [9]



korszak mélypontján viszont a tengerszint 120–130 méterrel volt alacsonyabb, ami lehetővé tette például, hogy az emberek száraz lábbal vándoroljanak át a mai Bering-szoros területén, így népesült be az amerikai kontinens.

Az utolsó fontos pont az antropogén csatolás. Bár a méréseken jól látszik, hogy trendforduló lépett fel az előző évszázad elején, az emberi tevékenység hatását tudományosan nem teljesen értjük. Hogy e manapság merész kijelentést árnyaljam, a tudományos megértettség fogalmát érdemes felidézni: értünk valamit, ha arra pontos kvantitatív modellt tudunk adni, ami prediktív erővel bír. Egy sor ilyen elméletünk van, a klasszikus mechanika, kvantummechanika, relativitáselmélet, elektromágnesség stb. mind képes precízen megjósolni új, még el nem végzett kísérletek kimenetét. Egész technikai civilizációnk, a mérnökök tevékenysége ezen alapul (láttható sikerrel). A klímatudomány azonban jobbra leíró jellegű, a jóslások komoly hibákkal terhelték. Hangsúlyozom, hogy nem kérdőjelezem meg az emberi tevékenység lehetséges klímamódosító hatását, de ahhoz, hogy pontosan tudjuk, hol és mit kellene közbeélni és ennek milyen következményei lesznek, még nem tudunk eleget.

Két fő közvetett bizonyítékunk van arra, hogy a fosszilis tüzelőanyagokból a légkörbe kerülő CO₂ és egyéb ipari-mezőgazdasági tevékenységből származó NH₃ okozhat globális felmelegedést. Az első a paleoklimatológiai észlelés, mely szerint a hőmérsékleti görbe az említett nyomgázok koncentrációival erős korrelációban mozgott az utolsó 5–6 millió évben. Az interglaciális meleg időszakokban és később sem, egészen a 20. század elejéig, a CO₂-koncentráció nem haladta meg 300 ppm értéket, jelenleg (2020. július 8.) 416 ppm. A növekmény főleg a fosszilis tüzelőanyagok égetéséből ered, ezt egyértelműen igazolja például a szén izotóparányainak vizsgálata. Emiatt várható, hogy az extra üvegházhatású gáz felmelegedést okoz. Nyitott kérdés viszont a pontos mechanizmus. Nem lehet eleget hangsúlyozni, hogy egy korreláció nem jelent automatikusan ok-okozati csatolást. A paleoklimatológiai adatsorok felbontása nem teszi lehetővé az időbeli sorrend egyértelmű kiderítését, azaz mi volt előbb, a felmelegedés, vagy a nyomgázok koncentrációjának megszaladása. Nem tudjuk továbbá, hogy mennyi idő alatt várható a hosszú élettartamú nyomgázok kiürülése, mert nagyon sok biológiai, kémiai, fizikai mechanizmus kapcsolódik hozzá. A növekvő CO₂-koncentráció fokozza a kivo-

nási folyamatok sebességét – például a fotoszintézis felpörgetésével, a zöld levéltömeg és a fitoplankton (fotoszín-tetizáló algák) számának növekedésével.

A másik közvetett bizonyíték a numerikus szimulációkból adódik. A globálisan csatolt óceán-atmoszféra modellek „belépő tesztje”, hogy reprodukálják az előző évszázad klímáját, amennyire csak lehet. A jelenleg használt 50+ független modell elképesztő komplexitású. Minden ismert csatolási folyamatnak különböző modulja van a programokban, kezdve az alap dinamikai egyenletektől a vulkánkitörésekig. A szabad paraméterek száma több száz, ezek beállítása nemigen lehet módszeres, inkább a „művészet” kategóriájába tartozik. A szisztematikus paramétertér-vizsgálat elképzelhetetlen ennyi dimenzióban. A numerikus számítások kezdeti időszakában, jó négy évtizeddel ezelőtt az volt a várakozás, hogy a modellek majd „konvergálnak”, azaz a paraméterhalmazok egyre hasonlóbbak lesznek egymáshoz. Ennek ellenkezője történt, a független modellek paraméterezése szinte alig összehasonlítható. Ennek ellenére, ha a számolások során például a CO₂-koncentrációval nem követik a mérési adatokat, hanem a 20. század eleji szinten rögzítik a koncentrációt, egyetlen szimuláció sem képes reprodukálni a tapasztalt felmelegedést. Ez persze nem jelenti azt, hogy minden rendben lenne ezekkel a modellekkel. Jól ismert tény, hogy nagy gondok vannak az említett pliocén klímával (3–4 millió évvel ezelőtt). A numerikus szimulációk nem képesek reprodukálni azt a hőmérséklet-eloszlást, amely a trópusi övezeteken kb. a mai állapothoz hasonló, a pólusokon viszont jelentősen melegebb. A modell-projekciók az évszázad végére úgy jósolják a 2–3 °C-os globális felmelegedést, hogy jut belőle bőven az egyenlítői övnek is. Hasonlóan kérdés a regionális projekciók területe. A felmelegedés, olvadás és tengerszint-emelkedés tendenciái nagyon jelentős földrajzi területi különbségeket mutatnak, az észlelt mintázatok reprodukálása általában sikertelen. Ha olyan numerikus számításokról hallunk, amelyek a Kárpát-medence jövőbeli éghajlatára vonatkoznak, érdemes erős fenntartásokkal kezelni az állításokat.

Felmerülhet a kérdés, hogy ha ismerjük a modellek számos hiányosságát, miért használjuk ezeket távlati jóslásokra. A válasz egyszerű: nincs más eszköz a kezünkben. Kísérletek nem végezhetők, a jövőbe nem látunk, egyelőre a jelenlegi ismeretekből kell annyit használni, amennyit csak lehet.

A numerikus modellezés terén új trendnek tekinthető a „vissza a gyökerekhez” irányzat. Ez azt jelenti, hogy komoly munka folyik ún. minimál modellekkel, melyeknek a komplexitása és térbeli felbontása sokkal alacsonyabb, mint a „nagy” modelleké. Ezzel szemben a fizikájuk jól értett, a lényegesen kisebb számú szabad paraméter jobban kezelhető. Ezek a modellek nem használatosak földi klímaprojekciókra, viszont sokat segítenek a tudományos megértésben. Vizsgálható velük például olyan alapvető kérdés, mint a „klímaérzékenység”, azaz mekkora felmelegedés várható, ha a CO₂-koncentráció megduplázódik. Hasonló munkák során fedték fel például ELTE-s kutatók a hiszterézis jelenséget, mely szerint ha visszaállítjuk a nyomgáz-koncentrációkat valamely korábbi szintre, az éghajlati rendszer várhatóan akkor sem az eredeti állapotába kerül vissza [10, 11, 12].

IRODALOM

- [1] A. M. Petersen, E. M. Vincent, A. L. Westerling, Nat. Commun. (2019) 10, 3502.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Flat_Earth
- [3] NOAA National Centers for Environmental Information, Climate at a Glance: Global Time Series, published June 2020, retrieved on July 4, 2020 from <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>
- [4] J. Hansen, M. Sato, P. Hearty et al. (+ 16 coauthors), Atmos. Chem. Phys. (2016) 16, 3761.
- [5] S. Barker, I. Cachó, H. Benway, K. Tachikawa, Quarterly Sci. Rev. (2005) 24, 821.
- [6] K. D. Burke, J. W. Williams, M. A. Chandler, A. M. Haywood, D. J. Lunt, B. L. Otto-Bliesner, Proc. Natl. Acad. Sci. (2018) 115, 13288.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles
- [8] D. Kaufman, N. McKay, C. Rousseton et al. (+ 90 coauthors), Sci. Data (2020) 7, 201.
- [9] J. Hansen, M. Sato, G. Russell, P. Kharecha, Phil. Trans. R. Soc. A. (2013) 371, 20120294.
- [10] Drótos G., Bóдай T., Tél T., J. Climate (2015) 28, 3275.
- [11] Herein M., Márffy J., Drótos G., Tél T., J. Climate (2016) 29, 259.
- [12] Bóдай T., Drótos G., Haszpra T., Herein M., Márffy J., Tél T., Magyar Tudomány (2017/2) 188.

ÖSSZEFOGLALÁS

JÁNOSI IMRE: KLÍMAVÁLTOZÁS: HOL TARTUNK MOST?

Az észlelések alapján a globális klímaváltozás ténye megkérdőjelezhetetlen. Mértéke egyelőre sokkal kisebb, mint a természetes változékonyság teljes tartománya. Sejthető, hogy az antropogén tevékenység gyorsítja a globális felmelegedést, melynek számos következményét tapasztaljuk. Ezzel szemben óvatossá kell lenni az információk értékelésében, mert a káros környezeti folyamatok taglalása kapcsán a klímaváltozás emlegetése túl gyakran fordul elő akkor is, amikor a háttérben sokkal inkább a globális túlnépesedés és környezetszennyezés következményei állnak.

Abonyi János¹ – Czvetkó Tímea¹ – Sebestyén Viktor^{1,2}

¹ MTA-PE Lendület Komplex Rendszerek Figyelemmel Kísérése Kutatócsoport

² Pannon Egyetem Fenntarthatósági Megoldások Kutatólabor

janos@abonyilab.com | czvetko.tim@gmail.com | sebestyenv@almos.uni-pannon.hu

Az adattudomány eszköztárának alkalmazási lehetőségei a klímaváltozás kihívásainak azonosításában és kezelésében

Bevezetés

A klímaváltozás összetett problémáinak jelentőségét elsőként az 1979-es Egyezmény a nagy távolságra jutó, országhatárokon átterjedő levegőszennyezésről nemzetközi szintű megállapodás (Genfi Egyezmény) ismerte el. A legutolsó és legjelentősebb párizsi éghajlatvédelmi egyezmény 2015-ben rögzítette, hogy a globális átlaghőmérséklet-emelkedés mértéke az iparosodás előtti szintet maximum 2 °C-kal haladhatja meg. Ezt a célt később 1,5 °C alatti hőmérséklet-emelkedésre csökkentették, mivel felismerték, hogy az éghajlatváltozás okozta kockázatokat jelentősen mérsékelni kell [1]. Az ezzel kapcsolatos nemzeti feladatokat 2015-ben az Egyesült Nemzetek Szervezete a 13. fenntarthatósági célként definiálta.

A probléma komplex kezelése olyan tudományos eredményeket igényel, amelyekre közpolitikai stratégiai döntéseket [2], a társadalom magatartási hajlandóságának ösztönzésére alkalmas akciókat [3] és a gazdasági élet célirányos szabályozó és ösztönző piaci válaszainak kidolgozását [4] lehet alapozni. Ennek az összetett társadalmi igénynek eleget téve a kutatások a klímaváltozás okainak alapos megismerésére [5], előrejelzésekre alkalmas modellek fejlesztésére [6], a hatások mérséklésére vonatkozó megoldások kidolgozására [7], valamint a társadalmi szemléletformálás lehetőségeinek feltárására [8] fókuszáltak.

A klímaváltozással kapcsolatos kutatások homlokterében lévő problémák csaknem mindegyike interdiszciplináris megközelítést kíván. A természet és a társadalom kapcsolatrendszerének megismerését célzó erőfeszítések összességéként alakult ki a fenntarthatóság tudománya [9]: ez a transzdiszciplináris tudományterület olyan kérdésekre fókuszál, amelyek csak az adattudomány eszköztárának intenzív alkalmazásával válaszolhatók meg.

• *Miként írható le és elemezhető a természet és a társadalom közötti dinamikus kapcsolatrendszer?*

A környezet, a gazdaság és a társadalom közötti dinamikus kapcsolatrendszer leírásának és elemzésének egyre inkább elterjedt eszköze a dinamikus rendszer-modelleken alapuló szimuláció (Systems Dynamics Modelling) [10]. A koncepciót kiválóan jellemzi az eszköztár leghíresebb képviselője, a World3 modell, amely a népesség, az ipari növekedés, az élelmiszer-termelés és az ökoszisztéma korlátainak időben változó kap-

csolatrendszerét írta le a Római Klub számára, és érzékelteti a fenntarthatóság problematikáját *A növekedés határai* című könyvben [11].

A modellek állapotváltozói közti kapcsolatok feltárása idő- és költségigényes célirányos interdiszciplináris kutatásokat igényel. Az adattudomány eszköztára ezt a munkát a kapcsolatokra vonatkozó hipotézisek automatizált generálásával és validálásával teheti hatékonyabbá [12], ugyanis az adatalapú dinamikus modellek alkalmazása a kapcsolatokat valószínűsítő korrelációk feltárásán túlmutatva ok-okozati kapcsolatokra vonatkozó információt is nyújthat [13].

Annak érdekében, hogy a megközelítés a klímaváltozás hatásait leíró részletesebb elemzésekben is alkalmazható legyen, a legfontosabb feladat a heterogén adat- és információforrások integrálása és együttes kezelése. Az e megközelítésben rejlő lehetőséget jól illusztrálja az az esettanulmány, amelyben a társadalmi-gazdasági változók összekapcsolásával a klímaváltozás globális élelmiszer-termelési rendszerre gyakorolt hatását tárták fel [14].

• *Miként kezelhetők a késleltetések, a tehetetlenség és a bizonytalanság a modellekben?*

A klímaváltozást leíró változókból rejlő bizonytalanság hatásának számszerűsítése a klímaváltozás előrejelzésére fejlesztett az RCP 4.5 és RCP 8.5 CMIP modellek [15], [16] Monte Carlo-szimulációval történő kiértékelése lehet alkalmas [17]. A bizonytalanság és kockázatok számszerűsítésére alkalmas szimulációs vizsgálatok tervezésére, kiértékelésére és a környezeti és társadalmi adatokkal való integrálására szolgáló célirányos megoldások integrált fejlesztése a legfontosabb előttünk álló feladat [18].

• *Miként tárható fel a társadalmi-természeti rendszer sebezhetőségét és ellenálló képességét meghatározó folyamatok?*

A sérülékenységi fogalmi rendszerét az Éghajlatváltozási Környezetvédelmi Testület (IPCC) alapozta meg. A sérülékenységet meghatározó összetett hatásláncok feltárása a nem klimatikus tényezők azonosítását és modellbe illesztését követeli meg, ideértve az alkalmazkodóképességet és a várható károk becslését is jellemző modellek fejlesztését [19].

Kutatócsoportunk úgy gondolja, hogy a sérülékenységi érté-

kelésében egyre nagyobb szerepet kap a hálózattudomány eszköztára, ugyanis az állapotváltozók és kapcsolatok jelentősége célirányosan minősíthető a dinamikus modellek állapotváltozói alapján készített hálózatban betöltött szerepe alapján [20].

- *Miként mérhető és kezelhető a növekvő kockázat? Milyen tudományosan megalapozott „határok” és „korlátok” definiálhatók?*

A klíma-indukált változások kockázatainak klímamodellek segítségével történő számszerűsítése azt mutatja, hogy a következő kétszáz évben a kockázatok még akkor is tovább nőnek, ha a légkör összetétele állandó marad [21]. A kockázat-felfogásban a társadalmi-kulturális tényezőknek különösen nagy jelentőségük van [22], így a társadalmi és kulturális tényezőket leíró változók modellekbe való integrálása különösen fontos feladat a jövőre nézve.

A kockázatok értékeléséhez elengedhetetlenül szükségesek azok az elemzések, amelyek feltárják, hogy az emberi tevékenység okozta zavaró hatások hogyan befolyásolják az ökoszisztéma kényes egyensúlyát, és hol vannak azok a korlátok és határok, melyek átlépése már felvállalhatatlan kockázatot jelent [23]. E határok a szimulációs eszközök és a gépi tanulás eszköztárának integrált alkalmazásával tárhatók fel [24].

- *Milyen támogató/motiváló rendszerek – szabályok, normák, tudományos információk – alakíthatók ki a társadalom kapacitásának, fenntarthatóságának növelésére? Milyen jelzésekre, útmutatásokra van szükség a társadalom fenntarthatósági pályára állításához? Miként lehet napjaink elszigetelt kutatásait, elemzéseit, döntéstámogató rendszereit hatékonyabban integrálni?*

A fenti kérdések megválaszolásához, azaz a klímaváltozás okainak hosszabb távú felszámolásához és hatásainak csökkentéséhez a tudományos ismereteket integrálni és célirányosan rendszerezni kell [25].

A cikk arra szeretne rávilágítani, hogy mindez pontosan miként valósítható meg. A következő részben ismertetjük az adattudomány, pontosabban a nagy adatok kezelésének, azaz a Big Data-nak az eszköztárát, és szisztematikusan áttekintjük a klímaváltozáshoz kapcsolódó eddigi alkalmazásokat és lehetőségeket. A tartalmi áttekintést az eddigi megoldások metaelemzése követi, melyben a hálózatelemzés eszköztárának felhasználásával adunk áttekintést a kapcsolódó tématerületekről. A tanulmány az elemzésekbe bevonható adatok forrásait és típusait is áttekinti a szerzők munkájának ismertetésén keresztül. Az összefoglalásban a legfontosabb megállapításokon túl a klímaváltozás modellezéséhez és hatásainak csökkentéséhez kapcsolódó, legfontosabbnak tartott adatintenzív kutatási és fejlesztési feladatokat is rögzítjük, ismertetve a Pannon Egyetemen közeljövőben induló Éghajlat-változás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium adattudományi programjának tervezett tevékenységét.

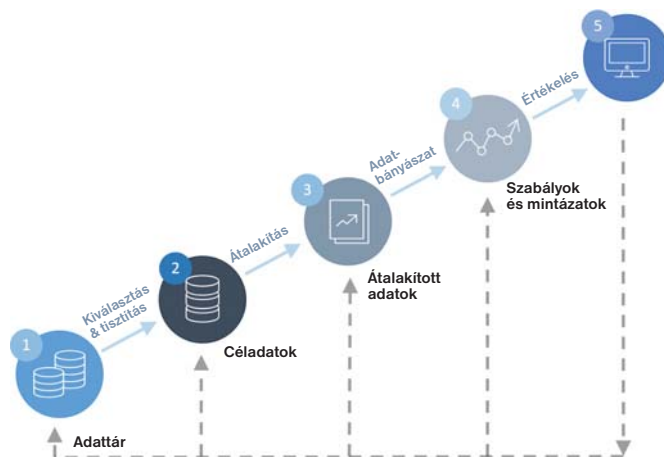
A nagy adatok elemzésének eszköztára, a Big Data

A klímaváltozáshoz hasonló komplex, társadalmi tényezőket fegyelemben vevő interdiszciplináris problémák megoldása olyan integratív megközelítésmódot igényel, amit akár Tudomány 2.0 címkével is jellemezhetünk [26]. A Tudomány 2.0 alap gondolata, hogy 1) az összetett rendszerek elemei közötti kapcsolatokra fókuszál, és 2) mivel a kontrollált kísérletek nem minden kapcsolatot fednek, így valós környezetből, azaz az emberek, a technológia és a társadalom integrált rendszeréből származó adatok elemzésére van szükség.

A Tudomány 2.0 tehát nagyméretű, különböző formátumú és eltérő forrásból származó adatok elemzését, azaz az úgynevezett Big Data-technikák alkalmazását igényli; ugyanis Big Data alatt azoknak az adatelemzési és kezelési módszereknek az összességét értjük, amelyeket az elmúlt évtizedben annak érdekében fejlesztettek, hogy a nagy adatok gyűjtése, tárolása, elemzése, keresése, megosztása és megjelenítése a mennyiség, a sebesség, a változatosság, a megfelelőség és az alkalmazhatóság értéke [27] szempontjából hatékony legyen [28].

A Big Data-megoldások alapvetően a tárgyak internetéhez (Internet of Things (IoT), [29]) és a hatékony adattárolást és párhuzamos adatfeldolgozást biztosító felhőalapú technológiák fejlesztéséhez kapcsolódnak. Az IoT, mint a különböző számítástechnikai eszközök, tárgyak és emberek összekapcsolását biztosító technológia [30], a klímaváltozás hatásainak követéséhez és előrejelzéséhez elengedhetetlenül szükséges környezeti adatok gyűjtésének is hajtómotorja [31].

Az infrastrukturális háttér fejlődésén túl a lehetőségek elsődleges bővülését az adatelemzési (azaz gépi tanulási és adatbányászati) algoritmusok fejlődése jelenti [32]. Az adatbányászat előzetesen nem ismert, de potenciálisan hasznos információk feltárásának (1. ábra) folyamatát jelenti, amely a heterogén adat-



1. ábra. Az adatbányászat folyamata

források adattárházban történő integrálásától – az adatokban való mintázatok keresésén át – a feltárt tudás alkalmazásáig terjedő tevékenységeket integrálja.

Az adatokban keresett mintázat, azaz a kapcsolódó algoritmusok alapján az 1. táblázatban összefoglalt adatbányászati technikákat különböztetjük meg, felvázolva azok potenciális alkalmazási lehetőségeit is.

A Big Data-technikákat alkalmazó klímaváltozást vizsgáló elemzések

Az elmúlt 10 évben a klímatudomány területén a publikációk száma megduplázódott; a Scopus adatbázis 2019-ben már 27 681 tudományos közlemény rögzített. A klímaváltozással kapcsolatos munkák egyre inkább alkalmazzák a Big Data-technikákat, ugyanis ez az eszköztár hatékonyan hozzá tud járulni komplex problémák megértéséhez, előrejelzéséhez, és segíti a döntéstámogató és -elemző modellek megalkotását [33].

Annak érdekében, hogy feltárjuk a Big Data-vezérelt, klímaváltozáshoz kötődő elemzési módszereket és technikákat, kulcszóelemzést végeztünk [34], amely során a Scopus adatbázisban

Módszer	Definíció	Adatelemző technikák	Potenciális alkalmazási terület
Csoportosítás	Az adatokkal jellemzett objektumok közötti hasonlóságok alapján az objektumok csoportosítása	Particionáláson alapuló algoritmusok (pl. K-means, fuzzy c-means) Hierarchikus csoportosítás (pl. dendrogram) Adatok eloszlásán alapuló módszerek Modellalapú algoritmusok	Adatok szegmentálása (homogén halmazokra való osztása) Jellemző prototípusok azonosítása (pl. időben homogén időszakok és az azokat jellemző átlagok/trendek szimultán azonosítása)
Osztályozás	Kategóriákba sorolásra alkalmas modell tanulása Adatokkal reprezentált objektumok előre definiált osztályokba sorolása	Neurális hálózatok Tartóvektor-gép (SVM) Döntési fa Legközelebbi szomszéd elemzés Bayes-osztályozó	Előre meghatározott osztályokba sorolás (pl. eltérések típusainak azonosítása)
Regresszió	Folytonos jellegű változók becslésére alkalmas modell tanulása	Többváltozós lineáris regresszió Neurális hálózat Regressziós fa	Időben előre becslést végző modell alkotása (pl. hőmérséklet előrejelzésére alkalmas modell készítése)
Gyakori mintázatok keresése	Gyakran előforduló elemhalmazok és szekvenciák azonosítása, asszociációs szabályok tanulása	Gyakori elemhalmaz-kereső algoritmusok: Apriori algoritmus, FP-grow algoritmus, szekvenciakereső algoritmusok: refixSpan, Spade, SPAM	Gyakorta együtt előforduló anomáliák azonosítása Események és azok sorrendje közti kapcsolatok feltárása
Vizualizáció	Többváltozós adatok megjelenítése Változók számának csökkentése Az adatok belső összefüggésének feltárása	Főkomponens-elemzés (PCA) Többdimenziós skálázás (MDS) t-SNE Önszerveződő hálózatok (SOM)	Feltáró jellegű adatelemzés Faktorok azonosítása Kompozit indikátorok készítése Komplex rendszerek figyelemmel kísérése

1. táblázat. Adatbányászati technikák és alkalmazási területeik

(TITLE-ABS-KEY(„climate change”) AND TITLE-ABS-KEY(„big data”)) kulcsszavakra és 2012 és 2020 közötti időtartamra vonatkozó keresés eredményeként kapott 442 publikációt dolgoztunk fel. Az azonosított publikációk kulcsszóinak kapcsolatrendszerét a **2. ábra** mutatja be, ahol a különböző színnel jelölt csoportok jelzik az egymással összefüggőnek azonosított tématerületeket.

A piros színnel jelölt csoport olyan kulcsszavakkal rendelkező publikációkat fog össze, melyek az éghajlatváltozás hatásának és ellenálló képességének mérésére, valamint előrejelzések készítésére alkalmas, Big Data-technológiákat és -módszereket használó informatikai megoldásokat tárgyalnak. Ilyen technológiák a mesterséges intelligencia, a gépi tanulás, a mélytanulás, a neurális há-

2. ábra. A klímaváltozással és Big Data eszköztárával kapcsolatos tudományos publikációk kulcsszavainak hálózata



lózatok. Neurális hálózatokat alkalmaznak időjárási előrejelzésekhez és vizualizációhoz [35], míg a gépi tanulást mintázatok intelligens felismeréséhez [36], valamint a klímaváltozás hatásának és ellenálló képességének meghatározására [37], továbbá járványok és betegségek terjedésének leírására mind társadalmi [38], mind környezeti kontextusban – például termékeknél [39], kávébetegség és -kártévők nyomon követésére – használják [40].

A narancssárga klaszterbe tartozó kulcsszavak az okos mezőgazdaság koncepciójának kialakításához kapcsolódó megoldásokra vonatkoznak [41]. A tárgyak internete (IoT) technológiák bizonyítottan hatékonyak a mezőgazdaság területén. Szenzorokat alkalmaznak a talajra, termékenységre, nedvességtartalomra, napsugárzásra, hőmérsékletre vonatkozó információk gyűjtésére, majd azokat más adatbázisokkal összekapcsolva nyomon követik a termés fejlődését és meghatározzák az azt befolyásoló tényezőket [42]. Az automatizálás és IoT-technológia integrálása újabb távlatokat nyit az okos mezőgazdaság területén: a valós idejű távérzékelésen is alapuló információkkal támogatott robotokra és az intelligens termesztés- és ellátásmenedzsmentre már egyre több példát találunk [43].

A lila színnel jelölt klaszter a természeti katasztrófákkal, mint árvizek és romló levegőminőség, valamint a kockázatkezelési mechanizmusokkal kapcsolatos kutatásokat jelöli. A kapcsolódó publikációk igazolják, hogy az adatbányászati technikák, a statisztikai és térbeli elemzések a döntéshozatali folyamatokat támogatva [44] miként hasznosulhatnak a katasztrófák megelőzésében, a természet védelmében, a káros hatásokok enyhítésében, valamint a természeti és társadalmi ellenálló képesség javításában [45].

A világoskéek klaszter a különböző klímamodelleket fogja össze olyan területeken, mint az ökológia, a biodiverzitás, a sebezhetőség vagy a vízkérdés. A Big Data-alapú technikák esetén nem szabad figyelmen kívül hagyni a nyílt adatok jelentőségét sem, melvre

értékes példákat találunk a multimodelles klímaváltozási adat-elemzés [46] és az üvegházhatású gázok földrajzi eloszlásának elemzése kapcsán [46], [47].

A zöld klaszter az üvegházhatásúgáz-kibocsátás, az energia-hatékonyság, a környezetvédelmi politika, a veszélyeshulladék-kibocsátás minimalizálása, az energiahatékonyság maximalizálása [48], a körforgásos gazdaság és a fenntartható fogyasztás [49], azaz a fenntartható fejlődés problémakörébe tartozó közleményeket fogja össze.

A sötétkékekkel jelölt témakör a városiasodás hatásának és a légkör [50], a szárazföld [51] és/vagy a vízkészlet [52] tér- és időbeli állapotértékelésére alkalmas műholdas távérzékelés kutatásait ábrázolja [53].

A citromsárga színnel jelzett klaszter magában foglalja a globális klímaváltozással kapcsolatos adatelemzési és politikai döntéshozók, valamint a nyilvánosság számára készült megjelenítési megoldásokat [54]. A tér- és időbeli adatok értékelése vizuális elemzőrendszerek fejlesztését igényli. Az éghajlati környezet elemzése modellszámításokkal [55] és 3D-s szimulációval [56] gazdagítható.

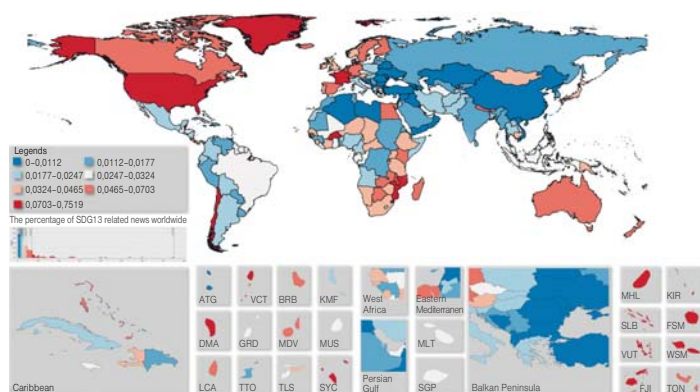
Adatforrások innovatív alkalmazási lehetőségei

Az éghajlatváltozás komplex kérdésének vizsgálata heterogén adatforrások innovatív módon integrált elemzését követeli meg. Ilyen információforrás lehet:

- A műholdas távérzékelés, ami jelentős előrelépést jelentett a klímarendszer megértésében, a légkör, a szárazföld és az óceán folyamatainak, tér- és időbeli állapotainak kvantitatív mérési megoldásaival [53].
- Közösségi médiából származó adatok, például a Twitter [57].
- Térinformatikai rendszerekből származó adatok, például a GEOSS [58].
- Makrogazdasági indikátorok [59] és kormányzati adatok [60].
- Az ENSZ által gyűjtött fenntarthatósági indikátorok [61].
- A társadalom véleménye a fenntartható fejlődési célok teljesüléséről, fontosságáról [62].
- Nyílt kormányzati adatok [63].
- Az európai országok klíma-attitűdje [64].
- Hírek. Az éghajlatváltozás megértésében jelentős szerepet játszhat a média mint a nyilvánosság első számú információforrása. A lakosság és a politikai döntéshozók nem minden esetben értik kellő mértékben a klímaváltozást [65], ezért a világhírek feltáró elemzése jelentősen hozzájárulhat a klímaváltozással kapcsolatos kérdések megértéséhez.

Kutatócsoportunk megmutatta a világ híreinek a klímaváltozással és a fenntarthatósággal kialakult összefüggéseit [66]. A GDELT adatbázisából 2019-ben 60 851 572 hírt elemeztünk, amelyeket a Világbank taxonómiaja alapján tudtunk megcímkézni. A klímaváltozással kapcsolatos hírek gyakoriságát a világ országai-ban a **3. ábra** mutatja.

A **3. ábra** az éghajlatváltozási akciókkal kapcsolatos hírek eloszlását mutatja az adott országban megjelent összes hír százalékában. A kék szín az alacsonyabb, a piros a nagyobb előfordulási arányt jelzi. Egyértelműen elmondható, hogy a klímaváltozás fontossága a kis szigetállamok esetében kiugróan magas. A műholdas képekből származó 25 éves idősorok adatainak elemzése azt mutatja, hogy 2100-ra a tengerszint 53–77 cm-es emelkedése várható [67]. A növekvő tengerszint sok alacsonyan fekvő part menti és vízparti területet árasztana el: ennek hatása a kis szigetállamok esetében drasztikus lehet: így érthető az éghajlatvál-



3. ábra. A klímaváltozással kapcsolatos hírek gyakorisága [66]

tozás iránti érdeklődésük. Az eredmények további részletes ismeretése meghaladja a tanulmány kereteit, ezzel a példával csupán illusztrálni szeretnénk volna, hogy a hírek globális elemzése hatékonyan integrálható a klímastratégiákkal kapcsolatos menedzsmenttevékenységbe [68].

A tanulmány legfontosabb üzenete, hogy a klímaváltozás kihívásainak és kezelési lehetőségeinek azonosításában az adat- és rendszertudomány eszköztára jelentős segítséget tud nyújtani. Ez az eszköztár ugyanis segíti a problémák megoldásához elengedhetetlenül szükséges heterogén adat- és információforrások integrálását, a szimulációs vizsgálatok tervezését, kiértékelését és a környezeti és társadalmi összefüggések megértését. Kijelenthetjük, hogy a klimatikus tényezők kizárólagos értékelése nem alkalmas hatékony alkalmazkodási stratégiák kialakítására, ezért a társadalmi és kulturális tényezőket is leíró, nem klimatikus tényezőket szintén bele kell illeszteni a modellekbe.

A Pannon Egyetemen most induló Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratóriumban célul tűztük ki, hogy a fenti alapelveket követve olyan döntéstámogató megoldásokat fejlesszünk, amelyek figyelembe veszik az ökoszisztéma kényes egyensúlyát befolyásoló emberi tevékenységeket, ugyanakkor kiterjednek a korlátok és határok vizsgálatára. Úgy véljük, hogy e megoldásokkal majd növelni lehet a települések klímaérzékenységet, a társadalmi-környezeti rezilienciát, továbbá bővíthető lesz a klímaváltozással összefüggő elemzési potenciál is. ●●●

IRODALOM

- [1] J. Rogelj et al., Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* (2016) 534/7609, 631–639.
- [2] M. Di Gregorio et al., Multi-level governance and power in climate change policy networks. *Glob. Environ. Change* (2019) 54, 64–77.
- [3] B. Xie et al., Predicting climate change risk perception and willingness to act. *Journal of Environmental Psychology* (2019) 65, 101331.
- [4] C. Wright, D. Nyberg, An Inconvenient Truth: How Organizations Translate Climate Change into Business as Usual. *Academy of Management Journal* (2017) 60/5, 1633–1661.
- [5] G. C. Hegerl et al., Causes of climate change over the historical record. *Environmental Research Letters* (2019) 14/12, 123006.
- [6] X. Du, N. K. Shrestha, J. Wang, Assessing climate change impacts on stream temperature in the Athabasca River Basin using SWAT equilibrium temperature model and its potential impacts on stream ecosystem. *Sci. Total Environ.* (2019) 650, Pt 2, 1872–1881.
- [7] A. Gomez-Zavaglia, J. C. Mejuto, J. Simal-Gandara, Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems. *Food Res. Int.* (2020) 134/109256.
- [8] M. Iturriza et al., Awareness-development in the context of climate change resilience. *Urban Climate* (2020) 32/100613.
- [9] R. Kates, W. C. Clark, Sustainability Science. SSRN Electronic Journal. doi: 10.2139/ssrn.257359.
- [10] G. Honti, G. Dörög, J. Abonyi, Review and structural analysis of system dynamics models in sustainability science. *Journal of Cleaner Production* (2019) 240, 118015.
- [11] D. H. Meadows et al., The Limits to Growth: A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind, 1972.

- [12] V. Sebestyén et al., Network model-based analysis of the goals, targets and indicators of sustainable development for strategic environmental assessment. *J. Environ. Manage.* (2019) 238, 126–135.
- [13] G. Dörgö, V. Sebestyén, J. Abonyi, Evaluating the Interconnectedness of the Sustainable Development Goals Based on the Causality Analysis of Sustainability Indicators. *Sustainability* (2018) 10/10, 3766.
- [14] G. Fischer et al., Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* (2005) 360/1463, 2067–2083.
- [15] K. E. Taylor, R. J. Stouffer, G. A. Meehl, An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* (2012) 93/4, 485–498.
- [16] V. Eyring et al., Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* (2016) 9/5, 1937–1958.
- [17] R. B. Mallick et al., Understanding the impact of climate change on pavements with CMIP5, system dynamics and simulation. *International Journal of Pavement Engineering* (2018) 19/8, 697–705.
- [18] Change, Intergovernmental Panel On Climate, Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Evaluation of climate models (szerk. Flato, Gregory et al.). Cambridge University Press, 2014, 741–866.
- [19] H.-M. Füssel, R. J. T. Klein, Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change* (2006) 75/3, 301–329.
- [20] D. Leitold, A. Vathy-Fogarassy, J. Abonyi, Network-Based Analysis of Dynamical Systems: Methods for Controllability and Observability Analysis, and Optimal Sensor Placement. Springer Nature, 2020.
- [21] M. Scholze et al., A climate-change risk analysis for world ecosystems. *PNAS* (2006) 103, 13116–13120.
- [22] S. van der Linden, The social-psychological determinants of climate change risk perceptions: Towards a comprehensive model. *Journal of Environmental Psychology* (2015), 41, 112–124.
- [23] W. et al Steffen, Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* (2015) 347/6223, 1259855.
- [24] T. M. Lenton, Early warning of climate tipping points. *Nature Climate Change* (2011) 1/4, 201–209.
- [25] S. Pauliuk, Making sustainability science a cumulative effort. *Nature Sustainability* (2020) 3/1, 2–4.
- [26] B. Shneiderman, *Science 2.0*. Science, 2008.
- [27] D. Laney, 3D data management: Controlling data volume, velocity and variety. META group research note, 2001.
- [28] J. et al Anuradha, A Brief Introduction on Big Data 5Vs Characteristics and Hadoop Technology. *Procedia Computer Science* (2015) 48, 319–324.
- [29] E. G. Symeonaki, K. G. Arvanitis, D. D. Piromalis, Cloud Computing for IoT Applications in Climate-Smart Agriculture: A Review on the Trends and Challenges Toward Sustainability. *Innovative Approaches and Applications for Sustainable Rural Development*, 2019, 147–167.
- [30] A. Lavin, D. Klabjan, Clustering time-series energy data from smart meters. *Energy Efficiency* (2015) 8/4, 681–689.
- [31] A. Salam, Internet of Things for Environmental Sustainability and Climate Change. *Internet of Things*, 2020, 33–69.
- [32] U. M. A. S. Fayyad, Data mining and knowledge discovery. *Tutorial Notes at PADD'97-1st Int.* 1997.
- [33] H. Hassani, X. Huang, E. Silva, Big Data and Climate Change. *Big Data and Cognitive Computing* (2019) 3/1, 12.
- [34] S. Lozano, L. et al., Complex network analysis of keywords co-occurrence in the recent efficiency analysis literature. *Scientometrics* (2019) 120/2, 609–629.
- [35] A. Buszta, J. Mazurkiewicz, Climate Changes Prediction System Based on Weather Big Data Visualisation. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2015, 75–86.
- [36] K. Demertzis, L. Iliadis, Adaptive Elitist Differential Evolution Extreme Learning Machines on Big Data: Intelligent Recognition of Invasive Species. *Advances in Big Data*, 2017, 333–345.
- [37] R. David et al., Tackling climate change with machine learning, arXiv preprint arXiv:1906.05433, 2019.
- [38] E. E. Rees et al., Risk assessment strategies for early detection and prediction of infectious disease outbreaks associated with climate change. *Can. Commun. Dis. Rep.* (2019) 45/5, 119–126.
- [39] G. Fenu, F. M. Mallocci, An Application of Machine Learning Technique in Forecasting Crop Disease, in *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Big Data Research*. Cergy-Pontoise France, Nov. 2019, 76–82.
- [40] E. Lasso, J. C. Corrales, Towards an Alert System for Coffee Diseases and Pests in a Smart Farming Approach Based on Semi-supervised Learning and Graph Similarity, in *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change*, vol. 687 (szerk. P. Angelov, J. A. Iglesias, J. C. Corrales). Springer International Publishing, 2018, 111–123.
- [41] N. H. Rao, Big Data and Climate Smart Agriculture-Status and Implications for Agricultural Research and Innovation in India. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.* (2018) 96.
- [42] D. Yan-e, Design of Intelligent Agriculture Management Information System Based on IoT. *2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2011.
- [43] G. Nikesh et al., IoT based smart agriculture. *International Journal of advanced research in Computer and Communication Engineering* (2016) 838–842.
- [44] M. E. J. N. Garcia, Marie Elaine Joyce, A. A. Hernandez, Pattern Analysis of Natural Disasters in the Philippines. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2018, 74–83.
- [45] C. Yang, G. Su, J. Chen, Using big data to enhance crisis response and disaster resilience for a smart city. *2017 IEEE 2nd International Conference on Big Data Analysis (ICBDA)*, 2017.
- [46] S. Fiore et al., Towards an Open (Data) Science Analytics-Hub for Reproducible Multi-Model Climate Analysis at Scale. *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2018.
- [47] N. Charkovska et al., High-resolution spatial distribution and associated uncertainties of greenhouse gas emissions from the agricultural sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (2019) 24/6, 881–905.
- [48] S. Fathi, R. Srinivasan, Climate Change Impacts on Campus Buildings Energy Use, *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Urban Building Energy Sensing, Controls, Big Data Analysis, and Visualization – UrbSys'19*, 2019.
- [49] Z. Wang et al., Big data: New tend to sustainable consumption research. *J. Clean. Prod.* (2019) 236, 117499.
- [50] J. Zhao et al., International reanalysis cooperation on carbon satellites data. *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIV*, 2019.
- [51] Y. Yan et al., Assessing the contributions of climate change and human activities to cropland productivity by means of remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* (2020) 41/5, 2004–2021.
- [52] G. B. Senay et al., Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. *Remote Sensing of Environment* (2017) 202, 98–112.
- [53] J. Yang et al., The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature Climate Change* (2013) 3/10, 875–883.
- [54] J. R. Alder, S. W. Hostetler, Web based visualization of large climate data sets. *Environmental Modelling & Software* (2015) 68, 175–180.
- [55] Z. Li, Q. Huang, G. J. Carbone, F. Hu, A high performance query analytical framework for supporting data-intensive climate studies. *Computers. Environment and Urban Systems* (2017) 62, 210–221.
- [56] Y. Xie, X. Kou, P. Li, A simulation method of three-dimensional cloud over WRF big data. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* (2019) 252.
- [57] S. M. Jang, S. Mo Jang, P. Sol Hart, Polarized frames on 'climate change' and 'global warming' across countries and states: Evidence from Twitter big data. *Global Environmental Change* (2015) 32, 11–17.
- [58] M. Craglia et al., Exploring the depths of the global earth observation system of systems. *Big Earth Data*, (2017) 1, 21–46.
- [59] The World Bank, Indicators, The World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator>
- [60] The World Bank, GovData360, The World Bank. <https://govdata360.worldbank.org/>
- [61] United Nations Statistics Division — SDG Indicators. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/database/>
- [62] United Nations, The United Nations Global Survey for a Better World, My World. <http://about.myworld2030.org/results/>
- [63] B. Ubaldi, Open government data: Towards empirical analysis of open government data initiatives. *OECD Obs.*, 2013.
- [64] EES, Public Attitudes to Climate Change (ESS8 2016), European Social Survey. <https://www.europeansocialsurvey.org/data/themes.html?t=climatech>
- [65] L. Antilla, Climate of scepticism: US newspaper coverage of the science of climate change. *Global Environmental Change* (2005) 15/4, 338–352.
- [66] T. Czvetkó et al., The intertwining of world news and Sustainable Development Goals: an effective monitoring tool. Submitted to: *Heliyon*.
- [67] R. S. Nerem et al., Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *PNAS* (2018) 115/9, 2022–2025.
- [68] S. Hallegatte et al., Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen. *Climatic Change* (2011) 104/1, 113–137.

ÖSSZEFOGLALÁS

ABONYI JÁNOS, CZVETKÓ TÍMEA, SEBESTYÉN VIKTOR:
AZ ADATTUDOMÁNY ESZKÖZTÁRÁNAK ALKALMAZÁSI
LEHETŐSÉGEI A KLÍMAVÁLTOZÁS KIHÍVÁSAINAK
AZONOSÍTÁSÁBAN ÉS KEZELÉSÉBEN

A fenntarthatóság tudományterületének legfontosabb kérdésein végighaladva bemutattuk, hogy a jövőben milyen kutatási és fejlesztési tevékenységekre van szükség ahhoz, hogy a klímaváltozás komplex problémáinak megismerésében és kezelésében az adattudomány eszköztára hatékony segítséget nyújtson.

A jelenleg sikeresnek bizonyult adatalapú alkalmazásokat kulcsszóelemzés segítségével tekintettük át. Elemzésünk szemlél-tette, hogy a Big Data a klímatudomány egyre szélesebb körben alkalmazott eszköze, ugyanakkor kevés az e technológia előnyeit ténylegesen kiaknázó, igazán átfogó jellegű, integratív elemzés. Tanulmányunkkal szeretnénk felhívni a figyelmet a rendszerek rendszere (SoS) elvére, ugyanis a klímaváltozás mozgatórugói és hatásai csak akkor ismerhetők fel, és a hatásokhoz csak akkor tudunk alkalmazkodni és azoknak ellenállni, ha időben felismerjük és feltárjuk az új kutatási irányzatok közötti szinergiákat.

Laky Dóra

■ BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék | laky.dora@epito.bme.hu

Az ivóvízellátás problémái és kezelési lehetőségei

A klímaváltozás miatt előforduló szélsőséges időjárási események jelentős hatást gyakorolnak vízbázisaink mennyiségére és minőségére. A kisvízi hozamok csökkenése, a kisvízes időszakok hosszabbodása és gyakoriságuk növekedése érzékenyebbé teszi a vízfolyásokat a szennyezőanyag-terhelésekkel szemben. Az intenzív csapadékok növelik a vízgyűjtő területről felszíni vizeinkbe jutó szennyezőanyagok mennyiségét. A felszín alatti vizek esetében a szárazabb talajállapotok miatt a csapadék-utánpótlás általános csökkenése várható. [1]

A hosszú távú cél vízbázisaink védelme mennyiségi és minőségi szempontból, rövid távon azonban a meglévő ivóvíztisztítási technológiák módosított üzemeltetésével, átalakításával kell felkészülnünk arra, hogy azok a kedvezőtlenebb minőségű nyersvíz tisztítására is alkalmasak legyenek. Jelen tanulmány bemutatja, hogy hazai viszonyok között ezt milyen technológiai módosításokkal lehet elérni.

A klímaváltozás vízminőséget befolyásoló hatása, a tisztítási technológiák szerepe

Magyarországon az ivóvíz többnyire felszín alatti vízbázisokból származik, ezen belül is a legnagyobb részt a mélységi vizek (35%), illetve a parti szűrési vízbázisok (35%) képviselik. A karsztvizek használata is jelentős (25%). A felszínközeli talajvizek olyan mértékben szennyezettek, hogy azok ivóvízcélú felhasználása nem jellemző. Vízellátás szempontjából a felszíni vizek jelentősége kisebb (5%) [2].

Felszíni vizek

Vízminőségi változások a felszíni vízbázisokban

Az ivóvízbázisok közül a klímaváltozás kedvezőtlen hatásai leginkább felszíni vizeinket érintik. A kisebb vízhozamok következtében csökken a szennyezőanyagok hígulásának mértéke, valamint az öntisztuló képesség. A hirtelen keletkező, gyors árvizek miatti fokozódik az erózióvesztés, illetve az állóvizek esetében az eutrofizáció [1].

Delpa és munkatársai [3] átfogó szakirodalmi összeállítást készítettek a klímaváltozás vízminőségi paraméterekre gyakorolt hatásáról. Általánosságban elmondható, hogy a kedvezőtlen vízminőségi változások elsősorban a heves esőzések, és ennek következtében a szennyezőanyagok bemosódása révén jelentkeznek.

A fizikai kémiai paraméterekkel kapcsolatban megállapították, hogy a klímaváltozás következtében a 1) a pH-érték növekszik, 2) az oldott oxigén koncentrációja csökken (a vízhőmérséklet növekedése, valamint annak következtében, hogy a biológiailag hozzáférhető szerves anyag mennyisége növekszik, ami a mikroorganizmusok számának növekedéséhez, és így az általuk igényelt

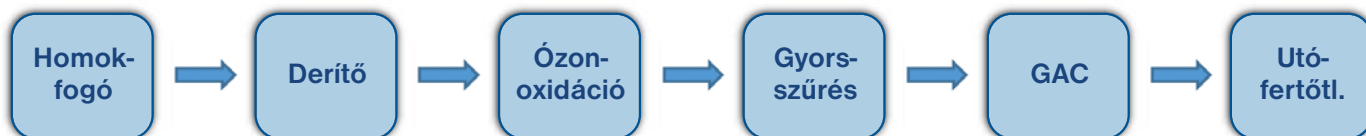
oldott oxigén mennyiségének növekedéséhez vezet), 3) a tápanyagok (nitrogén és foszfor) mennyisége is növekszik, ami eutrofizációhoz vezethet. A mikroszennyezők közül mind a szerves (pl. peszticidek, gyógyszermaradványok), mind a szervetlen szennyezők (pl. nehézfémek) koncentrációja növekszik. A biológiai paraméterek esetében szintén kedvezőtlen változásokra lehet számítani (pl. patogén mikroorganizmusok számának növekedése; az eutrofizáció következtében fellépő algaszaporodás, és ennek következtében algatoxinok megjelenése).

A vízhőmérséklet emelkedése és a szerves anyagok mennyiségének növekedése a fertőtlenítési melléktermékek koncentrációját is kedvezőtlenül befolyásolja. Amennyiben az ivóvíztisztítást követően a vizet klórgázzal vagy nátrium-hipoklorittal fertőtlenítik, a vízben található szerves anyagok és a klór reakciója trihalogén-metán- (THM-) vegyületeket képez. Ezek a vegyületek rákkeltő hatásúak, így szigorú határérték érvényes az ivóvízben megengedhető maximális koncentrációra vonatkozóan. Valdivia-Garcia és munkatársai [4] azt vizsgálták, hogy az éghajlatváltozás következtében a víz hőmérsékletének emelkedése és az oldott szerves anyag koncentrációjában bekövetkező változások milyen mértékben befolyásolják a THM-képződést. A három vizsgált klímaszenárió közül már a középső esetben is igen jelentős, 39%-os THM-koncentráció-növekedést jeleztek előre.

Felszíni vízkezelő technológiák és működtetésük megváltozott vízminőség esetén

Az **1. ábra** egy felszíni víz kezelésére alkalmas, jellemző technológiai sort mutat be. A nyersvízkivételi művek szívókamrái, -vezetékai mozgatható szűrőkosárral, durva ráccsal vannak ellátva a nagyobb mechanikai/darabos szennyeződések bejutásának megakadályozására [5]. A technológia első lépésként a könnyen ülepedő szennyezőanyagokat távolítják el a homokfogóban. Ezt követően a derítító műtárgyakban történik a kolloid mérettartományba eső szennyezőanyagok eltávolítása, melyek ülepíthetővé tételéhez vegyszer adagolása szükséges. Felszíni vizeknél a kórokozó mikroorganizmusok kellő hatástalanítására célszerű ózonos oxidációt alkalmazni. Ezt a lépést gyorsszűrés követi a finom lebegőanyagok eltávolítása céljából, majd granulált aktív szén tartalmazó adszorberen (GAC) vezetnek át a vizet, amely megköti az oldott szerves anyagokat és a mikroszennyező anyagokat. A felszíni vizek kezelésekor bevett gyakorlat, hogy a technológia több pontján alkalmaznak fertőtlenítést klórgázzal vagy nátrium-





1. ábra. A felszíni vízkezelés technológiai sora

hipoklorittal, így a tisztítótelepen a baktériumok elszaporodása visszaszorítható. A tisztítás befejező lépése az utófertőtlenítés, általában klórgázzal, nátrium-hipoklorittal vagy klór-dioxiddal. Ez utóbbi alkalmazása egyre gyakoribb, hiszen a klórozási melléktermékek mennyisége így csökkenthető.

A klímaváltozás következtében fellépő kedvezőtlen vízminőségi változások a tisztítási technológia célszerű módosításával – bizonyos határon belül – kiküszöbölhetők. A zavarosság növekedésekor a homokfogókban felgyülemelő iszap gyakoribb eltávolítása, illetve a derítőszer mennyiségének növelése és ezáltal a derítés hatásfokának javítása jelenthet megoldást. A szennyezés jellegétől függően – amennyiben a technológiai sorban nincs granulált aktív-szén-adszorber – a derítők előtt szükség lehet aktív-szénpor adagolására [5]. A szokásosnál gyakoribb gyors-szűrő-öblítésekre is szükség lehet. Amennyiben a kórokozó mikroorganizmusok számának növekedése problémát okoz, a fertőtlenítőszer dózisok növelése jelenthet megoldást: a technológiaközi klóros fertőtlenítés, az ózonos oxidáció és az utófertőtlenítés esetében egyaránt. A szerves anyagok mennyiségének növekedésekor szintén a derítési hatásfokot kell javítani a derítőszer mennyiségének változtatásával, továbbá az ózonkoncentráció növelése is javíthatja a szerves anyagok eltávolításának hatékonyságát. Szükség lehet az aktív-szén-adszorber gyakrabbi cseréjére vagy regenerálására, mivel a nagyobb szervesanyag-terhelés gyorsabb töltetkimerülést eredményez. A szerves anyag eltávolításának hatékonyabbá tétele azért is különösen fontos, mert a mikroorganizmusok számának növekedésekor növelni kellene a klórkoncentrációt, amely a fertőtlenítési melléktermékek (pl. a már említett THM-vegyületek) koncentrációjának növekedését eredményezné.

A fentiek alapján elmondható, hogy a felszíni vízkezelés során számos technológiai egység áll rendelkezésre, mellyel a hirtelen fellépő kedvezőtlen vízminőségi változások esetében közbe lehet avatkozni. Természetesen előfordulhatnak olyan haváriák, amelyekre az alaptechnológia nem tud megfelelő választ adni. Ilyen esetekben az adott szennyezőanyag eltávolítását célzó, egyedi megoldásokra van szükség. Erre volt példa a 2000. évi tiszai cianidszennyezés. Ez a Szolnoki Felsővízi Vízművet közvetlenül érintette, megfelelő technológiai módosítással azonban sikerült elérni, hogy az ivóvíz-szolgáltatást nem kellett leállítani.

Karsztvizek

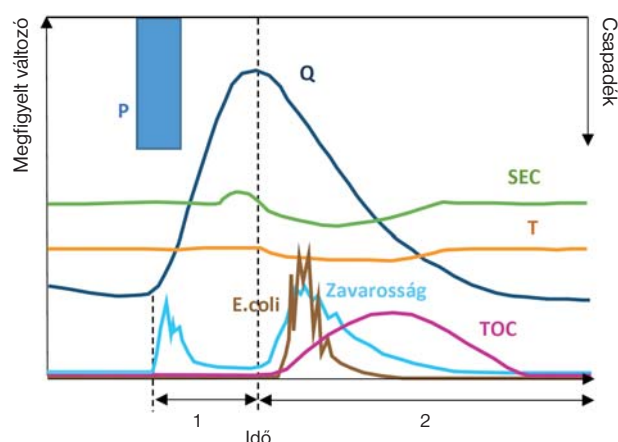
Vízminőségi változások a karsztvízbázisokban

Karsztvizeink jelentős ivóvízbázisaink, amelyek érzékenyen reagálnak a felszíni környezet változásaira. A klímaváltozás kapcsán meg kell különböztetnünk az elmúlt évtizedek klímaváltozásából következő hosszú távú, tartós vízminőségi változásokat és az időjárási extrémításokból (aszályok, hirtelen lezúduló intenzív csapadékok) adódó változásokat, amelyeknek átmeneti hatása van a víz minőségére.

Hazánkban a karsztvízbázisok egy része a bauxit- és szénbányászathoz köthető. A bányászati tevékenység megszüntetésével a kitermelt vizek mennyisége jelentősen csökkent. Ez a karsztvízszint emelkedéséhez vezetett, és bizonyos esetekben vízminőség-javulást is eredményezett. Hazai viszonyok között ezért ne-

héz szétválasztani a klímaváltozásból adódó hosszú távú hatásokat a bányászati tevékenység megszűnésének következményeitől.

Az ivóvízellátás szempontjából kiemelten fontos az intenzív csapadékok hatása. A 2. ábra bemutatja, hogy a kitermelt karsztvíz minőségében milyen változások várhatók [6]. Időben két jól elkülönülő részre oszthatjuk a megfigyelt idősort: az első szakaszban, amikor a P csapadékesemény kapcsolatba lép a Q karsztvízhozammal, megkezdődik a járatokban tárolt karsztvíz kimosódása, és a leülepedett részecskék felkavarodása a zavarosság növekedését eredményezi. Ezt követően a járatokban, illetve az epikarsztban található, oldott anyagokban gazdag víz érkezik meg (kisebb csúcsot eredményezve a víz elektromos vezetőképességében). A második szakaszban a csapadékvíz a karsztvízforráshoz érkezik a felszínről szilárd szennyezőanyagokat és bak-



2. ábra. Csapadékesemény (P) hatása a karsztvíz minőségére [6]

Q – vízhozam; SEC – elektromos vezetőképesség; T – hőmérséklet; TOC – összes szerves szén

tériumokat juttat a vízbe (*E. coli*-csúcs, és egy második csúcs a zavarosságban jellemezi ezt a szakaszt). Eközben a csapadékvíz hígítja a karsztvizet (ennek következtében csökken az elektromos vezetőképesség és a hőmérséklet), valamint a talajból szerves anyagok jutnak a vízbe (az összes szerves szén koncentrációjában megjelenő csúcs mutatja ennek hatását). A fentiek alapján az intenzív csapadékok esetében fellépő zavarosság általában mikrobiológiai terhelést is jelent [7], így a zavarosság online mérése és az adatokban tapasztalható hirtelen változás fontos információ a vízmű üzemeltetője számára.

2006-ban Miskolcon a nyár eleji, két hétig tartó intenzív csapadék okozott komoly problémát az ivóvízellátásban. A vízgyűjtő terület nem megfelelő csapadékvíz- és szennyvízcsatorna-hálózattal rendelkező részeiről a rövid idő alatt lehulló nagy mennyiségű csapadék kórokozó mikroorganizmusokat juttatott a karsztvízbázisba [8].

Karsztvízkezelő technológiák és működtetésük megváltozott vízminőség esetén

A hazai karsztvízkezelő technológiák körében a hagyományos, valamint korszerű technológiák és a vízkezelés nélküli megoldá-

sok egyaránt megtalálhatók. Kedvező vízminőség esetén csupán fertőtlenítésre van szükség, és a víz közvetlenül a hálózatba táplálható. Kevésbé kedvező adottságok esetén azonban tisztítani kell a nyersvizet, ez a helyzet például Kincsesbányán vagy Miskolctapolcán. Kincsesbányán eredetileg egy hagyományos (levegőztetésen, derítésen és szűrésen alapuló) technológiát alkalmaztak, azonban a bányászati tevékenység megszűnését követő vízminőség-javulás miatt a technológiát az utóbbi években jelentősen egyszerűsítették a levegőztetés és a derítés kiiktatásával, valamint az adagolt vegyszerek mennyiségének csökkentésével.

Miskolctapolcán a 2006. évi vízjárványt követően alakítottak ki vízkezelő technológiát. A hasonló vízjárványok elkerülése érdekében egy előszűrésből, ezt követő ultraszűrésből, majd utófertőtlenítésből álló kezelési sort alakítottak ki [7].

A karsztárterek következtében hirtelen megjelenő kedvezőtlen vízminőségi változásokat – bizonyos határokon belül – a megfelelő technológiával rendelkező vízmű kezelni tudja. Ez esetben lehetőség van szerves anyag eltávolítására szolgáló vegyszerek adagolására, majd az így átalakított szennyezők gyorsszűrőn történő eltávolítására (gyakoribb szűrőöblítésekkel) és a fertőtlenítőszer-koncentrációk növelésére. Ha ilyen technológia nem áll rendelkezésre, csupán a biztonsági fertőtlenítés céljából adagolt vegyszer mennyiségét lehet növelni. Karsztvízbázisok esetén ezért kiemelt jelentősége van a nyersvíz folyamatos (lehetőség szerint online) monitoringjának, hiszen a mikrobiális szennyezést általában a zavarosság növekedése és más paraméterek egyidejű változása kíséri.

Parti szűrésű vizek

Vízminőségi változások a parti szűrésű vízbázisokban

A parti szűrésű vízbázisok kútjait a folyómederhez közel, jó vízvezető képességű, alluvialis kavicsteraszokon alakítják ki. Parti szűréskor a felszíni víz ezen a néhányszor tíz, esetleg száz méter vastag kavics- és durva szemű homokrétegen átszűrődve jut el a víztermelő kútba, miközben természetes mechanikai, fizikai, kémiai és mikrobiológiai tisztítási folyamatok játszódnak le. Ennek hatására a felszíni víz lebegőanyag-tartalma és szervesanyag-koncentrációja jelentős mértékben csökken, valamint mikrobiológiai paraméterei akár több nagyságrenddel ($1,5 \log - 3,5 \log$ eltávolítási hatékonyság) is javulhatnak [9], [10]. A mikrobiológiai lebontási folyamatok a kavicszemcsék felületén kialakult biofilmnek, az abban élő biológiai szervezeteknek köszönhető. Ideális körülmények között a termelt nyersvíz további kezelés nélkül, biztonsági fertőtlenítés után továbbítható a hálózatba [9]. Vannak olyan parti szűrésű vízbázisaink, ahol kevésbé kedvezőek az adottságok, és a kitermelt nyersvízben bizonyos szennyezőanyagok (pl. vas- és mangán-, esetenként ammóniumionok) jelennek meg, így a hálózatba táplálás előtt ezeket el kell távolítani. A parti szűrésű vizeknél a folyó vízállása határozza meg, hogy a termelő kutakba milyen hányadban érkezik a víz a folyó felől, és milyen mértékű a háttérvízből (felszín alatti vízből) történő utánpótlás. Kisebb vízállások esetén a háttér felőli áramlás aránya megnő, míg magasabb vízállás esetén a folyó felőli áramlás aránya lesz nagyobb.

A parti szűrésű vizek minőségét tehát nagymértékben befolyásolja a folyó vízállása. A folyóvíz és háttérvíz arányának alakulása mellett a természetes tisztítási folyamat hatékonysága is függ a folyó vízállásától, hiszen a vízállás a szivárgási időre is hatással van. Kis vízállások esetén problémát jelenthet a kisebb szivárgási sebesség, azaz a szivárgási idő növekedése, aminek következtében a redoxviszonyok is megváltoznak. A mikrobiális tevékenység következtében az oldott oxigén koncentrációja jelen-

tősen csökkenhet, és nem kívánt mikrobiológiai folyamatok játszódhatnak le. Nagy vízállások esetén problémát okozhat, hogy a felszíni víz egy olyan zónán keresztül szivároghat a kútba, amely korábban nem állt közvetlen kapcsolatban a folyóval. A mikrobiológiai lebontásban kulcsfontosságú szerepet játszó biofilm ebben a zónában nem alakult ki, és ez a kutakban szennyezőanyagok megjelenéséhez (pl. növekvő szervesanyag-koncentráció, patogén mikroorganizmusok) vezethet. Magas vízállások esetén további problémát okozhat a kútfejek víz alá kerülése és a nyers felszíni víz kutakba kerülése is [9], [11].

A parti szűrésű rendszerek működését a hőmérséklet is jelentősen befolyásolja. A hőmérséklettel változik a víz viszkozitása, és ez módosítja a szivárgási sebességet [9], továbbá a biológiailag aktív zónában lejátszódó folyamatokra is jelentős hatással van. Nyári időszakban, a hőmérséklet emelkedésével a folyóvízben oldott oxigén koncentrációja csökken, mindemellett magasabb hőmérsékleten a szűrőközegben a mikrobiológiai aktivitás jelentősen növekszik, a mikroorganizmusok több oldott oxigént használnak fel működésükhöz, aminek hatására az eredetileg oxidáló közeg oxigénhiányossá válhat [9], [10], [11].

A felszíni vizek minőségét veszélyeztető extrém csapadékok a parti szűrésű vízbázisok minőségét is kedvezőtlen módon befolyásolják. Azt, hogy a parti szűrésű rendszer milyen mértékben képes a szennyezőanyagok eltávolítására, mindig az adott körülmények (a nyersvízben megjelenő szennyezőanyagok jellege és mennyisége, a hőmérséklet, a szivárgási sebesség, a szűrési zóna jellemzői stb.) határozzák meg.

A parti szűrés vízkezelő technológiai és működtetésük megváltozott vízminőség esetén

Parti szűrés esetén Magyarországon vízkezelő technológiát általában a fent említett kedvezőtlen redoxviszonyok kialakulása és ennek következtében az oldott vas és mangán (esetenként ammóniumion) megjelenése miatt kell működtetni. A vas és a mangán oxidációval, majd ezt követő gyorsszűréssel távolítható el. Hazánkban több olyan, parti szűrésű vizet kezelő technológia működik, ahol a vas és a mangán átalakítása céljából a levegőztetést követően ózonos oxidációt alkalmaznak. Az ózonos oxidáció miatt granulált aktív szén adszorpció alkalmazására is szükség van annak érdekében, hogy az ózonizálás hatására keletkező, biológiailag könnyen hozzáférhető szerves anyagokat eltávolítsák a vízből. A technológia végső lépéseként utófertőtlenítést alkalmaznak (3. ábra).

A vázolt – meglehetősen komplex – technológiai sor alkalmas arra, hogy a nyersvíz minőségében hirtelen bekövetkező kedvezőtlen változásokkor is megfelelő minőségű tisztított vizet szolgáltatson. A klímaváltozással összefüggésben a már említett kisvizes és nagyvizes időszakok jelentenek leginkább veszélyt, mert a parti szűrt vizek minőségében megnövekedett szervesanyag-koncentrációt és kedvezőtlen mikrobiológiai paramétereket eredményezhetnek. A nyersvízben megjelenő nagyobb szervesanyag-tartalom esetében lehetőség van az ózonkoncentráció növelésére, illetve – amennyiben a technológiában az adagolás lehetősége kiépített – a gyorsszűrés előtt koagulálószer adagolására. Felszíni vízkezelés esetén ideális esetben a megfelelő pehelyszerkezet az erre a célra megvalósított derítő műtárgyban alakul ki. A parti szűrés vízkezelő technológiája azonban derítőt általában nem tartalmaz, így a pehelyképződésre csak annyi idő áll rendelkezésre, amíg a víz az adagolás helyétől a gyorsszűrőig eljut. A vegyszeradagolás miatt a gyorsszűrő szennyezőanyag-terhelése is nagyobb lesz, így a szűrőket gyakrabban kell öblíteni. A magasabb



3. ábra. A parti szűrés technológiai sora (nagy vas- és mangánkoncentrációk esetén)

szennyezőanyag-koncentráció és a megnövelt ózondózis miatt az aktív-szén-adszorberek is hamarabb merülnek ki, így a tölteteket gyakrabban kell regenerálni vagy cserélni. Végül az utófertőtlenítéskor is be lehet avatkozni; a fertőtlenítőszer-koncentráció növelésével, illetve – amennyiben lehetőség van rá – többlépcsős fertőtlenítéssel (pl. kiegészítő ultraibolya fertőtlenítéssel) tovább csökkenthető a mikroorganizmusok mennyisége.

Számos parti szűrésű vízbázisunk olyan kedvező adottságokkal rendelkezik, hogy vízkezelő technológia kiépítése nélkül, csupán biztonsági fertőtlenítés alkalmazásával is megfelelő minőségű vizet tud szolgáltatni. Ebben az esetben a nyersvíz minőségében bekövetkező kedvezőtlen változásokat csak kismértékben tudják a technológia változtatásával követni: a beavatkozásra lehetőség a fertőtlenítés hatékonyságának növelése. Budapest vízellátásának jelentős része ilyen kedvező adottságú vízbázison alapul. A vízminőségromlással járó helyzetekre felkészülve a klórozás mellett lehetőség van ultraibolya sugárzással történő fertőtlenítésre is, így abban az esetben, ha a mikrobiológiai paraméterek ezt indokolják, kétféleképp fertőtlenítést követően táplálják a vizet a hálózatba.

Rétegvizek

A hazai ivóvízellátás mintegy harmadát rétegvizekből biztosítjuk. A vízzáró rétegek alatt elhelyezkedő – gyakran több mint száz méter mélyen megtalálható – vízbázis nagyobb része a „védett” kategóriába tartozik, ami azt jelenti, hogy emberi eredetű szennyeződések nem tartalmaz. Természetes szennyezők azonban szép számban megtalálhatóak (vas- és mangánvegyületek, ammóniumionok, arzénvegyületek, oldott gázok, szerves anyagok), így ezek eltávolítására esetenként egészen összetett technológiákra van szükség. A védett rétegvizekben a nyersvíz minősége azonban igen stabil, abban hirtelen változásokra nem számíthatunk; elmondhatjuk, hogy a klímaváltozás – az általunk vizsgált időtartamokon belül – e vízbázisokat nem érinti.

Rétegvizeinknek azonban van egy jelentős hányada, amely a nem védett kategóriába esik, azaz a védőidomoknak van felszíni vetülete. Ezen vízbázisok sérülékenyek, így szélsőséges időjárási körülmények között a nyersvíz minősége kedvezőtlenül változhat. Amennyiben a vízben található természetes szennyezőanyagok jelenléte miatt kezelési technológiára egyébként is szükség van, a szélsőséges időjárási körülmények okozta kedvezőtlen vízminőségi változások hatását az adott technológia csökkenteni tudja. A vízminőségi változás és a technológia jellegétől függ, hogy milyen módon tud a vízmű üzemeltetője beavatkozni; általában az oxidálószer és a koagulálószer koncentrációjának növelése, gyakoribb szűrőöblítések, a fertőtlenítőszer-koncentráció növelése jelenthet megoldást.

Összességében elmondható tehát, hogy a klímaváltozás kedvezőtlen hatásainak leginkább kitett felszíni vízbázisok csupán kis részét képviselik a hazai ivóvízellátásnak. Parti szűrésű kútjaink és karsztvizeink esetében azonban számolni kell az éghajlatváltozás kedvezőtlen hatásaival. Azon vízműveknek, amelyek a kedvező adottságaik következtében nem rendelkeznek vízkezelő technológiával, a megfelelő monitoring tevékenységgel, és indokolt esetben kiegészítő technológiai lépésekkel kell felkészülniük a

kedvezőtlen vízminőségi változásokra. A hazai ivóvízellátás szintén jelentős részét kitevő rétegvizek esetében a nem védett vízbázisaink szintén fokozott figyelmet érdemelnek. A rétegvizek nagyobb hányada védett vízbázis, a nyersvíz minősége ezeken a helyeken igen stabil, így kedvezőtlen vízminőségi változásokra nem kell számítanunk.

Köszönetnyilvánítás. Ezúton szeretnék köszönetet mondani Szabó Vincze Borbálnak (Dunántúli Regionális Vízművek Zrt.), Magyar Bede Mariannának (Víz- és Csatornaművek Koncessziós Zrt.), László Balázsnak (Fővárosi Vízművek Zrt.) és Laky Sándornak (Tunel Kft.), akik hasznos észrevételeikkel segítették a tanulmány elkészítését.

IRODALOM

- [1] Országos Vízügyi Főigazgatóság, Magyarország Vízügyi-Gazdálkodási Tervének második felülvizsgálata – Jelentős Vízgazdálkodási Kérdések, vitaanyag, 2019. http://vizeink.hu/wp-content/uploads/2020/01/JVK_vitaanyag_20191220.pdf
- [2] Magyar Vízi Közmű Szövetség. https://www.maviz.org/fogyasztai_informaciok/honnan_ered_a_csapviz_magyarorszagon
- [3] Delpla I. et al., Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International* (2009) 35/8, 1225–1233.
- [4] Valdivia-Garcia M., et al., Predicted Impact of Climate Change on Trihalomethanes Formation in Drinking Water Treatment. *Scientific Reports* (2019) 9, 1–10.
- [5] Magyar Vízi Közmű Szövetség. A Magyar Víziközmű Szövetség 2014./6. számú szakmai ajánlása az Ivóvízbiztonsági tervek elkészítéséhez (2014)
- [6] Hartmann A. et al., Karst water resources in a changing world: Review. *Reviews of Geophysics* (2014) 52, 218–242.
- [7] Viszokai J., Membrántechnológiai üzemeltetési tapasztalatok a Tapolcai Vízműben Miskolcon. Előadás a Magyar Víz- és Szennyvíztechnikai Szövetség Szakmai Napján, 2019.
- [8] Kiss Z. et al., A 2006. évi miskolci ivóvízjárvány környezet-egészségügyi ismertetése – esetismertetés. *Egészségtudomány* (2008) 52/1, 60–71.
- [9] Goda Z., Az éghajlatváltozás lehetséges hatásai a parti szűrésű vízbázisokra. Műszaki Katonai Közlöny (2019) 29/1, 185–194.
- [10] Nagy-Kovács Zs. et al., Water Quality Changes during Riverbank Filtration in Budapest, Hungary. *Water* (2019) 11/2.
- [11] Eckert P., Lamberts R., Wagner C., The impact of climate change on drinking water supply by riverbank filtration. *Water Science and Technology* (2008) 8/3, 319–324.

ÖSSZEFOGLALÁS

LAKY DÓRA: AZ IVÓVÍZELLÁTÁS PROBLÉMÁI ÉS KEZELÉSI LEHETŐSÉGEI

Az éghajlatváltozás jelentősen befolyásolja vízbázisaink mennyiségét és minőségét, ezáltal hatással van az ivóvízkezelő technológiák működtetésére.

A tanulmány bemutatta, hogy milyen technológiai válaszokat adhatunk az ivóvízkezelés során a nyersvíz minőségének klímaváltozás következtében fellépő kedvezőtlen irányú változásaira. A konkrét lépéseket természetesen minden esetben a helyi viszonyok, a rendelkezésre álló technológia adottságai határozzák meg. Ezekről a – minden vízmű esetében rendelkezésre álló – vízbiztonsági tervek részletesen rendelkeznek. A technológiák módosított üzemeltetése azonban nem minden esetben jelent megoldást a szélsőséges időjárási viszonyok esetén. Amennyiben ezen extrém körülmények között várható vagy tapasztalt vízminőségi változások, a vízbázis sérülékenysége indokolják, szükség lehet a meglévő technológia átalakítására, kiegészítésére annak érdekében, hogy a biztonságos ivóvízellátás ilyen körülmények között is biztosítható legyen.

Salgó András

■ BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszer-tudományi Tanszék

Az élelmiszeripar kihívásai: a klímaváltozás hatásai az élelmiszer-biztonságra

Bevezetés

A globális klímaváltozás és annak intenzív variabilitása az élelmi láncra és az élelmiszer-biztonságra, valamint az ellátás-biztonságra is jelentős veszélyeket hordoz az elsődleges nyersanyagtermeléstől a fogyasztóig.

Egy sor olyan klímfüggő tényezőt említhetünk, amelyek döntően befolyásolják az élelmi lánc biztonságát, mint a hőmérséklet-változás (felmelegedés), a csapadékeloszlás és gyakoriság extrémizációi, a természetes állóvizek felmelegedése és elsavanyodása (a pH csökkenése), a szennyező komponensek migrációja, transzportja, hogy csak a legfontosabbakat említsük.

A klímaváltozás társadalmi-gazdasági következményei is egyre inkább beláthatatlanok. Ezek megjelennek a növénytermesztés és az állattenyésztés, a feldolgozás, a globális kereskedelem, a demográfiai változások, a migráció és az emberi viselkedésformák területén egyaránt.

Az élelmiszerláncok klímaváltozás okozta sérülékenysége miatt kétirányú „védekezési” törekvéscsoportra van/lesz szükség. Egyrészt javítani szükséges az „adaptációs” készséget, másrészt minden erővel törekedni kell az „enyhítés” módzatainak kimunkálására.

Ezen „kettős feladat” – bár globális folyamatok következtében alakult ki – erősen lokális, specifikus megoldásokat igényel, s finom beavatkozásokat követel és kényszerít ki régióként, országonként, azok adottságai, képességei, kulturális viszonyai, táplálkozási szokásai stb. függvényében.

Jelen írás célja azon körülmények és veszélyek bemutatása, amelyek egyrészt az elsődleges nyersanyagtermelést alapvetően befolyásolják, másrészt az élelmiszer-biztonságra és a táplálkozási körülményekre döntő módon hatni képesek.

Összeállításunk a klímaváltozások okozta „események” modellezésére és várható hatásainak előjelzésére szolgáló módszerek potenciális alkalmazási lehetőségeit és a jelenleg látható és pozitív hatásának becsülhető javaslatokat is megkísérli összegezni.

A klímaváltozás hatásai a nyersanyagtermelésre

Ebben a fejezetben azon körülmények hatásait és kilátásait elemezzük, amelyek az élelmiszer-előállítás feltételeit leginkább befolyásolják. Ezek a következők: vízhiány, légszennyezés, nyersanyagok jellege, peszticidhasználat és növényi adaptáció.

A vízhiány körülményei és hatásai

2050-re, az előrejelzések szerint, az élelmiszerek iránti igény 70–90%-kal nő egyrészt a népességnövekedés, másrészt a bevételek növekedése miatt. Az ehhez szükséges, élelmiszer-biztonságot befolyásoló feltételeket (termelés, kereskedelem, hozzáférés, ellátási stabilitás, hasznosítás stb.) a következő lépések megtételével nagy valószínűséggel meg lehetne teremteni [1]: gyorsan növekvő fajok és fajták nemesítése, fejlesztése, kevesebb vizet és műtrágyát igénylő növényi anyagok előállítása, hozamnövelés, produktivitásjavítás, gyenge minőségű, másodlagos vizek és gyenge minőségű talajok használata.

Ezen igények egyidejű elérése azonban egyelőre utópia. Reálisan azzal kell számolni, hogy növekedni fog az egy főre jutó vízhiány, ugyanakkor a megművelhető föld nagysága csökken, vagy jó esetben stagnál. Ennek ellenére a termelés globálisan növekszik, de óriási lokális különbségek alakulhatnak ki. A helyzet enyhítését és esetleges megoldását alapvetően a technológiai fejlesztésektől és az ún. indukált innovációktól remélhetjük [2].

A problémakezelés kulcskérdése a vízellátás és -használat, amelyek sokféle vízhiány-, illetve vízhozzáférési mutatóval jellemezhetők [3,4]. Közülük széles körben az ún. Water Stress Index (WSI) az elfogadott: ez azt mutatja, hogy adott területen (ország, régió) mennyi az egy főre jutó visszanyert (tisztított) víz mennyisége [5]. Ezt az indexet használják a leggyakrabban a környezeti változások becslésére, a trend kijelölésére és a vízhiány, valamint annak éves változásai jellemzésére.

Az élelmiszerekhez való hozzáférést azonban a népességnövekedés, a föld- és vízhasználat és a termelési trendek is befolyásolják.

A népességnövekedésben, Európa kivételével, aránytalan, exponenciális emelkedés tapasztalható.

A föld- és vízhasználatot tekintve, mivel a művelhető terület közel állandó, az öntözés növelése jelentheti a megoldást, amihez az infrastruktúra megléte esetén is hozzáférhető vízforrás kell, ez a döntő tényező [6]. Itt kell megjegyezni, hogy globálisan a vízhez való hozzáférés és annak tendenciája rossz, ugyanakkor Magyarország helyzete ebben a tekintetben kiemelkedően jó. A problémák csak finom helyi szabályozásokkal és megoldásokkal kezelhetők.

A termelési trendeket vizsgálva látható, hogy az össztermelés és a hozamok (t/ha) folyamatosan javulnak, az egy főre jutó energiaszükséglet (kcal/fő/nap) növekszik, de ez az adat az egyes ré-

giók között akár 1000 kcal/fő/nap különbséget is mutat (EU, USA vs. Afrika és Ázsia).

Kérdés, hogy a fenti pozitív trend a technológiai változások eredményei és ezen technológiai változtatások, fejlesztések elemei-e a népességnövekedés és a klímaváltozás hatásainak kompenzálására.

A klímaváltozás vízellátásra és hozamokra gyakorolt hatásainak vizsgálata azt jelzi, hogy a csapadékváltozást és a változékonyságot tekintve Európa, Közép-Amerika és Óceánia mérsékeltén változékonny, míg Észak-Amerika, Ázsia és Afrika nagy változékonyságú kontinensként jellemezhető, és a változékonyság mértéke növekvő tendenciát mutat [7].

A várható hozamokra vonatkozó becslések szerint a kiváló mezőgazdasági viszonyokkal rendelkező Kaliforniában is, amennyiben a jelenlegi trendek megmaradnak, jelentős hozamcsökkenésekkel kell számolni 2010 és 2090 között (kukorica 5–10%, rizs 3–10%, búza 8–15%, napraforgó 10–25%) [8]. A relatív vízhiány miatt a déli régiók (Kanada és Észak-Európa vs. Dél-Európa vagy délebbre fekvő területek) hozamvesztései akár 50%-ot is elérhetnek.

A klímaváltozás több szempontú, a vízellátás változásai (egyetlen csapadékeloszlás, árvizek, hosszabb és gyakoribb szárazság) másodlagosan is hatnak a produktivitásra [9], a növekvő kártevő-aktivitás, a rezisztenciacsökkenés, a talaj növekvő sótartalma, a növényi adaptáció megváltozása [10] és a növényi légzés gátlása révén.

A vízellátás és -kezelés javítására, illetve a változások modellezésére egy sor javaslat fogalmazódott meg [11,12,13], amelyek lényege:

- a természetes vizek gyűjtése, tartalékképzés, tárolás, újrahasználat, öntözés,
- hulladékvizek és kezelt (szenny-) vizek öntözési hasznosítása (re-use),
- „more crop per drop” koncepció [14],
- „trade of water”, a használók közötti időleges vízmegosztás [15],
- „joint management” a vízforrásokra vonatkozóan [16].

A tartalékok legfontosabb eleme mindenképp az öntözési hatékonyság javítása [17].

A vízhiánnyal összefüggő technológiai módosítások lehetséges útjai:

- GM-növények alkalmazása, gond a sterilitás (Európában ez nem szempont),
- szárazságtűrő növények nemesítése (DRCs drought resistant crop), csak csökkenteni képesek a veszteségeket,
- CAM (crassulacean acid metabolism) fotoszintézis-növények használata [18],
- víztűrő (flood resistant) növényi kultúrák használata,
- gyomkontroll, rovar- és betegségrezisztencia javítása [19,20].

A légszennyezés viszonyai és hatásai

1961 és 2014 között a világ népessége 136%-kal nőtt, miközben a növényi anyagok termelése 188%, a hústermelés 345%-kal emelkedett, jelezve a „human well beeing” törekvések alapjait [21]. Ugyanakkor a termelés intenzifikálása, az agro-ipari fejlesztések, a műtrágyahasználat, a növényvédő szerek alkalmazása és a gépésítés radikális növelése óhatatlanul jelentősen emeli a légszennyezést. Ennek okait jól érzékelteti, hogy például 2010-ben a világon 100 millió tonna nitrogénműtrágyát használtunk fel és a mezőgazdaság energiafogyasztása 8728 PJ volt.

A primer légszennyezésen túl az üvegházhatást okozó gázok

(GHG) egynegyede származik a mezőgazdaságból [22]. A mezőgazdaságból származó NH₃-emisszió (ami műtrágyákból, állati hulladékokból származik) pedig 75%-át teszi ki a globális NH₃-emisszióknak [23].

Emellett a finom szállópor- (PM) kibocsátás jelent óriási környezeti veszélyt, mivel az atmoszférikus kölcsönhatások révén nagy letalitású szennyezések képződhetnek. Az USA-ban és az EU-ban sajnos a mezőgazdasági eredetű légszennyezés mértéke kifejezetten magas [24]. A légszennyező komponensek nemcsak primer hatásúak, de módosítják a fajok viselkedését és indirekt módon hatnak az élelmi láncra és a működési körülményekre is.

A légszennyezés hatásai számos módon csökkenthetők: az öntözés finom szabályozása, menedzsmentje alapvető lehet a GHG-kibocsátásban, a megfelelő időben történő öntözés a CH₄-, NO- és N₂O-emissziót jelentősen csökkentheti [25], az alkalmazott kemikáliák hatékony használata, a felesleg kerülése és a hatékony permetezési technológiák csökkentik az emissziót [26], a termelési hatékonyság javításával a GHG-csökkentés alapvetően javítható, csökkenthető a légszennyezés a mezőgazdasági hulladékok égetésmentes újrahasznosításával, a „vissza a takarmányozásba” elv érvényesítésével, táplálkozási változtatások is csökkenthetik a kibocsátást, bár erről szinte semmi adat sincs. Vagyis a vörös húsok helyett tejtermék, baromfi, hal, tojás, növényi táplálékok fogyasztásával („low meat diet”) csökkenthető a nemkívánatos gázok emissziója [27,28].

Az élelmi nyersanyagok változékonysága, klímahatások

A technológiai, biotechnológiai fejlődés eredményeként 1961 és 2014 között az egyes növényfajokra mint nyersanyagokra vonatkozó hozamok jelentősen javultak: búza esetében 204%, a rizsnél 144%, a kukoricánál 189%-os hozamnövekedéseket detektáltak [21]. A jövőbeli változási trendeket (2050-ig), nyersanyagtípusonként elemzi az a munka [29], amely az agro-biotechnológiai perspektíva jövőbeli fejlődési irányait és a fenntartható intenzifikálás fő csapásait is taglalja.

Az egyes növényi nyersanyagokra vonatkozó, a klímaváltozás okán várható trendek összefoglalását találhatjuk Olesen és Bindi [30] munkájában, amelyben Európa területeire vonatkozóan a természetes és öntözéses területek jelenlegi és kétszeres CO₂-terhelésű termesztések esetén várható változásait elemzik, 2050-ig előre jelezve az adatokat.

Az egyes nyersanyagokra az alábbi fontos megállapítások tehetők:

- A gabonaféléknél, az olajmagvaknál és a hüvelyeseknél a klímaváltozás hatására növekedési periódus-csökkenés és hozamcsökkenés várható; megváltozik vagy meg kell változtatni a vetési időt, várható a hosszabb tenyészidejű fajták előretörése és a használható tenyészterületek északra tolódása. Európa északi területein nagyobb hozamok, míg a déli területeken kisebb hozamok és nagyobb instabilitások várhatók.
- A gumós és gyökérnövények erősen reagálnak a légköri CO₂-növekedésre; a felmelegedés csökkenti a tenyészidő hosszát és növeli a vízigényt. A burgonyánál nő a hozamvariabilitás és instabilitás, vagyis növekszik a termelési kockázat, míg a cukorrépánál a növekvő CO₂-koncentráció és hőmérséklet meghosszabbítja a termesztési periódust.

Általánosan igaz az a megállapítás, hogy a gabonafélék jobban tűrik a szárazságot, mint a hüvelyesek és a gumósok, aminek oka a gyökérrendszer-különbségekből eredeztethető [19]. Fontos a fenológiai fázis állapota is, ha a növényi növekedés második felében következik be a szárazság, az sokkal

nagyobb veszteségeket eredményez, mint a korai fázisú szárazság.

- A zöldek és a kertészeti növények erős, fajfüggő, CO₂- és hőmérsékletfüggő érzékenységet mutatnak, amiben fajtáként néha ellentétes hatások figyelhetők meg. (Hagyma esetén a magas hőmérséklet tenyészidő- és hozamcsökkenést okoz, sárgarépa esetén ugyanez a hatás hozamnöveléssel jár. Saláta esetében a hőmérséklet hatása csekély, ugyanakkor a CO₂-növekedés hozamnövelő hatású [31].)
- Az élő növények közül a szőlő termesztése a növekvő hőmérséklet következtében északi és keleti irányba „tolódik”, ugyanakkor az instabilitás és a változékonyság növekszik, bár a növekvő CO₂-terhelés pozitív hatású [32]. A globális felmelegedésnek pozitív hatása lehet az olajbogyó termesztésére is.
- A takarmánynövényeknél a növekvő légköri CO₂-koncentráció és hőmérséklet hozamnövekedést, ugyanakkor emésztetőségszűkítést eredményez; az északi területeken növekedni fog a kukoricaalapú takarmányanyagok mennyisége.
- A legelőterületek „hozama” óriási változékonyságot mutat attól függően, hogy monokultúra vagy fajgazdag területről beszélünk; a talajtípus és annak vízháztartása szintén meghatározó. Általában igaz, hogy a fajgazdag, jól öntözött és tápanyagellátott területek jól tűrik a magas CO₂-koncentrációt és a magasabb hőmérsékletet.
- A hőmérséklet növekedése az állattartás viszonyait is befolyásolja. A meleg periódusok csökkenő hatékonyságot, ugyanakkor csökkenő takarmányfogyasztást is eredményeznek. A növekvő hőmérséklettel növekszik az NH₃-kibocsátás [33]. A takarmányozás változtatásával a CH₄-kibocsátás csökkenthető és hatékony trágyakezeléssel (biogázcélú hasznosítás, N₂O-csökkentés előntőzéssel, a növényi hulladék visszaforgatása, rotáció, vetésforgó-optimalás) a veszteségek csökkenthetők.

A klímaváltozási hatások kezelésében várható jövőbeli tendenciák kiváló összefoglalását és kezelési módszereit bemutató munka [34] egyesíti az adaptáció és a veszteségcsökkentés 13 fontos stratégiai szempontját, kezdve a termőterületek módosulásától, a növelt toleranciájú és adaptív nemesítési módszereken át, a növényi akklimatizációs képességek fokozásán túl, a helyi termelési politikák finom szabályozásáig.

Peszticidhasználat

A növényi nyersanyagtermelés hatékonysága alapvetően függ a gyomokkal és a kórokozókkal szembeni védelemtől, ami a termelési biztonságot növeli. A klímaváltozás hatásai, köztük a hőmérséklet-növekedés, a csapadék mennyiségének, gyakoriságának és eloszlásának extrém változásai, valamint a különféle gyomok, kórokozók, patogének váratlan megjelenése erősen befolyásolja a peszticidek használatát, felhasználásuk kémiai formáját, mennyiségét, dózist, frekvenciáját és fajspecifikusságát.

A klímaváltozás miatti magas hőmérséklet, nagy nedvességtartalom és az intenzív napsugárzás gyorsítja a szerek degradációját, az extrém csapadékmennyiség pedig hígító hatású. Mindez csökkenti a peszticidek környezeti koncentrációját, növeli illékonyságukat és gyorsítja lebomlásukat. A klímaváltozás a kórokozók közötti interspecifikus változékonyságot is indukálja (kompetíció, predáció), ezzel a peszticidek hatását is befolyásolja [35].

A cél a kórokozók prevenciója, hatáscsökkentés, hozam- és minőségjavítás. Potenciális toxicitásuk ellenére ezekre a szerekre elengedhetetlenül szükség van az élelmiszer-biztonság és ellátás-biztonság érdekében.

A peszticidhasználat gazdasági, technológiai, szabályozási, valamint környezeti összefüggéseit kiválóan foglalja össze Delcour és munkatársai [36] munkája.

Az egyes nyersanyagoknál alkalmazható peszticidek használatát a hőmérsékleti és CO₂-viszonyok, az anyag-kártevő kölcsönhatások és az adaptációs körülmények határozzák meg.

A peszticidek eliminálódásának, „eltűnésének” mechanizmusa sokféle lehet:

- A peszticidtranszport párolgás útján gyorsan bekövetkezhet pl. magas hőmérséklet, nagy talajnedvesség, napsugárzás esetén [37]. Az elpárolgott szermaradvány ún. wet-deposition formában az extrém csapadékban újra megjelenhet [38].
- Az elsodródás, légárammal, csapadékkal történő transzfer [39] erős hatású lehet, amit az emelkedett hőmérséklet és magas talajnedvesség felerősít [40].
- A kilúgozódás, vagyis a szerek mélyebb talajrétegbe (és vízrétegbe) vándorlása szintén bekövetkezhet az extrém csapadék és hőmérséklet hatására [41].

A peszticidek normál degradációját a globális felmelegedés szintén gyorsítja, ami fototranszformáció, mikrobiológiai és kémiai degradáció révén még inkább felgyorsul. Általában a melegebb klíma nagyobb peszticidhasználatot igényel [42].

A peszticidek ökotoxikológiai viszonyai is megváltoznak, amennyiben pozitív korreláció tapasztalható a magas hőmérséklet és az ökotoxikológiai hatás között [43], kivéve a piretroidokat és a DDT-t, amelyek alacsony hőmérsékleten toxikusabbak [42].

Összefoglalóan elmondható, hogy

- új peszticid hatóanyagokra lenne szükség, amelyek jobban bírják a klímaváltozás körülményeit,
- mivel a klímaváltozás a növényi növekedési periódus hosszát megváltoztatja, a fenológiai változásokhoz alkalmazkodni kell a kezeléseknél (a nagyobb hozam, kisebb kockázat érdekében),
- kulcskérdés a gyomok, kártevők, betegségek gyakoriságváltozása és a peszticidhasználat kapcsolatának az extrém feltelekhez igazodó finomhangolása.

Adaptáció

A növényi nyersanyagok környezeti stresszadaptációjának óriási irodalmából [44] itt csak két szempontot szeretnénk említeni:

- A fenológiai alapú stresszadaptációs vizsgálatok a növények gyökérrendszerének, a növény más különféle morfológiai részeinek stresszre adott válaszát, ennek diagnózisát tűzik célul, és olyan szenzor alapú fenotipizálást használnak, amivel a várható hatások becsülhetők [45].
- A genetikai alapon történő adaptáció gyorsítása a genetikai diverzitás növelése, „egzotikus” genetikai források (germplasm) alkalmazása segítségével, ún. célzott javított adaptációt eredményez, ami megnyilvánulhat például a szárazságtűrésben, a fokozott sőtoleranciában, az elárasztás- vagy foszforhiány-toleranciában, esetleg a hatékonyabb biofortifikációs tulajdonságokban [46].

A cél mindenképp adaptációképes, ún. klímaellenálló növénykultúrák fejlesztése, amelyek termesztési régiókhoz igazodva alkalmazhatók, és ezzel az ún. „atlas of climate sensitivities” koncepció [44] megvalósítását szolgálják.

A klímaváltozás hatásai az élelmiszer-biztonságra

Ebben a fejezetben azokat a hatásokat elemezzük, amelyek az élelmiszer-minőséget és -biztonságot közvetlen vagy közvetve befolyásolhatják. Idesorolhatók a mikrobák, a zoonózisok és para-

zíták, a toxikus gombák, a mikotoxinok, az algák, a környezet-szennyező komponensek és a szermaradványok.

Mikrobiológiai változások, következmények

A klímaváltozás hatásai az epidemiológiai triád mindhárom elemére, a transzmisszió forrására és módjára, a patogének növekedésére és túlélésére a környezetben és az élelmiszer-mátrixra egyaránt hatással vannak [45].

A mikrobiológiai hatások legelső és talán enyhébb megjelenése a hasmenéses tünetcsoport, ami a hőmérséklet emelkedésével erősen növekszik, és a gasztroenteritisz-típusú tünetek erős fozódásával jár [46].

A szalmonellózis várható gyakorisága, minden 1 °C-os hőmérséklet-növeléssel 5–10%-os mértékben nő Európában és Ausztráliában egyaránt [47, 48].

A campilobakteriózis erős szezonális és regionális különbségeket mutat, a hőmérséklet-emelkedés okozta gyakoriságnövekedése kisebb a szalmonellózishoz viszonyítva [49,50,51].

A patogén *Vibrio* fajok az emelkedett környezeti és vízhőmérséklet, az áradások és sótartalom-változások miatt elsősorban a kagyló- és osztrigafogyasztók számára jelentenek nagyobb veszélyt [52].

Brit eredmények hívják fel a figyelmet a *Clostridium* és az *Aeromonas* fajok erős hőmérséklet- és klímaváltozási érzékenységre, amelyek súlyos, élelmiszer okozta betegségeket idézhetnek elő [53].

A virális eredetű élelmiszer-fertőzés növekedése nem várható, ha a szennyvízkezelés megfelelő és a zoonotikus vírusok kizárhatók (napjaink égető és válaszra váró kérdése a Covid19 pandémia kapcsán éppen ez).

A paraziták okozta potenciális veszélyek, tünetek intenzív csapadék és annak abnormális eloszlása esetén protozoák által lehetséges (cryptosporidiosis, giardiasis) [54].

Az élelmiszer-eredetű trematódák (szívóérgerek) átvitele a globális felmelegedés következtében felgyorsulhat, és főleg a nyers vagy nem megfelelően hőkezelt vízi élőlények élelmiszerként való használatát veszélyeztetik [55].

Léteznek ún. vektor okozta betegségek, amelyek emelkedett hőmérséklet esetén megjelenhetnek az élelmi láncban, mint a kullancs eredetű encefalitisz, ahol a vírus a kecsketej révén jut a fogyasztóba, vagy a Chagas-kór, amit a *Trypanosoma cruzi* parazita okoz, és ivóvíz esetében fordul elő [56].

Zoonózisok, paraziták

A zoonózisok, vagyis az állatokról emberre terjedő betegségek és patogének hatásai, ezek variabilitásai a klímaváltozás következtében jelentősen megváltoznak [47]. Ennek oka egyrészt az, hogy a paraziták életciklusa nagyon különböző és ez különböző mértékben változik, másrészt megváltoznak az expozíciós utak és a transzmisszió sebessége. A klímaváltozás e két utóbbi körülményt döntően, fajfüggő mértékben és módon befolyásolja. Ez óriási élelmiszer-biztonsági kockázatot jelent elsősorban a fejletlen régiók zoonózis (nyugat-nílusi láz, kullancs eredetű betegségek) és nem zoonotikus (kék nyelv, afrikai sertésláz) betegségei esetében is [57]. A klímaváltozás a zoonózis-viszonyokat az alábbi módon képes befolyásolni: növekszik az állatok betegséggel szembeni érzékenysége, növekszik a fertőző vektorok száma, tartománya és transzmissziós ciklusa, megváltoznak/megváltoztandó a tartási, kezelési és védekezési technológia.

A mikotoxinok változásai

A mikotoxinok legszélesebb körben vizsgált komponensei az *Aspergillus*, *Penicillium* és *Fusarium* penészgombák másodlagos

metabolitjai, amelyekre a klímaváltozás specifikus hatásokkal bír. A fuzáriumtoxinok (trihotecének, fumonizinek, moniliformin és zearalenonok) egy sor fuzáriumfaj (*F. verticilloides*, *F. proliferatum*, *F. sporotrichoides*, *F. graminearum*, *F. culmorum*) révén, növények szennyezéseként jelentkeznek.

A kukorica jellemző endofitája az *F. verticilloides*, ami mérsékelt égövi hőmérséklet esetén termel toxint, ugyanakkor magasabb hőmérsékleten (>25–28 °C) az *F. graminearum*, míg alacsony hőmérsékleten az *F. culmorum* toxinjai dominálnak. Búza, árpa és rozs esetében az *F. graminearum* és az *F. culmorum* jelenléte tipikus. A *graminearum* deoxinivalenolt (DON), nivalenolt (NIV) és zearalenont (ZER) termel, míg a *culmorum* csak DON- és ZER-termelő [58].

Európában a hőmérséklet-emelkedés következtében határozott *culmorum*–*graminearum* fertőzéssel-telődés tapasztalható, ami a DON/ZER-től NIV/ZER-felé mutató összetétel-változást eredményez. Amerikában a *graminearum* fajok DON-termelők, és emelkedett hőmérsékleten döntően fumonizint (FM) és moniliformin (MON) toxinokat termelnek. Szárazság-stressz hatására a magas FM toxintermelés tipikus kukorica esetén Dél- és Kelet-Afrikában is.

Az *Aspergillus* és *Penicillium* toxinok fontos képviselői az aflatoxinok (AF), az ochratoxin (OTA) és a patulin. Az *A. flavus*, *parviticus*, *nomius* fajok által termelt genotoxikus karcinogének a kukoricában, a földimogyoróban, a dióban, a fügében, a datolyában, egyes olajmagvakban és a gyapotban mutathatók ki. Ezen toxinok magas szintje korrelál a különféle növényi stresszekkel és sérülésekkel. Kukorica és búza esetében a rovarjárádások és szárazság okoz emelkedett AF-szintet. A földimogyoró virágzás alatti fertőzése magas AF-szintet eredményez, míg gyapot esetében a magas hőmérséklet és nedvességtartalom emeli a toxinszintet [59]. Az OTA és patulin toxinok szintje és a növényi stresszállapotok között nincs szignifikáns összefüggés [47].

A klímaváltozás két tekintetben lehet még hatással a penész-kolonializációra és a mikotoxintermelésre: a rovarok és a kártevők nagyobb gyakoriságú előfordulása és az ún. posztharvest folyamatok (tárolás alatti változások, vízaktivitás változás, tisztítás) révén.

Az algák változásai

Röviden szólni kell a táplálékláncban helyenként használatos algaeredetű toxikus komponensekről. A toxintermelő HAB-ok (harmful algal blooms) egy sor súlyos, esetenként halálos tünetcsoport (légzési, emésztőrendszeri, idegrendszeri, keringési problémák) kiváltásáért felelősek. Ráadásul íztelenek, szagtalanok, hő- és savtűrők, ezért óriási veszélyt jelentenek a táplálkozásban. Kiterjedten vizsgálják a két fő funkcionális algacsoport, a diatomok (kovamoszatok) és dinoflagellák (ostorosok) klímaváltozaskor várható növekedés- és toxicitásváltozásait. A tengervíz hőmérsékletének alakulása a két csoport relatív arányait, helyspecifikusan és vízrétegtől függően, lényegesen befolyásolja. A hőmérséklet-emelkedés alapvetően növeli a HAB-terhelést [60], és az algaközösségek vegetációs periódusa 2100-ra emiatt elérheti a jelenlegi 3-szorosát [61]. Az egyes algafajok és területi változékonyságaik óriásiak lehetnek [62, 63].

A klímaváltozás további hatása, hogy az extrém csapadék és gyors áradások következtében, a megnövekedő N- és P-kimosódás miatt a fitoplankton-közösségek biomasszatömege (vagyis a HAB-terhelés) erősen növekszik és változik. A változások leginkább aggasztó körülménye, hogy a toxikus algatömeg növekedése mellett az algák inkorporációs kapacitása is megnő.

Környezetszennyezők, szermaradványok

A környezetszennyező és szermaradvány-komponensek különböző „útvonalakon” válnak veszélyessé és jutnak az élelmi láncba. A klímaváltozás során bekövetkező áradások révén a folyóüledékekből remobilizált dioxinok és dibenzofuránok (PCDD/PCDF) a termőföldre, illetve a táplálékláncba kerülnek [64]. A Katrina hurrikán idején az áradás eredményeképp a finomító primer hulladékaiban túl peszticidek, fémionok, veszélyes hulladékok, hatértékű krómvegyületek, p-krezol, toluol, fenol, 2,4-D, Ni-, Al-, Cu-, V-, Zn-, Pb-vegyületek, benzidin és illékony szerves savak [65] jutottak a környezetbe. A vizek műtrágya-, peszticid-, szervesanyag- és nehézfém-szennyezése, az intenzív esők, a hőmérséklet-emelkedés és a talajból való kimosódás miatt növekszik [66]. E hatás még fokozottabb, ha szárazság előzi meg az intenzív csapadékot. A tengerek és óceánok felmelegedése felgyorsítja az élelmi láncra veszélyes Hg-vegyületek metilációs folyamatait és ezek halakba, tengeri emlősökbe, algákba való beépülését.

A talaj klímaváltozás okozta degradációja a szárazság-áradás frekvenciájának növekedése miatt gyorsulhat elsősorban a hibás mezőgazdasági technológiák (monokultúra, peszticidfelesleg, túltözés stb.) miatt.

A peszticidhasználatot és a környezeti maradványok alakulását a klímaváltozás úgy is befolyásolja, hogy megváltozhat a kártevők fejlődési ciklusa és éves generációs periódusa (esetleg hidegtűrése) vagy a gazdanövény kártevővel szembeni érzékenysége.

Egy sor peszticid például száraz körülmények között kevésbé hatékony (illetve magasabb hőmérsékleten gyorsabban degradálódik), így a szükséges, nagyobb dózisú és frekvenciájú használat túlterhelést okozhat kukoricánál, búzánál, burgonyánál, gyapottonál és szójánál [67]. Ezért a Jó Mezőgazdasági Gyakorlat (GAP) ilyen tekintetben is döntő; pontos, lokális finomhangolást igényel.

A peszticidek mellett az állatgyógyszer-maradványokkal mint módosuló környezeti szennyezőkkel is számolni kell, hisz a zoonózis-viszonyok és érzékenységváltozás következtében főleg a vektoreredetű betegségek és makroparaziták, valamint vízkultúrák esetében alkalmazott szerek maradványai jelentenek új élelmiszer-biztonsági kockázatot.

A klímaváltozás élelmezési és táplálkozási vonatkozásai

A klímaváltozás a kis GDP-vel rendelkező országokban (alapvetően az ún. Global South régió) nyilvánvalóan alultápláltságot okoz, ami vízhiánnyal, illetve rossz vízminőséggel tetézve súlyos ellátási, közegészségügyi, járványügyi állapotokat eredményez. Az alultápláltság hosszú távú hatásai különösen az első 5 életévben kritikusak (magas mortalitás, fertőzőtlenség, fejletlenség, kognitív zavarok). Közepes várható klímaváltozás esetén 2050-ig a világon további 4,8 millió alultáplált gyermekkel kell számolni [68]. A hőstressz következtében extrém magas az éretlen, kis súlyú csecsemők aránya és fertőzőtlensége [69], a klímaváltozás tehát azonnal sokkhatást jelent és hosszú távú stresszforrásként hat [70].

A tápanyaghiány, vagyis a diéták változása következtében 2050-ig további félmillió halálesettel lehet számolni, aminek a diétában bekövetkező változások (csökkent zöldség- és gyümölcsfogyasztás, egyoldalú diéta, hiánykomponensek növekedése) lesznek az okai [71]. Az élelmi lánc jellemző változása lesz, hogy a klímaváltozás eredményeképp a nedves területek még nedvesebbé, a szárazok még szárazabbá válnak, ami miatt csökken a kórokozók és a betegségekkel szembeni ellenállás [72]. A növekvő

CO₂-terhelés csökkent fehérje-, Fe- és Zn-szintekhez vezet a diétában [73]. A klímaváltozás a tárolás, feldolgozás, szállítás „útvonalán” is veszteségeket okoz, és növeli a fertőzésveszélyt.

Ugyanakkor a táplálkozási szokások, diéták befolyásolják a klímaváltozást. Az élelmi láncok az antropogén üvegházhatást kb. 20–25%-kal növelik, sőt egyes „ortodox zöld” megállapítások szerint az állati eredetű élelmiszerek (elsősorban a szarvasmarha) a légszennyezés, a talaj- és talajvízszennyezés [72,74] fő okozói. A negatív környezeti hatás a szarvasmarha, sertés, baromfi „útvonal” mentén jelentősen csökken [75]. Az állati eredetű termékek „túlfogyasztása” (USA, Európa) tehát alapvető kiváltója a klímaváltozásnak, aminek hatásai aránytalanul nagyok a Global South régióban [76]. Globális szinten pedig az állati termékek iránti ilyen mértékű, növekvő igény fenntarthatatlan, sőt táplálkozási anomáliákhoz vezet [77].

Az ún. klímaérzékeny élelmi láncok a következő három lehetőséggel alakíthatók ki [78]: az élelmiszer-termelés hatékonyságának növelése, a veszteségek minimalizálása, az üvegházhatású gázok csökkentése, új adaptációs stratégiák kialakítása a sérülékeny populációk számára. Az ehhez szükséges „eszközök” között olyan technológiák jöhetnek számításba, mint például a hűtés vagy hűtve tárolást kerülő módszerek, a tápértéket megtartó, kémleletes feldolgozási eljárások vagy a klímaérzékeny, adaptált mezőgazdasági módszerek.

A klímaváltozás okozta, táplálkozási szempontból kritikus változások csökkentésére irányuló lehetséges akciótervek 7 legfontosabb irányát foglalja össze Fanzo és munkatársai (2018) munkája [79], amelynek fő pontjai: az élelmi lánc inputjai, a termelés, a posztharvest-technológiák, elosztás és kereskedelem, fogyasztás és hasznosulás, korai riasztórendszerek és a célirányos kutatások.

Modellezési lehetőségek, módszerek

A klímaváltozás élelmi láncra gyakorolt primer és további szocio-ökonómiai és környezeti hatásainak modellezése és prediktív előjelzése egyelőre kevés valós eredménnyel kecsegtet. Széleskörűen alkalmazott prediktív modellek léteznek az élelmiszer-eredetű betegségek, a mikotoxin-kontamináció, az algák és a kémiai szennyezők mint elemek becslésére [47], ugyanakkor a komplex modellezés (ún. scenario-based projection) rengeteg bizonytalansággal terhelt.

Széleskörűen terjednek a rövid távú, 3–10 éves periódusú prediktív, lokális korlátokat tartalmazó modellek [80]. Módszertanukban a dinamikus szimuláció, a matematikai programozás és a többváltozós ún. agent-based modellezés terjedtek el. Bármelyik módszer és/vagy kombinációik alkalmazása esetén a modellek bár elég dinamikusak és flexibilisek, mégsem képesek a klímaváltozás integrált hatásainak kvantitatív becslésére. A modellek segítik a helyes döntéshozást, de nem elég robusztusak a hatások és az adaptációs opciók kijelöléséhez. A modellezés prediktív értékének javításához fontos lehet: a meglévő információforrások kihasználása, információcsere, együttműködés, a szennyezések célzott felügyeletének fejlesztése, adatcserék, adatbázis-fejlesztés, stressz-tesztek, expozíciós modellek fejlesztése az egyes szennyezők és környezeti változók becslésére [81].

Feltételezések, kitekintés, következtetések, javaslatok

A klímaváltozás rendkívül komplex „eseményesorok” összessége, így felismerése, megértése, kezelése interdiszciplináris közelíté-

seket igényel (környezetvédelem, mezőgazdasági, állat-, növény-, humán egészségügyi hatások, higiénia stb.).

A különféle Jó Gyakorlatok (mezőgazdasági, higiéniai, állattartási, egészségügyi, vízkultúra stb.) iránymutatásainak betartása a változási „dinamikák” követését, az adaptációt könnyebbé tehetik.

A folyamatos felügyeleti és monitoring tevékenységek révén (növény, állat, élelmiszer, humán, környezet) nemcsak a korai felismerés és trendmeghatározás, az egészségvédelem lesz hatékony, hanem adatok generálódnak a prediktív modellezés és a kockázatbecslés céljaira is.

A nemzeti és nemzetközi szintű kockázatbecslési módszerek és eljárások, a különféle veszélykritériumok határait és mértékét definiálva, lehetővé teszik a gyors beavatkozást.

A nagy frekvenciájú, pontos adatgyűjtés és adatmegosztás révén, a prediktív modellezési módszerek fejlesztésével, a modellek komplexitása és robusztussága javítható, a bizonytalansági tényezők csökkenthetők.

A gyors, korai riasztórendszerek hazai és nemzetközi alkalmazása alapvetően csökkenti az élelmiszer-biztonsági kockázatokat. Ezek azonnali, készenléti állapota alapvető fontosságú.

A fogyasztó tájékoztatása és felvilágosítása alapvetően fontos, hisz a „láthatatlan” veszély, illetve annak kezelése alapvetően egészségmeghatározó (lásd Covid19).

Az új tudományos és technológiai innovációk bevezetése révén (pl. új molekuláris biológiai módszerek alkalmazása komplex mikrobiológiai közösségek jellemzésére, patogének vagy szennyezők gyors kimutatása, nanotechnológiai eljárások alkalmazása az analitikai eljárásokban) a környezetvédelmi és élelmiszer-biztonsági veszélyek sokkal gyorsabban ismerhetők fel.

A változások gyors és hatékony felismeréséhez a tudományos és technikai infrastruktúra, a kapacitások bővítése elengedhetetlen.

Mivel a klímaváltozás és hatásai „határtalanok”, a nemzetközi együttműködés, információ és adatcsere, valamint ezen együttműködés nemzetközi keretei és szervezetei alapvető fontosságúak.

Végezetül szólni kell a magyar élelmiszer-egészségügyi, élelmiszer-biztonsági rendszerről és szervezetekről, amelyek tradicionálisan magas szakmai és technikai színvonalon gondoskodnak a hazai élelmiszer-ellátás és élelmiszer-biztonság feltételeiről és a környezeti vagy klímaváltozás okozta anomáliák hatékony kezeléséről.

Köszönetnyilvánítás. Köszönettel tartozom Besenyő Gabriella tanszéki mérnöknek a cikk elkészítéséhez nyújtott irodalmazási munkájáért.

IRODALOM

- [1] C. C. Mann, Can Planet Earth Feed 10 Billion People. The Atlantic (2018) March.
- [2] Y. Hayami, V. W. Ruttan, in: Agricultural Development: An International Perspective. John Hopkins University Press, Baltimore, 1985.
- [3] S. Damkjaer, R. Taylor, The measurement of water scarcity: defining a meaningful indicator. *Ambio* (2017) 46, 513–531.
- [4] H. Xu, M. Wu, Water availability indices – a literature review. U.S Department of Energy, Energy Systems Division Report ANL/ESD-17/5 February. 2017.
- [5] M. Falkenmark, Fresh water: time for a modified approach. *Ambio* (1986) 15, 192–200.
- [6] FAO AQUASTAT (2016) Japan. Retrieved from: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/JPN/.
- [7] IPCC, in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 2013, 1535.
- [8] T. B. Pathak et al., Climate change trends and impact on California agriculture: a detailed review. *Argonomy* (2018) 8, 1–27.
- [9] D. Zilbernam et al., in: Innovation in Response to Climate Change. Springer and FAO, Berlin, 2018, 49–74.
- [10] H. Turral et al., Climate Change, Water and Food Security. In: FAO Water Reports 36. FAO, Rome, 2008.
- [11] M. Giordano et al., Beyond more crop per drop: Evolving thinking on agricultural water productivity. In: IWMI Research Report 169. Colombo, Sri Lanka, 2017.
- [12] T. Wheeler, J. von Braun, Climate change impacts on global food security. *Science* (2013) 341, 508–513.
- [13] K. McNeill et al., Food and water security: analysis of integrated modeling reforms. *Agric. Water Manag.* (2017) 194, 100–112.

- [14] S. M. Scheierling, D. O. Tréguer, Beyond crop per drop: Assessing agricultural water productivity and efficiency in a maturing water economy. In: International Development in Focus, Washington, DC World Bank, 2018. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29922>
- [15] J. Wang et al., Impacts of groundwater markets on agricultural production in China. In: Managing water on China's farms, institutions, policies and the transformation of irrigation under scarcity. Elsevier, 2016, 123–132.
- [16] E. Ostrom, Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *Am. Econ. Rev.* (2010) 100, 641–672.
- [17] M. F. Acevedo, Food security and the environment: Interdisciplinary research to increase productivity while exercising environmental conservation. *Glob. Food Secur.* (2018) 16, 127–132.
- [18] X. Yang et al., The *Kalanchoe* genome provides insights into convergent evolution and building blocks of crassulacean acid metabolism. *Nat. Commun* 8, (2017) 1899.
- [19] S. Daryanto et al., Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agric. Water Manag.* (2017) 179, 18–33.
- [20] A. Dinar et al., Water scarcity impacts on global food production. *Global Food Security* (2019) 23, 212–226.
- [21] F. Sun et al., Air pollution, food production and food security: A review from the perspective of food system. *Journal of Integrative Agriculture* (2017) 16, 2945–2962.
- [22] <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- [23] A. N. Hristov, Contribution of ammonia emitted from livestock to atmospheric fine particulate matter (PM_{2.5}) in the United States. *Journal of Dairy Science* (2011) 94, 3130–3136.
- [24] S. E. Bauer et al., Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation. *Geophysical Research Letters* (2016) 43, 5394–5400.
- [25] H. Hou et al., Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China. *Chemosphere* (2012) 89, 884–892.
- [26] J. Ricker-Gilbert et al., What are the effects of subsidy programs on maize prices? *Agricultural Economics* (2013) 44, 671–686.
- [27] L. C. Weber, H. S. Matthews, Food-miles and the relative climate impacts of food choices in the U.S. *Environmental Science and Technology* (2008) 42, 3508–3513.
- [28] T. Garnett, Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy* (2011) 36, S23–S32.
- [29] A. Tyczewska et al., Towards food security: Current state and future prospects of agrobiotechnology. *Trends in Biotechnology* (2018) 36, 1219–1229.
- [30] J. E. Olesen, M. Bindi, Consequences of climate change for European agriculture productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* (2002) 16, 239–262.
- [31] S. Pearson et al., A validated model to predict the effects of environment on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.): implication for climate change. *J. Hortic. Sci.* (1997) 72, 503–517.
- [32] M. Bindi, L. Fibbi, Modeling climate change impacts at the site scale of grapevine. In: Climate change, climatic variability and agriculture in Europe. Environmental Change Unit. University of Oxford, UK, 2000, 117–134.
- [33] S. G. Sommer, J. E. Olesen, Modelling ammonia volatilization from animal slurry applied to cereals. *Atmos. Environ.* (2000) 34, 2361–2372.
- [34] A. Tripathi et al., Agriculture, Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: A review on current knowledge and future prospects. *Ecosystems and Environment* (2016) 216, 356–373.
- [35] V. Lepetz et al., Biodiversity monitoring: Some proposal to adequately study species' responses to climate change. *Biodiversity and Conservation* (2009) 18, 3185–3203.
- [36] I. Delcour et al., Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International* (2015) 68, 7–15.
- [37] P. O. Otieno, Impacts of climate-induced changes on the distribution of pesticides residues in water and sediment of Lake Naivasha, Kenya. *Environmental Monitoring and Assessment* (2013) 185, 2723–2733.
- [38] D. B. Donald et al., Pesticides in surface drinking water supplies of the northern Great Plains. *Environmental Health Perspectives* (2007) 115, 1183–1191.
- [39] D. P. Oliver et al., The off-site transport of pesticide loads from two land uses in relation to hydrological events in the Mt. Lofty Ranges, South Australia. *Agricultural Water Management* (2012) 106, 70–77.
- [40] M. Carere et al., Potential effects of climate changes on the chemical quality of aquatic biota. *Trends in Analytical Chemistry* (2011) 30, 1214–1221.
- [41] E. Lewan et al., Implications of precipitation patterns and antecedent soil water content for leaching of pesticides from arable land. *Agricultural Water Management* (2009) 96, 1633–1640.
- [42] P. D. Noyes et al., The toxicology of climate change: Environmental contamination in a warming world. *Environmental International* (2009) 35, 971–986.
- [43] A. Seeland et al., Aquatic ecotoxicity of the fungicide pyrimethanil: Effect profile under optimal and thermal stress conditions. *Environmental Pollution* (2012) 168, 161–169.
- [44] S. L. Dwivedi et al., Food, nutrition and agrobiodiversity under global climate change. *Advances Agronomy* (2013) 120, 62–87.
- [45] A. Hartmann et al., HTPheno: an image analysis pipeline for high-throughput plant phenotyping. *BMC Bioinf.* (2011) 12, 148.
- [46] S. L. Dwivedi et al., Nutritionally enhanced staple food crops. *Plant Breed. Rev.* (2012) 36, 169–291.
- [47] M. C. Tirado et al., Climate change and food safety: A review. *Food Research International* (2010) 43, 1745–1765.
- [48] H. Bambrick et al., The impacts of climate change on three health outcomes: Temperature related mortality and hospitalizations, salmonellosis and other bacterial gastroenteritis, and population at risk from dengue. In: Garnaut climate change review, Australia, 2008, 59.

- [49] R. S. Kovats et. al., The effect of temperature on food poisoning: Time series analysis in 10 European counties. *Epidemiology Infection* (2004) 132, 443.
- [50] P. Bi et. al., Climate variability and Salmonella infection in an Australian temperate climate city. In: Conference of the international society of environmental epidemiologists, Dublin, 2009.
- [51] R. S. Kovats, Climate variability and campylobacter infection: An international study. *International Journal of Biometeorology* (2005) 49, 207–214.
- [52] M. Zimmermann et. al., Variability of total and pathogenic vibrio parahaemolyticus densities in Northern Gulf of Mexico water and oysters. *Applied and Environmental Microbiology* (2007) 73, 7589–7596.
- [53] I. R. Lake et. al., A re-evaluation of the impact of temperature and climate change on foodborne illness. *Epidemiol. Infect.* (2009) 137, 1538–1547.
- [54] U. Confalonieri et. al., in: *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II. to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge University Press, 2007, 391–431.
- [55] R. Poulin, K. N. Mouristen, Climate change, parasitism and the structure of intertidal ecosystems. *Journal of Helminthology* (2006) 80, 183–191.
- [56] K. S. Pereira et. al., Transmission of Chagas disease by food. *Advances in Food and Nutrition Research* (2010) 59, 63–85.
- [57] K. S. Utaaker, L. J. Robertson, Climate change and foodborne transmission of parasites: A consider of possible interactions and impacts for selected parasites. *Food Research International* (2015) 68, 16–23.
- [58] J. D. Miller, Mycotoxins in small grains and maize. *Food Additives and Contaminants* (2008) 25, 219–230.
- [59] Synthesis and assessment product 4.3, USDA. The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources and biodiversity in the United States. USDA, 2008.
- [60] L. Bopp et. al., Response of diatoms distribution to global warming and potential implications: A global model study. *Geophysical Research Letters* (2005) 32, 1–4.
- [61] S. K. Moore et. al., Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environmental Health* (2008) 7 (Suppl. 2), S4.
- [62] M. J. Edwards et. al., Regional climate change and harmful algal blooms in the northeast Atlantic. *Limnology and Oceanography* (2006) 51, 820–829.
- [63] G. Hallegraeff et. al., Recent range expansion of the red-tide dinoflagellate in Australian coastal waters. *IOC–UNESCO Harmful Algae Newsletter* (2008) 38, 10–11.
- [64] G. Umlauf et. al., The situation of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs after the flooding of river Elbe and Mulde in 2002. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica* (2005) 33, 543–554.
- [65] J. Manuel, In Katrina's wake. *Environmental Health Perspectives* (2006) 114, 32–39.
- [66] Soil erosion and run-off cropland. In: Report from the USA, Soil and Water Conservation Society, 2003, 63.
- [67] C. Rosenzweig et. al., Climate change, crop pests and diseases. In: *Climate change futures: Health, ecological and economic dimensions.* 2005, 70–77.
- [68] Global food policy report. In: *Extended results of the IMPACT model.* IFPRI, Washington, DC, 2017.
- [69] K. Grace et. al., Linking climate change and health outcomes: Examining the relationship between temperature, precipitation and birth weight in Africa. *Glob. Environ. Chang.* (2015) 35, 125–137.
- [70] J. Fanzo et. al., Climate change and variability. What are the risk for nutrition, diets and food systems? In: IFPRI discussion paper 1645. Washington, DC, 2017.
- [71] M. Springmann et. al., Global and regional health effects of future food production under climate change: a modelling study. *Lancet* (2016) 387, 1937–1946.
- [72] J. Ranganathan et. al., Shifting diets for a sustainable food future. In: *Creating a sustainable food future.* Washington, DC, 2016.
- [73] S. S. Myers et. al., Effects of increased concentration of atmospheric CO₂ on the global threat of Zn deficiency: a modelling study. *Lancet Glob. Heal.* (2015) 3, e639–e645.
- [74] L. Bouwman et. al., Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (2013) 110, 20882–20887.
- [75] J. A. Foley, A five-step global plan could double food production by 2050 while greatly reducing environmental damage. *Sci. Am.* (2011) 305, 60–65.
- [76] J. de Boer et. al., Help the climate, change your diet: a cross-sectional study on how to involve consumers in a transition to a low-carbon society. *Appetite* (2016) 98, 19–27.
- [77] W. You, M. Henneberg, Meat consumption providing a surplus energy in modern diet contributes to obesity prevalence: an ecological analysis. *BMC Nutr.* (2016) 2, 22.
- [78] L. Lipper et. al., Climate-smart agriculture for food security. *Nat. Clim. Chang.* (2014) 4, 1068–1072.
- [79] J. Fanzo et. al., The effect of climate change across food systems: Implications for nutrition outcomes. *Global Food Security* (2018) 18, 12–19.
- [80] M. T. van Wijk et. al., Farm household models to analyse food security in a changing climate: A review. *Global Food Security* (2014) 3, 77–84.
- [81] H. J. P. Marvin et. al., Proactive system for early warning of potential impacts of natural disasters on food safety: Climate-change-induced extreme events as case in point. *Food Control* (2013) 34, 444–456.

ÖSSZEFOGLALÁS

SALGÓ ANDRÁS: AZ ÉLELMISZERIPAR KIHÍVÁSAI:

A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSAI AZ ÉLELMISZERBIZTONSÁGRA

A globális klímaváltozás és annak intenzív variabilitása az élelmiszerláncra és az élelmiszer-biztonságra, valamint az ellátásbiztonságra vonatkozóan jelentős veszélyeket hordoz az elsődleges nyersanyagtermeléstől a fogyasztóig. Cikkünk a klímaváltozás hatásaitként az élelmiszernyersanyag-termelésre gyakorolt hatásokkal (vízellátás, légszennyezés, nyersanyag-változékonyság, védekezésben használt anyagok); az élelmiszer-biztonságra kifejtett hatások változásaival (mikrobiológiai változások, paraziták, mikotoxinok, egyéb környezet szennyezők); és a táplálkozási következményekkel, a humán hatások várható következményeivel foglalkozik. Összefoglaljuk a klímaváltozás lehetséges modellezési módszereinek fejlődési tendenciáit és kitekintést adunk a várható tendenciák és javaslatok tekintetében.

Nagyházi Márton – Tuba Róbert

■ Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet | tuba.robort@ttk.hu

A zöld kémia válasza az éghajlatváltozásra

A történelem minden időszakában voltak már világméretű válságok. Mára talán elég bölcs és érett az emberiség arra, hogy a tudomány eszközeivel előre jelezze az efféle veszteséges korszakokat, és azokra idejében megfelelő válaszokat adjon. S bár tudjuk jól, hogy a természet is ezer veszedelemmel leselkedik az emberi életre, a legnagyobb veszélyt kétségkívül mégis maga az ember jelentheti saját magára. Ennek legutóbbi s vélhetően legnagyobb kicsúcsosodása a bolygó méretű éghajlatváltozás.

Földünkön az élet azért alakulhatott ki, mert paradís légköré lehetővé tette a víz körforgásának beindulását. A légkörünket alakító gázokból néhány ugyanis képes a beérkező napfényből kép-

zódó hőenergiát (infravörös sugárzást) megkötni, és így szabályozni a Föld légkörének hőmérsékletét. Ezért többek között ezeknek a gázoknak is köszönhető, hogy olyan klíma jött létre a Föld felszínén, amely lehetővé tette az élet kialakulását. Ezt nevezzük üvegházhatásnak. E jelenség hiányában bolygónkon nap és árnyék közt akár kétszáz fok hőmérséklet-különbség is lehetne, ahogyan ez a Holdon vagy a Merkúron is van [1]. Ha viszont a jelenség túlszalad, és a légkör túl sok energiát köt a felszínhez, akkor az időjárás a Vénuszon uralkodóhoz válik hasonlóvá, amelyen 4–500 °C-os forróság tombol (itt a légkör több mint 90%-a szén-dioxid). S bár ez a bolygó nyilvánvalóan közelebb kering a

Naphoz, mint a Föld, szén-dioxid-dús légköre mintegy kétszáz fokot emel a felszín hőmérsékletén [2].

Nagyon fontos tehát, hogy tisztában legyünk a Föld légkörének állapotával, mert annak összetétele közvetlenül befolyásolja éghajlatunkat. Az utóbbi évtizedekben a megfigyelések egyértelműen az üvegházhatás fokozódását mutatják, amint azt a felmelegedés, valamint az időjárás szélsőségesessé válása is jelzi.

Mi lehet mindennek az oka? Geológiai megfigyelések és mérések arra engednek következtetni, hogy a bolygónk történetében volt már a mainál sokkal melegebb és hűvösebb időjárás is [3]. A jelenleg tapasztalható felmelegedés fő okának az üvegházhatású gázok légköri koncentrációjának utóbbi évszázadban bekövetkezett növekedését tartják, ezzel korrelál a hőmérséklet-emelkedés is. Mivel az üvegházhatású gázok az ipari forradalom óta döntő többségében emberi tevékenységekből származnak, ezért joggal feltételezzük, hogy a felmelegedés fő oka az emberi tevékenység.

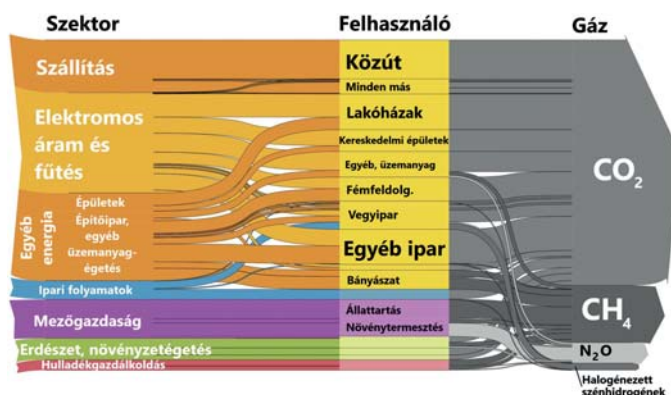
Az üvegházhatású gázok a légkörnek csekély részét alkotják. A leggyakrabban előforduló ilyen gáz a szén-dioxid, melynek átlagos koncentrációja a légkörben 390 ppm [4]. Emellett találhatóak más gázok is a légkörben, melyek ilyen hatást mutatnak – s bár koncentrációjuk ennél kisebb, a hőszugárzást visszatartó hatásuk nagyobb (Global Warming Potential, GWP), mint a szén-dioxidé (GWP = 1). Így ezekkel is számolni kell, ha valós képet szeretnénk kapni a hőviszátartásra gyakorolt hatásokról [5]. Ide tartoznak a nitrogén-oxidok (GWP = 60–300 [itt a nitrogén és az oxigén összes kombinációját értjük]), a metán (GWP = 25) és a halogénezett szénhidrogének (GWP = 12,200–22,800) [6]. Emellett figyelembe kell venni az egyes komponensek légköri tartózkodási idejét is. Mivel a Föld légköre oxidatív jellegű, a metán [7] és a nitrogén-oxidok [8] idővel átalakulnak, és a csapadék a földfelszínre mossa őket. Szintjük azért nem csökken, mert természetes körforgásban vannak, melynek egyenlege – nagyrészt az emberi kibocsátás miatt – pozitív [7,8]. A halogénezett szénhidrogének is képesek bomlani a légkörben (elsősorban a Nap sugárzásának hatására), ám ez nagyon lassú folyamat.

E hatásokat összevetve arányos, súlyozott képet kaphatunk arról, melyik gáz milyen mértékben járul hozzá az üvegházhatáshoz. Látható, hogy bár a halogénezett szénhidrogének, a metán és a nitrogén-oxidok térfogatarányukhoz képest jóval nagyobb mértékben járulnak hozzá ehhez, még így is a szén-dioxid felelős a hőviszátartás döntő többségeért (**1. ábra**).

Szerepet játszik az üvegházhatásban még a légkör vízgőztartalma és az aeroszolok (por, felhők) árnyékoló hatása is. Kimu-

1. ábra. A világ üvegházhatásúgáz-kibocsátási értékei fajta- és szektorra bontva szén-dioxid-ekvivalensben megadva

Forrás: World Resources Institute, a Climate Watch adatai alapján



tatható ugyan, hogy a vízgőz is hozzájárul a hőviszátartáshoz, azonban ez a tényező a víz körforgása miatt közel állandó hatásnak tekinthető, mely csak a hőmérséklet függvénye, arra pedig a többi üvegházhatást okozó gáz koncentrációjának növekedése is képes hatni. A felhőzet és egyéb aeroszolok árnyékolják a Föld felszínét, s ezért ezek mérsékelik az üvegházhatást [9]. Minden hatást összevetve azonban egyértelműen látszik, hogy az üvegházhatás erősödik, bolygónk melegszik.

Az üvegházhatású gázok közül tehát a legjelentősebb a szén-dioxid. Ez széntartalmú anyagok oxidációja során keletkezik, döntő többségében tüzelőanyagok égetéséből, de termelődik valamennyi például karbonátos kőzetek hevítésekor (építőanyaggyártás), illetve bányászati, ipari melléktermékek elégetésekor. Az emberiség a napi szükségletek fedezéséhez szükséges energiát túlnyomórészt – nagyon leegyszerűsítve – abban a kémiai reakcióban nyeri, melyben a szén oxigénnel egyesítve hőt szabadít fel, és szén-dioxid keletkezik. Jó jel, hogy a megújuló energia részaránya mindezek mellett is folyamatosan emelkedik.

Mivel az égetéshez nem tiszta oxigént, hanem levegőt használunk fel, az égetés hőmérsékletén a nitrogén is reagál az oxigénnel: ez eredményezi a szén-dioxidhoz képest akár nagyságrendekkel nagyobb hőviszátartó képességű nitrogén-oxidok keletkezését [10,11]. Jelentős mennyiségű nitrogén-oxid-kibocsátással jár továbbá a mezőgazdaságban a nitrogén-műtrágyázás [12].

A metán (GWP = 25) jellemzően élő szervezetekben termelődik, legnagyobb kibocsátója az állattartás. Kisebb részben lápos, mocsaras vidékeken is keletkezik anaerob bomlás következtében [13]. Ez a tundravídek mocsaraiban az utóbbi időben felgyorsult, ugyanis a felmelegedés miatt felengedő lápos talajból első-
kik az addig a fagy fogságában tartott metángáz [14].

A halogénezett szénhidrogének (GWP = 12,200–22,800) légköri térfogataránya ugyan nagyon kicsi, ehhez képest mégis számottevő mértékben járulnak hozzá a felmelegedéshez. Forrásuk elsősorban egy elavult technológia: ezeket az anyagokat hűtőgépekben használták nemrég elrendelt betiltásukig, ugyanis mérgező hatásuk mellett súlyosan károsítják a Föld ózonrétegét. Napjainkban már létezik alternatíva a kiváltásukra. Bár arányuk a légkörben lassan csökken, élettartamuk viszonylag nagy, és ezért egy jó darabig még biztosan számolni kell a jelenlétükkel [15,16].

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának részaránya nagyban függ a régiótól, a gazdaság különböző szektorainak arányától. Világszinten vizsgálva a kérdést kijelenthető, hogy a kibocsátás bő háromnegyedéért az ipar, az energiatermelés és a szállítmányozás a felelős, míg a maradékon a mezőgazdaság és a fogyasztók (háztartások, kereskedelem) osztoznak (**1. ábra**).

Akármely forrásból tájékozódjunk is az ember, vitán felül áll, hogy az energiatermelés a legnagyobb kibocsátó. Az energia legnagyobb részét – a felhasználó szektortól függetlenül – még mindig széntartalmú anyagok elégetésével állítják elő.

A szénnek mint primer energiahordozónak alternatívája jelenlegi tudásunk szerint a hasadóanyagok és a megújuló energiaforrások (nap-, szél-, víz-, geotermikus energia) lehetnek. A szén és a szénvegyületek olyan mértékben univerzálisan használható energiaforrások, hogy ehhez mérhetően jelenlegi technikai fejlettségünk szintjén csak az elektromos áram lenne reális alternatíva, mely viszont már szekunder energiahordozó. De még ezt is döntően fosszilis eredetű, széntartalmú anyagok égetésével állítják elő. Az atomenergia számos országban – biztonsági és társadalmi szempontból – nem szívesen látott alternatíva, a megújuló energiaforrások kiaknázása pedig függ a természeti adottságoktól, és még nem kellően hatékony. Ráadásul gazdaságos meg-

oldást kellene találni az energiatárolás és -szállítás problémájára is, mely legalább enyhíteni tudná az elektromosáram-felhasználás ingadozásából adódó veszteségeket, valamint a termelés területi inhomogenitását [17].

Mit tehet ilyen helyzetben a szűkebb értelemben vett vegyipar? E kérdés megválaszolása azért is különösen fontos, mert a társadalom az ágazattal szemben sajnos kevesebb bizalommal van, mint más kibocsátókkal. Mindezek ellenére amíg más ágazatok (például a közlekedés és az energiatermelés) úgynevezett zöldítése társadalmi és politikai nyomásra is látványosan halad, a vegyipar esetén ez a hatás inkább tudományos és gazdasági eredetű, tehát a szakma jobbra magát újítja meg. Az új szemlélet előfutára az úgynevezett zöld kémiai alapelvek megjelenése volt a kilencvenes években [18]. Az elv megalkotói tizenkét pontban fogalmazták meg, mely szempontok érvényesítésére kell nagyobb hangsúlyt fektetnie a vegyiparnak ahhoz, hogy eljárásainak káros környezeti hatásai mérséklődjenek, és lehetőség szerint gazdaságosak is legyenek.

Mivel a tizenkét pont közül több is rimel egymásra, ezért jobbnak láttuk csoportosítani őket a következő négy fő terület szerint: 1) energiahatékonyság, 2) takarékoság, 3) termékjellemzők és 4) biztonság. Az üvegházhatású gázok kibocsátására leginkább az energiafelhasználás van közvetlen hatással, de a termékektől és a folyamattól függően az anyagtakarékosági, termékminőségi és biztonsági kérdéseknek is komoly energetikai és károsanyag-kibocsátási vonzata lehet. Így lényegében az összes elv a környezet védelmére és az éghajlatváltozás mérséklésére irányul.

Energiahatékonysági szempontból kívánatos a reakciókat, vegyipari folyamatokat és műveleteket oly módon megvalósítani, hogy a melegítésre, hűtésre, magas, illetve alacsony nyomás előállítására szánt energiabefektetés minél kisebb legyen. Ehhez járul hozzá például a hulladékhő helyes felhasználása (exergiaelemzés) és a katalitikus reakciók előtérbe helyezése (aktiválási energia csökkentése).

Fontos **takarékossági** szempont a nagy atomhatékonyságú és kevés lépésből álló szintézisek alkalmazása, amelyek a lehető legkevesebb melléktermék képződésével járnak. Tipikus környezetbarát és fenntartható példa az úgynevezett többkomponensű reakciók alkalmazása. E reakciók például egy edényben több reakciótermék együttes jelenlétében dominóreakcióba lépve magas hozzáadott értékű, gyógyszerhatóanyagokban előforduló heterociklusos vegyületek előállítására alkalmasak [19]. Takarékoskodni megéri – és nemcsak az adott gyártás anyagaival érdemes, hanem a környezet véges erőforrásaival is, mert a nem megújuló alapanyagok pazarló felhasználása előbb-utóbb visszaüt; drasztikusan emelkedhetnek a beszerzési árak, vagy erőltetett technológiaváltásra lehet szükség [20].

A **termékjellemzők** helyes beállítása is fontos szerepet játszik a zöld kémia alapelvei közt. Az elv lényege, hogy a gyártó számoljon az általa gyártott termék utóéletével (életciklus-elemzés, Life Cycle Assessment, LCA). Gondoskodjon a termék kritikus minőségi paramétereinek helyes beállításáról már a tervezés, majd a gyártás során is, lehetővé téve az újrahasznosítást és csökkentve a termék használatakor és az után fellépő környezetterhelést. Napjaink talán egyik legfontosabb kihívása a műanyagok újrahasznosítása, és olyan újszerű polimerek szintézise, amelyek felhasználásukat követően a természetbe kerülve belátható időn belül lebomlanak [21].

Végül meg kell említeni a zöld kémia **biztonsági** vonatkozásait is. A megfogalmazott irányelvek értelmében törekedni kell kevésbé veszélyes vagy ártalmatlan alapanyagok, köztitermékek, re-

agensek, segédanyagok és folyamatok paraméterek megválasztására [22].

Mindezen alapelvek kétségtelenül hozzájárulnak a környezet védelméhez, ideértve mind a természetet, mind pedig a társadalmat. Ugyanakkor az utóbbi években szárnyra kapott egy olyan közelítésmód, mely a környezetvédelem helyett a fenntarthatóságot helyezi súlypontba. Úgy véljük, eme megközelítés nem elveti a zöld kémia fent megfogalmazott elveit, hanem továbbgondolja, részben átalakítja és meghaladja azokat. A továbblépést az jelenti, hogy a fenntarthatóság alaposabban veszi figyelembe a technológiaváltás gazdasági vonatkozásait, és a zöld kémia elveit aszerint súlyozza, hogy valóban érdemes-e belevágni egy technológiaváltásba [23].

A következőkben vegyünk sorra néhány példát, miben segít a zöld kémia a társadalomnak, és hogyan enyhíti a környezetre nehezedő terhelést!

A szállításmányozási szektor „zöldítésére” kétféle jelentős irányvonal bontakozott ki az utóbbi két évtizedben. Az egyik a szénalapú tüzelőanyagok reformja [24], a másik pedig az elektromos meghajtás térnyerése. (Az előbbivel kapcsolatban Hancsók Jenő ugyanabban a lapszámban megjelent írására, 41. oldal, az utóbbi esetében pedig Tompos András cikkére utalunk, 36. oldal.)

Kétségtelen, hogy a fosszilis (szénalapú) energiaelőállítás nem fenntartható, ennek ellenére még mindig az energia döntő többségét, csaknem kétharmadát így állítják elő [25]. Hosszú távon azzal számolnak, hogy az energia egyre kisebb környezetterheléssel állítható majd elő, és az elektromos árammal mint szekunder energiahordozóval lehet meghajtani mind a közlekedési eszközöket, mind pedig az ipar egyéb berendezéseit, gépeit és technológiáit is.

A legegyszerűbbnek az tűnik, hogy a széntüzelésű erőműveket kiváltjuk olyanokkal, melyek nem bocsátanak ki szén-dioxidot. Vannak már jelenleg is olyan országok, melyek képesek energiaellátásukat szén-dioxid-kibocsátás nélkül biztosítani [26]. Ez jellemzően olyan régiókban lehetséges, ahol a természeti adottságok ideálisak vízi erőművek telepítésére (pl. Albánia, Norvégia, Etiópia, Paraguay), illetve jelentős az atomenergia felhasználása (pl. Franciaországban kb. 70%) [27].

A társadalmi szemléletváltás és az erőművi technológiák fejlesztése nem kizárólag és nem elsősorban a vegyipar feladata, azonban az energiaválság megoldásához a vegyipar nagymértékben járulhat hozzá. Az energiatárolás forradalmasítása például hatékonyabbá tehetné a jelenleg alacsony hatásfokú megújuló energiaforrásokat. Különösen igaz ez a nap- és a szélenergiára, ugyanis a nap nem mindig akkor süt, a szél nem mindig akkor fúj, amikor a társadalom nagyobb energiaigénye megjelenik.

Az elektromos energia tárolására leginkább telepek használata, melyeket energiabőség esetén töltenek, hiány esetén pedig hálózatra kapcsolva kisütnek. Széles körben elterjedtek az átmene-tifém-hidrides és az alkálifémes technológiával működő akkumulátorok. Égetően fontos, hogy megoldást találjunk ezek összetevőinek fenntartható előteremtésére, mert a készítésükhöz felhasznált fémek készletei jelenlegi felhasználási szinten végesek [28].

A hidrogén is jó alternatíva lehet az energia tárolására, mert könnyű elem, előállítására számos lehetőség és alapanyag van, energiasűrűsége pedig a szénhidrogéneknek közel háromszorosa [29]. Gazdaságos tárolása egyelőre nem megoldott, hiszen elemi állapotban robbanásveszélyes, más anyagokban tárolva pedig számolni kell a hidrogénezés és dehidrogénezés energiaigényével. Tárolnak már hidrogént szénhidrogénekben, erre kísérleti üzem

is épült Németországban [30]. Lehetséges továbbá szilárd hordozón (pl. zeolitokban), a szén bizonyos módosulataiban (grafit, szén nanocsövek), hidrogéngazdag sószerű vegyületekben (pl. NaNH_2 , NH_3BH_3 , MgH_2) [31] vagy ötvözetekben is [32] hidrogént raktározni.

Az energiatárolás kihívásai mellett jól mutatja a zöld kémia gyakorlati hasznosítását néhány polimerkémiai példa.

Biológiai úton lebomló polimerek. A műanyagok felhasználásának kiemelkedő problémája, hogy használat után nem vagy csak nagyon lassan bomlanak le természetes körülmények között. Az elhasznált műanyag termékeket jobb esetben elégetjük – ezáltal növeljük az üvegházhatású gázok kibocsátását –, rosszabb esetben lerakjuk őket. E „megoldás” nemcsak tájidegen, hanem természetidegen is, és károsíthatja az élővilágot. Szemléletes példát adnak erre a világtengereken úszó szemétszigetek [33], melyek legnagyobb részben műanyag hulladékból állnak. A műanyagok lassú degradációja (pl. UV-sugárzás), illetve használata (pl. műszálas textíliák mosása, egyes kozmetikai cikkek alkalmazása) során kisméretű műanyag-töredékek (mikroműanyagok) keletkeznek, melyek bizonyos típusai különösen veszélyesek az élővilágra [34]. Bár egyelőre minden kétséget kizáróan nem erősítették meg, hogy ezek az anyagok közvetlenül veszélyesek az emberekre is [35], a velük kapcsolatos aggodalmak folyamatosan növekednek – különös tekintettel a Föld ökoszisztémájára vonatkozóan.

A polimerek lebonthatóságát alkalmazási területeik nagyban befolyásolják. Amíg az autókban alkalmazott műanyag bevonatokkal szemben általános elvárás a hosszú, akár több tízéves élettartam, addig a csomagolóiparban ez egy-két órától pár hónapig terjedhet. A műanyagok felhasználása ezért kihat a természetben történő lebomlásukra is. A biodegradális polimerek széles palettájában kiemelt helyet foglalnak el az utóbbi évtizedekben piacon is megjelenő, ipari körülmények között komposztálható polimerek, mint például a polisztirol kiváltására is alkalmas politejsav [36,37]. A környezetbarát polimerek közé sorolhatók még a biodegradális polivinil-alkohol kopolimerek is, amelyek polaritásának finomhangolásával a csomagolóanyagok oxigénátengedő képessége is szabályozható [38]. Így nemcsak természetben lebomló polimert kapunk, hanem egyben olyan csomagolóanyagot is, amelyben az élelmiszer – akár védőgáz csomagolásban – hosszabb ideig tárolható.

Polipenténamerek mint újrahasznosítható gumialapanyagok. Ismeretes, hogy olefinekből számos polimerféleség készíthető. Ilyenek a legelterjedtebbek is, például a polietilén és a polipropilén. A kőolaj pirolitikus feldolgozása során azonban nemcsak ezek alapanyagai, az etilén és a propilén keletkeznek, hanem más, több szénatomot tartalmazó alkének is, melyeket eddig csak tüzelési energiatermelésre hasznosítottak. A ciklopentén, a ciklopentadién olyan, a kőolaj pirolízise során keletkező melléktermékek, melyeket szintén fel lehet használni polimerek előállítására, és így egységnyi ásványolajból több, magas hozzáadott értékű anyagot lehet előállítani. A polipenténamerek hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a természetes gumi, ezért az egyik legfontosabb felhasználási területük a nagy igénybevételnek kitett gumiabroncsok gyártása. A polipenténamereket egyenúlyi, gyűrűnyitó metatézis-polimerizációval állítják elő [39]. Ez nemcsak azt teszi lehetővé, hogy felépítsük a polimerláncokat, hanem használatuk után, a reakciókörülmények megváltoztatásával, azokat vissza lehet bontani alkotóelemekre, amelyek aztán újból hasznosítók egyazon katalizátorrendszer segítségével [40].

Nejlón és poliuretán monomerek megújuló alapanyagokból. Sok helyen és intenzíven kutatják a kereskedelmi forgalomban beszerezhető műanyagok előállítását megújuló alapanyagokból, például ligninekből, növényi olajokból vagy akár foszfolipidekből kiindulva. Ligninekből például tereftálsav-származékok állíthatók elő [41,42]. A többszörös telítetlen kötések tartalmazó növényi olajokból, lipidekből és foszfolipidekből akár adipinsav- (nejlón-66 monomere) származékok vagy 1,6-hexándiol (poliuretán monomer) is gyárthatók [43,44]. Noha e monomerek megújuló alapanyagokból kiinduló szintézisét a szakirodalomban már leírták, azok gazdaságos, ipari megvalósításához még további fejlesztések szükségesek.

A növényvédelemnek az éghajlatváltozásra gyakorolt hatása közvetett, mégis nagymértékben méréselkelhető az éghajlatváltozás hatásai, ha a mezőgazdaságban is teret nyernek a zöld technológiák. A környezettudatos földművelés mellett a klasszikus növényvédelmi eljárások, a totál irtószerek a jogi szabályozásoknak köszönhetően folyamatosan háttérbe szorulnak, és helyüket a bio-növényvédőszeresek veszik át. Ezek számos esetben olyan szemiokemikáliák, amelyek a kártevők kommunikációjában játszanak fontos szerepet. Ezek a vegyületek alkalmasak a kártevők csalogatására, csapdázására, és így akár azok befogására és szelektív ritkítására is. A bio-növényvédőszeresek legnagyobb jelentősége többek között a fajspecifikusság, amelynek köszönhetően csak a célkártevők ellen hatnak, így az ökoszisztémára nincsenek káros hatással. A bio-növényvédőszeresek – amelyek általában természetben előforduló vegyületek – nagyon kevés anyagot tartalmaznak (tulajdonképpen illatok), így azok környezetterhelése a klasszikus növényvédő szerekkel szemben, beleértve a kijuttatásukra szolgáló, nagy teljesítményű mezőgazdasági gépek működtetését is, elhanyagolható. Fontos szempont továbbá, hogy a mezőgazdasági termények nem érintkeznek e vegyületekkel, így lehetőség nyílik környezetbarát és növényvédőszermentes nagyipari (bio-) zöldség- és gyümölcs termesztésre.

A szemiokemikáliák között sok, telítetlen kettős kötések tartalmazó zsírsav-származékot találunk, melyek Z-orientáltak. Leghatékonyabban Z-szelektív, olefin-metatézis katalizátorokkal lehet őket előállítani [45,46]. Az elmúlt időszakban számos molylepkéferomont szintetizáltak nagy szelektivitású, homogén katalitikus eljárással [47,48].

A környezetvédelem fontossága vitán felül áll. Egy nemrégiben publikált tanulmány szerint hazánkban a lakosság is tisztában van ezzel, olykor más országokat is megelőző mértékű ez a konszenzus [49]. Nem hunyhatunk szemet azonban afelett, hogy körünk társadalma hozzászólt jelenlegi jólétéhez és ragaszkodik a lehető legkényelmesebb és legolcsóbb életviteli megoldásokhoz. Az a technológiaváltás, amely nem versenyképes, nem fog elterjedni. A társadalmi szemléletváltozás támogatása is eredményes lehet. Amennyiben ugyanis az állampolgárok meggyőződhetők arról, hogy a kényelem hosszú távon árt mindnyájunk egészségének és jólétének, akkor többen lesznek hajlandóak olyan életvitelt folytatni, olyan termékeket vásárolni, egyszóval olyan javakat fogyasztani, melyeknek előállítása és használata kevésbé terheli környezetünket. Az emberek meggyőződhetők a jóról, és ha kell, tömegesen is helyesen tájékoztathatók. Mindezek mellett elengedhetetlen a zöld szemlélet integrációja a közoktatásba.

Az idei világhírű jól megmutatta, hogy emberek tömegei képesek a szükséges szintre redukálni a fogyasztásukat, mert világosan látták, hogy a túlfogyasztás nem opció ilyen vészhelyzet idején. Megtanulták, hogy nem kell mindenáron autóból ülniük, repülőre szállniuk, ha szabadidejüket aktívan és értelmesen sze-

retnek eltölteni. Felértékelődtek a személyes kapcsolatok, mind ezek mellett az otthoni munkavégzés térnyerésével csökkentek az irodák fenntartásával, a munkahelyi bejárással, a munkahely környékén történő fogyasztással kapcsolatos környezetterhelési többletek. Mindezzel egy időben felértékelődött a minél teljesebb körű önellátás, mely az iparra is kihatott. Mennyivel környezetkímélőbb lenne az ellátási láncot a lehető legrövidebbre tervezni, hogy ne kelljen egy-egy ipari közterméknek vagy alkatrésznek a fél világot beutaznia, mire rendeltetési helyére kerül.

A zöld kémia és más ágazatok zöld megközelítései nagyban hozzájárulnak az éghajlatváltozás mérsékléséhez. Ahogy láttuk, a vegyiparban ez nemcsak környezetvédelmi szempontokból, hanem gazdaságilag is előnyös lehet. Nemcsak a vegyiparban, hanem más iparágakban és mindennapjainkban is sokat nyerhetünk szemléletünk változtatásával és új, környezetkímélő technológiák bevezetésével.

Nem az a végső cél, hogy olyan kémiát adjunk az iparnak és a társadalomnak, mely mindenképpen vagy mindenáron zöld, hanem a legjobb, leghatékonyabb és legtakarékosabb kémiát, mely épp ezért zöld is.



IRODALOM

- [1] Atmospheres and Planetary Temperatures – American Chemical Society, (n.d.). <https://www.acs.org/content/acs/en/climatescience/energybalance/planetarytemperatures.html> (accessed June 29, 2020).
- [2] R. Wolfson, Environment and Climate, 2nd edition. WW. Norton & Company Ltd., New York, 2012.
- [3] S. A. Marcott et al., A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science* (2013) 339, 1198–1201.
- [4] B. Ekwurzel et al., The rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. *Clim. Change*. (2017) 144, 579–590.
- [5] J. S. Fuglested et al., Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices. *Clim. Change* (2003) 58, 267–331.
- [6] T. Stocker et al., Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2013.
- [7] M. Wahlen, THE GLOBAL METHANE CYCLE, 1993. www.annualreviews.org (accessed June 29, 2020).
- [8] J. N. Galloway et al., The Nitrogen Cascade. *Bioscience* (2003) 53, 341–356.
- [9] R. Zhang et al., Have aerosols caused the observed atlantic multidecadal variability? *J. Atmos. Sci.* (2013) 70, 1135–1144.
- [10] K. A. Smith et al., The role of N₂O derived from crop-based biofuels, and from agriculture in general, in Earth's climate. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* (2012) 367, 1169–1174.
- [11] G. Martini et al., Effect of fuel ethanol content on exhaust emissions of a flexible fuel vehicle. *JRC Sci. Tech. Reports*, 2011.
- [12] M. Almaraz et al., Agriculture is a major source of NO_x pollution in California. *Sci. Adv.* (2018) 4.
- [13] The greenhouse gas methane (CH₄): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions. *Popul. Environ.* (1994) 16, 109–137.
- [14] N. Shakhova, The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle. *Geophys. Res. Lett.* (2005) 32, L09601.
- [15] Fluorinated greenhouse gases – Climate Action, (n.d.). https://ec.europa.eu/clima/policies/f-gas_en (accessed June 29, 2020).
- [16] N. Abas et al., Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2018) 90, 557–569.
- [17] Data & Statistics – IEA, (n.d.). <https://www.iea.org/data-and-statistics> (accessed June 29, 2020).
- [18] P. T. Anastas, J. C. Warner, Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press, New York, U.S.A., 1998.
- [19] I. A. Ibarra, A. Islas-Jácome, E. González-Zamora, Synthesis of polyheterocycles via multicomponent reactions, *Org. Biomol. Chem.* (2018) 16, 1402–1418.
- [20] J. F. Mercure, P. Salas, On the global economic potentials and marginal costs of non-renewable resources and the price of energy commodities. *Energy Policy* (2013) 63, 469–483.
- [21] M. A. Ilgin, S. M. Gupta, Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *J. Environ. Manage.* (2010) 91, 563–591.
- [22] H. F. Sneddon, Safety first. *Green Chem.* (2016) 18, 5082–5085.
- [23] E. J. Yanarella, R. S. Levine, R. W. Lancaster, Research and Solutions: “Green” vs. Sustainability: From Semantics to Enlightenment. *Sustain. J. Rec.* (2009) 2, 296–302.

- [24] Alternative Fuels Data Center: Alternative Fuels and Advanced Vehicles, (n.d.). <https://afdc.energy.gov/fuels/> (accessed June 29, 2020).
- [25] Fossil Fuels – Our World in Data, (n.d.). <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (accessed June 29, 2020).
- [26] World Development Indicators | The World Bank, (n.d.). <http://wdi.worldbank.org/table/3.7> (accessed June 29, 2020).
- [27] Nuclear shares of electricity generation – World Nuclear Association, (n.d.). <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/nuclear-generation-by-country.aspx> (accessed June 29, 2020).
- [28] N. T. Nassar et al., Evaluating the mineral commodity supply risk of the U.S. Manufacturing sector. *Sci. Adv.* (2020) 6, eaay8647.
- [29] G. Jeong et al., Nanotechnology enabled rechargeable Li-SO₂ batteries: Another approach towards post-lithium-ion battery systems. *Energy Environ. Sci.* (2015) 8, 3173–3180.
- [30] P. Preuster, C. Papp, P. Wasserscheid, Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Toward a hydrogen-free hydrogen economy. *Acc. Chem. Res.* (2017) 50, 74–85.
- [31] G. Jungmeier et al., Treibhausgasemissionen, Geschätzte Verkehrssystemen. Von Pkw-basierten, 2019.
- [32] M. Hirscher, et al., Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook. *J. Alloys Compd.* (2020) 827, 153548.
- [33] O. J. Dameron et al., Marine debris accumulation in the Northwestern Hawaiian Islands: An examination of rates and processes. *Mar. Pollut. Bull.* (2007) 54, 423–433.
- [34] S. Zhang J. et al., Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects. *TrAC – Trends Anal. Chem.* (2019) 111, 62–72.
- [35] Microplastics: more research needed – BfR, (n.d.). https://www.bfr.bund.de/en/press_information/2019/04/microplastics_more_research_needed-240153.html (accessed June 30, 2020).
- [36] S. Muniyasamy et al., Mineralization of poly(lactic acid) (PLA), Poly(3-hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV) and PLA/PHBV blend in compost and soil environments. *J. Renew. Mater.* (2016) 4, 133–145.
- [37] J. Lunt, Large-scale production, properties and commercial applications of poly lactic acid polymers. *Polym. Degrad. Stab.* (1998) 59, 145–152.
- [38] R. Tuba et al., One-pot synthesis of poly(vinyl alcohol) (PVA) copolymers via ruthenium catalyzed equilibrium ring-opening metathesis polymerization of hydroxyl functionalized cyclopentene. *Macromolecules* (2014) 47, 8190–8195.
- [39] R. Tuba, R. H. Grubbs, Ruthenium catalyzed equilibrium ring-opening metathesis polymerization of cyclopentene. *Polym. Chem.* (2013) 4, 3959–3962.
- [40] R. Tuba et al., Synthesis of recyclable tire additives via equilibrium ring-opening metathesis polymerization. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2016) 4, 6090–6094.
- [41] D. Ferdous et al., Pyrolysis of Lignins: Experimental and Kinetics Studies. *Energy & Fuels* (2002) 16, 1405–1412.
- [42] Z. Bai et al., Production of Terephthalic Acid from Lignin-Based Phenolic Acids by a Cascade Fixed-Bed Process. *ACS Catal.* (2016) 6, 6141–6145.
- [43] E. Kovács et al., Synthesis of 1,6-Hexandiol, Polyurethane Monomer Derivatives via Isomerization Metathesis of Methyl Linolenate. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2017) 5, 11215–11220.
- [44] M. Nagyházi et al., Towards Sustainable Catalysis – Highly Efficient Olefin Metathesis in Protic Media Using Phase Labelled Cyclic Alkyl Amino Carbene (CAAC) Ruthenium Catalysts. *ChemCatChem.* (2020) 12, 1953–1957.
- [45] M. B. Herbert, R. H. Grubbs, Z-selective cross metathesis with ruthenium catalysts: Synthetic applications and mechanistic implications. *Angew. Chemie – Int. Ed.* (2015) 54, 5018–5024.
- [46] M. B. Herbert et al., Concise syntheses of insect pheromones using Z-Selective cross metathesis. *Angew. Chemie – Int. Ed.* (2013) 52, 310–314.
- [47] R. L. Pederson et al., Applications of olefin cross metathesis to commercial products. *Adv. Synth. Catal.* (2002) 344, 728–735.
- [48] G. Turczel et al., Synthesis of Semiochemicals via Olefin Metathesis. *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2019) 7, 33–48.
- [49] How does the world view climate change and Covid-19?, 2020. <https://www.ipsos.com/sites/default/files/ct/news/documents/2020-04/earth-day-2020-ipsos.pdf> (accessed June 29, 2020).

ÖSSZEFOGLALÁS

NAGYHÁZI MÁRTON, TUBA RÓBERT: A ZÖLD KÉMIA VÁLASZAI AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁSRA

A globális éghajlatváltozás számos ágazat zöldülését eredményezte már. Mitől lesz egy kémiai reakció, egy vegyipari folyamat vagy éppen egy vegyi úton előállított termék környezetbarát? Mi hívta életre, milyen problémákra és kihívásokra adhat választ, és milyen buktatók elé nézhet a zöld kémia? Írásunk áttekintést ad a szemlélet elvi-tudományos háttéréről, és néhány való életből vett példával mutat rá a modern vegyészet új kihívásaira, új lehetőségeire, melyek nem csupán a környezet védelmét, hanem a gazdaságosságot és a fenntarthatóságot is szolgálhatják.

Keglevich György

■ BME Szerves Kémia és Technológia Tanszék | gkeglevich@mail.bme.hu

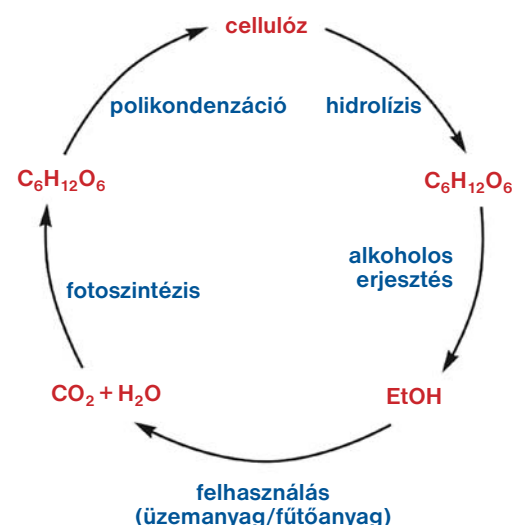
Trendek és lehetőségek az ipari szerves kémia környezetbarátabbá tételére

A mai időkben mi, kémiával foglalkozó szakemberek sokat tehetünk bolygónk megmentéséért. Egyrészt sok múlik azon, hogy milyen termékeket (műanyagokat, mosószereket, színezékeket, növényvédő szereket és gyógyszereket stb.) fejlesztünk, illetve hogy az említett kemikáliákat milyen és mennyire környezetbarát technológiával állítjuk elő. Másrészt a kémia különböző szintű oktatásában részt vállalva, fontos, hogy megfelelő szemléletmódot alakítsunk ki az említett termékek észszerű felhasználása és életünk fenntarthatóságának érdekében. Idetartozik a levegő, a talaj és a vízkészletek szennyezésének megakadályozása, valamint az újrafelhasználás előmozdítása. Oktatási-nevelési tevékenységünknek természetesen ki kell terjedni a társadalomban érezhető kemofóbia kompenzálására is.

Írásunkban – a teljesség igénye nélkül – a fentiekhez kapcsolódó néhány fontos szempontra szeretnénk felhívni a figyelmet.

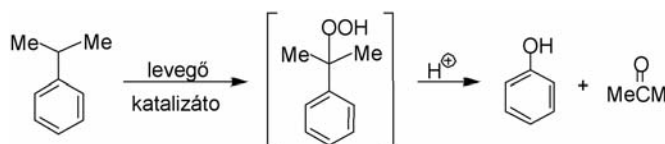
A „zöld kémia” 12 alapszabálya [1] közül az egyik legfontosabb, hogy kiindulási anyagaink megújuló nyersanyagforrásból származzanak. A cellulózból savas hidrolízissel származtatható glükóz alkoholos erjesztésével etanolhoz lehet jutni, amely mind vegyipari kiindulási anyagként, mind üzemanyagként felhasználható. Ez a már ma is alkalmazott eljárás a jövőben egyre inkább el fog terjedni. A fotoszintézissel induló természetes körfolyamatot az **1. ábrán** szemléltetjük [2]. Megjegyzendő, hogy Oláh György a metanolalapú gazdaságban látta a jövő lehetőségét [3].

1. ábra. Az etanolciklus – kinyerés és felhasználás



Visszatérve a bioalapú etanol előállítására, nagyobb mennyiséget nyernek ki kukoricából is, és az így nyert bioetanolt már 10% körüli mennyiségben keverik a petrokémiai alapú üzemanyagba. Ez – különösen az Egyesült Államokban – gyakran okoz feszültséget a kormányzat és a farmerek között, ugyanis a termelők takarmánnyként és élelmiszerként sokkal rentábilisabban tudnák eladni a kukoricát.

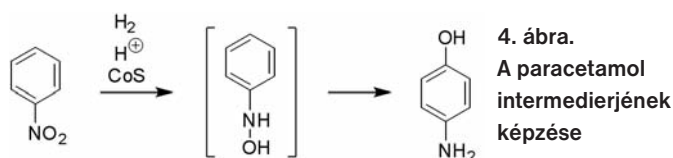
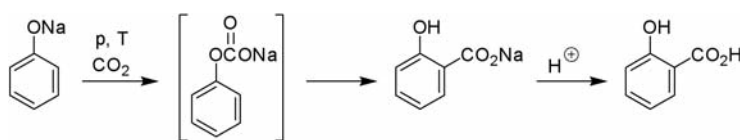
Másik fontos zöld kémiai alapvetés, hogy atomhatékony kémiai átalakításokat célszerű választani. Ilyenek az addíciók, izomerizációk, átrendeződések és polimerizációs reakciók. Ipari példaként vegyük a fenol kumol-hidroperoxid intermediereken keresztül történő előállítását (**2. ábra**), a szalicilsav Kolbe–Schmitt-eljárás-



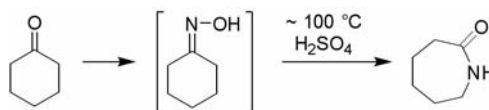
2. ábra. A fenol kumol-hidroperoxid intermediereken keresztül történő előállítása

sal történő szintézisét (**3. ábra**), a paracetamol kulcs-intermedierejének képzését (**4. ábra**), valamint a kaprolaktám gyártását (**5. ábra**) [4], melyet már kifejezett zöld kémiai körülmények kö-

3. ábra. Szalicilsav előállítása Kolbe–Schmitt-szintézissel



5. ábra. A kaprolaktám gyártásának sémája



zött is megvalósítottak [5]. Megállapítható, hogy már jelenleg is egy sereg atomhatékony eljárást alkalmaznak a vegyiparban. Sok olyan eliminációs és kondenzációs reakció ismeretes, amikor víz a melléktermék. Nos, bár ezekben az esetekben nem 100% az atomhatékonyság, az eljárások mégis környezetbarátak.

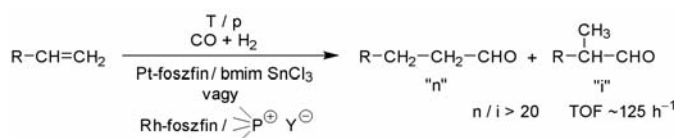
Talán a harmadik legfontosabb kritérium az, hogy előnyben részesítendő a szelektív katalitikus reakciók. Közismert, hogy a katalizátorok leszállítják egy adott reakció aktiválásentalpia-gátját. Nagyon sokféle katalitikus reakció van, a két legnagyobb csoportot a heterogén és a homogén katalitikus átalakítások alkotják. Előbbire példák a levegővel végzett oxidációk, illetve a hidrogénezések. A hidrogénezések ugyanakkor homogén katalitikus reakciók is lehetnek, ha átmenetifém–foszfin komplex a katalizátor. A hidroformilezések (oxoszintézisek) is ebbe a csoportba tartoznak. A heterogén és homogén katalitikus átalakítások jelenleg is gyakran alkalmazott eljárások az intermediér-, a finomkémiai- és a gyógyszeriparban. Speciális terület a fázis-transzfer-katalízis (PTC), amely folyadék–folyadék, vagy szilárd–folyadék rendszerekben tesz lehetővé szerves kémiai átalakításokat [6]. A PTC-t ma is alkalmazzák a gyógyszeriparban és a műanyagiparban (pl. epoxigyanták szintézise során). Az igazán zöld kémiai megvalósításoknál szilárd hordozóhoz (pl. gyantához) kötött katalizátorokat alkalmaznak, melyek a használat után szűrővel eltávolíthatók és újrahasználhatók [6]. Külön megemlítendő az enantioszelektív szintéziseket lehetővé tevő katalizátorok, melyek – ligandumaik révén – kiralitáscentrumokat hordoznak. Hosszabb távon az enantioszelektív szintézisek ki is válthatják a racémátok rezolválását. Az enantiomertiszta „hatóanyagok” nemcsak a gyógyszergyártásban relevánsak, hanem egyre inkább begyűrznek a növényvédőszer-iparba, sőt a kozmetikai iparba is.

A katalizátorok alkalmazásával kapcsolatban felvetődik egy „filozófiai” kérdés is. Manapság egy sereg olyan szakcikkkel találkozhatunk, melyekben különleges katalizátorok alkalmazásával szobahőmérsékleten lehet különféle – általában magasabb hőmérsékletet igénylő – reakciókat megvalósítani. Ez a kivitelezés valóban inkább környezetbarát, mint az a megoldás, amikor katalizátor nélkül, de 60–120 °C-on játszátják le az adott reakciót? A válasz az, hogy a katalizátor nélküli, viszont mérsékelt melegítést igénylő kivitelezés a zöldebb megoldás, hisz ez esetben nem szükséges költséget és környezeti terhelést okozó katalizátort alkalmazni. Természetesen továbbra is fontos zöld kémiai ajánlás marad, hogy a kémiai átalakításokat próbáljuk a lehető legmérsékeltőbb körülmények között (szobahőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson) lejátszani.

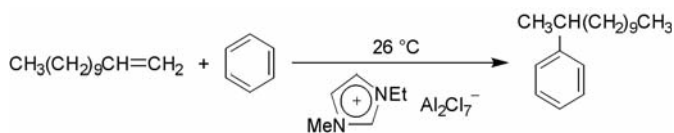
Az oldószerek közül benzolt, szén-tetrakloridot és kloroformot ma már sehol nem alkalmaznak az iparban, viszont előnyben részesítik a toluolt és a különféle alkoholokat, különösen a butanolt. Etil-acetát helyett inkább butil-acetátot alkalmaznak, ugyanis utóbbi magasabb forráspontja és lipofilebb jellege miatt (ami a vizes oldatokból történő extrakció szempontjából fontos) robusztusabb. Az acetonitril és az acetone – bár tűzveszélyesek, és utóbbi meglehetősen illékony is – megtűrt és nélkülözhetetlen oldószerek az iparban. A tűzveszélyes és nagyon illékony dietil-étert (amely nélkülözhetetlen a Grignard-reakciók és különféle fémorganikus átalakítások esetében) célszerű tetrahidrofuranra (THF) cserélni. Az ideális megoldás a természetes alapú (kukoricacsutkából előállított) 2-metiltetrahidrofuran alkalmazása, ami azért is jobb, mint a THF, mert magasabb a forráspontja (79 °C vs. 66 °C).

Érdekes kérdéskör a víz mint oldószer alkalmazása. Mivel a szerves vegyületek vízben általában nem oldódnak, a szerves ké-

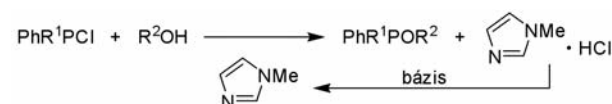
miában a víz mint oldószer nem igazán releváns. Kivételt képeznek a szénhidrátok, ezek ugyanis a bennük lévő hidroxilcsoportok miatt meglehetősen jól oldódnak vízben. Ugyanakkor bizonyos más szerves vegyületek melegítésre kismértékben oldódhatnak a vízben. Az α -D-glükóz mint alapanyag különféle biotechnológiai átalakításokban (például az adipinsav szintézisében) lehet fontos. A jövő útját a különböző mikroorganizmusokat (baktériumokat és gombákat) alkalmazó, továbbá az enzimkatalizált reakciók jelenthetik. Visszatérve a vízre, mint reakcióközegre, újabb kihívást jelentenek az ún. „on water” reakciók [7], amelyek vízben oldhatatlan szubsztátumok vizes közegben történő hatékony átalakítását jelentik. Szintén környezetbarát megoldást tesznek lehetővé a szuperkritikus (sc) oldószerek, például az sc CO₂ alkalmazása oldószerként, akár HPLC-elválasztásoknál, extrakciós folyamatokban vagy éppen rezolválásokban. Divatos oldószerek az ún. ionfolyadékok, amelyek nem illékonyak, és a kation, valamint az anion megfelelő megválasztásával tulajdonságaik finoman hangolhatók. E sorok írójának véleménye szerint azonban csak speciális esetekben alkalmazhatók ipari oldószerként. Idetartozhatnak a hidroformilezések (6. ábra), a dodecylbenzol-szul-



6. ábra. Hidroformilezés ionfolyadék oldószerben



7. ábra. A dodecylbenzol előállítás EtMe-imidazólium-Al₂Cl₇ alkalmazásával

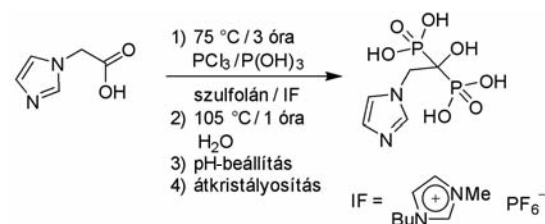


8. ábra. A BASIL-technológia

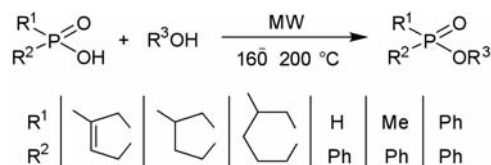
fonát kiindulási anyaga, a dodecylbenzol előállítása (> 2M tonna/év) (7. ábra) vagy az úgynevezett BASIL-technológia, amely szintén ipari eljárás (8. ábra) [8].

Valószínűnek tűnik, hogy az ionos oldószerek inkább reakciókat segítő katalizátorként, illetve adalékként fognak elterjedni az iparban [9]. Erre példaként a különféle csontbetegségekben alkalmazott dronsavszármazékok megfelelően szubsztituált ecetsavból, valamint foszfor-trikloridból és foszforossavból történő előállítását említhetjük. A zoledronát szintézisében a butil-metilimidazólium hexafluorofoszfát katalizátorként való alkalma-

9. ábra. Zoledronát hatékony előállítása IF jelenlétében



zása rekord kitermelést tett lehetővé (9. ábra) [10, 11] A másik példa a foszfinsavak direkt észterestése ionos folyadékok (IF) jelenlétében, mikrohullámú (MW) körülmények között. Megfigyeltük, hogy IF-katalízis mellett az észterestések alacsonyabb hőmérsékleten, gyorsabban és magasabb konverzióval játszódnak le (10. ábra) [12, 13].



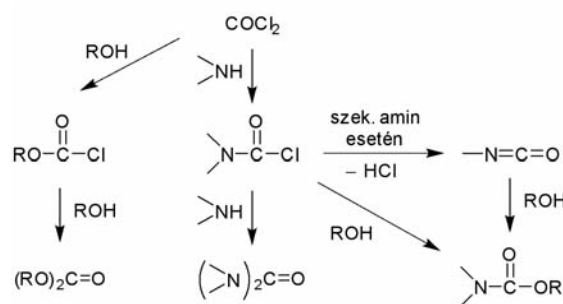
10. ábra. Foszfinsavak MW által segített direkt észterestése IF jelenlétében

Az MW-besugárzás alkalmazása reakciók megvalósítására több szempontból is zöld kémiai megoldást jelent. Egyrészt a közvetlen, MW-hőátadás hatékonyabb a hagyományosnál, másrészt gyorsabb és szelektívebb átalakításokat tesz lehetővé annál, harmadrészt pedig sok esetben oldószert sem kell alkalmazni [14]. Az MW-me-legítés igazából a magas aktiválási entalpiával (kb. 130–180 kJmol⁻¹) rendelkező és termoneutrális reakciók megvalósítására (11/B ábra) a legalkalmasabb. Endoterm átalakításoknál (11/C ábra) nem lesz teljes a konverzió, exoterm reakcióknál (11/A ábra) pedig felesleges [15, 16].

Ipari alkalmazás szempontjából igazi akadályt általában az MW-berendezések kis mérete és problematikus méretnövelése jelent. Viszont nem heterogén és nem viszkózus reakcióelegyek esetén jó megoldás lehet a folyamatos rendszer [17]. Valószínűsíthető, hogy az egymás mellett párhuzamosan üzemeltetett folyamatos MW-reaktorok el fognak terjedni az iparban.

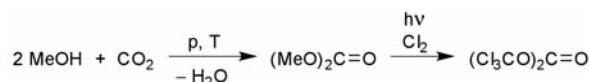
Végezetül néhány szó a fokozottan veszélyes, tüdővízenyőt és tüdőrákot okozó foszgén kiváltásáról. A foszgént dialkil-karbamatok, karbamidszármazékok, és karbamátok (uretánok) előállítására használják (12. ábra). Fontos intermedierek a klórhangyasav-származékok, illetve az izocianátok. A dialkil-karbonátok alkilezőszerek, és – újabban – zöld oldószerként is használatosak [18], míg a karbamidok és karbamátok a növényvédőszer-iparban relevánsak. A poliuretánok fontos műanyagok.

A foszgént hagyományosan szén-monoxid és klór aktív szén felületén végzett reakciójával állítják elő, ami nem környezetbarát eljárás. Ráadásul a foszgén normál körülmények között gázállapotú, palackból adagolható. A trifoszgén – összegképlet szerint – a foszgén trimerje (C₃O₃Cl₆), valójában azonban hexaklór-



12. ábra. A foszgén-család

dimetilkarbonát. Előállításakor először a szén-dioxid és metanol erőlyes körülmények közötti reakciójával dimetil-karbonátot képeznek, majd azt fotoklórozzák (13. ábra). A trifoszgén ártalmatlan, fehér színű szilárd anyag, feloldva foszgénként viselkedik.



13. ábra. A trifoszgén gyártási folyamata

Nagy mennyiségben állítják elő fejlődő országokban, például Indiában és Kínában. A trifoszgén még szélesebb körű ipari elterjedésének nincs különösebb akadálya.

A trifoszgén alkalmas karbonsavak savkloriddá, illetve alkoholok alkil-kloriddá alakítására is (14. ábra).



14. ábra. A trifoszgén alkalmazása
hidroxi → klór cseréje

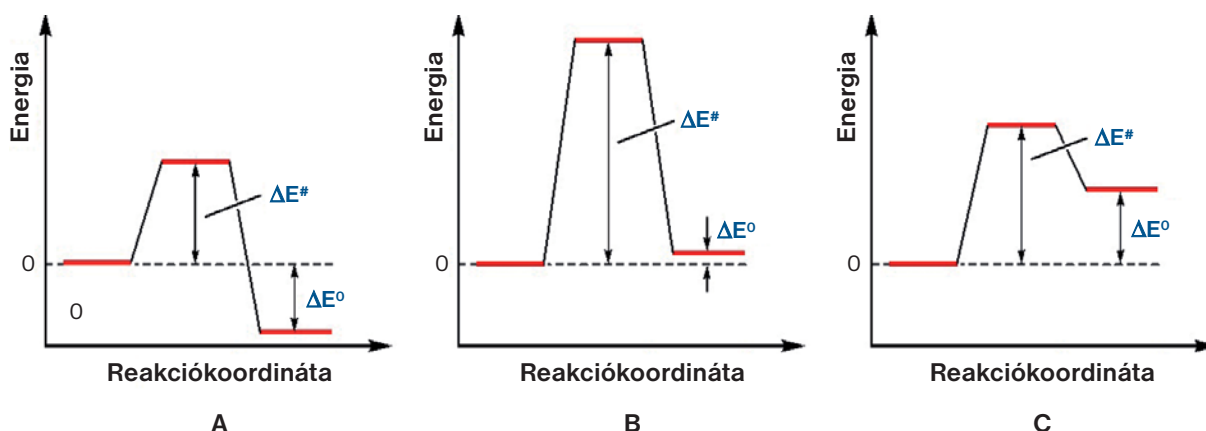
Jelen cikkben a gyakorló szintetikus szerves kémikus szemszögéből próbáltuk összefoglalni a kiindulási anyagok, oldószerek és katalizátorok szempontjából legfontosabb zöld kémiai trendeket és lehetőségeket.

Köszönetnyilvánítás. A szerző köszöni az NKFIH K134318 sz. támogatását.

IRODALOM

- [1] P. T. Anastas, J. C. Warner, Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press, Oxford, 1998.
- [2] Gy. Keglevich, Magyar Kémikusok Lapja (2018) 73, 310–312.
- [3] Gy. Oláh, A. Goeppert, G. K. S. Prakash, Kőolaj és földgáz után. A metanolgazdaság. Better Kiadó, Budapest, 2007.
- [4] P. Bakó., E. Fogassy., Gy. Keglevich, Szerves vegyipari technológia. E-tankönyv. Typotex Kft., Budapest, 2011.
- [5] M. Doble, A. K. Kruthiventi, Green Chemistry and Processes. Elsevier, Amsterdam, 2007, Ch. 9. 269.

11. ábra. Szerves kémiai reakciók tipikus energiaprofiljai



- [6] C. M. Starks, C. L. Liotta, M. Halpern, Phase-Transfer Catalysis, Fundamentals, Applications, and Industrial Perspectives. Chapman & Hall, New York, 1994.
- [7] S. Narayan, J. Muldoon, M. G. Finn, V. V. Fokin, H. C. Kolb, K. B. Sharpless, Angew. Chem. Int. Ed. (2005) 44, 3275–3279.
- [8] WO 2003062171 (2003).
- [9] Z. Rádai, N. Z. Kiss, G. Keglevich, Curr. Org. Chem. (2018) 22, 533–556.
- [10] D. I. Nagy, A. Grün, S. Garadnay, I. Greiner, G. Keglevich, Molecules (2016) 21, e1046.
- [11] D. I. Nagy, A. Grün, K. Lévy, S. Garadnay, I. Greiner, G. Keglevich, Synth. Commun. (2018) 48, 663–671.
- [12] N. Z. Kiss, G. Keglevich, Pure Appl. Chem. (2019) 91, 59–65.
- [13] R. Henyecz, A. Kiss, V. Mórocz, N. Z. Kiss, G. Keglevich, Synth. Commun. (2019) 49, 2642–2650.
- [14] Milestones in Microwave Chemistry – SpringerBriefs in Molecular Science (ed.: G. Keglevich). Springer, Switzerland, 2016.
- [15] G. Keglevich, Z. Mucsi, in: Microwave Chemistry (eds: G. Cravotto, D. Carnaroglio). De Gruyter, Berlin, 2017, 53–64.
- [16] G. Keglevich, N. Z. Kiss, A. Grün, E. Bálint, T. Kovács, Synthesis (2017) 49, 3069–3083.
- [17] N. Z. Kiss, R. Henyecz, G. Keglevich, Molecules (2020) 25, 719.
- [18] B. Schäffner, F. Schäffner, S. P. Verevkin, A. Börner, Chem. Rev. (2010) 110, 4554–4581.

ÖSSZEFOGLALÁS

KEGLEVICH GYÖRGY: TRENDEK ÉS LEHETŐSÉGEK AZ IPARI SZERVES KÉMIA KÖRNYEZETBARÁTBABBÁ TÉTELÉRE

Komoly kihívást jelent a vegyiparon belül az alkalmazott szerves kémiai átalakítások környezetbarátabbá tétele. Egyre fontosabb kiindulási anyag az etanol, amit a cellulóz hidrolízisével nyert glükóz alkoholos erjesztésével kapnak. Ahol lehetséges (pl. a kaprolaktám, szalicilsav és *p*-aminofenol gyártása), atomhatékony átalakításokat alkalmaznak. A katalitikus átalakítások között fontos szerepet töltenek be a fázistranszfer katalitikus megvalósítások. Az alternatív oldószerként is alkalmazható ionfolyadékok számos esetben kiváló katalizátorok. A folyamatos megvalósítások – beleértve a mikrohullám által segített reakciókat – komoly áttörést hozhatnak.

Tátraaljai Dóra – Pukánszky Béla

■ BME FKAT Műanyag- és Gumiipari Laboratórium, TTK AKI Polimerfizikai Kutatócsoport | tattraaljai.dora@ttk.mta.hu

A műanyagipar és a műanyag-felhasználás környezeti hatásainak csökkentése

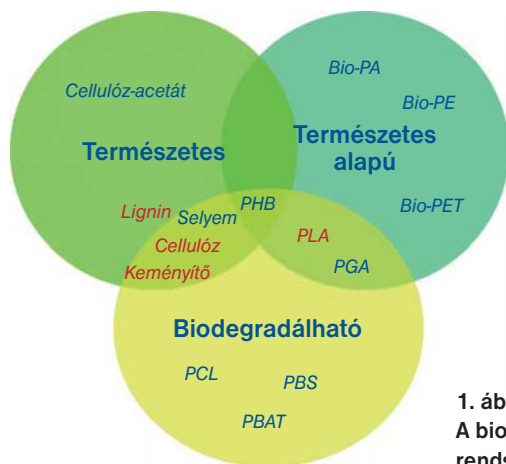
A világ műanyagtermelése az elmúlt 40 évben megnégyesződött [1], jelenleg az olajkitermelés 6%-át használják fel műanyagipari termékek gyártására [2, 3]. Ez nem véletlen, hiszen a műanyagok könnyen megmunkálható, olcsó, könnyű alapanyagok, amelyeket a csomagolóiparban, az építőiparban, az egészségügyben és még számos területen felhasználnak. Mindannyian ismerjük azonban a felelőtlen műanyag-felhasználás árnyoldalait is. Rengeteget olvashatunk, videókat láthatunk a tengeri állatok műanyagszennyezés okozta tömeges pusztulásáról, és ki ne bosszankodott volna az erdőben szétdobált hulladékok látványán. Kevesebbet hallhatunk azonban a műanyagok láthatatlan környezetterheléséről. A műanyagipar és a műanyagok felhasználása a teljes életciklus alatt 1,7 Gt CO₂-ekvivalens-kibocsátást okozott 2015-ben, ami a világ szén-dioxid-kibocsátásának 3,8%-át tette ki. Egyes kutatások szerint, ha a felhasználás ilyen ütemben nő, akkor ez 2050-re elérheti a 15%-ot [4]. A kutatók nagy része egyetért azzal, hogy elsősorban a CO₂ okolható a globális felmelegedésért és a klímaváltozásért, ezért sürgető lenne a műanyagok szénlábnomának (carbon footprint) csökkentése, vagy legalábbis a jelenlegi szint megtartása.

A műanyagok szénlábnomája csökkenthető: biopolimerek alkalmazásával, gyártásuk során megújuló energiaforrások felhasználásával, újrahasznosítással és felhasználásuk csökkentésével.

A szén-dioxid-kibocsátás csökkentési lehetőségei a műanyagiparban

Biopolimerek

Jelenleg a világon évi 360 millió tonna műanyagot termelnek. Ennek pusztán 1%-át teszik ki a bioműanyagok, de előállításuk és felhasználásuk folyamatosan nő [5]. A biopolimerek általánosságban kisebb szénlábnomával rendelkeznek, mint a hagyományos fosszilis alapú műanyagok, mivel a polimer alapját képező növény a növekedése során szén-dioxidot köt meg [6]. A biopolimereket az **1. ábrán** látható diagram alapján osztályozhatjuk. A köztudatban a természetes, a természetes alapú és a biológiailag lebomló (biodegradálható) polimerek fogalma gyakran összeesődik. Fontos tisztázni, hogy e fogalmak egészen mást jelölnek, és az adott kategóriába tartozó polimereknek mások a tulajdonságai, bár ezek a halmazok, ahogy az **1. ábrán** is látható, átfednek egymással.



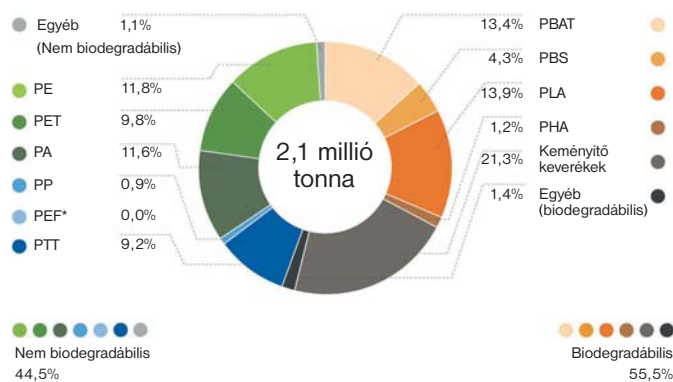
1. ábra.
A biopolimerek
rendszerezése

A természetes polimerek, a cellulóz, a lignin, a selyem polimer formában találhatók meg környezetünkben. Általában nehezen feldolgozhatók és kezelhetők, és nem helyettesíthetik a hagyományos műanyagokat. Felhasználhatók viszont töltőanyagként, mellyel a keverék szén-dioxid-mérlege jelentősen javítható. Ilyen keverékek például a fa-műanyag kompozitok (WPC), amelyek manapság már igen elterjedtek elsősorban kültéri burkolatként. Természetes alapú a biopoliamid (PA), -polietilén (PE), -polipropilén (PP): ezek természetes eredetű anyagokból előállított monomerek polimerizálásával készülnek. Szénlábnomuk közel zérus, hátrányuk azonban, hogy biológiai nem lebonthatók, mikroorganizmusok által előidézt bomlásra nem képesek. Ennek ellenére a biopolimerek piacának felét uralják [5]. A bio-PET (polietilén-tereftalát) előállítása egyelőre nem megoldott tisztán biomassza-alapon. A PET előállításához etilén-glikolra és tereftálsavra van szükség, amelyek közül csak az etilén-glikol előállítása megoldott cukornád alapanyagból, a tereftálsavat továbbra is kőolajból állítják elő.

A biodegradálható, de nem biológiai alapú polimerek csoportjába tartozik a polikaprolakton (PCL), a polibutilén-szukcinát (PBS) és a poli(butilénadipát-tereftalát) (PBAT). Ezek előnye, hogy biológiai lebonthatók, hátrányuk viszont, hogy nem csökkentik a műanyagipar szénlábnomát. Az 1. ábrán látható, hogy a polihidroxi-butyrát (PHB) felel meg minden „elvárásnak”. A PHB a polihidroxi-alkanoátok (PHA) legjelentősebb képviselője. Bioszintetikus, biokompatibilis, biodegradálható, bomlástermékei nem mérgezők. Hátránya azonban, hogy bakteriális szintézissel körülményesen és nagy költséggel állítják elő. Tömeges gyártására nem számíthatunk, elsősorban implantátumok alapanyagaként és hatóanyag-hordozó mátrixként használják. A poliglikolsav (PGA) természetes alapú és biodegradálható, de vízben könnyen bomlik, ezért csak korlátozottan használható fel. Elterjedten használják tejsavval kopolimerizálva a politejsav (PLA) bomlásának felgyorsítására, elsősorban orvosi eszközök alapanyagaként [3].

A biopolimerek piaca 2019-ben a 2. ábra szerint alakult [5]. Összesen 2,1 millió tonna biopolimert gyártottak, amelynek nagyjából fele volt biodegradálható, másik fele biológiai alapú.

A leggyéretebb biopolimer a politejsav (PLA), amely biológiai alapú, szintetikus úton előállított polimer, de egyben biológiai is lebontható. Jó merevséggel és szilárdsággal rendelkezik, széles termékpalettát tesz lehetővé, átlátszó termékek is készíthetők belőle. Hátránya, hogy nedvességérzékeny, tulajdonságai időfüggők, hőállósága és ütésállósága gyenge és ára még viszonylag magas: körülbelül háromszoros áron szerezhető be a kőolajalapú polimerekhez képest.

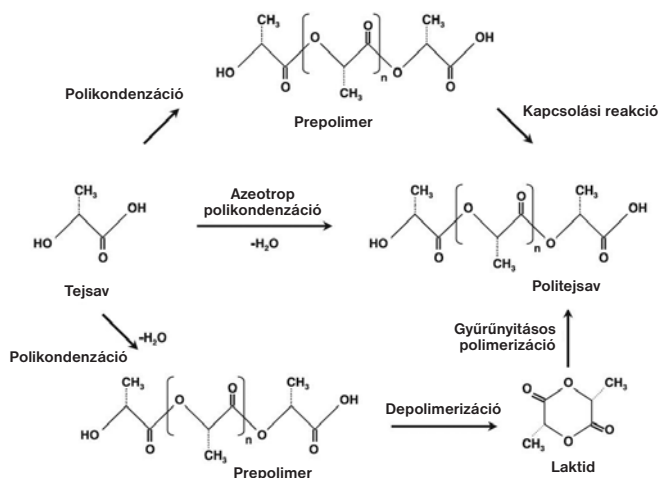


* Fejlesztés alatt, még nincs a piacon

2. ábra. Az előállított biopolimerek részesedése [5]

PTT: politrimetilén-tereftalát; PEF: polietilén-furanoát

A PLA előállításakor általában valamilyen cukrot fermentálnak tejsavbaktériummal; ennek során D- és L-tejsav képződik. A fermentációhoz jelentős mennyiségű kénsavat és mészkövet használnak fel, melléktermékként pedig gipsz (CaSO_4) keletkezik. Az egyszerű cukrok azonnal felhasználhatók, ezzel szemben az összetett cukrokat (keményítő, cellulóz) előbb bontani kell. Vonzó alternatíva lehet a lignocellulózok hasznosítása. Ezek jellemzően nagy mennyiségben hozzáférhető mezőgazdasági hulladékok (növények szára, levele), amelyek fermentálható szénhidrát tartalma hozzávetőlegesen 80%, ám sokkal körülményesebben használhatók fel. Először a lignintartalmat távolítják el erős savas vagy lúgos eljárással, majd enzimekkel tájékoznak, és teszik a mikroorganizmusok számára hozzáférhetővé az alapanyagot. Ezután a 3. ábrán látható három módszer valamelyikével állítják elő a PLA-t [7].



3. ábra. A politejsav előállítási lehetőségei [7]

A tejsav tisztasága és a polimerizációs körülmények jelentősen befolyásolják az előállított PLA kémiai és fizikai tulajdonságait, kristályosságát és hőállóságát. A PLA megfelelően vízmentes környezetben újra feldolgozható, depolimerizáció után a monomerek újra felhasználhatók (kémiai újrahasznosítás), és ipari körülmények között a PLA komposztálható (60–80 °C, magas páratartalom, oxigén jelenléte) [2].

Életút-elmérések szerint az üvegházhatású gázok kibocsátása 40%-kal csökkenthető, ha a hagyományos fosszilis alapú műanyagokat (PE, PET) PLA-val helyettesítjük, ráadásul a PLA előállításához 25%-kal kevesebb nem megújuló energiára van szükség [3]. Meg kell azonban említeni, hogy az olyan tényezők, mint

az öntözéshez használt víz, a növényvédő szerek használata és a tejsav gyártása során keletkező melléktermékek környezetterhelését is figyelembe kell venni [3]. Másik megfontolandó tény, hogy a PLA bomlása szobahőmérsékleten, alacsony páratartalom mellett, megfelelő mikrobiális környezet hiányában nagyon lassú. Ez persze tartós fogyasztási cikkek esetében kedvező, de sokan azt hiszik, hogy a PLA meg fogja oldani a tengeri és a természetes környezet szennyezésének problémáját, holott ez így, sajnos, nem igaz. Ugyan fosszilis társainál valamivel rövidebb ideig szennyezi a környezetet, de a felelőtlenül eldobott biológiailag lebomló polimerből készült szemét is környezetterhelő. A hazai helyzetet tovább árnyalja, hogy jelenleg az országban nem gyűjtik szelektíven a lakossági komposztot, így a biodegradálható műanyagok is vagy a szelektív hulladékgyűjtőbe, vagy szeméttelre kerülnek, ahol anaerob körülmények között nagyon hosszú idő alatt bomlanak le. Ha bekerülnek az újrahasznosításra váró, fosszilis alapú műanyagok közé, azok feldolgozásakor technológiai problémákat és termékminőség-romlást okozhatnak. Jelenleg az a legjobb eset, ha a biodegradálható műanyagot hulladékegetőbe szállítják, ahol a kémiai kötésekben tárolt energiát hő formájában visszanyerik, de olyan speciális alkalmazások is szóba jöhetnek, mint a kerti nyesedék, avar gyűjtésére szolgáló zsákok, amiket ipari komposztáló telepekre szállítanak.

Megújuló energiaforrások alkalmazása a polimerek gyártása során

Egyes számítások szerint a gyártás során felhasznált energia forrása jobban befolyásolja a polimer szénlábnymót, mint a gyártáshoz felhasznált alapanyag. Ha teljes egészében átállnánk biológiai nyersanyagokra, akkor a polimerek szénlábnymója 25%-kal csökkenne, míg ha megújuló energiát (szél, biogáz) használunk a polimerek előállításakor, akkor akár 50–70%-kal is csökkenteni lehetne a szén-dioxid-kibocsátást és a költségek is kevésbé növekednének [8]. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a növényi alapanyagok előállításához nagy földterületekre van szükség, ami csökkenti az élelmiszer-termelésre felhasználható területet. Technológiai szempontból is előnyös lehet, ha csak a felhasznált energiát cseréljük le megújulóra, hiszen ekkor az előállított polimerek minősége nem változik, ugyanazon gépeken dolgozhatók fel és nincs szükség újabb berendezésekre.

Természetesen a probléma megoldása nem ennyire egyszerű, hiszen a rendelkezésre álló megújuló energia mennyiségét nagyban befolyásolják a helyi adottságok, valamint amíg az energia-tárolás kérdése nem megoldott, addig a legtöbb területen lehetetlen átállni tisztán megújuló energiára. Ezenkívül a biológiailag lebontható polimerek igen hasznosak lehetnek olyan felhasználások esetén, amikor a képződő hulladék nem hasznosítható újra az erős szennyeződés miatt, például eldobható pelenkák, egészségügyi termékek, kávékapszulák esetén. Ezeknél a hatalmas mennyiségben termelődő hulladékoknál a legjobb mód a megsemmisítésre a komposztálás lenne. Minden megoldás segít, ami csökkenti a szén-dioxid-kibocsátást, együtt kellene új műszaki megoldásokat és új anyagokat is bevezetni.

Műanyagok újrahasznosítása – körkörös gazdaság

A 20. század második felére a lineáris gazdasági séma vált általánossá, amikor is a természeti erőforrások kiaknázása, a termék előállítása és megvásárlása után a már szükségtelenné váló tárgyat eldobták, és az esetek többségében hulladékként kezelték. Napjainkban a népesség és a termelési kapacitások növekedése miatt ez a modell egyre tarthatatlanabb. Alternatívát a gazdaság



4. ábra. A körforgásos gazdaság elve [9]

körkörös működése jelenthet. Az Ellen MacArthur Alapítvány definíciója szerint a körkörös vagy körforgásos gazdaság olyan fenntartható modell, amelyben az élettartamuk végére jutott eszközöket, tárgyakat vagy alkalmassá teszik újbóli felhasználásra, vagy ha ez nem lehetséges, akkor másodlagos nyersanyagként újrafeldolgozzák és így hasznosítják [9, 10] (4. ábra). Ez a modell tehát az anyagok és az energia körfolyamatban tartására koncentrálna. Az Európai Unió is nagy hangsúlyt fektet arra, hogy előmozdítsa ezeket a változásokat, a gazdasági szerkezet fokozatos átalakítását [11].

Az ideális körforgásos gazdaságban már a nyersanyagok kiválasztásakor gondolnak arra, hogy a belőlük készített termékeket újra lehessen hasznosítani, és a lehető legkisebb mértékben terheljék a környezetet. Ez az igény fokozott súllyal jelenik meg a termékek tervezésekor is. Egyes számítások szerint 80%-ban a tervezés során dől el, hogy mennyire lesz környezetterhelő az adott termék. A körkörös gazdasági modell általánossá válása esetén a világ szén-dioxid-kibocsátása közel 50%-kal csökkenne 2030-ra [10].

Az újrahasznosításnak három módja – fizikai, kémiai és energetikai – ismeretes. Egyesek idesorolják még az ipari szintű újrahasználatot is (amikor a visszaváltott betétdíjas palackot tisztítás után újratöltik), de ilyen termékekből egyre kevesebb van forgalomban a szigorú élelmiszerügyi szabályozások és a műanyag csomagolások nehézkes tisztítása miatt [12]. Ezzel szemben egyre

5. ábra. A műanyag reggranulátumok alkalmazási területei [11]



jobban terjed az a visszagyűjtési forma, amikor a PET-palackot laposra összenyomva visszaveszik, ám a betétdíj ez esetben a szelektív hulladékgyűjtés rendszerének kiegészítése.

2018-ban körülbelül 29 Mt lakossági hulladék keletkezett Európában, amelyből 9,4 Mt műanyag-hulladékot válogattak ki fizikai újrahasznosításra. Ebből 5 Mt újrahasznosított alapanyag keletkezett, amelyből 4 Mt regnanulátumot Európán belül értékesítettek és használtak fel az **5. ábrán** látható alkalmazási területeken. Kémiaiilag csak 0,1 Mt műanyag-hulladékot hasznosítottak újra, ezzel szemben a keletkezett hulladék csaknem felét energetikailag újrahasznosították, vagyis égetőben semmisítették meg energiavisszanyerés mellett. Nagyon fontos megjegyezni, hogy az újrahasznosítás aránya tízszer nagyobb volt azokon a területeken, ahol szelektíven gyűjtik a műanyag-hulladékot (62%), mint azokon a helyeken, ahol válogatás nélküli elszállítását alkalmaznak (6%) [11]. Azokban az országokban, ahol a szemétkerakást nagyon megdrágították, 10% alatti a hulladéklerakás aránya, ellenben az ilyen fajta ösztönzés nem alkalmazó országokban 50% körül van (**6. ábra**) [13, 14].



6. ábra. Hulladékkezelés Európa különböző országaiban [14]

A fizikai újrahasznosítás során a műanyag-hulladékot válogatják, tisztítják, aprítják és újból granulálják. A legnagyobb nehézséget a vegyes műanyag-hulladék válogatása, tisztítása jelenti. Kivételt jelent a műanyag-feldolgozókból származó tiszta műanyag-hulladék, amelynek minősége, összetétele jól ismert. Ezen anyagok értékesítése a legtöbb esetben nem okoz problémát, sokszor már az adott cég újrafeldolgozza, vagy jó áron értékesíti [13]. A vegyes műanyag-hulladékot válogatás nélkül is fel lehet használni, ám ekkor jellemzően kisebb értékű másodnyersanyagot nyerünk, amelyből préseléssel vastag falú termékeket, például közlekedési táblák talpát, fekvőrendőrkötőket, vandálbiztos padokat készíthetnek. Kiterjedt kutatások folynak a vegyes műanyag-hulladék töltőanyagként való felhasználására a beton- és habarcsgyártásban. Pozitív hozadéka lehet, hogy a beton könnyebb lesz tőle, hátránya viszont, hogy rontja a mechanikai tulajdonságait és növeli az éghetőségét [15].

Értékesebb másodnyersanyag előállításához a vegyes műanyag-hulladékot válogatni kell. Ez történhet a formája alapján (kézi válogatás esetén a PET-palackok kiválogatása), sűrűség, méret (nagy méretű termékek kiválogatása), szín vagy kémiai szerkezet alapján. A válogatás országonként, régióként és cégenként is változik, általában többlépcsős, állomásos válogatók vannak. A három fő polimertípus, ami a vegyes műanyag-hulla-

dékban található, a PET, PE és a PP. A fejlettebb régiókban FT-NIR (Fourier-transzformációs közeli infravörös) spektroszkópot alkalmaznak első lépésben, majd manuálisan igyekeznek a gép által vétett hibás azonosításokat korrigálni. A tiszta PET-hulladékot szín szerint válogatva bálázzák és szállítják el. Ez a legkevesebb és legkönnyebben elkülöníthető polimertípus. Vannak válogatók, ahol kizárólag jól képzett operátorok végzik a válogatást, a termék típusa alapján tudják, hogy milyen polimerből készült az adott tárgy. Ez inkább ott jellemző, ahol viszonylag olcsó az emberi munkaerő. Szintén elterjedt válogatási mód a hulladék aprítása és sűrűség szerinti, többlépcsős szétválogatása. Az első, forgó dobban végzett mosási lépésnél a nehezebb (fém-, kő-, üveg-) részecskéket választják le. Ezt követően még több mosási, úsztatási lépéssel igyekeznek a különböző sűrűségű szemcséket szétválogatni. A műanyagok közül a PE és a PP úszik a víz tetején, míg a többi részecske lesüllyed. Ez utóbbiak a vegyes műszaki műanyagfrakciót alkotják, amit már másodlagos nyersanyagként értékesíteni tudnak. A könnyű frakcióra jellemző (PE, PP), hogy szárítása során a nagy felületű részecskéket elsodorja a légáram (fóliamaradékok), ezeket regnanulálják egy szűrővel felszerelt extruderen, és így értékesítik.

Szükség esetén különböző adalékanyagokkal, kompatibilizáló szerekkel javíthatók a regnanulátumok tulajdonságai. Feldolgozás során a hő és nyírás hatására, majd utána az alkalmazás során is degradálódnak a polimerek. Ennek megakadályozására célszerű stabilizátorokat adalékolni a regnanulálás során. Kompatibilizáló szerekkel a vegyes polimerekből álló polimerkeverékek mechanikai tulajdonságai javíthatók. Szükség lehet még színezőanyag adagolására, ami elfedi a regnanulátum sokszor nem túl vonzó színét. Tipikus ilyen színező a korom, ami olcsó és jól fedi a korábbi színt.

A kémiai újrahasznosítás még kevésbé elterjedt, de az ipar érdeklődése egyre nő iránta. Az eljárás során a polimert kis móltömegű komponensekre bontják le, melyeket vagy a műanyag-iparban, vagy egyéb területeken használnak fel. Jelenleg a kemolízis a legelterjedtebb kémiai technika: polikondenzációs műanyagok bontására alkalmas, és monomereket szolgáltat. Elsősorban PET és PUR bontására használják. A másik kémiai módszer a pirolízis, amikor oxigénszegény környezetben, magas hőmérsékleten bontják le a hulladékot koromra, pirolízisolajra és gázokra. A pirolízis akkor lehet jó megoldás, ha a mechanikai újrahasznosítás nem jöhet szóba, például többretegű fóliáknál, kompozitok vagy keverékek esetében. A harmadik módszernél, a krakkolásnál katalitikusan, folyamatos eljárással bontják le a műanyagot különböző egyszerűbb szénhidrogénekre. A termékeloszlás a katalizátortól és a kezelési körülményektől függ. További lehetőség a nagy nyomáson és hőmérsékleten végzett hidrogénezés. Ekkor nő a H:C arány és csökken a keverék aromás szénhidrogéntartalma. Végül az elgázosítást lehet még megemlíteni mint kezelési módszert, amikor is magas hőmérsékleten szénhidrogénekké bontják le a polimereket. A KDV-eljárásnál alacsony nyomáson, megfelelő katalizátorok mellett a kezelt anyagból az oxigén CO₂ formájában szinte teljesen eltávolítható, míg a visszamaradó termék kerozinként vagy gázolajként használható fel [13].

A kémiai újrahasznosítás fő hátránya, hogy általában nem gazdaságos; a gazdaságosságot a kőolaj ára, a magas beruházási költségek és a viszonylag kis termelési kapacitások egyaránt befolyásolják. Egyes számítások szerint például a PET kemolízise 15 000 t/év kapacitástól lehetne nyereséges [16].

Mint láttuk, az EU fejlettebb tagállamaiban az energetikai újrahasznosítás, vagyis az energia-visszanyerés melletti égetés nagyon elterjedt eljárás, előnyben részesítik a lerakással szemben.

Alapvetően két technológiánál égetnek el műanyag hulladékot energiatermelési céllal. Az egyik a cementgyártás, a másik a kommunális hulladékégetés. Az égetés mellett esetenként szóba jöhetnek még fokozottan veszélyes anyagok kezelésére alkalmas egyéb technológiák is, például a termikus plazmákban történő hulladékkezelés. A tiszta műanyagok fűtőértéke nagyon magas, közel azonos a fűtőolajéval, ezért is alkalmas a cementgyárakban történő felhasználásra, ahol ~1500–2000 °C-ot kell előállítani. Magyarországon a négy cementgyár készséggel fogadja az elhasznált gumiabroncstól kezdve a vegyes lakossági műanyag hulladékig az összes, más módon már fel nem használható műanyag hulladékot [17]. A tüzelőanyagok egy légtérben égnék el a többi felhasznált alapanyaggal (mész, agyag), ezért a klinkerben, a cementgyártás köztütermékében oldhatatlan kötést alkotnak az elégetett hulladék maradékával, azaz gyakorlatilag nincs melléktermék az eljárásnak. Az extrém magas hőmérsékletnek és a modern füstgázszűrő berendezéseknek köszönhetően a cementgyárak károsanyag-kibocsátása minimális. A hagyományos hulladékégetőművek jellemzően 800–1100 °C körül üzemelnek. Vegyes háztartási hulladék égetésekor az égetési hatékonyság jelentősen romlik, hiszen magas víztartalmú hulladékokat is elégetnek ahelyett, hogy azok komposztálódna vagy biogázüzembe kerülne [18]. Az adott hőmérséklet-tartományban a kommunális hulladékkal bekerülő műanyag hulladékok nem bomlanak le teljesen, másrészt fokozottan veszélyes, esetenként karcinogén bomlástermékek (dioxinok, furánok, polikondenzált szerves anyagok) is képződhetnek. Kommunális hulladékok égetésekor ezért különös figyelmet kell fordítani a káros melléktermékek képződésére, és meg kell akadályozni azok kijutását a környezetbe, a véggázok termikus, kémiai vagy katalitikus utókezelésével. Szerencsére, a hulladékégetők jelenleg csak nagyon szigorú, az Európai Unió által megszabott füstgáz-ellenőrzéssel, alacsony károsanyag-kibocsátás mellett üzemeltethetők. A hulladékégetőkben képződő hőt felhasználják; a Fővárosi Hulladékhasznosító Mű például 420 ezer tonna kommunális hulladék termikus hasznosítását teszi lehetővé, és ezzel 13 ezer lakás fűtéséhez szükséges gőzt és 45 ezer lakás éves villamosenergia-ellátásához szükséges energiamennyiséget állít elő [19].

Érdekes kérdés, hogy a klímaváltozás szempontjából mi lenne előnyösebb, ha lerakókba tesszük a hulladékot, amit nem tudunk újrahasznosítani, vagy ha elégetjük. Tekintve, hogy a világon még mindig hatalmas mennyiségben bányásszák és égetik a fekete- és barnakőszén, könnyű belátni, hogy valamivel kevesebb fosszilis, elsődleges nyersanyag elégetése mellett ugyanazt a végeredményt érjük el, ha modern, szűrőkkel ellátott, jó hatékonyságú hulladékégetőket építünk a lerakás helyett.

A műanyag-felhasználás csökkentése

Napjainkban egyre népszerűbb nézet, hogy a műanyag-felhasználás akkor csökkenthető, ha alulról szerveződünk, vagyis a saját szokásainkat kell megváltoztatni, hiszen az ipar és a gazdaság érdekei általában ezzel ellentétesek. A „zero waste” mozgalom képviselői például egészen extrém mértékben csökkentik a hulladéktermelésüket, gyakorlatilag nem termelnek szemetet. Csomagolásmentes boltba járnak, otthon főznek, még a higiénias termékeket is maguknak készítik maradék textilanyagokból. Természetesen az ilyen szélsőséges életmódváltást igénylő lépések a társadalom nagy részétől nem várhatók el, az emberek nem szívesen mondanak le a kényelmükről.

Másik lehetőség, hogy törvényi szabályozással igyekezzünk rábírni az embereket a takarékos műanyag-felhasználásra, illetve

az ipart arra, hogy akár magasabb költségek árán is, de környezetbarát megoldásokat és termékeket vezessen be. Az Európai Unió a műanyag hulladék csökkentése, a körkörös gazdaság irányába való elmozdulás és a tengeri állatok védelmében direktívát adott ki 2019 júniusában. Ennek értelmében az egyszerű használatos műanyagok felhasználását csökkenteni, újrahasznosítási arányát pedig növelni kell [20]. Az Unióban a tengerparti hulladékszámllálás alapján a tengeri elhagyott hulladék 80–85%-a műanyag, ebből az egyszerű használatos műanyag 50%-ot, a halázzal kapcsolatos tételek pedig 27%-ot tesznek ki. Ilyen egyszerű használatos termékek például az italos palackok, készleteltárolók/felszolgáló dobozok, gyümölcsös dobozok, műanyag evőeszközök, szívószálak stb. Amennyiben lehetséges, az ilyen termékeket le kell cserélni nem műanyagra vagy többször felhasználható termékekre. Ha nincs jó alternatíva a helyettesítésre, ilyen lehet például az üdítőitalos palack, gondoskodni kell a hulladék megfelelő visszagyűjtéséről és nagy arányban történő újrahasznosításáról. Az újrahasznosítás előmozdításának jó eszköze lehet például a már említett palackvisszaváltási rendszer, vagy annak meghatározása, hogy hány százalék újrahasznosított műanyagot kell tartalmaznia az újonnan forgalomba kerülő palackoknak. ●●●

IRODALOM

- [1] R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, Sci. Adv. (2017) 3(7), e1700782.
- [2] J. Payne, P. McKeown, M. D. Jones, Polym. Degrad. Stab. (2019) 165, 170.
- [3] Y. Zhu, C. Romain, C. K. Williams, Nature (2016) 540(7633), 354.
- [4] J. Zheng, S. Suh, Nature Clim. Ch. (2019) 9(5), 374.
- [5] Bioplastics market data 2019, Eur. Biopl. (2020).
- [6] G.-Q. Chen, M. K. Patel, Chem. Rev. (2012) 112(4), 2082.
- [7] B. Gupta, N. Revagade, J. Hilborn, Progr. in Polym. Sci. (2007) 32(4), 455.
- [8] I. D. Posen, P. Jaramillo, A. E. Landis, W. M. Griffin, Env. Res. Lett. (2017) 12(3), 034024.
- [9] EU-Parliament, Circular economy: the importance of re-using products and materials, 2015.
- [10] <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/what-is-the-circular-economy>, 2020.
- [11] The circular economy for plastics, A European Overview, Plastics Europe. 2019.
- [12] K. Hamad, M. Kaseem, F. Deri, Polym. Degrad. Stab. (2013) 98(12), 2801.
- [13] K. Ragaert, L. Delva, K. Van Geem, Waste Man. (2017) 69, 24.
- [14] PlasticsEurope, Plastics-the Facts 2019.
- [15] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Mustafa Mohamed, A. Alaskar, Constr. Build. Mat. (2020) 253.
- [16] N. George, T. Kurian, Ind. & Eng. Chem. Res. (2014) 53(37), 14185.
- [17] <https://www.lafarge.hu/fenntarthatosag/masodlagos-tuzeloanyag-felhasznalas>
- [18] <https://alteo.hu/eromuvek/meguujulo-gaz/nagykorosi-biogaz-uzem>
- [19] <https://www.fkf.hu/fovarosi-hulladekhasznosito>
- [20] Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2019/904 irányelve az egyes műanyagtermékek környezetre gyakorolt hatásának csökkentéséről, 2019.

ÖSSZEFOGLALÁS

TÁTRAALJAI DÓRA, PUKÁNSZKY BÉLA: A MŰANYAGIPAR ÉS A MŰANYAG-FELHASZNÁLÁS KÖRNYEZETI HATÁSAINAK CSÖKKENTÉSE

A műanyagipar és a műanyag-felhasználás jelenleg csak körülbelül 4%-ban járul hozzá a világ összes szén-dioxid-kibocsátásához, de ha a felhasználás a jelenlegi ütemben nő, akkor ez az arány sokkal nagyobb lehet a közeljövőben. Számos módszer van arra, hogy csökkentsük a műanyagok szénlábnymát, ilyen a biopolimerek bevezetése, a megújuló energiaforrások alkalmazása a gyártás során, az újrahasznosítás és a műanyag-felhasználás csökkentése. Sajnos, a jelenlegi kőolajár mellett ezek a megoldások még sokszor nem elég gazdaságosak ahhoz, hogy tért hódítsanak; egyelőre elengedhetetlen a szigorú törvényi szabályozás a környezetvédelem érdekében. Nagy szükség lenne az emberek szemléletmódjának megváltozására is, ösztönözni kellene a szelektív hulladékgyűjtést, és takarékosabban kellene bánnunk a rendelkezésünkre álló erőforrásokkal.

Salma Imre

ELTE Kémiai Intézet | salma@chem.elte.hu

Légkörkémiiai folyamatok és éghajlatváltozás

A légkör mint az éghajlati rendszer része

A légkör a Föld szilárd és folyékony halmazállapotú – vagyis kondenzált – részéhez gravitációs kölcsönhatással kapcsolódó gáz-burok, amely együtt forog és halad vele. Kémiai szempontból gázok keverékéből és bennük szuszpendált formában lévő, apró, cseppfolyós és szilárd részecskékből áll. A levegő tehát egy kolloid rendszer, amit aeroszolnak nevezünk. A légkör igen intenzív és viszonylag gyors energia- és anyagforgalmat bonyolít le az éghajlati rendszer többi alkotójával: a hidroszférával, a geoszférával, a bioszférával és az antroposzférával. Jó példa lehet erre a víz hatalmas léptékű körforgásában betöltött szerepe vagy a bioszférával folytatott óriási jelentőségű gázcseré a fotoszintézis és a sejti szintű légzés révén. Ezen megfontolásokból következik, hogy a légkör az éghajlati rendszer különösen fontos részét képezi.

Energiamérleg

Földünk egységnyi felületére 342 W teljesítmény érkezik a Napból elektromágneses sugárzás formájában. A napsugárzás spektrális eloszlásának maximuma a látható tartományban található, mintegy 0,5 μm hullámhossznál. A sugárzás energiájának egy része (kb. 31%-a) visszaverődik az úrbe a felhőkről, a levegőből és a földfelszínről. Ez a planetáris albedó. Az energia egy másik részét (kb. 20%-át) a levegő elnyeli, ami a fotokémiai reakciókhoz szükséges energetikai feltételt jelenti. A maradék (kb. 49%) energia eléri a Föld felszínét, és ott abszorbeálódik. Ennek következtében a Föld is elektromágneses sugárzást, ún. hőmérsékleti sugárzást bocsát ki. E sugárzás energia-eloszlásának maximuma azonban lényegesen nagyobb a napfény hullámhosszánál; mintegy 10 μm körül található. A Föld felszínéről távozó hőszugárzást a levegő bizonyos összetevői – például a vízgőz, a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid, a halogénezett-szénhidrogének és az ózon – nagy valószínűséggel elnyelik. Ezeket az összetevőket üvegházhatású gázoknak nevezzük.

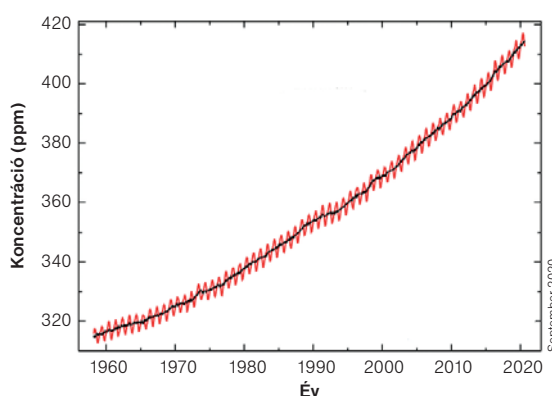
A levegőben elnyelt energia (ami a napsugárzásból, a hőszugárzásból, a felhőképződéshez kapcsolódó látens hőből és a légáramlással közvetített, konvektív hőből tevődik össze) a felszín sugárzásánál kissé nagyobb hullámhosszon emittálódik újra a levegőben, első közelítésben 5–6 km magasságban. A kisugárzott energia mintegy 62%-a térbeli okok miatt visszajut a Föld felszínére, és ott ismét elnyelődik, míg a maradék kb. 38% az úrbe távozik. Az üvegházhatású gázok által elnyelt és visszajuttatott energia következtében a Föld felszínén a globális átlagos hőmérséklet +15 °C, szemben a –18 °C-kal, ami az említett gázok nélkül alakulna ki. Ez nagyban hozzájárul ahhoz, hogy a Föld élhető bolygó legyen. Az élet fennmaradását tehát nemcsak a légkör fő

alkotóinak (például O_2), hanem a kis vagy nyomnyi mennyiségben előforduló, további gázok jelenlétének is köszönhetjük.

A beérkező napenergia, az albedó és a kibocsátott hőszugárzás is inhomogén térbeli eloszlásúak a Földön, ami időben többé-kevésbé állandó hőmérsékletet, légnyomást, sűrűséget és más különbségeket eredményez. A gradiensek az energia és az anyag áramlásos újraelosztásához vezetnek a levegőben és az óceánokban létrejövő, nagyléptékű körfolyamatok rendszere révén. Ilyen például a Golf-áramlat vagy a passzátszél.

Többlet fűtőhatások

Az emberiség szükségleteinek és igényeinek kielégítése során üvegházhatású gázokat bocsát a levegőbe. A gázok – kibocsátási helyüktől függetlenül – a Föld teljes légkörében elkeverednek. Az emisszió mára már olyan mértékűvé vált, hogy a gázok globális koncentrációja példátlan sebességgel nő. A CO_2 globális légköri koncentrációjának alakulását a helyszíni mérések megkezdése óta az **1. ábrán** szemléltetjük. Ez a növekmény már összemérhető az előző jégkorszak és a jelenlegi köztes melegebb időszak (az ún. interglaciális) átmenetekor bekövetkezett növekedéssel.



1. ábra. A CO_2 globális koncentrációjának növekedése a leghosszabb adatsorral rendelkező, a Meteorológiai Világszervezet Global Atmosphere Watch mérőhálózatának részeként működő Mauna Loa Obszervatórium (Hawaii-sziget) adatai alapján [1]

Piros görbe: mért érték, fekete görbe: évszakos változékonysággal korrigált menet

A többi üvegházgáz kissé összetettebb időmenetet, de – egyetlen kivétellel – növekvő tendenciát mutat. A szén-dioxid koncentrációja 43, a metáné 250, a dinitrogén-oxidé 14%-kal növekedett, míg az ózoné 4%-kal csökkent.

Időközben kiderült, hogy a bioszféra-légkör kölcsönhatás nélkül nem magyarázhatók meg az üvegházgáz légköri folyamatai,

ezért a távoli helyeken létrehozott mérőhálózatot kontinentális területekre is kiterjesztették. Ennek keretében Magyarországon is, a Hegyhátsálon végeznek értékes méréseket az Országos Meteorológiai Szolgálat szakemberei közel 30 éve. [2]

A nagyobb koncentrációk miatt a Föld felszínének hősugárzása nagyobb mértékben nyelődik el a levegőben. Az üvegházhatású gázok megnövekedett koncentrációja átlagosan „többlet” fűtőhatást eredményez az ipari forradalom előtti időszakhoz képest. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a felszín hőmérséklete mindenhol és egyenletesen növekszik. A sarkvidékek például érzékenyebben reagálnak a változásra. A levegőszennyezésből származó koromrészecskék szerepe egyre növekvő mértékben érvényesül a jégfelszín kiterjedésének zsugorodásában. [3] Érdemes azt is rögzíteni, hogy a CO₂ koncentrációja és a globális átlaghőmérséklet közötti kapcsolat nem írható le egyszerű, ok-okozati összefüggéssel.

Többlet hűtőhatások

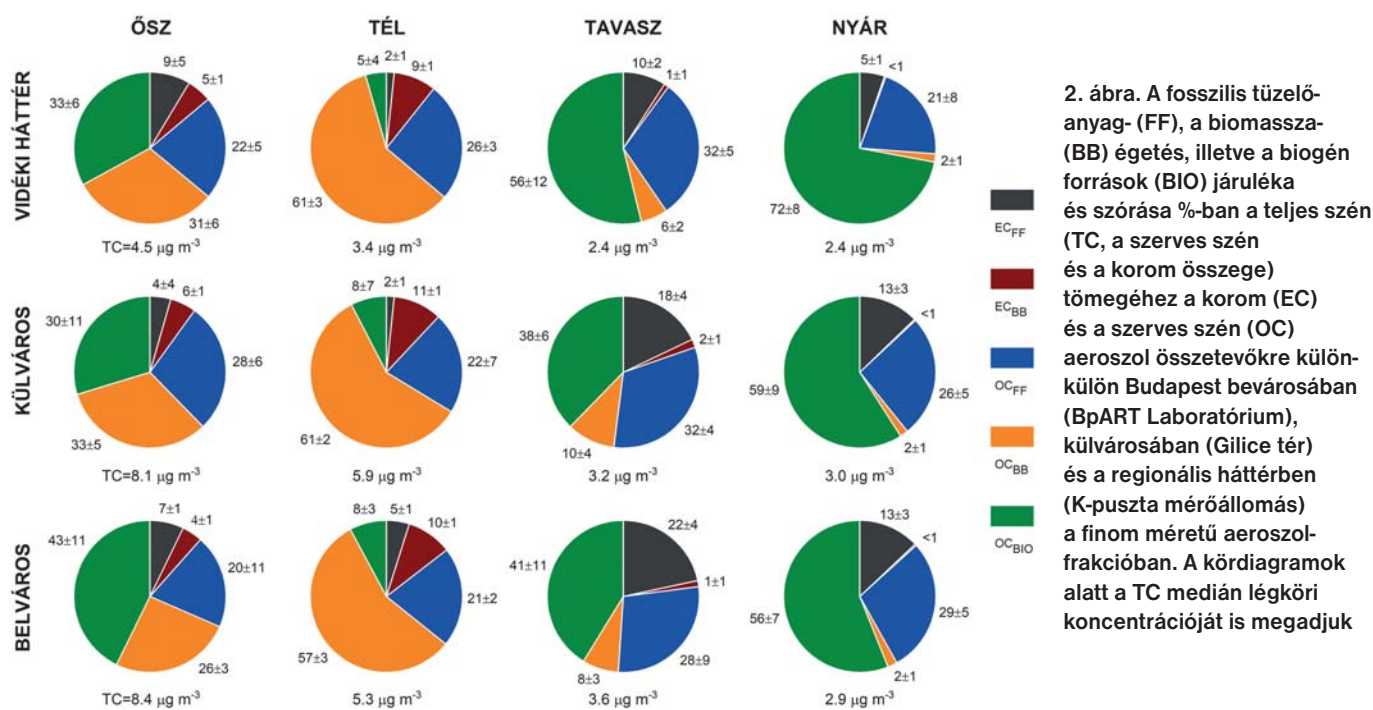
Az emberi tevékenység befolyásolhatja a légköri aeroszol részecskék koncentrációját is. Az aeroszol pedig szintén alakíthatja a Föld energiamérlegét: közvetlenül, tehát a napfény vagy a hősugárzás szórása és abszorpciója által, vagy közvetve, tehát a felhők optikai és mikrofizikai tulajdonságainak megváltoztatásán keresztül. Közvetlen éghajlati hatást elsősorban a szulfát aeroszol, a széntartalmú aeroszol, az ásványi por, illetve a korom aeroszol fejtenek ki optikai tulajdonságaik és méreteloszlásuk miatt. Ezen aeroszoltípusok emissziójának jelentős része (az ásványi por kivételével) az emberi tevékenységhez kapcsolódik. Fő forrástípusaik a széntartalmú anyagok, nevezetesen a fosszilis üzemanyagok (fossil fuel, FF) tüzelése, illetve a biomassza égetése (biomass burning, BB), valamint a biogén (leginkább növényi) emissziót követő légkörkémiái képződés. [4]

A biomassza égetése erdőtüzeket, mezőgazdasági tüzeket, illetve fa, szalma és szerves mezőgazdasági hulladék háztartási és ipari méretű égetését foglalja magában, fűtési vagy főzési céllal. Ezen formáknak fontos szerepe lehet a decentralizált energiatermelésben, illetve a fosszilis tüzelőanyagok helyettesítésében.

A legnagyobb mennyiségben égetett biomassza a fa, amelynek fő kémiai építőelemei a cellulóz, a hemicellulóz és a ligninek. A cellulóz lineáris biopolimer, amely D-glükóz monomeregységekből épül fel. A hemicellulóz kevésbé szabályos szerkezetű, fő monomerjei a glükóz, a mannóz, a galaktóz és a xilóz. A fa lángoló égése közben (300 °C feletti hőmérsékleten) anhidrocukrok, illetve illékony szerves vegyületek keletkeznek, amelyek a lángban tovább oxidálódnak. Az égéstermékek közül jelentős mennyiségben előforduló komponensek a levoglükozán (1,6-anhidro- β -D-glükopiranoz) és téniszomerjei, a mannozán, illetve a galaktózán. Ezek a vegyületek az aeroszol részecskékre kondenzálódnak, amikor a füstgáz hőmérséklete csökken. A vegyületek stabilnak tekinthetők a levegőben az aeroszol 7–10 napos légköri tartózkodási ideje alatt, ezért a BB forrás molekuláris markereként alkalmazhatók. A fosszilis anyagok égetésével keletkezett széntartalmú összetevőket a ¹⁴C (radiokarbon) méréssel lehet megkülönböztetni a többi forrástól. A 2. ábrán a széntartalmú részecskék fő forrástípusainak járulékát mutatjuk be a Kárpát-medencében, illetve azon belül Budapesten. [4]

A fosszilis üzemanyagok tüzelése viszonylag állandó arányban járul hozzá a szén teljes (TC) mennyiségéhez, míg a BB és a biogén források járuléka nagymértékben változik évszakonként. Ősszel a három fő forrástípus közel azonos jelentőségű, télen a BB a meghatározó forrás mindegyik környezetben, tavasszal az FF és a biogén források dominálnak, míg nyáron a növényi forrástípus válik meghatározóvá. Nyáron a BB alig minősíthető, míg a növények jelentősége télen sem elhanyagolható.

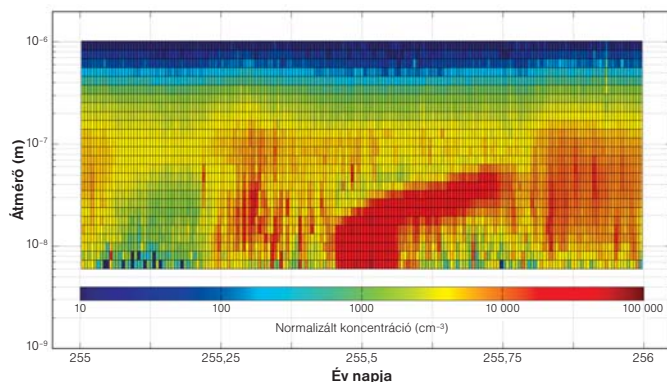
A hűtőhatás jelentős része a felhőkhöz kapcsolódik. A Föld felszínének nagyobb részét általában felhők borítják. A felhők létrejöttéhez szükséges feltétel az aeroszoloknak köszönhetően valószínűleg meg. Aeroszol részecskék nélkül nincsenek felhők és nincs csapadék a természetben. A felhőcseppek keletkezési folyamatában a részecskék bizonyos, kis aránya, az ún. felhőkondenzációs magvak (CCN) vagy jégkristály-magvak játszanak meghatározó szerepet. Hatékony CCN-tulajdonsággal rendelkeznek a vízzoldható vegyületek vagy a felületükön poláros csoportokkal rendelkező részecskék, például a tengeri sókristályok, a szulfátrészecskék vagy a biomassza-égetés termékei.



A Föld légkörében globálisan és átlagosan lényegében állandónak tekinthető a vízgőz mennyisége, viszont az aeroszol részecskeszám-koncentrációja változhat az emberi tevékenység hatására. Szennyezettebb levegőben az azonos mennyiségű vízpára több részecskére kondenzálódik, így nagyobb számú, de kisebb méretű csepp keletkezik. Ezek együttes felülete nagyobb, így nagyobb mértékben szórják a napfényt (ún. első közvetett aeroszol éghajlati hatás). Az ilyen felhők légköri tartózkodási ideje is megnő, és csapadékok hozó arányuk csökken (második közvetett hatás). A felhőcseppek ugyanis nem tudnak elég nagyra nőni ahhoz, hogy csapadékként távozzanak a légkörből. A felszín hűlése, illetve a légoszlop melegekedése kihat a hőmérséklet függőleges eloszlására is (harmadik közvetett hatás), ami befolyásolja például a víz globális körforgását vagy más légköri összetevők (pl. légköri nyomanyagok) és állapotjelzők vertikális transzportfolyamatait és dinamikáját. A kevesebb csapadékmennyiség és az egyenetlen csapadékeloszlás extrém időjárási helyzetek formájában súlyos természeti, gazdasági és mezőgazdasági károkat okozhat.

A hűtőhatások komolyan ellensúlyozzák az üvegházhatású gázok melegítő hatását, és hozzájárulnak az éghajlat fenntartásához és szabályozásához. Az éghajlati modellek legnagyobb, egyedi bizonytalansággal rendelkező összetevője az aeroszol közvetett éghajlati hatása. Ez leginkább a CCN-eken keresztül valósul meg. A természetben előforduló, maximum 0,2% túltelítettség a CCN számának körülbelül 50%-a légköri nukleációból származik, ami összekapcsolja az aeroszol-képződést az éghajlatváltozás témakörével. [5]

A légköri nukleáció elsőrendű fázisátalakulás, amely során lég-nemű anyagokból (pl. SO_2 , illékony szerves vegyületek, VOC) fotokémiai oxidációt követően kisebb gőznyomású, kondenzációra képes gőzök (pl. H_2SO_4 , extrém kis illékonyaságú VOC-k) keletkeznek, amelyek a légkörben jelen lévő más anyagokkal (pl. H_2O , NH_3 , aminok) új, szilárd vagy folyékony fázist – azaz aeroszol-rendszert – eredményeznek (3. ábra).



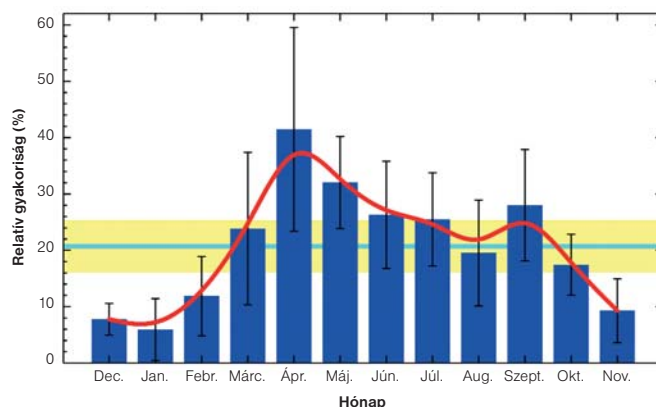
3. ábra. Új aeroszol részecskék keletkezése és növekedése Budapest belvárosában (BpART Laboratórium) 2020. szeptember 11-én. A piros alakzatot banángörbének hívjuk

Az ábra arra utal, hogy a szennyező gázok elegyét 10 óra után már erősebb napsütés érte, aminek hatására fotokémiai reakciók mentek végbe a levegőben. A reakciók a gázokat általában kevésbé illékony, tehát kondenzálódó gőzökké alakítják. A gőzök a meglévő aeroszol részecskék felületére kondenzálnának. Csak-hogy a levegőben lévő aeroszol részecskék koncentrációja ilyen időszakokban kicsi, és így nem állt rendelkezésre a kondenzációhoz elegendően nagy felület. A gőzök koncentrációja a levegőben egyre nőtt. Hamarosan kialakultak az új aeroszol részecskék keletkezésének a feltételei, és megtörtént a nukleáció. A megszületett

részecskék tovább nőttek a nap folyamán, mert a gőzök ezután már a nanorészecskékre kondenzálódtak. A növekedés 5–6 óráig tartott, ami után a részecskék hatékony CCN-ként viselkedhetnek. A légköri nukleációval és kondenzációs növekedéssel kialakult aeroszol részecskék vízfelvevő képességéről és ennek éghajlati, légkörkémiái, illetve egészségügyi jelentőségéről, illetve következményeiről azonban jelenleg még kevés tudással rendelkezünk.

A nukleáción kívüli, más folyamatok – például magas hőmérsékletű emisszió vagy szélérózió – is létrehozhatnak részecskéket, de ez utóbbiak száma elhanyagolható az előző csoportokhoz képest.

A nukleáció éves átlagos gyakorisága 13 és 28% között változott Budapesten 2008 és 2019 között 22% középértékkel. [6] Ez



4. ábra. Az új részecske-képződés átlagos havi relatív gyakoriságának eloszlása 2008 és 2019 között Budapest belvárosában (BpART Laboratórium). A havi hibahatárok a szórás, a vízszintes világosabb kék vonal az összesített éves középértéket, míg a sárga sáv ennek szórását jelöli. A piros görbe vizuális segédletként szolgál

azt jelenti, hogy minden 4–5. napon történik nukleáció. Előfordulási gyakorisága az évszaktól is függ. Az új részecske-képződésnek januárban abszolút minimuma, augusztusban lokális minimuma, míg márciusban vagy áprilisban abszolút maximuma, illetve szeptemberben lokális maximuma van (4. ábra). Ennek magyarázata multifaktoriális okokra vezethető vissza, amelyek közül kiemelhető a biogén emisszió hatása, ami az élő természet éves ciklusához kapcsolódik, illetve valamilyen további, általánosan érvényes jelenség, például a részecskék túlélési valószínűsége.

Kilátások

Az éghajlat eddigi változásai aggasztók, a modellek előrejelzései még inkább azok. Az éghajlati rendszert és különösen annak légköri részét többlet fűtő- és többlet hűtőhatások alakítják. Az előbbi főleg az üvegházgázok növekvő koncentrációjával, míg az utóbbi leginkább az aeroszol részecskékkel kapcsolatos. A részecskék – éghajlati szerepük mellett – azonban igen fontos egészségügyi és környezeti következményeket is okoznak. Az aeroszol hatása egyrészt kedvező, mert közvetett hűtőhatásuk révén ellensúlyozzák a Föld globális felmelegedését. Másrészt viszont hátrányos, mert szervezetünket olyan mértékű és minőségű egészségügyi kockázatoknak teszik ki, amelyekre nem vagyunk felkészülve. A fejlettebb gazdaságú országok az elmúlt években sikeres egészségvédelmi intézkedéseket valósítottak meg a levegőszennyezés csökkentése terén. Ezzel azonban az éghajlat érzékenységét és a globális felmelegedést is növelték.

Mi lehet hát a megoldás? Az ellentmondás feloldható, sőt a lehetséges válasz jól példázza egy új szemlélet kialakulását a kör-

nyezettel való kapcsolatunkban. Az emberiség legnagyobb kihívásaira (amelyek között a népességgel, az éghajlatváltozással, az energiatermeléssel, az élelem- és vízellátással, a biodiverzitással, valamint a környezetszennyezéssel kapcsolatos elképzelések feltétlenül szerepelnek) nem léteznek külön-külön megoldások, hanem ezekre összegző választ kell keresnünk. Ennek keretében az éghajlatváltozás és a légszennyezés mérséklése együtt megvalósítható, ha a fenntarthatóság fogalmát, a kiotói jegyzőkönyv szellemiségét és a biomasszára épülő energetika, illetve kémiai ipar kihívásait és lehetőségeit komolyan vesszük.

Köszönetnyilvánítás. A kutatómunkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (K116788 és K132254) támogatta. Köszönetemet szeretném kifejezni az ELTE BpART Laboratórium munkatársainak, Weidinger Tamás egyetemi docensnek, Zsigrainé Vasanits Anikó egyetemi adjunktusnak, Gyöngyösi András Zénó tudományos segédmunkatársnak és Thén Wanda PhD-hallgatónak, valamint korábbi kollégáimnak és tanítványaimnak értékes munkájukért és segítségükért. Bővebb információ a <http://salma.elte.hu/BpART/> címen található.

IRODALOM

- [1] US National Oceanic and Atmospheric Administration, Global Monitoring Laboratory, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>, utolsó letöltés dátuma: 2020. 09. 13.
- [2] Haszpra, L., Mérőföldkövek a légköri szén-dioxid-forgalomban. Magyar Tudomány (2016) 12, 1447–1454.

- [3] Gelencsér, A., Éghajlatváltozás és emberi tevékenység. Magyar Tudomány (2017) 6, 674–679.
- [4] Salma, I. et al., Fossil fuel combustion, biomass burning and biogenic sources of fine carbonaceous aerosol in the Carpathian Basin. Atmospheric Chemistry and Physics (2020) 20, 4295–4312.
- [5] Salma, I., Németh, Z., Dynamic and timing properties of new aerosol particle formation and consecutive growth events. Atmospheric Chemistry and Physics (2019) 19, 5835–5852.
- [6] Salma, I. et al., Influence of vegetation on occurrence and time distributions of regional new aerosol particle formation and growth, benyújtva, 2020.

ÖSSZEFOGLALÁS

SALMA IMRE: LÉGKÖRKÉMIAI FOLYAMATOK ÉS ÉGHAJLATVÁLTOZÁS

A Föld éghajlatának antropogén eredetű átalakulása többlet fűtő- és többlet hűtőhatások eredőjeként jelentkezik. Az előbbi elsősorban az üvegházgázok növekvő koncentrációjával kapcsolatos, míg az utóbbit leginkább az aeroszol közvetett hatása jelenti a felhők révén. A változás további, rendkívül fontos környezeti folyamatokkal, például a víz körforgásával, légköri keveredéssel vagy a levegőtisztasággal is kapcsolatos. A kihívások megoldását egységes környezeti szemlélettel érdemes keresnünk.

Tompos András

■ TTK Anyag- és Környezetkémiai Intézet | tompos.andras@ttk.hu

Klímaváltozás és energiaellátás, különös tekintettel a megújuló forrásokra

A hidrogén mint energiahordozó már a közeljövőben fontos szerepet játszhat a hagyományos és megújuló energiaforrások integrálásában. Ha a fel nem használt villamos energia egy részét megújuló forrásokból történő hidrogén előállítására fordítjuk, majd a kapott hidrogént az energiaágazaton kívül használjuk fel, az egyébként leszabályozott elektromos energiát megfelelően hasznosítani lehet. Az elektrolízissel kinyert hidrogén akár közvetlenül bevezethető a földgázhálózatba, akár felhasználható a közlekedésben hajtóanyagként, a vegyiparban és az acéliparban pedig energiaforrásként és redukálószerként is. A Paksi Atomerőmű bővítése és a megújuló források szélesebb körű elterjedése esetén a hidrogén-előállítás és -felhasználás Magyarországon is összekapcsolhatja a nagy energiatermelő és energiafogyasztó rendszereket és jelentősen csökkentheti azok szénlábnymát.

Energiaátmenet a hidrogénteknológia segítségével

A Párizsi klímaegyezmény szerint a világ energiaátmenetében a fosszilis-gazdaságtól a szén-dioxid-mentes gazdaság felé haladva

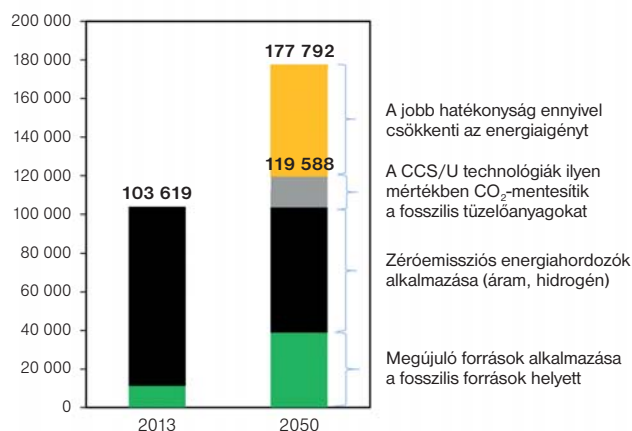
2 °C alatt kell tartani az iparosodás előtti szinthez képesti felmelegedést. Ez a cél igen ambiciózus, hiszen az energiához kapcsolható szén-dioxid-kibocsátást 900 Gt alá akarja vinni 2100-ra, amit már 2050-ben is meg fog haladni a világ, ha a jelenlegi pályán marad.

Nem kevés erőfeszítésre lesz szükség, hogy a szén-dioxid-kibocsátást 60%-kal csökkentsük 2050-ig úgy, hogy közben a Föld lakossága 2 milliárddal növekszik és ezen belül több száz millióval az olyan felzárkózó gazdaságoké, amelyek lakossága túlnyomórészt a középosztályhoz fog tartozni.

Ilyen mértékű dekarbonizációt csak az energiarendszer radikális átalakításával érhetünk el. Az **1. ábra** az energiaátmenet négy pillérét mutatja be.

Az energiahatékonysági cél szerint a világ primer energiaigénye csak 10%-kal haladhatja meg a 2015. évi igényt úgy, hogy a GDP megháromszorozódik, míg a lakosság évente 70 millió fővel nő. Magyarország Nemzeti Energia- és Klímastratégia (NEKT) [2] is úgy számol, hogy az ország végső energiafelhasználása 2030-ban nem lesz több, mint a 2005-ös érték (785 toe/218 TWh), vagyis a GDP

Globális energiaigény 2013-ban és 2050-ben, TWh



1. ábra. Az energiaátmenet kihívásai [1]

● megújuló források, ● fosszilis források, ● CO₂-mentesített fosszilis források
 ● el nem használt források

növekedésének üteme egyre nagyobb mértékben haladja meg az energiafelhasználás növekedését. Magyarország 2030-at követően vállalja, hogy a végső energiafelhasználás 2005-ös szintet meghaladó növekedése esetén a növekményt kizárólag karbonsemleges energiaforrásból biztosítja.

A második pillér szerint az energiaellátást a megújuló forrásokra kell alapozni. A 2 °C-os forgatókönyv szerint a világ villamosenergia-termelésében a megújulók részaránya 23%-ról 68%-ra fog növekedni világviszonylatban, ami kihívásokat jelent az áramellátás és a kereslet összehangolásában.

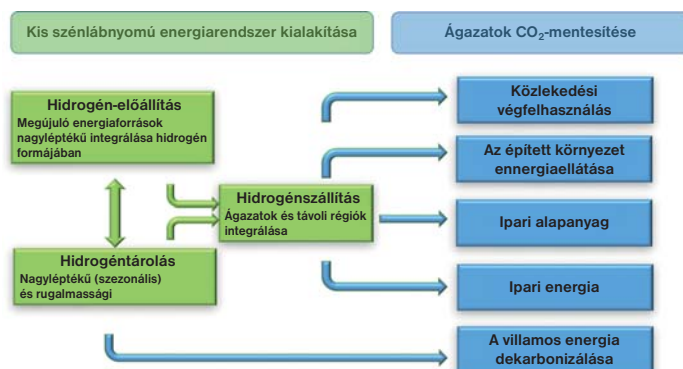
Az 1. ábrán látható harmadik pillér a végfelhasználói alkalmazásokban, azaz a közlekedésben, az épített környezetben és az ipari ágazatok energiafelhasználásában, a felhasználás helyén zéróemissziós energiahordozók használatát követeli meg. Néhány terület – a kisebb személyautók, lakossági fűtés-hűtés – könnyedén „fosszilis-mentesíthető” árammal, azonban a nagyobb hatótávolságot vagy nagyobb energiaigényt megkövetelő közlekedési alkalmazások (nehézgépjárművek, repülőgépek), illetve az ipari folyamatok hőigényének biztosítása úgy, hogy a felhasználás helyén ne legyen káros kibocsátás, már nagyobb kihívást jelent, ami csak árammal már nem valósítható meg.

Végül, a még a rendszerben maradó fosszilis energiahordozókból felszabaduló szén-dioxidot meg kell kötni és a vegyiparban hasznosítani (carbon capture and storage and utilisation – CCSU).

A villamos energia mellett a hidrogén lesz a kibocsátásmentes energiarendszer fő energiavektora, aminek igen egyszerűen az az oka, hogy a tiszta villamos energián alapuló rendszer – a hidrogén nélkül – leküzdhetetlen akadályokkal szembesülne. A két energiavektor egymást támogatva jelentős szerephez juthat a megújuló villamosenergia-termelés integrálásában, az ellátásbiztonság erősítésében és a dekarbonizációs célok elérésében egyaránt.

A hidrogén szerepét a klímavédelemben a 2. ábra szemlélteti [1], ami alapján a hidrogén:

- Ideális energiavektorként összeköti a megújuló energiaforrásokat számos végfelhasználói lehetőséggel.
- CO₂ kibocsátásától mentes, amennyiben tiszta villamos energiát felhasználva elektrolízissel vagy CCSU-technológiát is alkalmazva földgázból állítják elő.
- Nagy távolságokba lehet szállítani, ami hozzájárul az energiaszegényebb régiók és országok energiabiztonságának meg-



2. ábra. A tiszta hidrogén szerepe az energiaátmenetben [1]

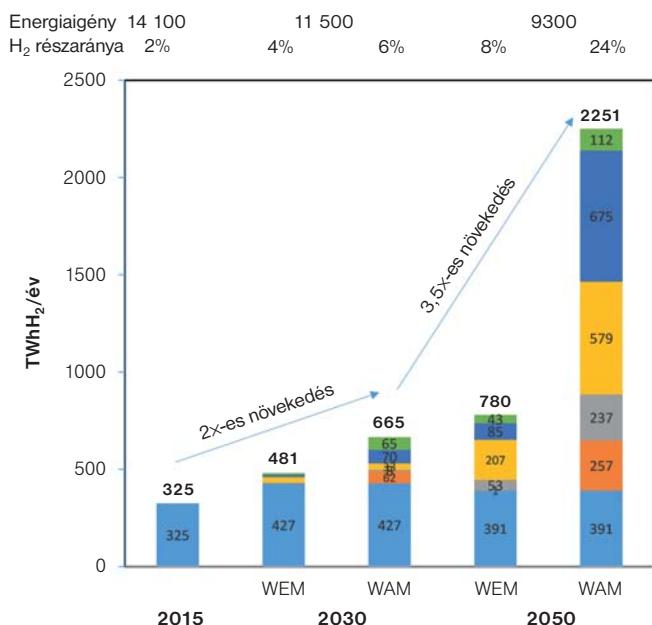
teremtéséhez. A hidrogén lehetővé teszi a jelenlegi földgáz-hálózat használatát is.

- Alkalmasság nélkül szezonális tárolásra, lehetővé téve a stratégiai fosszilisenergia-tárolók kiváltását és a villamos hálózati szabályozási feladatokat. A megújuló vagy alacsony szén-dioxid-lábnymú hidrogén nagy léptékű (szezonális) tárolása és visszaalakítása villamos energiává fontos rugalmassági lehetőség lesz a jövőbeni energiarendszerben a változó áramellátás és az energiaigény kiegyensúlyozására.
- Alkalmasság a végfelhasználói alkalmazások széles spektrumának CO₂-mentesítésére, tiszta villamos és hőenergiát biztosítva mind a közlekedési, mind a telepített energiaellátás számára. Különösen azoknak az alkalmazásoknak a dekarbonizálását várhatjuk a hidrogéntől, amelyek más megfelelő műszaki megoldás hiányában nehezen villamosíthatók. Ez igaz az acéliparra és a közlekedési ágazat egy részére, így a nehézgépjárművek, a nagyméretű személyautók, a nem villamosított vasúti közlekedés és a buszok szegmensében. A légi és vízi közlekedés is hidrogénalapú speciális megoldásokat fog igényelni, mint például a szintetikus üzemanyagok (power to Liquids – PtL). A vegyiparban a jelenleg is hidrogént alkalmazó eljárások egész sora CO₂-mentesíthető a fosszilis-eredetű metán gőzreformálásán alapuló hidrogén kiváltásával megújuló vagy kis szénlábnymú hidrogénnel.

A hidrogén nem pusztán az energiaátmenet jelentette kihívások változatos megoldásának egyik lehetséges eszköze, hanem az egyik kulcsa, ami nélkül a 2050-es klímavédelmi célok biztos, hogy nem érhetők el.

Ha a hidrogéntekológiák térnyeréséhez szükséges intézkedéseket uniós, nemzeti és helyi szinten meghozzák, akkor a hidrogén Európa teljes energiaigényének akár 24%-át is biztosíthatja, ami megfelel hozzávetőleg 2250 TWh energiaigénynek 2050-ben. Azonban a teljes értéklánc mentén (az előállítástól a végfelhasználásig) még a döntéshozók, az ipari szereplők és a befektetők összehangolt cselekvésére van szükség. Amennyiben ez az összhang nem valósul meg és a jelenlegi szakpolitikai keretek maradnak érvényben, (kiegészítő intézkedések hiányában) a hidrogéntekológiák kapacitásainak kiépítése sokkal kisebb szintet érhet csak el, és a klímacélok nem teljesülnek. A 3. ábrán a WEM- (with existing measures) forgatókönyv megvalósulása esetén csupán 780 TWh hidrogénfogyasztást prognosztizálhatunk 2050-re, szemben az ambiciózus forgatókönyvben elvárt 2250 TWh-val. Az ambiciózus jövőkép (with additional measures, WAM) szerint az EU-ban a hidrogéntekológiáknak köszönhetően 560 Mt szén-dioxid-kibocsátást lehet megspórolni évente, több mint 5,4 millió munkahely teremtése és mintegy 820 milliárd € éves

bevétel várható. Az európai és a globális jövőképeket 2050-re a **4. ábra** szemlélteti.



3. ábra. A hidrogénfogyasztás változása szektoronként az Európai Unióban 2050-ig [3]

• fosszilis-alapú hidrogénpiacok; • ipari alapanyag; • ipari energia; • épületek áram- és hőellátása; • közlekedés; • villamosenergia-ágazat



4. ábra. A hidrogénteknológia-telepítések és -kapacitások európai [3] és globális [1] jövőképe (2050)

A hazai hidrogénteknológia-telepítések és -kapacitások jövőképe 2030-ig a NEKT elemzése alapján

„A stratégia időtávján a hidrogén jelentős szerephez juthat a megújuló villamosenergia-termelés integrálásában, a hazai ellátás-biztonság erősítésében, és dekarbonizációs céljaink elérésében egyaránt” írja a hazai terv [2]. Ugyan bizonyos mértékű zöld hidrogén kapacitások már 2030-ig is kiépülhetnek a hagyományosan fosszilis-alapú (főleg metán vízgőzreformálása) hidrogénpiacok (pl. ammónia/metanol/olefingyártás, olajfinomítás stb.) mellett, de a kis szénlábnymó (nukleárisáram-alapú) vagy zöld hidrogénteknológiák komolyabb piaci részesedésére 2030-at követően kerülhet sor. A hazai NEKT a 2021–2030-as időtávot egyfajta előkészítő fázisnak tekinti a hidrogénteknológiák szempontjából, amelynek során közfinanszírozású alap- és alkalmazott kutatásokra, valamint azokra épülő magántőkét is bevonó innovációs és demonstrációs projektekre kell fókuszálni, a sza-

bályozási környezet akadályait elhárító intézkedéseket kell hozni és egymással szinkronban fokozatosan bővíteni a hidrogénalapú közlekedési és hidrogén-ellátási infrastruktúrát.

A közelmúltban igen tanulságos elemzés látott napvilágot, amely az EU-tagállamok NEKT-adatai mellett egyéb nyilvánosan elérhető adatokat használ fel az elemzést végző cég modellező algoritmusában [4]. Az elemzés minden EU-s tagállamra megállapította a műszakilag lehetséges megújuló-alapú elektromosenergia-termelés mértékét, ami biztatóan nagyra adódott Magyarország esetén. Elvileg 170 TWh éves megújuló villamos energia termelésére lennének képesek, ami 3,28-szorosa a prognosztizált teljes villamosenergia-igényünknek 2030-ban. Azonban ennek még csak töredékét fogjuk realizálni 2030-ig.

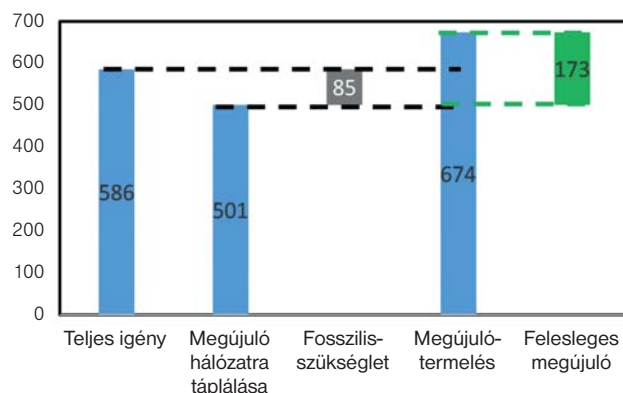
Magyarországon elsősorban a naperőműi kapacitások bővítése van napirenden. A kiegészítő intézkedéseket is figyelembe véve WAM-forgatókönyvben 2030-ra 11–12 TWh megújuló villamosenergia-termelés várható. A termelés alapjául szolgáló tervezett beépített kapacitások 6500 MW naperőműi, 330 MW szélőműi, 796 MW biomassza-alapú áramtermelés, amihez még 57 MW vízőműi és 60 MW „egyéb” járul hozzá.

Fontos megjegyezni, hogy ha ezek a kapacitások egy időben 100%-on működnek, az az átlagos hazai villamos teljesítmény-igény közel másfélszeresét biztosítaná az adott pillanatban. Szerencsére azonban a csúcstermelési időszakok igen változatosan jelennek meg, ami mérsékli annak a kockázatát, hogy ilyen jellegű túlerőtermelésre kerüljön sor, azonban a decentralizált és részben időjárásfüggő termelési struktúrából fakadó kihívásokat kezelni kell.

Az energiatermelés rövid távú ingadozásait hazánkban elsősorban a gáztüzelésű erőművek tudják egyelőre kiegyenlíteni, de a NEKT szerint teret kell adni az új, innovatív megoldások terjedésének is, mint amilyen az energiatárolás és a keresletoldali válaszintézkedés. [2]

Az energiatárolás piaci lehetőségeit tárgyaló tanulmány szerint még igen nagy megújuló-penetráció esetén is számottevő a fosszilis-alapú kiegyenlítőkapacitás szükséglete [5]. Részben azért, mert a megújuló energiák szakaszosan állnak rendelkezésre, részben pedig azért, mert az új tárolókapacitás kiépítése a megújuló energiák tárolására és a villamosenergia-rendszerbe történő visszatáplálására (power-to-power, PtP) egy bizonyos méretnél túl egyelőre nem megtérülő beruházás [5]. Németország példáján keresztül mutatták be, hogy 2050-ben a teljes német villamosenergia-igényt (586 TWh) is meghaladó megújuló áramtermelésre lehet számítani (674 TWh), de a stabil energiaellátás biztosításához

5. ábra. A németországi villamosenergia-helyzet 2050-ben. Dacára a nagy mennyiségű megújuló termelésének, további fosszilis forrásokra is szükség lesz [5]



még további 85 TWh fosszilis-felhasználásra is szükség van (5. ábra). Kiszámolható, hogy mintegy 173 TWh megújuló energiával nem igazán tudnak mit kezdeni. Ha teljesen új tárolókapacitásokat építenek ki, akkor azok telepítési és működési költségei viszonylag kis telepített teljesítmény mellett is hamar meghaladják az el nem használt fosszilis tüzelőanyagok árából, illetve az azokból így nem képződő szén-dioxidból (kvóta) származó megspórolt költségeket. A fenti példában a fosszilis-igényt 49 TWh-ig tudják lecsökkenteni „költségsemleges” forgatókönyv szerint, ha új szivattyús energiatárolós üzemeket hoznak létre hozzávetőleg 65 GW összes teljesítménnyel. A szivattyús energiatárolás PtP- (azaz a teljes ciklus) hatásfoka 80%, ami rendkívül jó. A 65 GW teljesítményű tárolók egyszerre 0,5 TWh tárolására alkalmasak, de éves szinten képesek 36 TWh energia tárolására (46 TWh áram átalakításával), és még ekkor is marad 127 TWh „felesleges” megújuló áram. A megújuló áramtermelésből keletkező, el nem tárolt villamos energia potenciális mennyisége tehát nagy megújuló-penetráció mellett drasztikusan megnő. Ezeket a kapacitásokat, ha nem tudjuk tárolni, akkor vagy le kell szabályozni, vagy a megtermelt áramot ki kell vezetni a villamosenergia-ágazatból (pl. power-to-gas, PtG), ami csak akkor nem baj (sőt előnyös), ha segíti a többi ágazat dekarbonizációját.

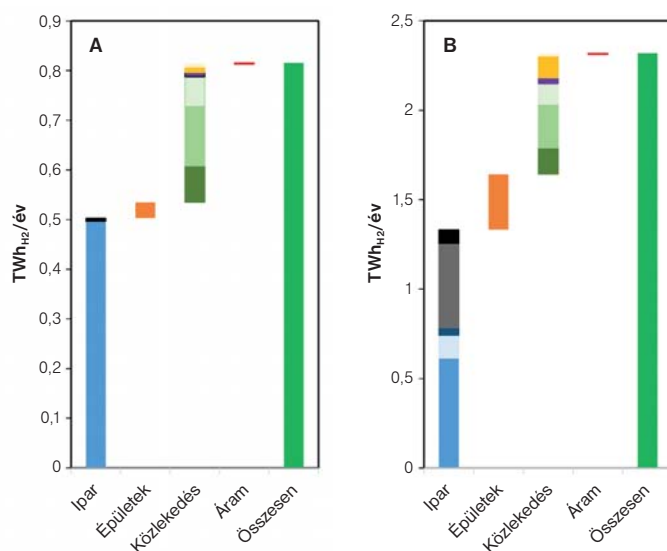
A hazai NEKT úgy kezeli a nagyméretű kapacitásokat feltételező szezonális PtP-tárolás, valamint a PtG-tárolás problémáját, hogy amennyire lehet, időben eltolja az új tárolókapacitások kiépítésének szükségességét. Ezzel összhangban a terv az, hogy megvizsgáljuk a már most is rendelkezésre álló földgáztárolói kapacitások egy részének hidrogéntárolásra való átalakításának lehetőségét, és az alacsony kihasználtságú elosztóvezetéseket kivezetésének alternatívájaként az elosztóvezetéseket alkalmassá kívánjuk tenni hidrogén betáplálására.

Meg kell jegyezni, hogy a megújuló villamos energia időszakos túltermeléséből adódó probléma kezelésének további módja a meglévő határkeresztű kapacitások bővítése, ami nemcsak azért fontos, mert a szomszédos országokkal megfelelően összekötött energiahálózat javítja a hazai ellátásbiztonságot, hanem azért is, mert a naperóműi és nukleárisalapú túltermelés energiatöbblete az interkonnektivitásnak (rendszer-összeköttetésnek) köszönhetően kiegyenlítődik a szomszédos országok piacán.

Az világos, hogy a 2030-ra tervezett hazai megújuló villamosenergia-termelés nem kíván meg sem PtP- sem PtG-tárolást, hiszen minden megtermelt energia hasznosítható az eredeti (áram) formájában, ráadásul tárolás esetén számolni kell az energiaátalakítási veszteségekkel is. Ugyanakkor fel kell készülni, hogy előbb-utóbb nálunk is a teljes éves áramigénnyel összemérhető megújuló-termelés várható. Hosszabb távon pedig a szén-dioxid kvótaárának drasztikus növekedése, valamint a nagyméretű tárolási technikák árának csökkenése az új tárolókapacitások kiépítését is lehetővé teszi.

A NEKT szerint: „Annak érdekében, hogy a szükséges innovatív megoldások alkalmazását támogatni lehessen a szezonális energiatárolásban, Magyarország pilot projekteket is tervez. Magyarország a biogáz/biométán mellett a megújuló energia felhasználásával előállított hidrogénre is alternatívaként tekint: a karbonmentes forrásokból termelt villamos energiával előállított hidrogén földgázhoz keverése innovatív, kísérleti szakaszban lévő, nagy potenciállal rendelkező, ám magas támogatási igényű opciót jelent, amely ugyancsak releváns a megújuló- és dekarbonizációs célok teljesítése szempontjából” [2].

Véleményem szerint a szintén már használatban levő tároló-infrastruktúra „újrahasonosítását” tenné lehetővé a hidrogéntá-



6. ábra. A hidrogén becsült dekarbonizációs hatása Magyarországon a különböző ágazatokban 2030-ban a WEM- és WAM-forgatókönyvek szerint (A és B)

● olajfinomító; ● ammóniagyártás; ● olefinek; ● acélipar; ● ipari energia; ● épített környezet; ● busz; ● személyautó; ● nehézgépjármű; ● vasút; ● légi közlekedés; ● hajózás; ● áram

roló szerves folyadékok technológiája (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC). Tipikus képviselői a metil-toluol, illetve a di-benzil-toluol, amelyek tehát folyadékok, azaz a gázolaj és gázolaj-termékek tárolási infrastruktúráját kiválóan tudnák hasznosítani.

Első lépésben – bármelyik hidrogénteknológiai tárolási forma valósul is meg – a hidrogén előállításáról kell gondoskodni. A már idézett tanulmány a WEM- és WAM-forgatókönyvekre a megújuló-, elsősorban tehát naperóműi kapacitásokhoz kapcsolva, elektrolizáló berendezések telepítését prognosztizálja 300 és 900 MW összes teljesítménnyel 2030-ig hazánkban [4], aminek eredményeként 0,8, illetve 2,3 TWh éves megújulóhidrogén-igényt lehet kielégíteni. A hidrogénigények ágazatonkénti megoszlását a 6. ábra szemlélteti. A tanulmányban alkalmazott modell a fosszilis-eredetű hidrogéntermelés felhasználását nem részletezi és a hidrogén lehetséges exportját vagy importját sem veszi figyelembe. Érdekes például megjegyezni, hogy a fosszilis hidrogén-alapú ammóniagyártás mértéke 340 kt évente, amihez hozzávetőleg 2 TWh H₂-re van szükség. A WAM-forgatókönyvben megjelenő 0,12 TWh pusztán az a hazai megújuló forrásokból megtermelt hidrogén, ami a szükséges fosszilis-mennyiségnek részbeni kiváltását teszi lehetővé.

A hazai végső energiafelhasználásban (218 TWh) egyelőre még nem lesz tehát jelentős szerepe a megújuló hidrogénnek, de az ágazati megoszlás jelzi, hogy mely területeken érdemes a hazai telepítéseket és fejlesztéseket, pilot projekteket kezdeményezni.

A modellben figyelembe vett adatok szerint Magyarországon a hidrogén ipari felhasználásának jelentős szerepe lehet. Az ammóniagyártásról már megemlékeztünk, de a hazai olajfinomítók is fosszilis hidrogént használnak jelenleg. Emellett a földgáz is, amely a hazai ipari villamosenergia-szükséglet 30%-át biztosítja, könnyen kiváltható megújuló hidrogénnel. A magas hőmérsékletű ipari folyamatok energiaigénye hozzávetőleg az összes ipari energiaigény 26%-át teszi ki, amit jelenleg szintén fosszilis forrásokból oldunk meg. Összességében 0,5 és 1,33 TWh H₂ kerülhet évente az ipari igények kielégítésére a WEM- és WAM-forgatókönyvek szerint 2030-ban [4].

Magyarországon, az épített környezetben, a földgázfelhasználás a teljes hazai energiaigény közel felét és a fűtési szükségletek több mint 60%-t teszi ki. Ez ugyan óriási potenciált jelentene a tiszta hidrogén számára, de 2030-ban a fosszilis források 0,03, illetve 0,3 TWh mértékű éves megújuló hidrogénnel történő kiváltását (a WEM és WAM szerint) a szektor meg sem fogja nagyon érezni.

Közlekedési eszköz	Mennyiség, db	
	WEM	WAM
személyautó	41 100	82 200
busz	500	1 000
kistehergépjármű	2 700	5 500
nehézgépjármű	410	830
vonat	3	11

1. táblázat. Becslés a közlekedési ágazatban tüzelőanyag-cellás járművek mennyiségére (2030) [4]

Mint a legtöbb EU-tagállamban, hazánkban is nagy lehetőség van a hidrogén alkalmazására a közúti közlekedésben. Az ágazat energiafelhasználásának 44%-a a nehézgépjárművekhez, buszokhoz és kistehergépjárművekhez köthető. Mivel ezeknek a szegmenseknek a dekarbonizálása nehezen oldható meg akkumulátorokkal, megnyílik az út a hidrogén előtt. Magyarországon továbbra is léteznek nem villamosított vasúti szakaszok, a teljes vasúti szegmens 30%-ában, amelyek fosszilis (dízel) energiát használnak. A további villamosítás mellett meg lehet fontolni a megújuló hidrogén használatát a CO₂-kibocsátás csökkentése érdekében. Hosszabb távon a hidrogén és a szintetikus üzemanyagok a légi közlekedés dekarbonizációjához is hozzájárulhatnak. A WEM- és WAM-forгатókönyvek szerint 2030-ban 0,27 és 0,67 TWh hidrogénigény lehetséges a közlekedési szektorban. Az 1. táblázat az ezekhez az energiaigényekhez rendelhető gépjárműszámokat is mutatja. A becslések szerint a hidrogéntöltő állomások száma 2030-ra 80–160 között alakulhat, ami 45 000–90 000 tüzelőanyagcellás gépjármű töltésére lenne alkalmas évente. Meg kell jegyezni, hogy jelenleg nincs hidrogéntöltő kút idehaza. Ennek fényében a fenti prognózis igen merésznek tűnik, de feltehető, hogy az ország átjárhatóságának igénye az tüzelőanyag-cellás járművek elterjedésével ezeket a töltőállomás-telepítési jóslatokat valóra válthatja.

A fenti számok azt valószínűsítik, hogy a hidrogénteknológiák környezeti, gazdasági és társadalmi hatása 2030-ban még nem lesz nagyon érezhető. A modell úgy kalkulál, hogy a megújuló hidrogénhez köthető szén-dioxid-kibocsátás csökkenése 0,3–0,7 Mt CO₂ lehet a WEM- és WAM-forгатókönyv szerint, ami a szükséges kibocsátáscsökkentés 1,4–3,2%-a. A hidrogénteknológiák telepítése révén 134–360 millió euró körüli éves árbevétel realizálható, ami közel megegyezik a beruházások költségeivel és 721–1548 új álláshely jöhet létre [4].

Nemzeti Hidrogénteknológia Platform

A Nemzeti Hidrogénteknológiai Platform (NHTP) 2020 májusában kezdte meg munkáját, amelynek célja egy iparági „fehér könyv” megalkotása, a hidrogénteknológiák piaci érvényesülését elősegítő szabályozási feladatok felmérése, az európai uniós támogatások hatékony lehívásához szükséges nemzetközi kapcsolatépítés és a gazdaságfejlesztés szempontjából fontos kulcsterületek azonosítása. A hidrogénteknológiák telepítését és fejlesztését

magas hazai hozzáadott érték mellett meg kell alapozni, hogy ezek a technológiák mielőbb piaci érettségig érjenek el, ahol már a szakpolitikai mechanizmusok és a piac szabályai átvehetik és tovább folytathatják a telepítést és a kapacitásnövelést.

A munka ugyan még folyamatban van, de a platform tagjainak kompetenciái alapján valószínűsíthető már most is pár kiemelt terület, ahol jelentős hazai hozzáadott érték jelenhet meg. Ezek közé tartozhat a tüzelőanyagcella-köteg beépítése a közlekedési alkalmazások (busz, kommunális gépjármű, hajó, drón) hajtásláncba, a tüzelőanyag-cellák integrálása néhány telepített energiaellátó alkalmazásba, valamint az elektrolízisteknológia laboratóriumi célú fejlesztése. Kialakíthatjuk az elektrolizáló berendezések, valamint a tüzelőanyag-cellák egyes komponenseinek, üzemgyensúlyi és segédberendezéseinek hazai beszállítói láncát, támogatva ezzel a hazánkban ezen a területen aktív globális nagyvállalatok fejlesztéseit. Horizontális tématerületekhez tartozik a technológiák integrálása a teljes értéklánc mentén, azaz az előállítástól a szezonális tároláson keresztül – a rendelkezésre álló fosszilizistáról kapacitások és földgázhálózat műszaki és biztonsági megfelelésének megteremtésével – a végfelhasználásig, mintaprojektteken keresztül, amit egybe kell kötni az oktatási és a jogszabály-előkészítési tevékenységek támogatásával. A lehetséges területeket az ősz folyamán véglegesítjük, megalapozva a magyar hidrogénstratégiát. További információk a cikk szerzőjétől, illetve a www.hfc-hungary.org/platform honlapon kaphatók.

IRODALOM

- [1] Hydrogen scaling-up, Hydrogen Council, 2017.
- [2] Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve, 2020.
- [3] Hydrogen Roadmap Europe, FCH2-JU, 2019.
- [4] Opportunities for Hydrogen Energy Technologies considering the National Energy & Climate Plans, FCH2-JU, 2020.
- [5] Commercialisation of Energy Storage in Europe, Final report, FCH JU, 2015.

ÖSSZEFOGLALÁS

TOMPOS ANDRÁS: KLÍMAVÁLTOZÁS ÉS ENERGIAELLÁTÁS, KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A MEGÚJULÓ FORRÁSOKRA

A klímacélok elérése és számos ágazat CO₂-mentesítése nem valószínűsíthető meg hidrogén nélkül, amire az előttünk álló évtizedben fel kell készülni. Ezt felismerve a Nemzeti Energia- és Klímaterveben (NEKT) hangsúlyosan jelennek meg a hidrogénteknológiák. Nemcsak az a cél, hogy a külföldön kifejlesztett műszaki megoldásokat itthon telepítsük, hanem arra kell törekedni, hogy megtaláljuk a hazai hozzáadott értékeket és gazdaságfejlesztési lehetőségeket. Fókuszálni kell a kutatás-fejlesztés és az innováció műszaki területeire, kezelni kell az oktatási, a piaci kihívásokat, valamint a jogi-közigazgatási környezet megváltoztatásának kihívásait is, illetve mindezek komplex rendszerét, mert csak egymással szinkronban lehet majd fokozatosan bővíteni a hidrogénellátási és -felhasználási infrastruktúrát. A NEKT céljai eléréséhez még idén ki kell dolgozni a magyar hidrogénstratégiát.



Címlap: Blue Marble (NASA)
Belső borítók: Felmelegedés miatt olvadó jégtömbök az Arktiszon (csis.org)
Hátsó borító: Hajók útvonalát követő, keskeny felhőcsíkok Portugália és Spanyolország partjainál. A hajók kipufogógázával keveredő felhőben több, de kisebb felhőcsepp keletkezik a szennyezés miatt, mint máshol: jobban szóródik a fény, mint a tiszta felhőn, ezért a csíkok fényesebbnek látszanak (NASA)

Hancsók Jenő

■ Pannon Egyetem, MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék | hancsokj@almos.uni-pannon.hu

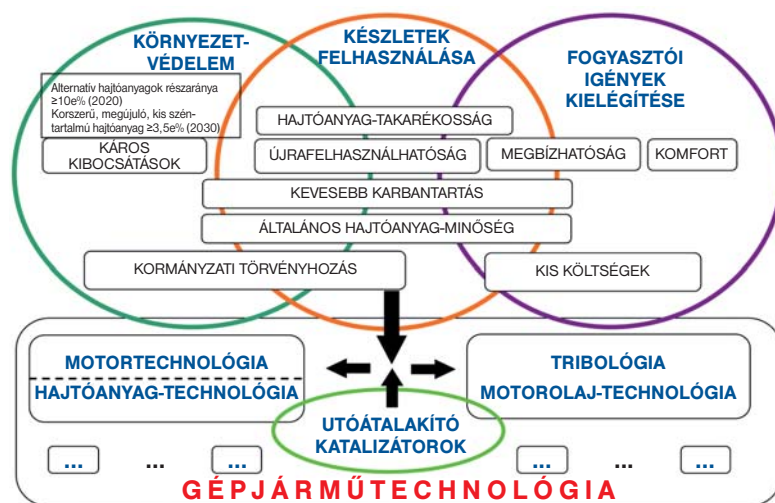
Mobilitás és klímaváltozás (környezetszennyezés) rendszerszemléletben

Bevezetés

A mobilitás a fenntartható fejlődés egyik, a teljes szárazföldi, vízi és földközeli légtérre kiterjedő alappillére. A mobilitás tárgyi eszközeit – több mint 100 éve és jelenleg is – döntő részben belső égésű motorok hajtják, megfelelő áttételeken (hajtásláncon) keresztül. Természetesen a mobilitás megvalósítására több más erőgép és azok kombinációja is alkalmas, de ezek egyértelműen számos műszaki, gazdasági és komfort-hátránnyal működnek. Az utóbbi kb. 20 évben a fenntarthatósági kritériumok között egyre inkább előtérbe került a teljes életciklusú emisszió figyelembevétele. Ennek fő oka a fokozódó mobilitással (közlekedés és szállítás) járó, állandóan növekvő teljes életciklusú (összes) károsanyag-kibocsátás, és így az egyre nagyobb környezetterhelés. Történt ez annak ellenére, hogy a mobilitás területén számos, környezetvédelmi szempontot alapvetően figyelembe vevő intézkedés született és a tárgyi eszközökön is jelentős műszaki fejlesztéseket végeztek.

A károsanyag-kibocsátás számos tényező összességéből tevődik össze, illetőleg azok függvényében alakul (például belső égésű motorok esetében lásd az **1. ábrát** [1]). A szárazföldi mobilitás esetében ilyenek például:

- a mobilitás tárgyi eszközeinek meghajtási lánc, ezen belül:
- a motor kialakítása,
- a motorhajtóanyag minősége,
- a motorolaj minősége,
- az előzőek kölcsönhatása,
- a fékrendszer kopási gyakorisága stb.,
- a jármű kialakítása,
- az utóátalakító katalitikus rendszerek,
- a szállítás/közlekedés külső feltételei,
- az utak minősége (egyenletesség, megfelelő tapadás),



1. ábra. A károsanyag-kibocsátást befolyásoló fontosabb tényezők belső égésű motorok alkalmazásakor [1]

- az utak tisztasága (hozzájárulás a károsrészecske-képződéshez, porképződéshez; fő alkotók: gumiabroncs és fékbetét, aszfaltkopadék, nagyméretű égéstermékek lerakódása stb.),
- a közlekedési szabályok,
- a megengedett sebesség,
- a forgalom és a közlekedés irányításának korszerűsége,
- a gépjármű és alkotóinak újrahasznosíthatósága (gumiabroncsok stb.).

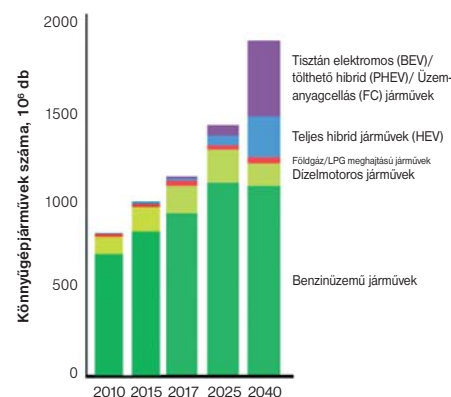
A gyakorlatban a felsoroltak közül több tényezőt még nem vesznek figyelembe, mivel jelenleg még nem tartják őket fontosnak vagy gazdaságilag kezelhetőnek.

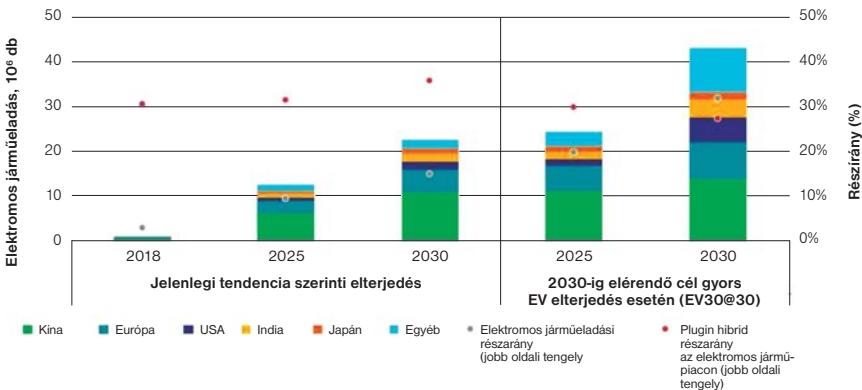
A mobilitás gépjármű-állományának alakulása

A világon jelenleg a szárazföldi, a légi és a vízi közlekedésben/szállításban döntő részarányban (> 80–85%) a belső égésű motorokkal meghajtott járműveket használják, és ez a tendencia megmarad kb. 2040-ig. Ér-

zékelhető változás csupán a könnyűgépjárművek (főleg személygépjárművek) esetén várható az elektromos meghajtás elterjedésének függvényében. A személygépjárművek/könnyűgépjárművek esetén ezt jól tükrözi a **2. és 3. ábra** [2, 3] és az **1. táblázat** [4]. A világon eladott új személygépjárművek száma a 2009. évi kb. 70 millióról 95 millió

2. ábra. A könnyű gépjárművek számának változása típusok szerint a világon [2]





3. ábra. Az elektromos járművek értékesítése és részaránya a kiválasztott régiókban és országokban [3]

Év	Kína	USA	Norvégia	Német-ország	Nagy-Britannia	Francia-ország	Hollandia
2017	577 000	194 500	62 300	54 500	48 000	36 800	9 000
2018	1 155 000	361 000	73 000	68 000	52 000	46 000	27 000

1. táblázat. Az új elektromos személygépjárművek értékesítése a fontosabb piacokon [akkumulátoros gépjárművek és hálózatról tölthető hibrid (PHEV) gépjárművek együtt] [4]

főlé nőtt 2018-ban. A korábbi, közel kizárólagosan belső égésű motorokkal meghajtott személygépjárművek mintegy 50%-a valamilyen elektromos meghajtás felé tolódott el. Ugyanakkor az új elektromos meghajtás (NEV) részaránya a világ teljes személygépjármű-értékesítésének csak 2%-a.

Kínában a 2018-ban eladott több mint 23 millió személygépjárműből az új elektromos autók száma már 1 millió feletti, megközelíti az értékesítés 5%-át. Észak-Amerikában az eladott 17 millió személygépjármű alig 1,5%-a volt új elektromos autó 2018-ban. Európában 2018-ban a dízelgépjármű-

vek kereskedelme csökkent, de az eladott személygépjárművek több mint 92%-ának meghajtására csak hagyományos belső égésű motort használnak. Az elektromosan tölthető járművek részaránya csak 2% volt. A benzin-üzemű személygépjárművek részaránya 55,8%, a dízeleké 36,7%, a tisztán elektromos (BEV) járművéké 0,9%, a hálózatról tölthető hibrideké (plug-in hybrid) 1,1% volt, míg a többi hibridjárművé (HEV) 4,7% [5].

A haszongépjárművek és az áruszállító hajók (vízi szállítás) továbbra is döntő részarányban (> 98–99%) szakaszos, a repülőgépek pedig folyamatos működési elvű bel-

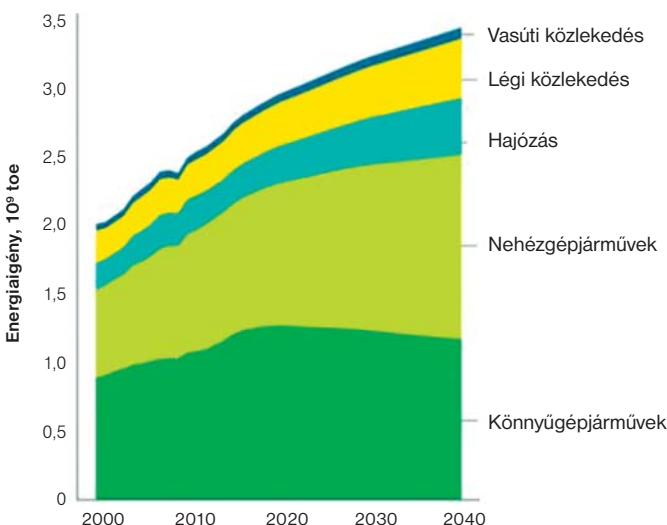
ső égésű motorokkal járnak. Ez a tendencia lesz jellemző kb. 2040-ig. Mindhárom szállítási móddal szemben folyamatosan nőnek az igények, ezzel együtt nő a járműflották nagysága is [6–8]. A légi forgalomban nemcsak a személy-, hanem az áruszállítás is – természetesen ingadozásokkal – növekedni fog [9–10].

A mobilitás energiaigénye

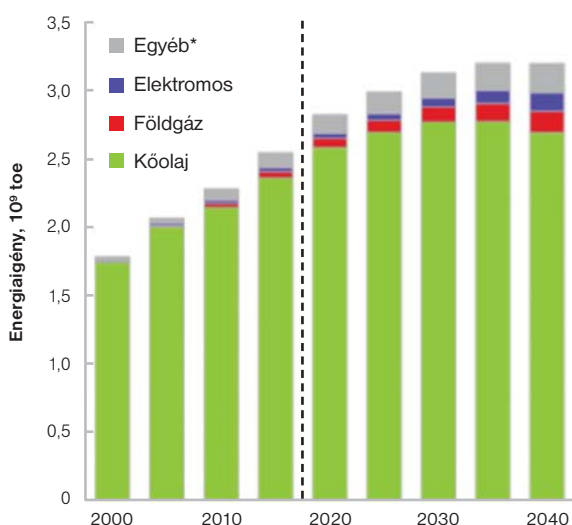
Az előzőknek megfelelően alakul a közeljövőben (kb. 2040-ig) a mobilitás károsanyag-kibocsátását alapvetően meghatározó elsődleges, másodlagos és harmadlagos energia-hordozók felhasználása is. A különböző szállítási módok motorhatóanyag-energiaigényének alakulásából (4. ábra) [2] megállapítható, hogy mindegyik esetben egyértelmű növekedés várható, kivéve a könnyű gépjárművekét kb. 2020–2025 után. Az energiaigény legnagyobb mértékben várhatóan a nehézgépjárműveknél, valamint a légi és vízi szállításban nő 2018 és 2040 között. A 2020 évi világválságra miatti átmeneti visszaesés után értéke elérheti a 40%-ot is. A kereskedelmi célú szállítás a világ valamennyi régiójában növekedni fog, különösen Ázsia, Óceánia térségében. A legkisebb változás Európában és Észak-Amerikában várható [2].

Az elsődleges energiahordozók szállítási célú felhasználását tekintve továbbra is egyértelműen a kőolaj a vezető szerep (5. ábra) [11]; részaránya elérheti, illetőleg meghaladhatja a 80%-ot is. Az alternatív motorhatóanyagok részaránya várhatóan 10% körüli lesz 2040-re (noha a biohatóanyagoké – a legnagyobb mennyiségben alkalmazott bioetanolé és biodízelé – 2019-ben még nem érte el a 4%-ot) [12].

4. ábra. A szállítási módok energiaigényének alakulása a világon [2] toe: tonna kőolaj-egyenérték



5. ábra. A szállítás energiaigénye/felhasználása energiahordozók szerint a világon [11] Egyéb*: biohatóanyagok, szénhidrogének megújuló elektromos árammal előállított H₂ és CO/CO₂ reakciótermékei



A mobilitás környezetszennyező hatásai

Az előzőekben áttekintett különböző szállítási módok eltérő környezetszennyezéssel járnak. Ezt számos tényező együttes hatása befolyásolja, illetőleg határozza meg. Ezek közül a legfontosabbak a következők:

- a járművek száma, teljesítménye és általános korszerűsége,
- a motorok/hajtáslánc korszerűsége,
- utóátalakító katalitikus rendszerek (ha egyáltalán ezek alkalmazása szükséges),
- a jármű kialakítása (pl. alak, tömeg),
- a hajtóanyagok és kenőanyagok minősége,
- a gumiabroncsok minősége (ha van ilyen),
- a jármű karbantartottsági állapota,
- a jármű újrahasznosíthatósága, esetleges részleges megsemmisítése,
- direktívák, irányelvek, szakmai szervezetek ajánlásai, szabványok, törvények, rendeletek stb.

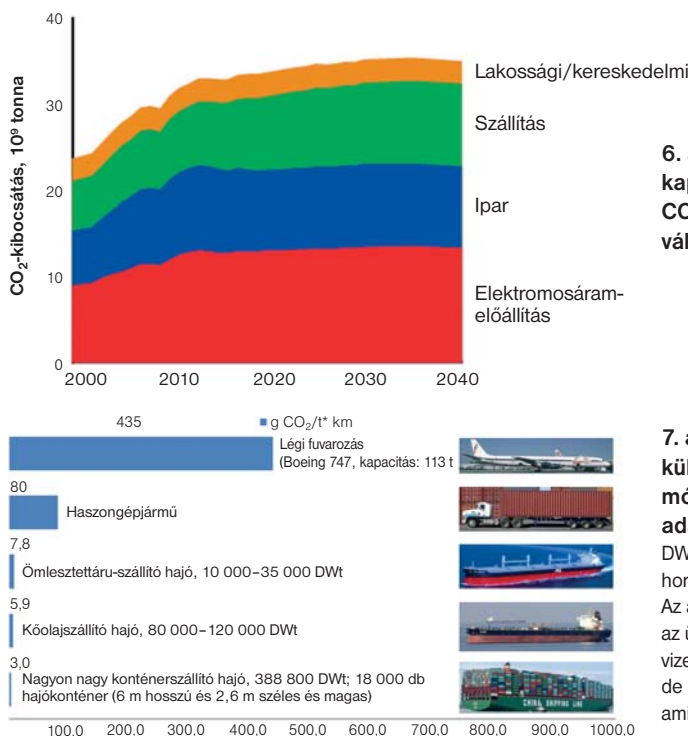
A **6. ábra** jól érzékelteti, hogy a szállítási szektor is hozzájárul a szén-dioxid-kibocsátás növekedésének fékezéséhez [2]. Ez az ábra egyértelműen szemlélteti azt is, hogy 2040-re a szállítás okozza a második legnagyobb CO₂-kibocsátást (az elektromos áram előállítása után). Részaránya kb. 25% lesz. A mérsékelt emelkedés oka egyértelműen a kereskedelmi (áru)szállítás növekedése.

A könnyűgépjárművek CO₂-kibocsátásának csúcsát 2020–2025-re jósolják. Ezt kb. 15%-os csökkenés követi, a sokkal hatékonyabb hagyományos járművek és az elektromos személygépjárművek részarányának növekedése miatt.

A légi fuvarozás (légi szállítás) tonnára és kilométerre (t × km) vonatkoztatott CO₂-kibocsátása a legkisebb (**7. ábra**) [13]. Természetesen nemcsak a CO₂-kibocsátást kell figyelembe venni a káros anyagok közül, hanem például a kén-oxidokét és a részecskéket is. Ezek mind károsak az élőlényekre és a környezetre.

2. táblázat. A különböző motorhajtóanyagok kéntartalma a fejlett régiókban (szabványok és egyéb előírások)

Motorhajtóanyag	Kéntartalom, mg/kg (legfeljebb)
Motorbenzin	10,0
Dízelgázolaj	10,0
Sugárhajtómű-üzemanyag	3000
Áruszállító hajók	35 000 (2019-ig), 5000 (2020-tól)



6. ábra. Az energiához kapcsolódó CO₂-kibocsátás változása a világon [2]

7. ábra. CO₂-kibocsátás különböző szállítási módok esetén (jellemző adatok) [13]

DWT: dead-weight ton = hordképesség (tonna). Az a tömeg (beleértve az üzemanyagot, a ballasztvizet, személyzetet stb., de a hajótest tömegét nem), amit a hajó képes elszállítani

A vízi és légi szállítás üzemanyagainak szabványokban és szakmai szervezetek által előírt kéntartalma (legfeljebb 3,5%, újabban 0,5%, illetőleg 0,3% = 3000 mg/kg) lényegesen nagyobb, mint a szárazföldi szállítás hajtóanyagaié (motorbenzinek/dízelgázolajok kéntartalma a világ fejlett régióiban, így az EU-ban is legfeljebb 10,0 mg/kg). Ezért nagyon jelentős is lehet a vízi és légi szállítás kén-dioxid-kibocsátása.

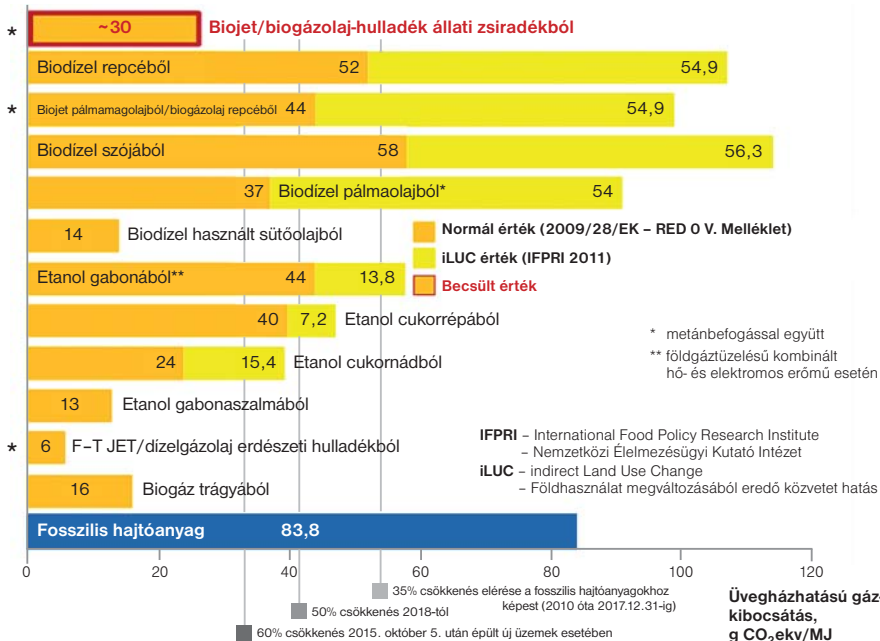
A köolajeredetű hajtóanyagokon túl egyre nagyobb mennyiségben használnak különböző alternatív alapanyagokból, olykor nagyon eltérő kémiai elveken működő eljárásokkal (**8. ábra**) előállított, megújuló motorhajtóanyagokat [15].

A **9. ábrán** [16] néhány mezőgazdasági

eredetű hajtóanyag teljes életciklusra vonatkoztatott, üvegházhatásúgáz-kibocsátásának adatai láthatók. Az adatok szerint a motorhajtóanyagok károsanyag-kibocsátása lényegesen kisebb a fosszilis nyersanyagokból előállított hajtóanyagokénál. A földhasználat megváltozásából eredő közvetett negatív hatás is csak az étkezési célú alapanyagokból előállított hajtóanyagok esetén kedvezőtlen. Az erdészeti hulladékokból származó szintézisgázból Fischer–Tropsch-szintézissel előállított sugárhajtómű-üzemanyag (JET) és/vagy dízelgázolaj károsanyag-kibocsátása a legkisebb, amit az egyéb hulladékokból kapott termékeké követ. Az adatok alapján a biológiai, ezen belül elsősorban a hulladékeredetű hajtóanyagok alkalmazása

8. ábra. Az alternatív motorhajtóanyagok javasolt osztályozása felismerésük és alkalmazásba vételük időpontja szerint, a teljesség igénye nélkül [15]

GENERÁCIÓ			
első	második	harmadik	negyedik
• bioetanol • növényolajok • biodízelek • előzőek + köolaj-alapú hajtóanyagok elegyei	• bioparaffinok (zsírsavak/zsírsav-észterek hidrogénezése és izomerizálása) • bioetanol lignocellulózsból • biobutanol • biokomponensek molekulaalkotóként (bio-ETBE) • biometán (biogáz)	• szintetikus bio-motorhajtóanyagok szintézisgázból (bioetanol is) • szintetikus benzin és gázolaj (lepárlási bioolajok hidrokrakkolása) • bioparaffinok szénhidrátokból • dimetil-éter (DME) • szintetikus biometán • elektromos áram alternatív forrásokból	• biohidrogén • biometanol • e-motorhajtóanyagok (megújuló elektromos áram felhasználásával) • γ-valero-lakton • még nem ismertek



9. ábra. Agráreredetű motorhajtóanyagok teljes életciklusú üvegházhatásúgáz-kibocsátása

tekinthető fenntarthatónak. Ugyanakkor az agrárnyersanyagok szűkös rendelkezésre állása miatt, ami alól csak a lignocellulózok kivételek, még több évtizedig fontos lesz a kőolajból történő előállítás is.

A közlemény további részében a mobilitás megvalósításának néhány fontosabb elemét tekintjük át – a teljesség messze nem igénye nélkül.

Az elektromobilitásról röviden

Az *elektromobilitás*, azaz élőlények és áruk szállítása részben vagy kizárólag elektromos meghajtással, napjaink egyik népszerű és sok vitát kiváltó témaköre. Az elektromos járművek főbb típusait – a műszaki ismeretek jelenlegi szintjén – a 3. táblázat sorolja fel.

Az elektromos járművek elterjedését közismert módon az akkumulátorok kis teljesí-

tóképessége és magas ára korlátozza és még ma is korlátozza. Nemi áttörést tett lehetővé a lítiumion-akkumulátorok (viszonylag nagy tárolási kapacitás/energiasűrűség, kis mértékű önkisülés stb.) felismerése és folyamatos fejlesztése. Természetesen az elektromobilitás megvalósításának és széles körű elterjedésének további előfeltételei is vannak:

- a meghajtástechnológia magas színvonalú kifejlesztése,
- a töltésinfrastruktúra és a hálózati integráció megléte,
- szabványosítás és dokumentálás,
- anyagok és újrahasznosítás,
- fejlesztések és minősítés,
- a keretfeltételek megléte.

Az elektromos járműmeghajtás főbb előnyei a következők:

- energiahatékony (> 90%, belső égésű motoroké legfeljebb 40%),

- az alkalmazás közvetlen környezetében emissziómentes,
- az első fordulatoktól kezdve nagy forgatónyomatékkal rendelkezik és nagy fordulatszám-tartományt ölel fel,
- csendes (ez hátrány is lehet),
- a tisztán elektromos járművek egyszerű felépítésűek, könnyen szabályozhatók és kis karbantartásigényűek,
- ideális esetben, ha az akkumulátor feltöltéséhez megújuló forrásból előállított elektromos áramot használunk, akkor az elektromos jármű teljes életciklusú emissziója sem jelentős (10. ábra) [17].

Az elektromos járművek/meghajtások főbb hátrányai az alábbiak:

- beruházási (bekerülési) költségei nagyok,
- a hatótávolság korlátozott, és viszonylag hosszú az akkumulátorok töltésének ideje (de általában elegendő az egy-nyolc városi/rövid távú közlekedéshez).

A hibridjárművek

(Hybrid Electric Vehicle: HEV)

A hibridjárművek (pontosabban az EU-irányelv szerint hibrid-elektromos járművek) az IEC/TC69 szerinti definíció értelmében:

- két különböző energiaátalakítót, tehát például egy elektromotort és egy belső égésű motort vagy ez utóbbi helyett üzemanyagcellát, valamint
- két különböző energiatárolót, például akkumulátort és benzintartályt vagy akkumulátort és hidrogéntartályt tartalmaznak meghajtás céljából.

Ezzel a „vegyes” meghajtással ki lehet használni a két különböző elv előnyeit, és egyidejűleg el lehet kerülni a rájuk jellemző hátrányokat. Így a belső égésű motor garantálja a nagy hatótávolságot, ami a tisztán elektromos járműveknél még hiányzik.

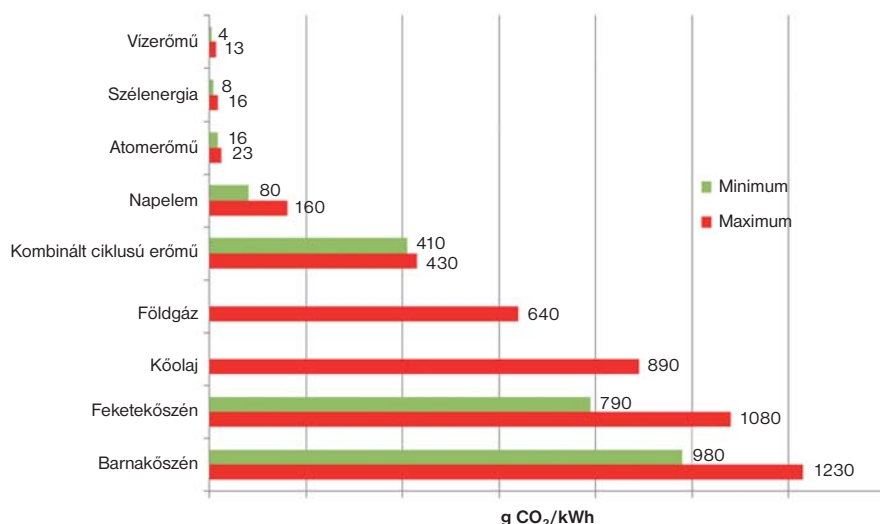
Az Európai Unió előírásai a CO₂-kibocsátás csökkentésére

Az Európai Bizottság (EC) hosszú távú stratégiát alakított ki az átfogó klímaakcióra, és felismerte annak a fontos szerepét, hogy a kis *szénatomtartalmú* (tulajdonképpen a teljes életciklus alatt kis karbonkibocsátású) hajtóanyagok, főleg a biohajtóanyagok fontos szerepet játszanak a szállítási szektor szénkibocsátásának csökkentésében.

A 2009-ben bevezetett Megújuló Energia Direktíva/Irányelv (Renewable Energy Directive: RED I.) a tagállamoktól – jellemzően nemzeti energiacélként – kérte a megújuló energia legalább 10% részarányának elérését a közúti és vasúti szállításban 2020-ra.

3. táblázat. Az elektromos járművek főbb típusai

A jármű típusa	Leírás
(„Tiszta”) Elektromos jármű (BEV: Battery Electric Vehicle)	Meghajtás elektromotorral és hálózatról feltölthető akkumulátorral
Elektromos jármű hatótávolság-növeléssel (REEV: Range Extended Electric Vehicle)	Elektromos jármű kiegészítő belső égésű motorral vagy üzemanyagcellával az akkumulátor (menet közbeni) feltöltésére
Hibridjármű (HEV: Hybrid Electric Vehicle)	Belső égésű motor és elektromotor egy járműben; az akkumulátor hálózatról nem tölthető
Hálózatról tölthető hibridjármű (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Elektromotoros és belső égésű motoros meghajtás kombinációja; az akkumulátor hálózatról feltölthető
Üzemanyagcellás jármű (FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle)	Elektromos áram előállítása üzemanyagcellával a jármű fedélzetén
Üzemanyagcellás hibridjármű (FCHEV: Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle)	Elektromotor és üzemanyagcella az energiaellátáshoz



10. ábra. Különböző energiahordozók CO₂-mérlege elektromos áram előállításakor [17]

EU-átlagban 2019-ben ettől még kb. 2% volt az elmaradás.

A RED II. irányelv új kihívásokat tartalmaz. A Párizsi Egyezmény a CO₂-kibocsátás csökkentésére vonatkozó klímacéljával összhangban megalkották a Renewable Energy Directive II. (RED II.) leírását. Ebben a fejlett biohajtóanyagok célértéke 3,5%, amit közel húszféle, előre definiált alapanyagból lehet előállítani. Ezek főleg biomassza-maradékok és -hulladékok, de nincs köztük a használt sűtőolaj, valamint az 1 és 2 kategóriájú zsiradék.

Az elektromobilitás egyik fő hajtóereje a légkör CO₂-tartalmának csökkentése. A széndioxid közismert üvegházhatású gáz (ÜHG), amely az atmoszférába jutva hozzájárul a káros klímafelmelegedéshez. A mobilitás lényegesen növeli a légköri CO₂-koncentrációt, ezért 2008 decemberében az EU rendeletet hozott az új személygépjárművek CO₂-emissziójának csökkentésére, amit 2009. április 23-án véglegesítettek. 2013-ban az előírásokat tovább szigorították: valamennyi újonnan eladott gépjárműnél flottaátlagként legfeljebb 95 g CO₂/km szén-dioxid-kibocsátás a megengedett határérték.

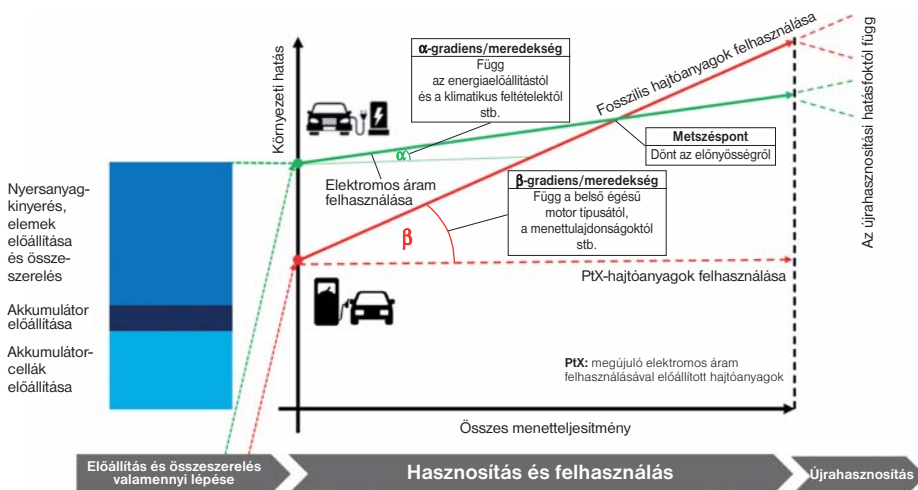
A szakemberek véleménye szerint új műszaki megoldásokkal az ilyen mértékű csökkentés gyorsan nem biztosítható. Ezen a problémán segít az elektromos járművek eladása: az EU ugyanis rögzítette, hogy a tisztán elektromos autót a flottaátlagérték számításakor 0 g CO₂/km kibocsátással kell figyelembe venni. E vonatkozásban a „plug-in” hibridjárműveknek is lényeges előnyei vannak, mivel ezeknél is csökkenteni lehet a CO₂-emissziót az elektromos autóként való alkalmazás hatótávolságának függvényében. Ez tehát azt jelenti, hogy minél nagyobb egy járműgyártó által előállított tisztán elektromos gépjárművek és „plug-in” hibridek rész-

aránya az újonnan gyártott gépkocsik között, annál könnyebb biztosítani az előírt CO₂-határértékeket.

Az EU-személygépjárművek flottaátlagos károsanyag-kibocsátása 2012-ben 130 gramm CO₂/km volt. 2020/2021-re a már említett 95 gramm CO₂/km flottaátlag cél, ami a világon az egyik legszigorúbb. Ennél kisebb értéket csak Japánban írtak elő (90 gramm CO₂/km). Az EU-ban 2025-re 70 gramm CO₂/km értéket, majd hosszú távon 50 gramm CO₂/km kibocsátást terveznek. Ezek a határértékek egyértelműen a gépjárművek és építőelemeik technológiai változását is jelentik. Ez természetesen magában foglalja a hajtó- és kenőanyagok fejlesztését is [5].

A tisztán elektromos és a belső égésű motorral szerelt személygépjárművek teljes életciklusú elemzésének vázlatos összehasonlítása a CO₂-semleges mobilitás megvalósítása szempontjából a 11. ábrán látható [18].

11. ábra. Akkumulátoros és belső égésű motorral szerelt személygépjárművek teljes életciklusának elemzése [18] Átállás a teljes életciklus alatt (LCA) semleges üvegházhatású gáz-kibocsátással megvalósuló mobilitásra szén-dioxid-semleges hajtóanyagok bevezetésével (a CO₂-semleges előállításra/gyártásra való párhuzamos áttérés mellett)

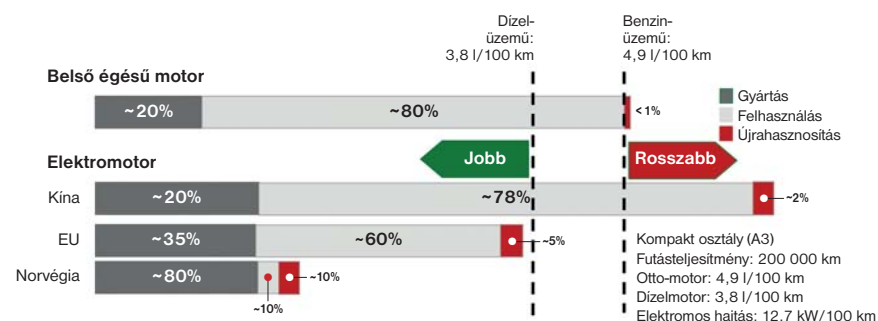


A 11. ábrából egyértelműen megállapítható, hogy a káros környezeti hatások alapvetően a jármű gyártásának ÜHG-hatásától, továbbá a meghajtáshoz szükséges energiahordozótól függenek. Hosszú távon sok esetben döntő lehet az α és β szög értéke. (Természetesen az akkumulátor előállításának környezeti hatása még számos más tényezőtől is függ.)

A kis, közepes és nagyméretű személygépjárművek teljes életciklusú gázkibocsátásának összehasonlításakor megállapították, hogy a személygépjárművek méretének növelésével a különböző elektromos meghajtási módok esetében (PHEV, BEV) egyre nagyobb mértékben csökken a CO₂-kibocsátás. A megtakarítás értéke megközelíti a 70%-ot a belső égésű motorral szerelt személygépjárművekhez képest. Sőt a BEV teljes életciklusú üvegházhatásúgáz-kibocsátásának megtakarítása a kisebb méretű gépjárművek esetén is kedvezőbb [3].

A belső égésű motorral, illetve elektromotorral meghajtott személygépjárművek károsanyag-kibocsátásának megoszlását a gyártástól az újrahasznosításig a 12. ábra szemlélteti. Az elektromotorok esetében a hajtóanyag-felhasználás miatti kisebb emissziót (EU, Norvégia) az elektromos áram előállításának növekvő megújuló és nagyobb hatásfokú előállítása okozza. Ez az ábra is azt sugallja, hogy nem a meghajtás a döntő a fenntarthatóságot illetően, hanem a gépjármű előállításának költsége és ÜHG-hatása, továbbá a meghajtáshoz szükséges energiahordozó milyensége [19].

A felhasználók számára rendelkezésre álló elektromos áram különböző forrásokból származhat. Az egyes országokban és térségekben (EU) általában egy „áramegylet” (áram-



12. ábra. A különböző járművek fenntarthatósága (ÜHG-részarányok) [19]

palettára) érvényes átlagos hatásfokot és fajlagos CO₂-kibocsátást határoznak meg.

A szén-dioxid mint a megújuló hajtóanyag-előállítás egyik alapanyaga

A hagyományos hajtóanyagok különböző szénhidrogének komplex elegyei; ezek felhasználásakor – többek között – CO₂ is keletkezik. Ha ezt a „terméket” ismét be tudják vinni a hajtóanyag-előállítás folyamatába, akkor egy zárt körfolyamat, ezáltal üvegházhatásúgáz-semlegesség alakul ki. A CO₂ ekkor fenntartható nyersanyagnak tekinthető.

A nap- és szélenergia alkalmazása az elektromosáram- és hőelőállításban versenyképes technológiák fejlesztéséhez járult hozzá. Ezen megújuló energiaforrások felhasználásával víz (hidrogén) és CO₂ kémiai átalakításával szintetikus hajtóanyagokat lehet előállítani. A rendszeranalízisek során kiderült, hogy a CO₂ rendelkezésre állása lényegesen drágább, mint a vízé, és döntő tényező a klímaegyensúlyban [20].

Egyes vélemények szerint a szintetikus hajtóanyagok csak akkor lehetnek fenntarthatók, ha az égéskor keletkező szén-dioxidot előzetesen az atmoszférából nyerték ki. A szektorkapcsolatok területén élénk vita van, hogy vajon előnyös CO₂-mérleg adódik-e akkor is, ha a megújuló energiával egy hajtóanyagot szintetizálunk, és ehhez az erőmű füstgázából származó fosszilis szén-dioxidot használunk fel. Vannak pozitív [21] és negatív [20] válaszok is. Mindenesetre az igaz, hogy a CO₂-körfolyamat csak a CO₂ levegőből történő leválasztása esetén lesz zárt.

Összefoglalás és jövőkép

A jövőben a személygépjárművek által felhasznált motorhajtóanyagok energiatartalomra átszámított mennyisége jelentősen csökkenni fog a technológiai fejlesztések következtében, ugyanakkor az áruszállítás nö-

vekedése összességében növeli a mobilitás energiafelhasználását.

Az alternatív energiák tárolását feltétlenül meg kell oldani mind a szél-, mind a nap-erőművek esetében; az állandó, megszakításmentes energiaellátás biztosítására az időszakonkénti felesleges energiát hatékonyan tárolni kell. Ez többnyire napokat, heteket és különleges esetekben hónapokat is igényelhet. Fontos szempont, hogy az elektromos energia tárolásakor mindig valamilyen anyagátalakítás (Power-to-X; például hidrogén, metán, metil-alkohol, cseppfolyós szénhidrogének) szükséges [18].

Minden átalakító eljárás esetén biztosítani kell a környezeti összeférhetőséget. Az energiatárolás sűrűségét tekintve valamilyen jelenlegi hajtóanyag, a hidrogén, a metán, a metanol vagy a hagyományos cseppfolyós hajtóanyagok kedvezőbbek, mint az akkumulátorok. Az akkumulátorok tömege, szemben a hajtóanyagtartályok tömegével, nem csökken a jármű használatakor, mert valamilyen reakciópartner és termék abban van. Ugyanakkor a jármű fékezésekor az energiát vissza lehet nyerni és tárolni lehet. Kisebb gravimetrikus és térfogati energiasűrűsége miatt a járműüzemhez szükséges energia tárolása egy akkumulátorban a jármű tömegét nagyon jelentősen megnöveli.

Ez is fontos oka annak, hogy a részben vagy teljesen a szintetikus hajtóanyagok jó ideig nélkülözhetetlenek lesznek. Különösen a cseppfolyós, nagy hidrogéntartalmú hajtóanyagoknak nagy az energiasűrűségük, amit a szállítási szektor számos esetben megkövetel és meg is fizet. Ez különösen érvényes a nehézgépjárművekre és a hosszú távolságon történő felhasználásra, továbbá a tengeri hajószállítás és a repülőgépek esetében. Ennek megfelelően a szintetikus motorhajtóanyagokat úgy kell előállítani, hogy azok minőségi és anyagi tulajdonságai a fosszilis hajtóanyagokéhoz viszonyítva a motorikus égés szempontjából előnyösebbek legyenek (alapemisszió – a katalizátor előtt –, hatékonyság), és így csökkentik a károsanyag-kibocsátást.

Gazdasági szempontból a hajtóanyagok kiemelkedő előnye, hogy a jelenlegi járműflottában is alkalmazhatóak. Ez lehetőséget ad az üvegházhatású gázok csökkentésére, és hozzájárul a meglévő járműállomány értékének megőrzéséhez is. További előny a meglévő, teljes lefedettséget biztosító infrastruktúra, a logisztika, az ellátási hálózat és a biztonságtechnika.

A megújuló hajtóanyagokat különböző eljárásokkal lehet előállítani. Több esetben a hidrogén előállítására is elektromos áramot használnak. Ha a hidrogén előállítására használt elektromos áram megújuló forrásból származik, akkor a keletkező hajtóanyag klíma-semleges. További előny: az így előállított „zöld” hidrogént fel lehet használni vagy további E-hajtóanyagokat lehet belőle gyártani.

A napenergia energetikai hasznosítására alkalmas, nagyipari berendezések létesítése a megfelelő európai helyeken, illetve Európához közel észszerű és kézenfekvő alternatíva lehet. Európa déli területein kívül Észak-Afrika nagy, beépítetlen szabad részei is szóba jöhetnek. Részletes elemzések szerint egy kb. 300 km × 300 km-es észak-afrikai területről fedezni lehetne a világ teljes energiaigényét [18]. Az átalakított napenergiát gázként (hidrogén) vagy folyadékként (metanol, E-hajtóanyag) a meglévő szállítórendszerekkel (csővezetékek, hajók stb.) el lehetne juttatni a felhasználási helyek közelébe, ahol a hajtóanyagokat – további átalakításokkal – a mindenkori piaci igényekhez lehetne igazítani.

Az EU Bizottság klímacéljait, az infrastrukturális és gazdasági peremfeltételeket, továbbá a végfelhasználók oldaláról felmerülő piaci követelményeket is figyelembe véve, az alkalmazási esetektől függően részben időben eltolt, három súlyponti meghajtólánc-technológia rajzolódik ki [18]:

- az új könnyű és közepes méretű járművek esetén tisztán akkumulátoros és hibridizált meghajtórendszerekre való áttérés,
- az új és nagyobb/nehezebb járműveknél a hidrogénalapú üzemanyagcellák mint hosszú távú megoldások (a hidrogénnel üzemelő belső égésű motorok is szóba jöhetnek átmeneti megoldásként),
- más széles felhasználási területek és a meglévő járműflották esetén a CO₂-semleges hajtóanyagok felhasználása tűnik a legmegfelelőbbnek, adott esetben továbbfejlesztett belső égésű motorokkal való kombinációban.

Összességében a jövő elektromosan akkumulátorokkal, üzemanyagcellákkal és E-hajtóanyagokkal megvalósított, vegyes meghajtású mobilitással képzelhető el. Csak szé-

les energia- és technológiapalettával lehet a szállítást és a közlekedést korszerűen átállítani, az új rendszert hatékonyan bevezetni és a piac által elfogadtatni. Ugyanakkor egyre többen sürgetik a személygépjárművek számának csökkentését, hogy elkerüljük a „közlekedési és klímainfarktust”. Ehhez természetesen sokkal több tömegközlekedési lehetőségre és lényegesen bővített infrastruktúrára van szükség, különösen kerékpárok részére. A szállítási szektorban a fő hangsúly a vasútra helyeződhet át. *Ennél a szállítási formánál persze hosszabbak a változtatási ciklusok is.*

Természetesen addig is, amíg ezek az elképzelések megvalósulnak, a lehető legnagyobb mértékben csökkenteni kell az üvegházhatásúgáz-kibocsátást. Ez alapvetően az eddig széles körben elterjedt és meglévő, belső égésű motorokat alkalmazó járműflották esetében nagy hidrogéntartalmú motorhajtóanyagok felhasználását feltételezi. Ezek részben vagy teljes egészében a meglévő kőolajfinomítói technológiákkal és/vagy azok célirányos módosításával, másrészt kisebb mértékben zöldmezős beruházásokkal (amelyek a későbbi jövőben átalakíthatóak PtX-üzemekké) állíthatók elő.

Az elektromobilitás nagyon jó megoldás olyan országokban, amelyek készen állnak megújuló vagy nukleáris úton történő elektromos áram környezetbarát és olcsó előállítására. Más országok számára, amelyekben nagy szénintenzitású energiaforrások állnak rendelkezésre, a belső égésű motorok hatásfokának növelése és a kisebb széntartalmú hajtóanyagok alkalmazása a leginkább hatékony és a megfizethető megoldás. Ez utóbbi általánosan is igaz rövid és középtávon egyaránt.

Magyarországon mind a két lehetőség rendelkezésre áll: az elektromos áram jelenleg meglévő és a jövőben elkészülő, új paksi atomerőművel viszonylag olcsón rendelkezésre állhat. A megújuló alapanyagforrásokat és az ezekből előállított keverőkomponenseket tartalmazó motorhajtóanyagok részben már ma is rendelkezésre állnak a nagyobb hatásfokú belső égésű motorokkal szerelt járművek üzemeltetésére (motorbenzin: bioetanol, bio-ETBE; dízelgázolaj: biodízel- és újabban, 2020-tól bioparaffin-tartalmú gázolaj; ez utóbbi magyar fejlesztés eredményeképpen).

Megjegyezzük, hogy a belső égésű motorok esetében elvárt kb. 50%-os hatékonyságnövelés nagy kihívás, ami nemcsak motor-, hanem kőolajfinomítói fejlesztéseket is igényel. Ezzel kapcsolatban 4 kulcsterületet lehet megjelölni az ÜHG-csökkentés eszközeként [22]:

- a kőolaj (kutatás, fúrás, kitermelés) szénintenzitásának csökkentése,
- a feldolgozásban és előállításban eszközölt fejlesztések a kis széntartalmú, alapanyagok (pl. bioeredetűek, megújuló hidrogén stb.) és termékek biztosítására,
- a motorhatékonyság növelése,
- mobilis szénleválasztó technológiák alkalmazása a gépjárműben.

Jelenleg a személygépjárművek belső égésű motorjainak hatásfoka mintegy 36%, míg a nehéz motorok esetében ez 47%. Ezek növelésére nagyon jelentős pénzügyi támogatással több fejlesztési irányban folyik K+F tevékenység (motorfejlesztés – [benzinüzemű kompressziógyújtású motor (GCI), korszerű ellendugattyús motorok], „mobil részecskeleválasztás”).

A GCI új elv, amely az égés előtti tökéletesített elegyképzéssel növeli a motor hatásfokát és megkönnyíti az emisszió szabályozását. Nemcsak a hajtóanyag-felhasználást lehet csökkenteni (ami 25%-os CO₂-emissziócsökkentést jelent), hanem 90%-os NO_x-csökkentést is el lehet érni. A nagyobb hatékonyságú és a kisebb emissziójú járművet várhatóan 2021-ben fogják bemutatni.

Az ellendugattyús motorban hengerenként két dugattyú működik ellentétes mozgással. Ez csökkenti a súrlódást és a hővesztést, ezáltal javítja a hatásfokot, elősegíti a hajtóanyag-megtakarítást és csökkenti az emissziót. Ez nagyon sokoldalú megoldás, és alkalmazni lehet mind a szikragyújtású, mind a kompressziógyújtású motoroknál, így hagyományos motorbenzinekkal és dízelgázolajokkal is üzemeltethető.

A legújabb, harmadik generációs mobil szén- (részecske-) leválasztó technológiával (MCC: Mobile Carbon Capture) például a Volvo kamionok esetében 50%-os CO₂-csökkentést értek el. A gépjárműben összegyűjtött részecskehalmazt például energiaelőállításra lehet felhasználni.

Általánosan megállapítható, hogy a mobilitás megvalósításakor már részben ma is rendelkezésre állnak azok a megújuló energiaforrások és technológiai megoldások, ame-

lyek egyértelműen csökkenthetik az üvegházhatású gázok emisszióját és a fosszilis energiaforrások felhasználását. ●●●

Köszönetnyilvánítás. A publikáció az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatottGINOP-2.3.2-15-2016-00053 projekt „Molekulaszerkezetében nagy hidrogéntartalmú, cseppfolyós üzemanyagok kifejlesztése (hozzájárulás a fenntartható mobilitáshoz)” keretében készült.

IRODALOM

- [1] Srivastava, S. P., Hancsók, J., Fuels and Fuel-Additives. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA (ISBN: 978-0-470-90186-1), 376 oldal, 2014.
- [2] https://corporate.exxonmobil.com/-/media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy_v4.pdf, megtekintve: 2020. 03. 05.
- [3] IEA Global EV Outlook 2019. Scaling up the transition to electric mobility, 2019. május.
- [4] <https://www.welt.de/wirtschaft/article187209256/Elektromobilitaet-Fuer-E-Auto-Durchbruch-fehlt-der-9000-Euro-Vor-teil.html>, megtekintve: 2020. 06. 12.
- [5] ACEA Report, Vehicles in use, Europe, 2019.
- [6] <https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/heavy-duty-trucks-market>, megtekintve: 2020. 06. 20.
- [7] United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD): Handbook of Statistics 2019, Genova, 2019.
- [8] <https://www.statista.com/statistics/262971/aircraft-fleets-by-region-worldwide/>, megtekintve: 2020. 06. 25.
- [9] Chuck, Ch. J. (szerk.), Biofuels for Aviation. Feedstocks, Technology and Implementation. Academic Press, London, 2016.
- [10] <https://www.iata.org/en/publications/economics/>, megtekintve: 2020. 06. 21.
- [11] BP Energy Outlook, 2018.
- [12] BP Statistical review of world energy, 2020.
- [13] IMO GHG Study, 2009; *Meilew Maersk, 2014.
- [14] Hancsók, J., Fuels for Internal Combustion Engines, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016, 21.
- [15] Hancsók, J. et al., Fuels with high hydrogen content in their molecular structures, Istanbul 22nd World Petroleum Congress (Forum title: F11 Products of the future), 2017, július 09–13., ppt: 18 slide.
- [16] Baladincz, P., Hancsók, J., Fuel from waste animal fats. Chemical Engineering Journal (2015) 282, 152–160.
- [17] Hedrich, K., Kuczera, M., Plass, L., Was kostet klimaneutraler Straßenverkehr: Erdöl, Erdgas, Kohle (2018) 134 (10), 362–370.
- [18] Körfer, T., Intelligente Sektorkopplung – Ein substantieller notwendiger Baustein zur schnellen Energiewende im Transportsektor. Erdöl, Erdgas, Kohle (2020) 136(2), 24–27.
- [19] Hagemann, B., Gosalia, A., DriveElectric, Decarbonisation, Digitalization. Neste Uniti Pre-Seminar, Stuttgart, 2019. április.
- [20] <https://www.bauhaus-luftfahrt.net/forschung/alternative-kraftstoffe/co2-als-rohstoff-fuer-die-erneuerbare-kraftstoffproduktion/>, megtekintve: 2020. 06. 22.
- [21] Jungmeier, G., Pkw-Umweltbilanz nur mit Erneuerbaren top. Die Ökoenergie (2020) 115.
- [22] <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/passenger-cars/shaping-future-mobility/>, megtekintve: 2020. 05. 14.

ÖSSZEFOGLALÁS

HANCSÓK JENŐ: MOBILITÁS ÉS KLÍMAVÁLTOZÁS (KÖRNYEZETSZENNYEZÉS) RENDSZERSZEMLELETBEN

A mobilitás a fenntartható fejlődés egyik alappillére; kiterjed a teljes szárazföldi, vízi és földközeli légtérre. Az írás a mobilitást és annak környezetkárosító hatását mutatja be rendszerszemléletben, a klímaváltozáshoz való hozzájárulás teljes, tudományos mélységű elemzése nélkül. Tényszerűen megadja és értékeli a szárazföldi, a légi és a vízi közlekedés/szállítás járműállományát, összetételét és alakulását, a mobilitás energiaigényét, károsanyag-kibocsátását, kiemelten a személygépjárművekre. Az összefoglaló értékelés lehetőségeket feltáró jövőképet vázol.

Bezegh András

■ andras@bezegh.hu

Körforgásos gazdaság: a fenntarthatóság nélkülözhetetlen eszköze

A fenntarthatóság, illetve a fenntartható fejlődés

Ezt az cikket 2020-ban, a Covid19 világjárvány felfelé ívelő szakaszában írom. Annak ellenére, hogy korábban elhatároztam, még csak nem is említem, mégis szóba hozom. A járvány sok negatív következménye mellett van néhány pozitív is. Egyik ilyen az, hogy sokan – köztük jogászok, újságírók, politikusok – megismerkedtek a járványterjedés egyik jellemzőjével, az *exponenciális növekedéssel*.

Ez viszont már az adott témánkba vág. A *fenntarthatóság* ugyanis kimondva-kimondatlanul az exponenciális növekedés elmentése. Ez a fenntarthatóság 1972-ben még eredetileg fenntartható fejlődés volt, és a környezet védelmének összekapcsolódását jelentette a már akkoriban is égető társadalmi, gazdasági kérdésekkel. Ráadásul, amint azt az ENSZ Környezet és Fejlődés Világbizottsága 1987-ben meghatározta, a fejlődés legyen olyan, amely „kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy csökkentené a jövő generációk képességét, hogy kielégítsék a saját szükségleteiket”.

Miközben a szegénység csökkentésének kérdése állandó feladat, és továbbra is nagy jelentőséggel bír, a világ új kihívásokkal néz szembe, kezdve a népességnövekedéstől, az élelmiszer- és energiaválságoktól az időnkénti globális recesszióig és az éghajlatváltozásig. Mindezek a tényezők sokkal összetettebbé teszik a mai helyzetet. Bár a legtöbb szerző egyetért abban, hogy a fenntarthatóság kérdése az emberi faj hosszú távú fennmaradásáról szól, a fenntartható fejlődést, a fenntarthatóságot sok vita, félreértés, félreértelmezés övezi. Hogyan értsük a *jelen szükségleteit*, kinek, milyen szükségleteiről van szó? Mit jelenthetnek a *jövő generációk szükségletei* – hány generáció? Elvben bárhány, de tudjuk, a politika időhorizontját a választási ciklusok határolják, és általában az emberek unokáikra, legjobb esetben dédunokáikra gondolva sem képesek kellően hosszú távra felelős döntéseket hozni. Pedig, ha az emberiség hosszú távú érdekeiről van szó, akkor évezredek távlatában kellene gondolkodni. Bármilyen kicsiny, állandó exponenciális növekedés ilyen hosszú távon óriási változást jelent. Éppen ezért a leginkább szokásos politikusi félreértelmezésről, a *fenntartható növekedésről* Herman Daly amerikai közgazdász írta: „mint próza, a gazdaságban egy rossz önellentmondásos kifejezés, mint költészet pedig értelmetlen” [1].

A körforgásos gazdaság

A *körforgásos gazdaság* elsősorban azt jelenti, hogy törekszünk a termékek karbantartásának és javításának, újrafelhasználásá-

nak és újrahasznosításának további növelésére. Ezek a tevékenységek természetesen már régóta jelen vannak a gazdaságban, sőt, mondhatjuk, mindig is jelen voltak. A reciklálás, visszaforgatás (hivatalosan magyarul újrafeldolgozás) sok ezer éves múltra tekint vissza.

Időszámításunk kezdete előtt már összegyűjtötték a bronzmaradékokat és újraolvasztották új tárgyak formálásához. De nem csak bronzot recikláltak: hazai bronzkori fonókorong-leletek azáltal okoztak fejtörést a régészek számára, hogy korábbi korokból, esetleg más kultúrákból származó agyagedénycserepek újrahasznosításával készültek.

Az építőanyagok esetében is meglehetősen hosszú időre nyúlik vissza az újrahasznosítás. A római Colosseum köveit az 5. századtól kezdve beépítették kisebb helyi lakóépületekbe. Feljegyezték, hogy Magyarországon az egri vár köveit a 17. századtól kezdve székérszámra „újrafeldolgozták” [2]. Budapesten, a zuglói vasalóház építéséhez az Astoriánál egykor állt Nemzeti Színház bontásából megmentett ablakokat használták fel. Japánban a 11. században készítették papírt használt papírból, az USA-ban csak kb. 150 éve.

„Szemből arany – piszokból jólét! Hiszen, ha jól meggondoljuk, nincs szemét, nincs piszok. Csak anyag van, mely akkor válik szemétté, ha nincs a helyén; a legértékesebb is. Értékké válik a leghitványabb is, ha helyére kerül. Nagy tanulság ez! Mindenre érvényes. Anyagra, energiára, emberre. Mindent és mindenkit a maga helyére!” – jelent meg *A technika világa* című könyvben, Beke Manó szerkesztésében, 1928-ban [3]. Az anyagkörforgás a hétköznapi, a józan éssen alapuló gondolkodásban éppúgy, mint a mérnöki gondolkodásban, mindig is jelen volt.

Elkerülhetetlen zöldülés

Ökológiai közgazdászok többször kifejtették álláspontjukat az *állandósult állapotú* gazdaság szükségessége mellett, mert a világ már *tele* van. Ipari-kapitalista rendszerünk elterjeszkedett odáig, ahol már nincs tovább. A „globális gazdaság most olyan hatalmas, hogy a társadalom már nem viselkedhet úgy, mintha egy végtelen méretű ökoszisztémában működne” [4]. Ezt az EU üzleti körei és bürokratái is végre felfedezték, vagyis, hogy a földgolyó készletei végesek. Ebből következően az ásványi nyersanyagok és a mai napig domináns fosszilis eredetű energiahordozók készletei előbb-utóbb kimerülnek. A készletek csökkenésének figyelmeztető jelei: az ezredforduló óta egyre magasabb nyersanyagárak, a szélsőséges áringadozás és az időszakos hiányok.

Sokak előtt ismert volt *Angela Merkel* német kancellár néhány évvel ezelőtti pekingi, luandai, abujai és ulánbátori útja [5]. Valójában az *Allianz zur Rohstoffsicherung* (Szövetség a Nyersanyag-biztonságért) nevű szervezet, illetve a szervezetet alkotó német gigavállalatok (BASF, Bosch, Thyssen-Krupp, Daimler stb.) és a körükük gyülekezett kisebbek számára igyekezett biztosítani bizonyos egzotikus nyersanyagok folyamatos ellátását. Különböző mint írták annakidején, sokan lehúzhatták volna a rolót.

Az olyan high-tech termékek, mint a merevlemezek, hangszórók, mágneses csapágyak, kémiai és orvosi műszerek és a legkülönfélébb villanymotorok nem nélkülözhetik a korrózió- és hőálló számárium-kobalt vagy vas-bór-neodímium mágneseket. A szenzorok gyártásának kulcsanyagai a LiNbO_3 , a GaPO_4 , a BaTiO_3 és a Nb. Persze a német iparon kívül is nagy a kereslet ezekre a különleges anyagokra. A Toyota Priusok [6] motorjaihoz 1 kg neodímium, akkumulátoraihoz 10–15 kg lantán kell. Aggodalomra ad okot például a lítiumakkumulátorok terjedése is. Vannak, akik szerint a következő évtizedek elektromos autóinak térhódítása miatt lítiumhiány lesz. Nem lesz hozzáférhető, ezért már most javasolják, hogy ne jobb lítiumakkumulátorokat, hanem helyette olyan új akkumulátor-technológiákat fejlesszenek, amelyek gyakoribb, hozzáférhetőbb fémeket használnak.

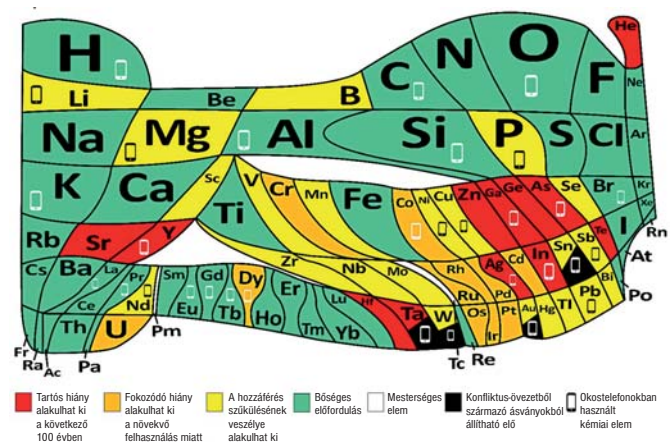
A periódusos rendszer alsó részén listázott 15 elem és az ittrium együtt alkotják a ritkaföldfémek csoportját. A kereslet irántuk évi 40 ezer tonnával haladja meg a kínálatot. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a kritikus anyagok kitermelésének és feldolgozásának lépései gyakran kockázatos országokban összpontosulnak.

A hétköznapi alapanyagok még nagyobb gondot jelenthetnek a jövőben. Ha a nikkel válik nehezen elérhetővé (előrejelzések szerint 2030 táján [7]), a jó minőségű acél gyártása lesz nehéz. Meghatározták azt az időt, amely alatt egy adott nyersanyag kifogy, ez az ún. *burn-off time*. Ez a megbecsült kitermelhető mennyiség és a kitermelés jelenlegi sebességének hányadosa, figyelmen kívül hagyva a termelés exponenciális növekedését vagy a piaci mechanizmusokat. A *burn-off time* a mai szokásos visszaforgatási arányok mellett a cink esetében 20, az ónra 20, az ezüstre 14, és a szupravezető-kutatáshoz, illetve party-léggömbökhöz nélkülözhetetlen héliumra 9(!) év volt egy 2012-ben megjelent tanulmány szerint [8]. Ugyanebben a közleményben egy másik mutató 19 évet adott a héliumnak, és a frissebb híradások is az univerzum egyik leggyakoribb elemének földi szűkösségéről számolnak be [9]. Szerencsénkre a vas *burn-off* ideje 79 év, az alumíniumé 132 év, bár ez sem megnyugtató a későbbi generációk számára.

Természetesen, még mielőtt az utolsó tonna cink- vagy ónércet kibányásszák, az áruk olyan magas lesz, ami miatt gyakorlatilag elérhetetlenekké válnak, nem fizikailag, hanem gazdaságilag. Látszik ugyanakkor, hogy technikai civilizációnk alapvető erőforrásainak elérhetősége nem csak a távoli jövőt érinti, vannak meglehetősen közvetlen jövőbeli következményei is, amelyekre fel kell készülni.

A réz ára annak ellenére megháromszorozódott az elmúlt évtizedben [10], hogy az egykori fő használatából, a hírközlési célú kábelek területéről végképp kiszorult, ugyanis az üvegszál asztalváltás ára századrésze a rézzel történőnek. Optimista feltevés, hogy a jövőben a hiányzó, pontosabban dráguló alapanyagok újfajta anyagokkal helyettesíthetők lesznek. Tény, hogy az anyagtudomány újabb és újabb nagyszerű, különleges tulajdonságú anyagokat kínál a mérnöki tervezőmunkához, de nincs biztosíték sem arra, hogy az új anyagokhoz nem lesz szükség kifogyóban lévő nyersanyagra, sem arra, hogy az új anyagok elérhető áron, egészség- és környezeti kockázatmentesen állnak majd rendelkezésre.

Tavaly, a Mengyelejev-féle periódusos rendszer kiadásának 150. évfordulója alkalmából az Európai Kémikusok Egyesülete (EuChemS) mutatta be azt az ábrát, amellyel az egyes elemek véges készleteire hívja fel a figyelmet (1. ábra) [11].



1. ábra. A világot alkotó 90 elem. Mennyi van? Elég lesz-e?

Forrás: European Chemical Society, 2019

Hulladékhegyek

A gazdaság kézzel fogható termékei nemcsak Murphy törvénye (ami elromolhat, az el is romlik), hanem a termodinamika szabályai szerint is valamilyen formában előbb-utóbb hulladékká válnak. Ez a nyersanyagforrások elapadásával egyenrangú problémát okoz. Nem végtelen kapacitásúak azok a természeti erőforrások sem, amelyek funkciója a természetből kitermelt és oda hulladékként visszajuttatott anyag lebontása, feldolgozása, be-, illetve visszaépítése a természet meglévő elemei közé.

A hulladékgazdálkodás növekvő terhet jelent szinte minden gazdaság számára. A népességnövekedés, a fogyasztói társadalom bővülése, a fogyasztói szokások alakulása és az ipari technológiák komplexitásának növekedése egyre nagyobb környezetterhelést és egyre nagyobb kihívást jelent a hulladéktalantlanításban érdekeltnek számára. Az égetés drága, mellette a légszennyezés kiküszöbölése, a hamu és pernye elhelyezése miatt technikai és jogi nehézségek merülhetnek fel. Nem minden hulladék égethető, a lerakáshoz terület és az érintett lakosság beleegyezése szükséges.

Az EU-ban az utóbbi években évente mintegy 1,7 milliárd tonna hulladék keletkezett, ebből Magyarországon 13 millió. Összehasonlításképpen: Ausztriában 35, Lengyelországban 150 millió tonna [12]. A hulladék tömegének legnagyobb része, 25–30%-a építési-bontási hulladék. Ennek egy részét ugyan visszaforgatják, de a reciklálás sokkal nagyobb is lehetne, ha az összetevőket szétválogatnák, vagy – még inkább – elkerülnék azok összekeveredését. Jelentős hulladékrámmot képviselnek a háztartási hulladékok és a háztartásokból származó elektromos és elektronikus készülékek hulladécai. Ezek mennyiségét növeli a „tervezett elavulás”, egy általában titokban tartott üzleti praktika, amelyik a gyártmányok használati idejének szándékos csökkentésével növeli forgalmát.

A nagy izzólámpa-összeesküvés híre bejárta a világot: a „tervezett elavulás” széles körű megvalósítására az Osram, a Philips, a Tungsram és a General Electric 1924-ben gazdaságtörténeti jelentőségű kartellt hoztak létre és mintegy 15 éven keresztül működtették a villanykörtegyártás és -kereskedelem „érdekében”. Rendszeresen ellenőrizték egymás termékeit, és ha azok élettartama meghaladta az 1000 üzemórát, bírságot róttak ki. (A kartelltagok szerint az 1000 óra a gondos műszaki optimumkeresés

eredménye volt.) Ennél nyilvánvalóbb eset a nejlonharisnyaé. Kezdetben annyira tartósak voltak, hogy a hölgyeknek csak igen ritkán kellett újat vásárolni. Ezért a gyártó külön erőfeszítéseket tett gyengébb minőségű szálak kifejlesztésére.

A termelés, a kereskedelem és a fogyasztás fenntartása érdekében a gazdaság működtetői néha arra törekednek, hogy gyártmányaik mielőbb meghibásodjanak, elkopjanak, elavulttá és javíthatatlanná váljanak. Maga a divat is a tervezett elavulás egyik megnyilvánulása. Egyesek szerint a tervezett elavulás a munkahelyek megtartásának eszköze. Lehet, hogy ez igaz, bár a természet a nagyobb erőforrás-felhasználással, a több keletkező hulladékkal magas árat fizet érte.

A tartósság mint fő szempont

A tartósság kérdése igen nagy hatással van az erőforrások felhasználására és a hulladékok keletkezésének ütemére is. Ha egy termék kétszer annyi ideig képes ellátni rendeltetését, akkor a hasznos működésére vetített nyersanyagigény és hulladékképződés fele lesz az eredetinek.

A gyártók igyekeznek olyan megoldásokat alkalmazni, amelyek nem könnyítik, inkább nehezítik a házi javításokat. Kivétel mégis akadnak. Néhány ipari ágazat üzleti modelljének része a felújítás. Nagy járműmotorokat vagy éppen nyomtatók festékkazettáit terveztek az egyszerű felújítás szempontjai szerint. Visszaveszik és felújítva adják el újból. Néha van lehetőség a visszavételt követő korszerűsítésre is. A legegyszerűbb javítás a számítógépek szoftverei, amit frissítésnek vagy update-nek neveznek ebben a szakmában. Ilyenkor egy program egy-egy rosszul működő vagy sebezhető összetevője helyett egy jobb, illetve biztonságosabb, leggyakrabban funkcionálisan fejlettebb elem települ a számítógépre, a felhasználó eredeti beállításai szerint. Mindez a világhálón keresztül zajlik, szinte észrevétlenül.

A hardver-korszerűsítés nem ennyire egyszerű, de mivel sok géptípus moduláris felépítésű, nem is túl bonyolult. Lényeg, és ez nem csak számítógépekre igaz, hogy a karbantartást vagy cserét igénylő részek könnyen hozzáférhetőek legyenek.

Bár jelenleg világszerte évente sok ezer tonna számítógép, telefon és hasonló e-hulladék kerül a szemétkosárba, a javítás-felújítás támogatásával ezek hasznos működési ideje növelhető, lassítva a hulladékképződést és az újak beszerzésének ütemét.

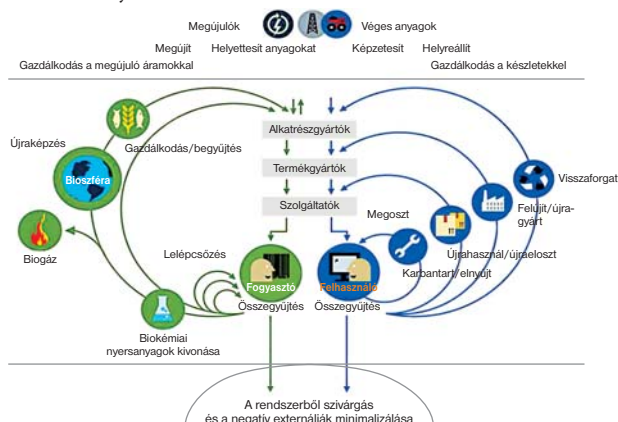
A *Research Council for Automobile Repairs* (RCAR, Gépkocsijavítók Kutatási Tanácsa) nemzetközi szervezet, tagokkal Malajziától Finnországon, az Egyesült Államokon át Brazíliáig, évekkel ezelőtt irányelveket dolgozott ki az autógyárak számára, amelyben – mint írják – segítséget nyújtanak a jogszabályoknak megfelelő, biztonságos és gazdaságilag életképes autók műszaki tervezéséhez. Ebben előremutató szerepet kívánnak játszani, különösen az utasok biztonsága és az autók javíthatósága terén. Az anyagválasztástól kezdve az alvázzáig mindenre kiterjed a figyelmük. Utóbbiról annyit írtak, hogy azt a legkevésbé sérülékeny részre kell helyezni, és kell titkos alvázzám-helynek is lennie.

Ahhoz, hogy egy termék tartós legyen, nem elég, hogy fizikailag ellenálló, megjelenésében is időtállóan kell maradnia. Használata során ellen kell állnia a kopásnak, a sérüléseknek, ugyanakkor a tulajdonos számára fontosnak és kívánatosnak is kell maradnia hosszú ideig.

A tartósság, a termék-élettartam kérdésével legrégebb óta a genfi *Institut de la Durée*, a Terméktartósság Intézet foglalkozik. Alapítója, *Walter Stahel* építész számos eredeti elképzeléssel járult hozzá a körforgásos gazdaság alakításához [13].

Sok régi és új megoldás: visszaforgatás, visszanyerés, újrafeldolgozás, újrahasználat és társaik

A körforgásos gazdaság gondolatvilágát, célkitűzését a McKinsey & Company üzleti tanácsadó cég és az *Ellen MacArthur Alapítvány* hihetetlen méretű nemzetközi PR-munkával hozta ki az ismeretlenségből. Élén az angol *Ellen MacArthur* világutazó vitorlázó hölgygel, aki támogatóival elérte az EU legmagasabb politikai szintjét e kiemelkedő, nemes cél érdekében lobbizva. Első összefoglaló kiadványukban [14] jelent meg a körforgásos gazdaság emblemikus ábrája (2. ábra), amely a különböző anyagáramok ciklusait mutatja be.



2. ábra. A körforgásos gazdaság elemei: bal oldalon a biológiai, jobb oldalon a technikai anyagok körei

Forrás: Ellen MacArthur Foundation circular economy team (fordította: B. A.)

Mivel a körforgásos gazdaság az Európai Zöld Megállapodás [15] egyik fő eleme, ez év márciusában az Európai Bizottság dokumentumot fogadott el „A tisztább és versenyképesebb Európát szolgáló, körforgásos gazdaságra vonatkozó új cselekvési terv” címmel. A zöld megállapodás a fenntartható növekedésre vonatkozó európai elképzelés. Az új körforgásos akció intézkedéseket terjeszt elő annak érdekében, hogy a fenntartható termékek alapkövetelménnyé váljanak az EU-ban. Emellett cél az is, hogy összpontosítsanak azokra az ágazatokra, amelyek a legtöbb erőforrást használják és ahol a körforgásos gazdaság jó lehetőségeket kínál. Ilyen lehet például az elektronika és az informatika, az akkumulátorok és a járművek, a csomagolás és az élelmiszerek területe.

Volt már korábban is uniós cselekvési terv a fenntartható, karbonszegény, erőforrás-hatékony és versenyképes gazdaság kialakítására, amit a Bizottság „Az anyagkörforgás megvalósítása – a körforgásos gazdaságra vonatkozó uniós cselekvési terv” címen publikált 2015 decemberében. Már ebben is sürgették az áttérést a még inkább körforgásos gazdaságra, olyanra, amelyben a termékek, alapanyagok és erőforrások értékét a lehető legtovább megőrzik a gazdaságban, a hulladék keletkezését pedig a minimálisra csökkentik [16]. A körforgásos gazdaság az EU versenyképességének fokozását ígéri azáltal, hogy megvédi az erőforrások – itt legelsősorban nyersanyagokra kell gondolni – szűkösségével és az ingadozó árakkal szemben. Ez – mint írják – elősegíti az új üzleti lehetőségek, illetve a termelés és fogyasztás innovatív, hatékonyabb módjainak kialakítását.

Tudatos, előrelátó tervezés, ipari ökológia

A tudományos vizsgálódás tárgyaként az 1970-es évektől kezdve egyre inkább megjelenik a visszaforgatás vagy újrafeldolgozás, a „re-

cycling”, és formálódik az életciklus-elemzés (*Life Cycle Analysis* – LCA) módszertana.

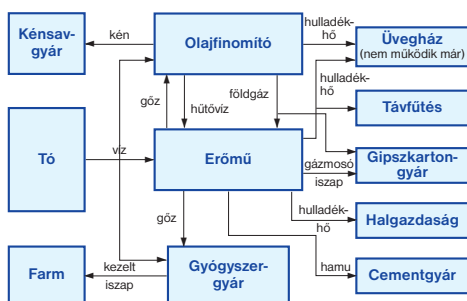
Berry Commoner New York-i biológiai professzor írta 1968-ban: a természetben nincs hulladék, mert „amit az egyik szervezet kiválaszt hulladékként, azt felveszi a másik, mint táplálék”. Az R. U. Ayrestől származó alap gondolat [17]: az élő rendszerek anyagcseréje jelenik meg az ipari rendszerekben. Ez az elképzelés vált az *ipari ökológia* központi elemévé. Az *ipari ökológia* a természetes ökoszisztémákat modellként tekintő, körfolyamatok révén zárt anyagáramot biztosító iparszervezési forma, amely független vállalatok együttműködéséből áll. A hangsúly a rendszer teljesítményén van, így sem az egyes elemek tervezése, működése vagy funkciói, sem a részfolyamatok önmagukban való vizsgálata nem tartozik az ipari ökológia tárgykörébe, viszont együttes optimalizálásuk igen.

Az ipari ökológia, mint tudomány, számos ismert problémára válaszolni igyekvő elmélettel együtt fejlődött, és ezek közvetlen hatást gyakorolhattak rá. Elég hamar nyilvánvalóvá vált, hogy a „lineáris modell egy, a természeti környezetbe jobban integrálódó modellel, az ún. ipari ökorendszerrel kell felváltani” [18].

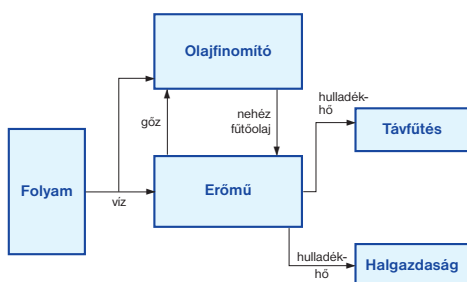
A vizsgálódások egyik célja az ipari és társadalmi metabolizmust alkotó struktúrák és folyamatok megismerése, fő tárgyat az anyagáramok képezik, ezek vizsgálatának eszköze az életciklus-elemzés. Ismeretes, hogy az életciklus-elemzés a természetes közegekből történt kitermeléstől az oda visszajuttatásig, ahogy általában mondják „a bölcsőtől a sírig” tart. Ezt kiegészítették azzal, hogy az ipari ökológiában ideális esetben nincs sír. Ez utóbbi az anyagok teljes körfolyamatú hasznosítása, a „bölcsőtől a bölcsőig” elképzelés, amelynek kidolgozása és népszerűsítése Baumgart és McDonough nevéhez fűződik. „Képzeld el egy világot, amelyben az összes dolog, amit készítünk, használunk és fogyasztunk, tápanyag a természet és az ipar számára egy olyan világban, ahol a növekedés jó, az emberi tevékenység kellemes és az ökológiai lábnyomot csökkenti” – írták, ami egyaránt nagyon hasonlít az ipari ökológia és a körforgásos gazdaság gondolataihoz.

Az ipari ökológia szolgáltatta azt az első olyan átfogó megközelítést, amely miatt elnevezték a *fenntarthatóság tudományának*.

Az ipari ökológiai rendszerek tankönyvi példája a dániai *Kalundborg* város ipari parkjában (3. ábra) együttműködő olajfinomító és erőmű, a hozzájuk kapcsolódó távfűtőművel, gyógyszer-gyárral, gipszkartongyárral, halgazdasággal és más kisebb létesít-



3. ábra.
A kalundborgi
ipari
szimbiózis



4. ábra.
A százhalom-
battai
ipari szimbiózis

ményekkel az 1970–1980-as időszakban alakult ki. Magyarországon már ezt megelőzően teljesen hasonló módon működött együtt (4. ábra) Százhalombattán a Dunai Finomító és a Dunai Erőmű, és az együttműködésben halgazdaság és távfűtőmű is szerepelt. Az időbeli sorrend okán még az is felvethető kérdés, hogy ki másolt kit.

Ez a korai ipari szimbiózis felbomlott. Az okok között a technikai haladás, a környezetvédelmi szabályozás szigorodása, a kölcsönös hasznok elenyészése egyaránt szerepelt [19].

Az ipari ökológia terjedését a hulladékáramokat szabályozó szigorú jogi korlátok akadályozták, továbbá hiányoztak a gazdasági szereplők együttműködését segítő, rendkívül fontos *bizalom-erősítő* eszközök. A körforgásos gazdaság annyiban tér el az ipari ökológia és a korábbi hasonló szándékú elképzelések megoldásaitól, hogy egyrészt felhívta a figyelmet az „áru helyett szolgáltatás” típusú üzleti modellre, másrészt továbblép a termelő vállalatoknak a fenntarthatóságot célzó együttműködésén, és a gazdaság valamennyi szereplőjét, tehát a *fogyasztókat* is az együttműködés részévé teszi. Ezt erősíti a „*kiterjesztett termelői felelősség*” elve, ami a gyártókat és a forgalmazókat gyakorlatilag hulladékká vált termékeik visszavételére kötelezi.

A körforgásos gazdaság két jól megkülönböztethető irányzata közül az egyik egy termék karbantartása, felújítása, korszerűsítése, funkciójának megőrzése révén, a másik a termékben található anyag feldolgozása, visszaforgatása révén takarít meg anyagot és képződő hulladékot. Mindkettőben fontos szerepet játszik az *inverz vagy fordított logisztika*, amely a felhasználótól visszaszállítja termékeit, anyagait a gyártóhoz, illetve feldolgozóhoz.

Minták, megoldások

A Hollandiából indult *Repair Café* mozgalom – ahol alkalmi közösségek összejöveteleiken kávézgatás közben, egymást segítve ki-ki megjavíthatja elromlott hajszárítóját, régi ingaóráját. Weboldaluk (www.facebook.com/repaircafehungary/) tanúsága szerint Budapesten is eredményesen működnek. Mint írják: „Van hova fejlődni... A jó hír, hogy elég lemásolni.” Ez a fajta, az élettartam-növelésre, javításra alapozó és egyúttal a fenntarthatóságot is segítő tevékenység, ha foglalkozásszerűen végzik, jelentős képzett, helyi munkaerőt köthet le.

A körforgásos gazdaságban nem elképzelhetetlen a fémek ötvöztetésének fordított művelete, amikor egy ötvözetet tiszta fém-összetevőkre bontanak. Létezik kémiai visszaforgatás is. Lehet a műanyagokat, vagyis a polimereket elemi molekulákká, monomerekké lebontani annak érdekében, hogy hulladék se keletkezzen, és feldolgozás után újra „új” műanyag készüljön belőlük, megtakarítva a friss nyersanyagot. Utóbbi téren Magyarországon a Pannon Egyetem és a Mol kutatói közösen nemzetközileg is figyelemre méltó eredményeket értek már el. Hasonlóan ígéretes megközelítés az, hogy a műanyag hulladék funkcionalizálása révén összeházasítható betonnal – így készül a magyar szabadalommal védett zöldbeton. Utóbbi a kísérleti fejlesztésre és az adalék gyártására szolgáló üzem megvalósítására még befektetőket keres. Előrehaladottabb stádiumban van a balatonfűzfői ipari parkban működő Pirolízis Project Kft. szintén szabadalommal védett [20] gumiabroncs-pirolizálója, amelynek teljesítménye évi 1200 tonna gumiabroncs. Outputja pedig korom, ami a festékgyártás, a kozmetikai ipar és a gumiabroncs-gyártás alapanyaga lehet, továbbá pirolízis olaj és pirolízisgáz.

A körforgásos gazdaság hazai terjedésének egyik gátja, hogy sem a széles közönség, sem az ipari szakemberek, sem a döntéshozók számára nem ismert vagy nem eléggé ismert a benne rejlő sok le-

hetőség és a kapcsolódó tennivaló. Ugyancsak nehezíti alkalmazását, hogy a hozzá kapcsolódó szakkifejezések kiforratlanok, a magyarra lefordított EU-eredetű joganyag következetlen szóhasználatában. Még inkább nehézséget okozhat az uniós hulladékgazdálkodási jog gyakorlati alkalmazása, a hulladék státusz megszűnésének vitatott kérdései: például hogyan lehet egy országhatárnál azt ellenőrizni, hogy egy anyag alkalmas-e újrafeldolgozásra vagy sem.

A fenntarthatóság iránti igény hazai előfutárának „A fáknak és erdőknek neveléséről és megtartásáról” szóló, *Mária Terézia* királynő által a Magyar Királyság részére 1769. december 22-én kiadott Erdőrendtartást tekintik. Ebben írták elő, hogy az erdőt – akkori szóhasználatlaltal – *tartamosan* kell művelni. A királynő érdeme, hogy a jogszabállyal egyidejűleg külön iskolákat alapított az erdészeti ismeretek oktatására. Ennek példája nyomán lenne hasznos ma a különböző szintű iskolákban oktatni a körforgásosra tervezés ismereteit.

Összegzés

A termelés hatékonyságának növekedése és a Föld népességének gyarapodása egyforma mértékben járult hozzá a gazdaság exponenciális növekedéséhez [21], ahhoz a jelenséghez, amit *Will Steffens* amerikai születésű ausztrál kémikus – az *antropocén* földtörténeti kor bevezetésének lelkes híve – *nagy felgyorsulásként* jellemzett. Cikkében [22] az emberiség és környezete 24 fontosnak tartott paraméterét (népesség, GDP, műtrágya-felhasználás, járművek száma, légköri CO₂- és N₂O-koncentráció stb.) ábrákon mutatta be, és ezek – különösen a második világháborút követő időszakra nézve – egytől egyig exponenciális jelleget mutattak.

Annak a ténynek a bemutatására, hogy *sokan vagyunk, sokat fogyasztunk és sokat hajigálunk* el, az említett fontos paraméterek mellett többféle kombinált mérőszámot is bevezettek. Egyik ilyen a Föld eltartóképességének szemléletes megjelenítésére szolgáló *ökológiai lábnyom*. Ez olyan mutatószám, amely összehasonlítja az emberiség természet iránti erőforrás- és hulladék-nyelőképességét azzal, amit bolygónk nyújtani képes [23]. A legutóbbi, 2016. évi adatok [24] szerint 1,69 darab, vagyis több mint másfél földgolyóra volt szüksége az emberiségnek, az akkori életvitel átlagos szintjén. Ha csak magyarok élnének a Földön, akkor pontosan 2,22 darabra. Arra, hogy hány bolygóra lesz szükség két év múlva, 2022-ben, amire az emberiség lélekszáma meghaladja a 8 milliárdot, és addigra a tehetősebb középosztály lélekszáma is több százmillióval nő, egyelőre nincsenek becslések.

Ökológiai szempontból *inváziósnak* nevezik azokat a fajokat, amelyek képesek tömegesen, az ökológiai egyensúlyt felborítva elterjedni [25]; gyorsan szaporodnak, változatos környezeti feltételek között életképesek és versenylőnyt élveznek az őshonos fajokkal szemben, mert az új élőhelyen még nincsenek természetes ellenségeik. E megközelítésben számos mai ember ismerhetne magára mint inváziós faj egyedére. Azt, hogy az emberiség felébred-e, nem lehet tudni. A már idézett *Herman Daly* tanítómestere, *Nicholas Georgescu-Roegen* kételyeit ekképpen fogalmazta meg [26]: „Meg fog-e hallgatni az emberiség olyan programot, amely megszokott kényelmének korlátozását eredményezné? Az emberiség sorsa talán egy rövid, de élénk, izgalmas és extravagáns élet, nem pedig egy hosszú, eseménytelen és vegetatív lét. Hagyja-e, hogy más fajok – például az amőbák –, amelyeknek nincsenek spirituális törekvéseik, örököljék a még akkor is bőséges napfényben fürdőző Földet?”

Fenntartható és a nyersanyagokat hatékonyan használó gazdálkodás kialakítására van szükség. Ennek modellje a körforgás-

sos gazdaság. Tudni kell azonban, hogy ez még ígéri – és egy átmeneti időre lehetővé is teszi – a gazdaság mennyiségi és az emberiség számbeli gyarapodását. Ami ez után következhet, az a *stabil népesség* és az általános *ipari ökológiai* modell, amit a természet évmilliók alatt fenntarthatóvá fejlesztett.

IRODALOM

- [1] Daly H. E., Townsend K. N., *Vauling the Earth: Economics, Ecology, Ethics*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1993, 267.
- [2] Egri vár, https://www.wikiwand.com/hu/Egri_vár
- [3] Beke M. (szerk.), *A technika világa*. Athenaeum, Budapest, 1928.
- [4] Daly, H. E., *Economics in a full world*. Scientific American (2005) 293, 100–107.
- [5] Der Spiegel, 2011. nov.
- [6] <http://www.reuters.com/article/us-mining-toyota-idUSTRE57U02B20090831>
- [7] Peak metals, minerals, energy, wealth, food and population; urgent policy considerations for a sustainable society. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2013.
- [8] Ragnarsdóttir, K. V. et. al., *Long Term Sustainability of Global Supply of Natural Resources and Materials, Sustainable Development – Energy, Engineering and Technologies. Manufacturing and Environment*, 2012.
- [9] *Physics Today* (2019) 72/4, 26. <https://doi.org/10.1063/PT.3.4181>
- [10] <https://knoema.com/prujshc/copper-prices-forecast-long-term-to-2025>
- [11] <https://www.euchems.eu/wp-content/uploads/2019/05/Hungarian-Periodic-Table-Element-Scarcity.pdf>
- [12] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics#Total_waste_generation
- [13] Stahel, W. R., *Ipai Ökológia* (2015) 3, 55.
- [14] The Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy*, Vol. 1. An economic and business rationale for an accelerated transition, 2012.
- [15] COM(2019) 640 final. Brüsszel, 2019. 12. 11.
- [16] COM(2015) 614 final. Brüsszel, 2015. 12. 2.
- [17] Ayres, R. U., Kneese, A. V., *Environmental Pollution*. Washington DC: Federal Programs for the Development of Human Resources, 1968.
- [18] Szépvölgyi J., *Ipai ökológia: az ipar és a környezet kapcsolatának újragondolása*. In: *Az ipari ökológia a gazdaság és a környezet szolgálatában*. Környezettudományi Központ, Budapest, 2003.
- [19] Bezegh A. és mtsi, *Ipai szimbiózis a központi tervezésű gazdaság korában. A százhalombattai eset*. *Ipai Ökológia* (2013) 2, 5–26.
- [20] Patent No. P 06 00661.
- [21] Piketty, Th., *A tőke a 21. században*. Kossuth Kiadó, Budapest, 2015, 106–107.
- [22] Steffen W, et al., *The Anthropocene: conceptual and historical perspectives*. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2011) 369, 842–867.
- [23] Wackernagel, M., Rees, W., *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canada, 1996.
- [24] <http://data.footprintnetwork.org/>
- [25] https://www.wikiwand.com/hu/Inváziós_faj
- [26] Georgescu-Roegen, N., *Energy and Economic Myths*. *Southern Economic Journal* (1975) 41/3, 379.

ÖSSZEFOGLALÁS

BEZEGH ANDRÁS: KÖRFORGÁSOS GAZDASÁG: A FENNTARTHATÓSÁG NÉLKÜLÖZHETETLEN ESZKÖZE

A gazdaság mai általános modelljét, a növekvő népesség növekvő fogyasztását kiszolgáló növekvő termelést egyre észrevehetőbb mértékben korlátozza az egyes speciális nyersanyagfajták egyre gyakrabban kialakuló hiánya és a Földet elborító hulladék mennyisége.

A *körforgásos gazdaság* új gazdasági fejlődési pályát kínál azáltal, hogy a természeti erőforrásokat hosszabb ideig használja saját céljaira, így egyidejűleg csökkenti az erőforrások iránti igényt és a hulladékok képződését.

A *körforgásos gazdaság* valójában a gazdálkodás különböző területein régóta ismert megoldások tudatosabb és szélesebb körű alkalmazását jelenti. Bemutatjuk a *körforgásos gazdasághoz* vezető kényszerítő körülményeket és a korábbi gyakorlatok mellett azokat a gondolati iskolákat, amelyek a fenntarthatóság érdekében vizsgálták a termelés anyag- és energiaáramait.

Tudni kell azonban, hogy a *körforgásos gazdaság* ígéri – és egy átmeneti időre lehetővé is teszi – a világ gazdaságának mennyiségi és az emberiség számbeli gyarapodását. Ami ez után következhet, az a *stabil népesség* és az általános *ipari ökológiai* modell, amit a természet évmilliók alatt fenntarthatóvá fejlesztett.

A KÜLÖNSZÁM SZERZŐI



Abonyi János az MTA doktora, a Pannon Egyetem Folyamatmérnöki Intézeti Tanszék professzora, az MTA–PE Lendület Komplex Rendszerek Figyelemmel Kísérése kutatócsoport vezetője. Több mint 250 folyóiratcikk és könyvfejezet társszerzője, öt monográfiát és egy tankönyvet jelentetett meg az adatbányászat témakörében.

Kutatási területei a komplexitás, a folyamatmérnökség, a minőségirányítás, az adatbányászat és az üzleti folyamatok újratervezése.



Bezegh András PhD, a kémiai tudományok kandidátusa, a Magyar Ipari Ökológiai Társaság elnöke, a Magyar Mérnöki Kamara Környezetvédelmi Tagozata elnökségének és a Balaton Groupnak a tagja. Számos hazai és külföldi egyetemen oktatott és kutatott. Több tanácsadó cég foglalkoztatta. Érdeklődése a bonyolult problémák modelljeire, így farmakokinetikára, elektrokémiai szenzorok egyen-súlyi méréseire, újabban a környezeti menedzsment, illetve a fenntart-hatóság kérdéseire terjed ki.

Kutatási területei a komplexitás, a folyamatmérnökség, a minőségirányítás, az adatbányászat és az üzleti folyamatok újratervezése.



Czvetkó Tímea a Pannon Egyetem Folyamatmérnöki Intézeti Tanszék és az MTA–PE Lendület Komplex Rendszerek Figyelemmel Kísérése kutatócsoport tagja. A rendszer- és adattudomány eszköztárának fejlesztési lehetőségeit vizsgálja fenntarthatósági problémák összefüggésrendszerének feltárásában, műszaki és üzleti folyamatok és regionális innovációs infrastruktúrák fejlesztésében.

Kutatási területei a komplexitás, a folyamatmérnökség, a minőségirányítás, az adatbányászat és az üzleti folyamatok újratervezése.



Hancsók Jenő az MTA doktora, a Pannon Egyetem emeritus egyetemi tanára. Nemzetközileg is elismert módon művelt kutatási területei a motorhajtóanyagok, motorolajok és azok adalékainak kifejlesztése köolaj-alapú és alternatív energiaforrásokból. Több magyar és angol nyelvű szakkönyv, tankönyv (társ)szerzője. Közel ezer tudományos közlemény és 20 magyar és nemzetközi szabadalom (társ)szerzője.

Kutatási területei a komplexitás, a folyamatmérnökség, a minőségirányítás, az adatbányászat és az üzleti folyamatok újratervezése.



János Imre fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár az ELTE TTK Komplex Rendszerek Fizikája Tanszéken, a Környezettudományi Doktori Iskola és a Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium vezetője. Kutatási területe a geofizikai áramlástan mellett nagy tömegű meteorológiai és egyéb környezeti adatok elemzése, nemlineáris idősor-analízis.

Kutatási területei a komplexitás, a folyamatmérnökség, a minőségirányítás, az adatbányászat és az üzleti folyamatok újratervezése.



Nagyházi Márton gyógyszervegyészmérnök mesterdiplomáját 2018-ban szerezte a BME-n. Azóta a BME PhD-képzésének keretében a Természettudományi Kutatóközpont Zöldkémiai Kutatócsoportjában új típusú karbénligandumok szintézisével és homogén katalitikus célokra történő alkalmazásával foglalkozik.



Pukánszky Béla az MTA rendes tagja, a BME Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszékének egyetemi tanára, a Természettudományi Kutatóközpont Anyag- és Környezatkémiai Intézetének munkatársa. Szűkebb szakterülete a heterogén polimerrendszerek szerkezet-tulajdonság összefüggéseinek vizsgálata, valamint a biológiai lebontható polimerek és kompozitok vizsgálata.



Salgó András az MTA doktora, egyetemi tanár a BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszer-tudományi Tanszékén. Biotechnológiai és élelmiszer-tudományi területeken végez alkalmazott kutatásokat, amelyek fókuszában az infravörös spektroszkópiai és képalkotó módszerek fejlesztései állnak.



Salma Imre az MTA doktora, az ELTE Kémiai Intézet egyetemi tanára, a Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (BpART) Laboratórium vezetője, a Magyar Aeroszol Társaság elnöke. Légkörkémikus, leginkább az aeroszol részecskék keletkezését, kölcsönhatási folyamatait, valamint környezeti, éghajlati és egészségügyi hatásait vizsgálja.



Sebestyén Viktor PhD, a Pannon Egyetem Fenntarthatósági Megoldások Kutatólabor vezetője, több nemzetközi tudományos testület tagja. A fenntartható fejlődési célok összefüggésrendszerét tanulmányozza, hogy miként lehet a döntéshozókat támogatni a 2030 Agenda végrehajtásában.



Szépvölgyi János vegyészmérnök, az MTA doktora. A Pannon Egyetem és a Természettudományi Kutatóközpont professor emeritusa. Közel fél évszázados kutatói és fejlesztői munkája során elsősorban műszaki kémiai, anyagtudományi és környezatkémiai problémákkal foglalkozott. Nemzetközi és hazai vonatkozásban is széles körben látott el oktatási, kutatásszervezési és kutatásirányítási feladatokat.



Tátraaljai Dóra PhD, tudományos munkatárs a Természettudományi Kutatóközpontban és oktató a BME Műanyag- és Gumiipari Laboratóriumában. Polimerek degradációjával és stabilizálásával, biopolimerek alkalmazásával foglalkozik. Fő kutatási területe a természetes antioxidánsok alkalmazása szintetikus stabilizátorok helyett, polimerek feldolgozása során.



Tompos András PhD, a Természettudományi Kutatóközpont Anyag- és Környezatkémiai Intézetének igazgatója 2014-től. Kombinatorikus módszereket és nagy áteresztő képességű kísérleti eszközöket alkalmaz a heterogén katalizátorok optimalizálásában, jelenleg a tüzelőanyag-cellák elektrokatalizátorainak kutatása során.



Tuba Róbert PhD, az ELTE-n folytatott posztdoktori tanulmányokat, majd az Alexander von Humboldt Alapítvány tudományos munkatársa volt. Később a Glaxo-SmithKline Biologicalsnál, a Texas A&M Egyetemen és a Caltech-en dolgozott. Jelenleg a Természettudományi Kutatóközpont Zöldkémiai Kutatócsoportjának vezetője.

Klíímaváltozás a kémia és a határterületek szemszögéből

TARTALOM



Szépvolgyi János: Bevezetés	
Jánosi Imre: Klímaváltozás: hol tartunk most?	1
Abonyi János, Czvetkó Tímea, Sebestyén Viktor: Az adattudomány eszköztárának alkalmazási lehetőségei a klímaváltozás kihívásainak azonosításában és kezelésében	5
Laky Dóra: Az ivóvízellátás problémái és kezelési lehetőségei	10
Salgó András: Az élelmiszeripar kihívásai: a klímaváltozás hatásai az élelmiszer-biztonságra	14
Nagyházi Márton, Tuba Róbert: A zöld kémia válaszai az éghajlatváltozásra	20
Keglevich György: Trendek és lehetőségek az ipari szerves kémia környezetbaráttá tételére	25
Táttraaljai Dóra, Pukánszky Béla: A műanyagipar és a műanyag-felhasználás környezeti hatásainak csökkentése	29
Salma Imre: Légkörkémi folyamatok és éghajlatváltozás	33
Tompos András: Klímaváltozás és energiaellátás, különös tekintettel a megújuló forrásokra	36
Hancsók Jenő: Mobilitás és klímaváltozás (környezetszennyezés) rendszerszemléletben	41
Bezegh András: Körforgásos gazdaság: a fenntarthatóság nélkülözhetetlen eszköze	48

Szerkesztette: SZÉPVÖLGYI JÁNOS



A különszám megjelenését
a Kék Bolygó
Klímavédelmi Alapítvány
támogatta

KÉK BOLYGÓ

KLÍMAVÉDELMI ALAPÍTVÁNY

Szerkesztőség:

Felelős szerkesztő: KISS TAMÁS • SZEKERES GÁBOR örökös főszerkesztő • Olvasószerkesztő: SILBERER VERA • Tervezőszerkesztő: HORVÁTH IMRE
Szerkesztők: ANDROSITS BEÁTA, BANAI ENDRE, LENTE GÁBOR, NAGY GÁBOR, PAP JÓZSEF SÁNDOR, RITZ FERENC, ZÉKÁNY ANDRÁS
Szerkesztőség titkár: SÜLI ERIKA

Szerkesztőbizottság:

SZÉPVÖLGYI JÁNOS, a szerkesztőbizottság elnöke • ANTUS SÁNDOR, BIACS PÉTER, BUZÁS ILONA, HANCSÓK JENŐ, JANÁKY CSABA, KALÁSZ HUBA, KEGLEVICH GYÖRGY, KOVÁCS ATTILA, LIPTAY GYÖRGY, MIZSEY PÉTER, MÜLLER TIBOR, NEMES ANDRÁS, ifj. SZÁNTAY CSABA, SZABÓ ILONA, TÖMPE PÉTER, ZÉKÁNY ANDRÁS

Kapják az Egyesület tagjai és a megrendelők

A szerkesztésért felel: KISS TAMÁS

Szerkesztőség: 1015 Budapest, Hattyú u. 16. • Tel.: 36-1-225-8777, 36-1-201-6883 • Fax: 36-1-201-8056 • E-mail: mkl@mke.org.hu

Kiadja a Magyar Kémikusok Egyesülete • Felelős kiadó: ANDROSITS BEÁTA • Nyomdai előkészítés: Planta-2000 Bt.

Nyomás: Europrinting Kft. • Felelős vezető: ENDZSEL ERNŐ ügyvezető igazgató

Terjeszti a Magyar Kémikusok Egyesülete, 1015 Budapest, Hattyú u. 16. • Tel.: 36-1-201-6883, fax: 36-1-201-8056, e-mail: mkl@mke.org.hu

Aktuális számaink tartalma, az összefoglalók és egyesületi híreink, illetve archivált számaink honlapunkon (www.mkl.mke.org.hu) olvashatók

Index: 25 541

HU ISSN 0025-0163 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-1199 (online)

DOI: 10.24364/MKL.2020.13

A lapot az MTA MTMT indexeli, és a REAL, továbbá az Országos Széchényi Könyvtár (OSZK) Elektronikus Periodika Adatbázisa és Archivuma (EPA) archiválja