

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 űrbe 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 hősugárzást 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.

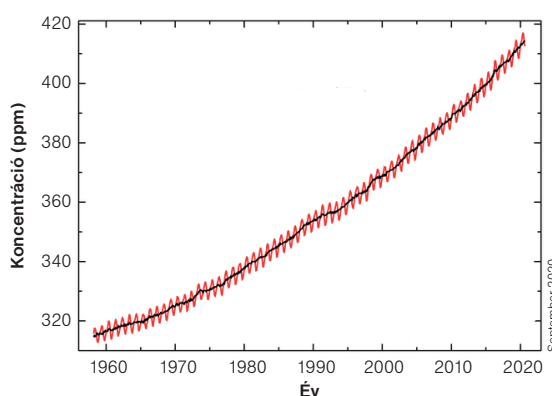
A levegőben elnyelt energia (ami a napsugárzásból, a hősugárzásból, a felhőképződéshez kapcsolódó látens hőből és a légáramlással közvetített, konvektív hőből tevődik össze) a felszín sugárzásánál kissé nagyobb hullámhosszon emittálódik újra a levegőben, első közelítésben 5–6 km magasságban. A kisugárzott energia mintegy 62%-a térbeli okok miatt visszajut a Föld felszínére, és ott ismét elnyelődik, míg a maradék kb. 38% az űrbe 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 hősugárzás 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 újraelosztáshoz 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

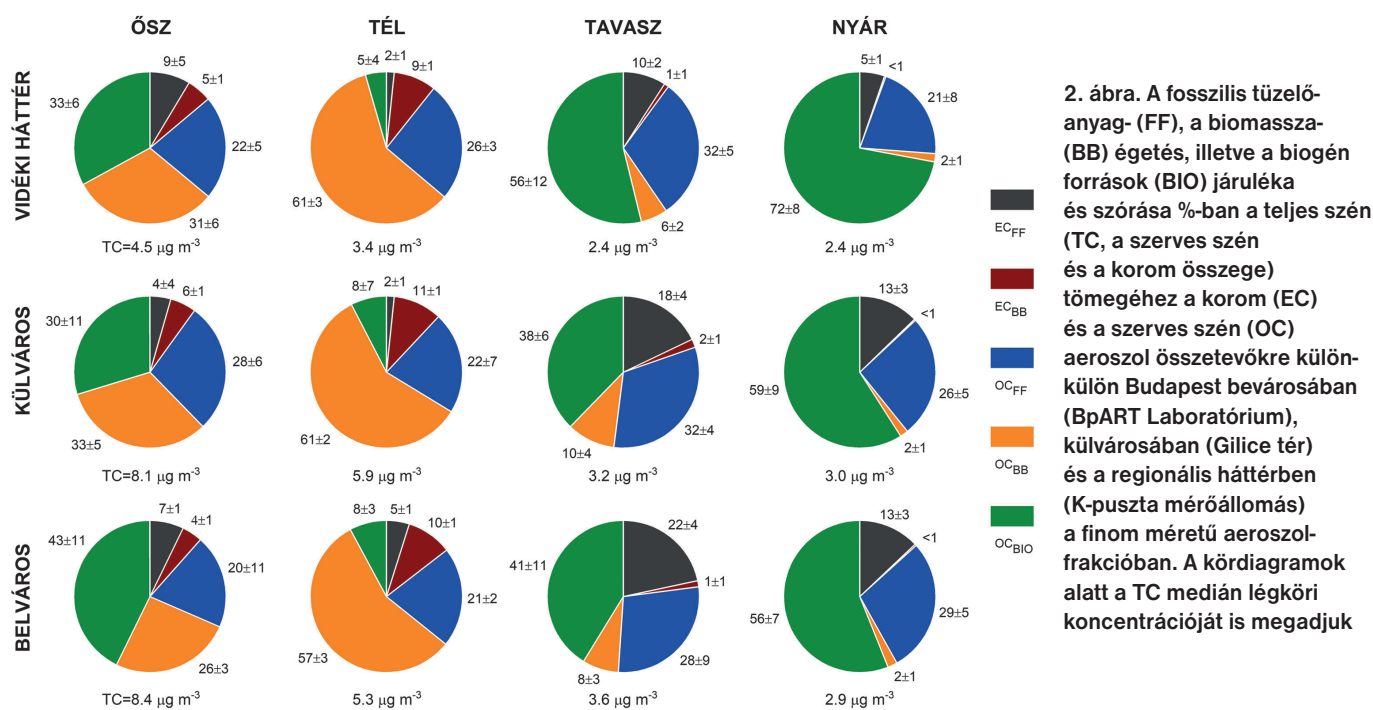
Az emberi tevékenység befolyásolhatja a légköri aeroszol részecskék koncentrációját is. Az aeroszol pedig szintén alakíthatja a Föld energiamérlegét: közvetlenül, tehát a napfény vagy a hősugárzás szórása és abszorpciója által, vagy közvetve, tehát a felhők optikai és mikrofizikai tulajdonságainak megváltoztatásán 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 légkörkémi 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 térizomerjei, 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) mérésével 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.

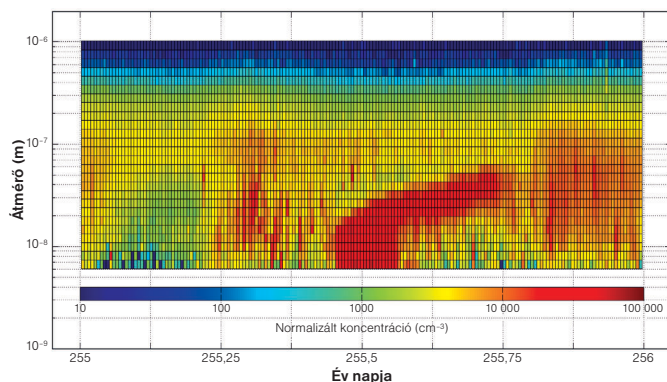
A hűtőhatás jelentős része a felhőkhöz kapcsolódik. A Föld felszínének nagyobb részét általában felhők borítják. A felhők létrejöttéhez szükséges feltétel az aeroszoloknak köszönhetően valószínűleg meg. Aeroszol részecskék nélkül nincsenek felhők és nincs csapadék a természetben. A felhőcseppek keletkezési folyamatában a részecskék bizonyos, kis aránya, az ún. felhőkondenzációs magvak (CCN) vagy jégkristály-magvak játszanak meghatározó szerepet. Hatékony CCN-tulajdonsággal rendelkeznek a vízzeloldható 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).



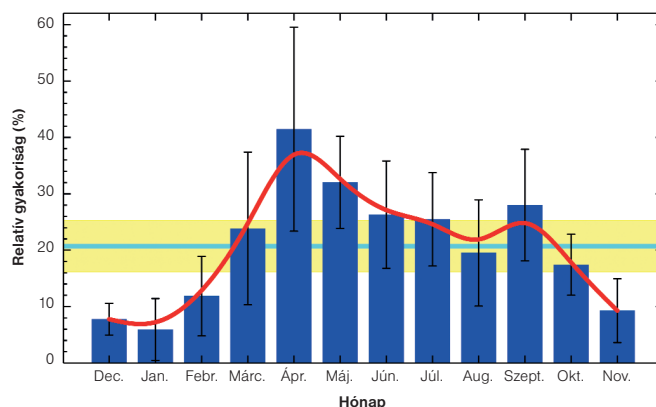
3. ábra. Új aeroszol részecskék keletkezése és növekedése Budapest belvárosában (BpART Laboratórium) 2020. szeptember 11-én. A piros alakzatot banángörbének hívjuk

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 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, légkörkémiai, 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 Vasánits 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., Mérföldkövek 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 hidrogéntechnológia 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