

# KOROMRÉSZECSKÉK A LÉGKÖRBE A KIPUFOGÓCSŐTŐL AZ ÉGHAJLAT-MÓDOSÍTÁSIG

Gelencsér András

az MTA doktora,

MTA–Pannon Egyetem Levegőkémiai Kutatócsoport, Veszprém  
gelencs@almos.uni-pannon.hu

A globális éghajlatváltozás okaival kapcsolatban szinte mindenki az üvegházhatású gázok (elsősorban a szén-dioxid) szerepére gondol, miközben létezik egy nagy koncentrációban szabad szemmel is látható légköri alkotó, amely a napsugárzás közvetlen elnyelése révén számszerűsíthetően óriási hatást gyakorol a Föld-légkör rendszer energiamelegére. A koromról van szó, amelyet napjainkban már évente közel 8 millió tonna mennyiségben bocsátunk a légkörbe, és amely ott a teljes éves globális energiafelhasználás harmincszorosának megfelelő többlet hőenergiát termel. A koromrészecskék változatossága és egyenlőtlen légköri eloszlása miatt hatásainak számszerűsítése nem könnyű feladat. Annyi azonban bizonyos, hogy a korom meghatározó szerepet játszik az északi félgömb jégfelületeinek gyors olvadásában, és nagy valószínűséggel ma már globálisan a többlet szén-dioxid mögött a második legnagyobb éghajlatmódosító tényezővé lépett elő. Nem feledkezhetünk meg arról a tényről sem, hogy súlyos egészségkárosító hatást okozó veszélyes levegőszennyező anyagról van szó. Globális kibocsátásának mérséklése ezért több szempontból is vonzó, látványos és a széndioxid-emisszió

csökkentésénél kevesebb lemondással járó nemzetközi vállalkozás lenne. Egyelőre azonban nem látszik körvonalazódni az ehhez szükséges nemzetközi politikai akarat.

## *A koromrészecskék fogalma, tulajdonságaik*

A korom majdnem kizárólag szénből álló szilárd részecske, amely rendkívül nagy hatékonysággal képes a napsugárzás elnyelésére a teljes hullámhossztartományban (280 nm és 2,5  $\mu\text{m}$  között). A légkör alkotói közül a napsugárzás elnyelésére a koromnál jóval kisebb fajlagos hatékonysággal csak az ásványi por vastartalmú részecskéi és a szerves aeroszol vegyületek egy része, az ún. *brown carbon* részecskék képesek (Andreae – Gelencsér, 2006). Az angol nyelvű szakirodalom a korom helyett többségében a *black carbon* (BC) kifejezést (betűszót) használja, az eredeti angol korom jelentésű szót (*soot*) a széntartalmú anyagok égéséből származó – sokszor jelentős mennyiségű szerves anyagot tartalmazó – komplex részecskékre vonatkoztatja. A magyar nyelvben célszerű a korom szót megtartani a fényt elnyelő részecskék esetében, hiszen a hozzá társuló jelző („koromfekete”) igen hatékony fényelnyelésre utal. A korom – más

légköri alkotókkal, például a gázokkal ellentétben – nem egyetlen, jól definiált kémiai anyag, hanem rendkívül változatos méretű, alakú, összetételű és tulajdonságú részecskék formájában fordulhat elő, amint az az 1. ábrán is látható.

A frissen kibocsátott korom 10–50 nm átmérőjű szén-gömbök laza füzéréből áll. A légkörben szállítódó korom fizikai és kémiai folyamatok (ún. öregedés) révén egy idő után a füzérből tömörebb, gömbszerű képződménnyé alakulhat át, jellemzően a 0,1–1 µm átmérő tartományban. Emiatt a koromkoncentráció mérése sem egyszerű: leggyakrabban fényelnyelő képességét vagy nagy termikus stabilitását használják ki a meghatározásához. A légköri korom mérésekor még a napjainkban használt korszerű mérési módszerek is egymástól jelentősen (akár 30 %-kal) eltérő koncentrációértékeket adhatnak. Sajnos a korom mérésére szabványosított mérési eljárás nem létezik, így a különböző módszerekkel kapott eredmények sokszor nehezen hasonlíthatók össze.

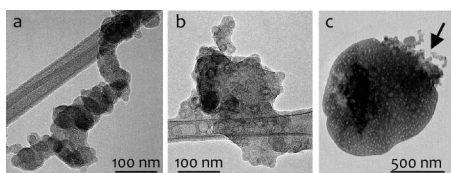
A koromrészecskék tulajdonságaiknál fogva átlagosan egy-két hétig maradnak a légkörben, mielőtt a csapadékkal vagy a felszínre ülepedve eltávoznak onnan. Ez a rövid légköri tartózkodási idő azzal is jár, hogy – szemben a légkör egészét többé-kevésbé egyenletesen kitöltő üvegházhatású gázokkal – a korom koncentrációja a kibocsátás környezetében lesz a legnagyobb. Vagyis a korom jellemzően regionális levegőszennyező, hatása, mint látni fogjuk, napjainkban mégis globális.

#### *A koromrészecskék képződése, kibocsátása és légköri elfordulása*

A koromrészecskék a széntartalmú anyagok tökéletlen égése során keletkeznek, gázok (például a szén-monoxid) és más részecskék

mellett. Legismertebb forrásaik, a dízelüzemű gépjárművek kipufogógázaiiban nagy koncentrációban szabad szemmel is jól megfigyelhetők. A felszabaduló koromrészecskék méretét, alakját, kémiai összetevőit és egyéb tulajdonságait elsősorban a tüzelőanyag tulajdonságai és az égés körülményei határozzák meg (például: oxigénellátottság, égési hőmérséklet, tüzelőanyag nedvességtartalma). A koromrészecskék főleg az ún. lángoló égés fázisában keletkeznek. Magas hőmérsékleten és nagy oxigénfelesleg mellett azonban a képződő részecskék tovább oxidálódnak, így viszonylag kevés koromrészecske szabadul fel. Kevésbé korszerű égésterekben és nyílt tüzeknél, ahol a lángban az oxigénellátottság és a hőmérséklet erősen ingadozik, jelentős mennyiségű korom képződhet. Parázsló égés esetén, ahol a hőmérséklet lényegesen alacsonyabb, koromképződés nem figyelhető meg.

A korom globális kibocsátására vonatkozó legfrissebb és ellenőrzött adatok a 2000. évre állnak a rendelkezésre (Bond et al., 2013).



1. ábra • Jellemző koromrészecskék transzmissziós elektronmikroszkópos felvételei. (a) Dízelmotor által kibocsátott, „csupasz” szén-gömbökből álló koromfüzér. (b) Szintén dízel kibocsátásból származó, amorf szerves anyagba ágyazott, kompakt korom. (c) Ammónium-szulfát és korom keverékéből álló részecske az Atlanti-óceán feletti levegőből (a nyíl a korom összetevőt jelöli). Az (a) és (b) ábrán látható „szalag” a mintahordozó felület része (Pósfai Mihály felvételei).

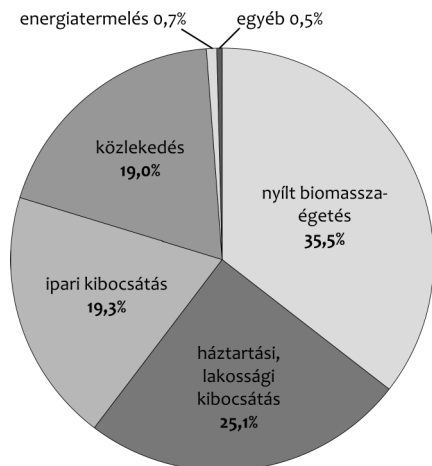
Eszerint a világ összes éves koromkibocsátása 2000-ben (szénegyenértékben kifejezve) 7,6 millió tonna volt. Ez azt jelenti, hogy minden egyes tonna szén-dioxid kibocsátásával együtt kb. 1 kg koromrészecske is a levegőbe kerül. A kibocsátás közel háromnegyede három földrajzi régióból, Kelet-, Délkelet- és Dél-Ázsiából (40%), Afrikából (23%), valamint Dél- és Latin-Amerikából (12%) származik. Az Egyesült Államok, amely a szén-dioxid-kibocsátásban élen járó országok közé tartozik, a koromkibocsátó régiók „dicsőségtábláján” csak a 7. helyen szerénykedik (5%-os részesedéssel). Európa, Japán és a Közel-Kelet koromkibocsátása szerény, ezekben a régiókban a közlekedés és szállítás a meghatározó emisszióforrás (főként nagy teljesítményű dízelmotorokból). A koromrészecskék globális kibocsátásának forrástípus szerinti megoszlását a 2. ábra mutatja (Lamarque et al., 2010).

A nyílt biomassza-égetés (erdőtüzek, szavannatüzek, mezőgazdasági hulladékégetés), valamint a fejlődő országbeli háztartások

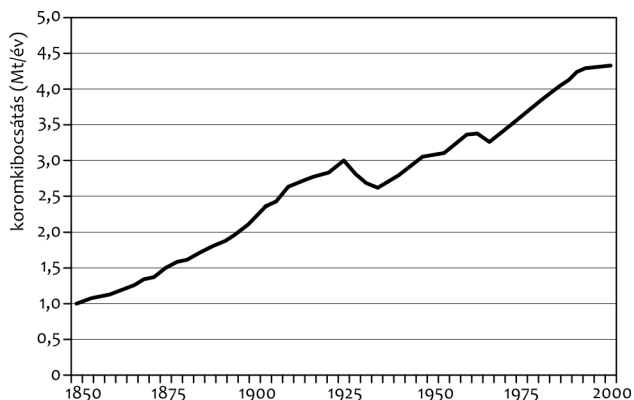
többségében ugyancsak biomassza égetésnek tekinthető kibocsátás (sütés-főzés és fűtés) együttesen a globális koromkibocsátás közel kétharmadáért felelős. Az utóbbi emissziótípus azonban globális hozzájárulásán túlmenően kiemelkedő kockázatot jelent, ugyanis a kibocsátás közvetlen környezetében több milliárd ember számára szinte elviselhetetlen mértékű levegőszennyezést is okoz. A kibocsátott koromrészecskék többsége az alsó légkörben marad, de a nagyobb magasságokba (az ún. szabad troposzférába) feljutó vagy ott kibocsátott koromrészecskék nagy távolságokra is eljuthatnak (az északi félgömbön döntően nyugat-keleti irányban). Az Északi-sarkvidéken a koncentrációjuknál aránytalanul nagyobb éghajlati hatást kifejtő koromrészecskék teljes egészében nagytávolságú légköri transzportból származnak. Az 1850-től rekonstruált történelmi koromkibocsátás trendje a 3. ábrán látható (Bond et al., 2007).

1850-ben a becsült globális koromkibocsátás még csak egymillió tonna körül lehetett, és ennek jelentős része széntüzelésből származott. A koromkibocsátás növekvő trendje az 1920-as évek körül megtorpant (az Egyesült Államok koromkibocsátása ekkor tetőzött), majd az 1950-es évek végén Európában is elérte a maximumát. Az utóbbi évtizedekben azonban a fejlődő országok növekvő kibocsátása egyre gyorsuló ütemben növeli a koromrészecskék légköri mennyiségét.

A globális kibocsátás növekedésével a koromrészecskék légköri koncentrációja nem egyenes arányban változott. Kezdetben a korom kifejezetten helyi légszennyező anyagnak számított: a széntüzelésből származó koromrészecskék ugyanis nagyobb méretük miatt a források közelében kiülepedtek a légkörből. Az 1950-es években a súlyos londoni szmoghelyzetek idején a korom koncentrációja el-



2. ábra • A globális koromkibocsátás forrástípusok szerinti megoszlása (Lamarque et al., 2007 nyomán)



3. ábra • A koromrészecskék éves globális kibocsátása 1850-től napjainkig (Bond et al., 2007 nyomán)

érte a  $60 \mu\text{g m}^{-3}$  értéket. A hatékony levegőtisztaság-védelmi intézkedéseknek és technológiáknak köszönhetően a fejlett országokban ez az érték napjainkra  $1\text{--}2 \mu\text{g m}^{-3}$ -re csökkent. Kínában azonban ismét egyre gyakrabban fordul elő  $15 \mu\text{g m}^{-3}$  feletti mért koromkoncentráció. A trópusi területeken a biomassza égetéséből, valamint mérsékelt égövön a hatalmas kiterjedésű erdőtüzekből származó koromrészecskék nagy magasságokba és több ezer kilométeres távolságra is eljuthatnak. Kijelenthető, hogy a globális koromkibocsátás növekedésével és a források arányainak eltolódásával nem elsősorban a városi koromkoncentrációk növekedtek, hanem egyre nagyobb kiterjedésű földrajzi régiókban fordul elő inkább a korábban csak a városokra jellemző nagy koromszennyezettség. Annak ellenére, hogy a kibocsátás legnagyobb része a felszín közelében történik, a korom ma már globális levegőszennyező: a felső troposzférában  $10\text{--}20$ , az Északi-sarkvidéken nyáron (nem az arktiszi szmog idején)  $40\text{--}100$ , az Anktartison pedig  $2\text{--}4 \text{ ng m}^{-3}$  koncentrációja mérhető (Gelencsér, 2004). A kis tömegkoncentrációk félvezetőek, az éghajlatmódosító hatás szem-

pontjából az ezeken a távoli területeken jelen lévő koromrészecskéknek összehasonlíthatanul nagyobb a hatékonyságuk, mint a felszínközeli szennyezett levegőben található részecskéknek.

#### *A koromrészecskék egészségkárosító hatásai*

Jól ismert és tanulmányok százaival alátámasztott tény, hogy a  $2,5 \mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű aeroszolrészecskék rendszeres belélegzése esetenként súlyos egészségkárosodást okozhat. Tekintettel arra, hogy a koromrészecskék is ebbe a mérettartományba tartoznak, sőt jellemzően a legkisebb, a tüdőhólyagokig lejutó részecskék közé, okkal feltételezhető, hogy a korom szervezetre gyakorolt hatásai is hasonlóak. Annál is inkább, mert a korom felületéhez rákeltő vagy toxikus vegyületek, például többgyűrűs aromás szénhidrogének, nehézfémek kötődnek. Bizonyítható a szív- és érrendszeri megbetegedések előfordulási gyakoriságának növekedése nagyobb részecsk koncentrációnál (Anenberg et al., 2011). Állatokon elvégzett toxikológiai vizsgálatok megerősítették, hogy a korom belélegzése közvetlen hatással van a szívizom működésé-

re, valamint az oxidatív stresszválaszra. Meglepő módon jóval kevesebb bizonyíték létezik a korom és a légúti megbetegedések közötti kapcsolatra. Nagy koromkoncentrációnak kitett újszülöttek esetében igazolható az asztma gyakoriságának jelentős növekedése, illetve asztmás gyermekeknél a légúti gyulladások gyakoribb előfordulása. Úgy becsülhető, hogy csak a légköri koromrészecskék évente mintegy 300 ezer ember idő előtti halálát okozzák.

Ennél is súlyosabb problémát jelent a szilárd biomassza (fa, szárított trágya, hulladék) elégetése sütés-főzés céljából rosszul szellőző, zárt helyiségekben. Bármilyen meglepő, ez a Föld népességének mintegy felét érinti, közülük legsúlyosabban a nőket és a gyermekeket. A kialakuló koromkoncentrációk közel százszor (!) nagyobbak, mint szennyezett városi levegőben. A következmények sem maradnak el, gyermekeknél a tüdőgyulladás, nőknél a COPD<sup>1</sup> a leggyakoribb betegség típus. Csak a beltéri koromszennyezéshez évente további 600 ezer ember idő előtti elhalálozása köthető, hatodik vezető halálókként (Smith et al., 2004). A koromrészecskék tehát évente összesen közel annyi ember haláláért tehető felelőssé, mint amennyiért a közúti balesetek.

#### *A koromrészecskék éghajlati hatásai*

Mivel a koromrészecskék mérete azonos a Napból érkező sugárzás maximális intenzitású hullámhosszával (500 nm=0,5 μm), ez a fénnel való kölcsönhatásukat, az elnyelést különösen nagy hatékonyságúvá teszi. Az is gyakran előfordul, hogy a koromrészecskék felületét a légkörben kondenzálódó anyag (például ammónium-szulfát vagy víz) vonja

be, megváltoztatva méretüket és tulajdonságaikat (*t.l.c ábra*). A koromrészecskék fényelnyelő képessége például bevonat hatására akár 30–100%-kal is megnőhet.

Tömegegységre vetítve a korom energiaelnyelő képessége közel egymilliószer nagyobb, mint a szén-dioxidé. Azaz a légkört melegítő hatás szempontjából adott pillanatban – legalábbis nappal – 1 gramm korom 1 tonna szén-dioxiddal egyenértékű. A legfontosabb különbség, hogy míg a koromrészecskék közvetlenül a Napból érkező (rövidhullámú) sugárzást nyelik el annak teljes spektrumában, addig a szén-dioxid (és a többi üvegházhatású gáz) a felszín által kibocsátott infravörös sugárzást kizárólag bizonyos tartományokban (az ún. *elnyelési sávokban*), egymással versengve. A felhőzet vagy hó- és jégfelszín fölé került korom különösen hatékony, mert nemcsak a Napból érkező, hanem a felszínről vagy a felhőkről visszavert sugárzást is elnyeli (ami egyébként a világűrbe jutna vissza). Ez a többletenergia hővé alakul és a légkör melegítésére fordítódik.

Az éghajlati kényszer fogalma azt fejezi ki, hogyan módosítja egy adott légköri alkotó az ipari forradalom előtti időszakhoz képest megnövekedett mennyisége a be- és kilépő sugárzás energiamérlegét. Az éghajlati kényszer előjelesen, egységnyi területű légoszlop-ra szokás megadni, teljesítményegységben ( $W m^{-2}$ ). Más szavakkal ez azt fejezi ki, hogy mennyivel növekedett meg az adott alkotó többlet koncentrációjának köszönhetően az alsó légkörben tárolt hőenergia mennyisége (azaz lényegében a hőmérséklettel arányos mennyiség).

Annak ellenére, hogy a korom döntően regionális levegőszennyező, a közvetlen nap-sugárzás elnyelésére számított globális éghajlati kényszerének becsült legvalószínűbb ér-

<sup>1</sup> COPD – chronic obstructive pulmonary disease (krónikus obstruktív tüdőbetegség)

téke  $+0,9 \text{ W m}^{-2}$  (bizonytalansági tartomány  $+0,4 \dots +1,2 \text{ W m}^{-2}$ , Ramanathan–Carmichael, 2008). Ez azzal egyenértékű, mintha az emberiség jelenlegi teljes energiatermelő kapacitásának harmincszorosával fűtené a légkört! Más mértékkel, minden egyes gramm (!) koromrészecske rövid tartózkodási ideje alatt a légkörben  $1,15 \pm 0,53 \text{ GJ}$  hőenergiát „termel” (ez kb. egy átlagos magyar háztartás egyheti (!) energiaszükségletének felel meg). Kár, hogy ez a jelenség a Földön az üvegházhatású gázok növekvő koncentrációja mellett módfelett nem kívánatos! Tekintettel arra, hogy napjainkban a légkörben jelen lévő korom szinte teljes mennyisége a globális emberi tevékenység „mellékterméke”, és ez a korom a légkör többi alkotójától eltérően a Napból érkező sugárzást közvetlenül elnyeli, kevés terük marad azoknak az ellenérveknek, amelyek ezért a hatalmas energiátöbbletért természeti folyamatokat próbálnának felelőssé tenni.

Még aggasztóbb a helyzet, ha figyelembe vesszük, hogy a korom éghajlati hatása az üvegházhatású gázokkal szemben nem egyenletesen jelentkezik a Föld felszínén: legnagyobb mértékben erősen szennyezett hatalmas régiókban (például Ázsiában), illetve a legérzékenyebb, hóval és jéggel borított területeken (például az Arktiszon) érvényesül. A globális átlag ezen regionális extrém hatásokat elfedi. Nagymértékű és hosszantartó levegőszennyezés esetén a koromrészecskék légköri sugárzáselnyelése számottevően csökkenti a felszínre jutó napsugárzás intenzitását. Ez az egyébként az 1960-as és 80-as évek között globálisan is kimutatható jelenség a „globális elhomályosodás” (global dimming) néven vált ismertté. Napjainkban ez jelenség Délkelet- és Dél-Ázsiában jelentkezik a legsúlyosabb formában, és az ezt előidéző levegőszennyezés a szakmában új elnevezést is kapott

(Atmospheric Brown Clouds–ABC, magyar fordítása talán a szuperszmog lehetne). Ez a fogalom kontinentális léptékű és hosszantartó, súlyos szmoghelyzetet takar, amelyben a koromrészecskék szerepe kiemelkedő (a nagyvárosi szmogban mért arány három–négy-szerese). A felszínre elérő napsugárzás intenzitása ilyenkor kontinensnyi kiterjedésű területeken átlagosan 5–10%-kal is csökken (Ramanathan et al., 2007). A felszín hűlése és az alsó légkör jelentős melegekedése miatt a felszínközeli levegő függőleges irányú átkeveredése gyengül, ami a szuperszmozg-helyzetet egyidejűleg súlyosítja és tartósítja.

A koromrészecskék légköri sugárzáselnyelése nemcsak légkörben maradó energia mennyiségét befolyásolja, hanem közvetve a felhőképződésre is hatással van – szemben például az üvegházhatású gázokkal. Szennyezett régiókban a korom által elnyelt többletenergia növeli az alsó légkör stabilitását, csökkenti a feláramlás mértékét és a relatív páratartalmat, ezáltal gátolja a felhők kialakulását (Ackerman et al., 2000). A felhőkbe keveredő korommal szennyezett levegő a felhők elpárolgását okozhatja (ún. „felhőpörkölés”, cloud burn-off). Emellett a szilárd koromrészecskékről kimutatták, hogy alakjuknál fogva kiváló jégképző magvak, azaz bizonyos felhőtípusoknál elősegítetik a csapadékképződést. Globális léptékben a korom felhőkre gyakorolt hatásai révén a sugárzási mérleg eredő változása nagy valószínűséggel pozitív (tartomány  $-0,25 \dots +0,50 \text{ W m}^{-2}$ ).

A koromrészecskék egyedülállóak a levegő összetevői között azon képességük miatt, hogy a légkörből kiülepedve is képesek befolyásolni a légkör energiamérlegét! A hó- vagy jégfelszínre ülepedő korom miatt ugyanis a felszín kevésbé veri vissza a napsugárzást, ezáltal több energiát nyel el, és közvetlenül me-

legszik (Hansen – Nazarenko, 2004). Hétköznapi megfigyelés, hogy városokban a piszkos hó jóval gyorsabban olvad, mint a friss és tiszta hó. Ez a hatás leginkább tavasszal érvényesül, amikor még van hótakaró, és jelentős intenzitásúvá válik a napsugárzás. Sajnos éppen ebben az időszakban alakul ki az Arktisz fölött rendszeresen hosszantartó és a városi levegőszennyezés mértékét közelítő hatalmas kiterjedésű szmog (az ún. *Arctic haze*), ami akadályozza a felszín hőleadását, ezáltal meggyorsítja az olvadást. Ez a hatás tehát pozitív, bár globális átlagban első pillantásra nem tűnik számottevőnek (+0,05...+0,16 W m<sup>-2</sup>). A globális átlag itt különösen félrevezető, mert ez a Föld felszínéhez képest viszonylag kis területen érvényesül. Az Arktiszon és a Tibeti-fennsíkon a hófelszín napsugárzás-visszaverő képességének (ún. *albedójának*) csökkenéséből eredő lokális éves átlag +1,5 W m<sup>-2</sup>, de tavasszal néhány helyen akár +20 W m<sup>-2</sup> (!) is lehet (Flanner et al., 2007). Mivel ez az érték a felszín által ténylegesen elnyelt sugárzási teljesítményre vonatkozik, ennek közvetlen következménye a felszíni átlaghőmérséklet +0,6 °C-os növekedése. Ezen adatok fényében már korántsem meglepő, hogy koromrészecskékkel erősebben szennyezett területeken a hó gyorsabban olvad (évente plusz 2–50 cm vastagságú hóréteg olvad el csak a korom miatt), illetve a hóborítottság időszakának hossza akár 18–35 nappal is lerövidülhet. Egyedül a koromszennyezés miatt az Arktisz átlagos felszíni hőmérséklete 1890 óta +0,5...+1,4 °C-ot emelkedett (Shindell – Faluvegi, 2009). Mivel pedig a jég olvadásával a múltban kiülepedett koromrészecskék a fennmaradó jégfelszínen feldúsulnak, a XX. század folyamán kibocsátott és felszínre került korom újból hatást fejt ki a felszín által elnyelt sugárzási energia mennyiségére.

### *Koromrészecskék kontra üvegházhatású gázok*

Az üvegházhatású gázokkal való összehasonlításban a koromnak egyetlen „hátránya” van, mégpedig az, hogy gyorsan kikerül a légkörből. Jellemző légköri tartózkodási ideje egy-két hét, szemben az üvegházhatású gázok több évtizedes, sőt évszázados tartózkodási idejével. A koromrészecskék rendkívüli sugárzáselnyelő képességét azonban még a rövid tartózkodási idő sem képes ellensúlyozni. A korom a szén-dioxidra vonatkoztatott fajlagos melegítő potenciálja (az ún. *Global Warming Potential* – GWP) még húszéves időskálán is 4470, sőt száz évre vetítve is legalább 330 (Jacobson, 2002). Ez másképp azt jelenti, hogy 1 kg koromrészecske egy-két hét alatt is 4470-szer, illetve 330-szor több sugárzási energiát képes a légkörben hővé alakítani, mint amennyit 1 kg légkörbe került szén-dioxid összesen húsz, illetve száz esztendő alatt. Ennek fényében nem meglepő, hogy a legújabb – a koromrészecskék a sugárzásra, a felhőzetre és a jégfelszínre gyakorolt hatását is figyelembe vevő, műholdas megfigyelési adatokkal alátámasztott – modellszámítások eredményei alapján a korom a globális légköri energiaelnyelés szempontjából a szén-dioxid után a második helyre lépett elő, megelőzve a metánt, a dinitrogén-oxidot, az ózont és a többi üvegházhatású gázt (EPA, 2012). Meg kell jegyezni, hogy ezek a legújabb kutatási eredmények még nem kerültek be a tudományos kánonba: az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi testület (IPCC) 2013. évi jelentésében a korom éghajlati kényszer legalacsonyabb értékeként még „csak” a politikailag korrekt +0,6 W m<sup>-2</sup> szerepel. Nem szabad azt sem elfelejteni, hogy a korom által elnyelt energiamennyiség közvetlenül a napsugárzásból, míg az üvegházhatású gázok által elnyelt sugárzá-

si energia a felszínről kibocsátott hosszúhullámú sugárzásból származik.

### Összefoglalás

A korom – eltérően az üvegházhatású gázoktól – súlyos egészségkárosító hatással is rendelkező elsődleges levegőszennyező anyag. Kizárólag égés során keletkezik, így szinte teljes légköri mennyisége emberi eredetű. A levegő egyetlen olyan összetevője, amely rendkívüli hatékonysággal képes elnyelni a napsugárzást. Az északi félgömb hóval borított területei fölött elnyelése különösen hatékony, nagymértékben hozzájárul a hó és jég olvadásához, az Északi-sarkvidék átlaghőmérsékletének gyors emelkedéséhez. Regionális elterjedése ellenére a Föld-légkör rendszer globális energiamérlegének megváltoztatásában napjainkra a szén-dioxid mögött a második legfontosabb tényezővé lépett elő. Kibocsátá-

sának csökkentése tehát egyszerre jelenthetné egészségkárosító és légkört melegítő hatásainak *azonnali* mérséklését. A globális kibocsátás trendjéből ítélve e cél megvalósításától még messze vagyunk, késlekedésünk következményei viszont egyelőre beláthatatlanok.

A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú *Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program* című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

*Kulcsszavak: koromrészecskék, levegőszennyezés, biomasz-égetés, egészségkárosító hatás, napsugárzás elnyelése, melegítő hatás, éghajlat-módosítás*

### IRODALOM

- Ackerman, Andrew S. – Toon, O. B. – Stevens, D. E. et al. (2000): Reduction of Tropical Cloudiness by Soot. *Science*. 288, 1042–1047. DOI:10.1126/science.288.5468.1042 • <http://cires.colorado.edu/science/groups/pielke/classes/atoc7500/Ackerman.pdf>
- Andreae, Meinrat O. – Gelencsér András (2006): Black Carbon or Brown Carbon? The Nature of Light-Absorbing Carbonaceous Aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6, 3131–3148. DOI:10.5194/acp-6-3131-2006 • <http://tinyurl.com/pk5ul9s>
- Anenberg, Susan Caspar – Talgo, K. – Arunachalam, S. et al. (2011): Impacts of Global, Regional, and Sectoral Black Carbon Emission Reductions on Surface Air Quality and Human Mortality. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 11, 7253–7267. DOI:10.5194/acp-11-7253-2011 • <http://www.atmos-chem-phys.net/11/7253/2011/acp-11-7253-2011.pdf>
- Bond, Tami C. – Bhardwaj, E. – Dong, R. et al. (2007): Historical Emissions of Black and Organic Carbon Aerosol from Energy-related Combustion. *Global Biogeochemical Cycles*. 21, Gb2018, 1850–2000. DOI: 10.1029/2006GB002840, 2007 • <http://tinyurl.hu/19qo/>
- Bond, Tami C. – Doherty, S. J. – Fahey, D. W. et al. (2013): Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment. *Journal of Geophysical Research*. 118, 11, 5380–5552. DOI: 10.1002/jgrd.50171, 2013 • <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50171/pdf>
- Epa (2012): *Report to Congress on Black Carbon*. Epa 450/R-12-001 • <http://www.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/Cover.pdf>
- Flanner, Mark G. – Zender, C. S. – Randerson, J. T. et al. (2007): Present-day Climate Forcing and Response from Black Carbon in Snow. *Journal of Geophysical Research*, 112, D11, DOI: 10.1029/2006jd008003 • <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JD008003/pdf>
- Gelencsér András (2004): *Carbonaceous Aerosol*. Springer, Dordrecht • <http://books.google.hu/books?id=6UqNc1hDDnoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&cf=false>
- Hansen, James – Nazarenko, Larissa (2004): Soot Climate Forcing via Snow and Ice Albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 101, 423–428. DOI: 10.1073/pnas.2237157100 • <http://www.pnas.org/content/101/2/423.full>



- Jacobson, Mark Z. (2002): Control of Fossil-Fuel Particulate Black Carbon and Organic Matter, Possibly the Most Effective Method of Slowing Global Warming. *Journal of Geophysical Research*. 107, 4410, DOI: 10.1029/2001JD001376 • <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JD001376/pdf>
- Lamarque, Jean-François – Bond, T. C. – Eyring, V. et al. (2010): Historical (1850–2000) Gridded Anthropogenic and Biomass Burning Emissions of Reactive Gases and Aerosols: Methodology and Application. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10, 7017–7039. DOI:10.5194/acp-10-7017-2010 • <http://www.atmoschem-phys.net/10/7017/2010/acp-10-7017-2010.pdf>
- Ramanathan, Veerabhadran – Carmichael, Gregory (2008): Global and Regional Climate Changes Due to Black Carbon. *Nature Geoscience*. 1, 221–227. DOI:10.1038/ngeo156 • <http://climatechange-asiapac.com/resource/global-and-regional-climate-changes-due-black-carbon>
- Ramanathan, Veerabhadran – Li, F. – Ramana, M. V. et al. (2007): Atmospheric Brown Clouds: Hemispherical and Regional Variations in Long-range Transport, Absorption, and Radiative Forcing. *Journal of Geophysical Research*. 112, D22821, DOI: 10.1029/2006jd008124 • <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JD008124/pdf>
- Shindell, Drew – Faluvegi, Greg (2009): Climate Response to Regional Radiative Forcing during the Twentieth Century. *Nature Geoscience*. 2, 4, 294–300, DOI: 10.1038/Ngeo473
- Smith, Kirk R. – Mehta, S. – Maeusezahl-Feuz, M. (2004): Indoor Air Pollution from Household Use of Solid Fuels. In: Ezzati, Majid – Lopez, A. D. – Rodgers, A. – Murray, C. J. L. (eds.): *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Due to Selected Major Risk Factors*. Vol 2. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1435–1493. • [http://www.who.int/healthinfo/global\\_burden\\_disease/cra/en/](http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/cra/en/)

