

FÓKUSZBAN A LEVEGŐMINŐSÉG

Kertész Zsófia¹, Haszpra László^{1,2}, Molnár Mihály¹

¹ HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

² HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

Kertész Zsófia fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Kutatási területe: az ionnyaláb-analitika és multidiszciplináris alkalmazásai, valamint légköri aeroszolkutatás.

Haszpra László meteorológus-levegőkémikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója, a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet munkatársa. Kutatási területe: az üvegházhatású gázok légköri forgalma.

Molnár Mihály az ATOMKI Radiokarbon és Szénciklus Kutatási csoport vezetője, szakterülete a ¹⁴C-izotópos mérésekre alapozott környezetkutatás és kormeghatározás, különös tekintettel a légköri széntartalmú gázok forrásainak és változásainak elemzésére.

A Föld légkörében a fő összetevők mellett jelen vannak nyomnyi mennyiségben egyéb gázok, illetve különböző folyadék és szilárd halmazállapotú részecskék is.

A légkörben lebegő cseppfolyós és szilárd részecskéket nevezzük légköri aeroszolrészecskéknek; ezeknek a hétköznapi használatban elterjedt elnevezése a szálló por. Bár a légköri aeroszolrészecskék a levegő tömegének csak egy töredékét (~százmilliomod-egymilliárdod részét) teszik ki, napjainkban mégis a figyelem középpontjába kerültek. Ennek egyik oka az, hogy az aeroszolrészecskék közvetett és közvetlen módon hatással vannak a Föld sugárzási egyensúlyára. A napsugárzás szórásában, elnyelésében, valamint a felhőképződésben játszott szerepük jelentős a klíma alakításában. Másrészt a légköri aeroszolrészecske-szennyezés (particulate matter, PM) jelenti az egyik legnagyobb környezeti egészségügyi kockázatot a világban. A legfrissebb adatok szerint az EU lakosságának 97% -a van kitéve az Egészségügyi Világszervezet legutóbbi iránymutatásait meghaladó PM_{2.5}-koncentrációnak (2,5 µm-nél kisebb átmérőjű részecskék).

A légkörben számos olyan nyomanyag található, amely bár nem jelent közvetlen egészségügyi kockázatot, megnövekedett mennyisége jelentős környezetalakítási hatással bír, közvetetten ronthatja életminőségünket. Ezeket a nyomanyagokat is légszennyező anyagoknak tekinthetjük, ha egy adott helyen és időben koncentrációjuk nagyobb, mint amennyi az emberi kibocsátás nélkül lenne. Ebbe a körbe tartoznak az úgynevezett üvegházhatású gázok, melyek sajátos molekulaszervezetük következtében részben elnyelik a Föld-légkör rendszer hőmérsékleti kisugárzását, és ezzel befolyásolják a bolygó éghajlatát. Az 1950-es évek végén merült fel komoly formában, hogy az emberiség által a fosszilis tüzelőanyagok elégetése révén a légkörbe bocsátott szén-dioxid már egy évszázadon belül is súlyos gazdasági, társadalmi és politikai következményekkel járó drasztikus éghajlatváltozást okozhat.

Az itt leírtak alapján nyilvánvaló, hogy az üvegházhatású gázok, valamint a légköri aeroszol tudományos igényű elemzése és monitorozása nemcsak a kutatóknak fontos, hanem lényeges információval szolgál a kormányok, környezetvédelmi hatóságok, az egészségügy és a társadalom számára is, valamint megalapozza a hatékony kibocsátáscsökkentési stratégiákat.

Az ATOMKI-ban mind a légköri aeroszol, mind az üvegházhatású gázok kutatása több évtizedes múltra tekint vissza.

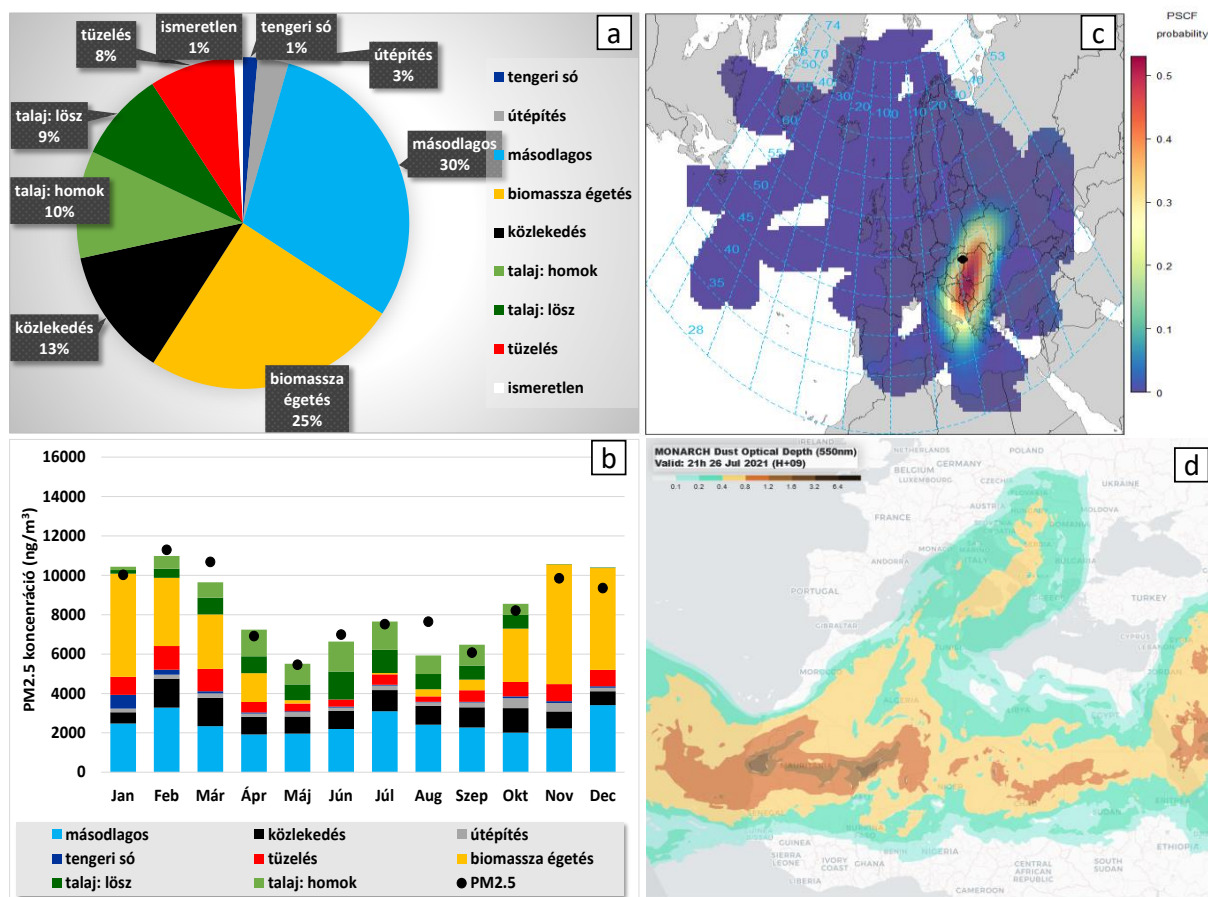
Szemelvények a légköri aeroszolkutatásból

Légköri aeroszolkutatást három évtizede végzünk, amelynek alapja egyrészt a minták elemösszetételének meghatározása ionnyaláb-analitikai módszerekkel, másrészt a minták szénizotóp-vizsgálata gyorsító és stabilizotóp-tömegspektrométerekkel. Ez idő alatt létrehoztunk egy Európában is egyedülálló, folyamatosan bővülő adatbázist, amely megalapozta ezt a kutatási területet. Az adatbázis többek között tartalmazza a PM_{2.5} fő-, mellék- és nyomnyi összetevői mellett a fosszilis és nem fosszilis eredetű szénkomponenst egyaránt. Kutatásaink egyik fő iránya a városi aeroszolszennyezés monitorozása, fizikai és kémiai jellemzése, a szennyezés forrásainak azonosítása modern mintavételi, analitikai és statisztikai módszerek és terjedési modellek segítségével. Az alábbiakban két példán keresztül mutatjuk be a legújabb kutatási eredményeinket.

A légköri aeroszolszennyezés alakulása a COVID-19-válság előtt és alatt Debrecenben

A COVID-19-világjárvány miatti lezárások és korlátozások egyedülálló lehetőséget teremtettek a városi levegőminőség változásának tanulmányozására egy olyan időszakban, amikor az antropogén eredetű kibocsátás jelentősen csökkent. Kihasnálva ezt az alkalmat, vizsgáltuk az aeroszolszennyezés változását a levegőminőség többi paraméterével együtt Debrecen városában 2018 és 2022 között. Meghatároztuk a légköri aeroszol koncentrációját, összetételét és forrásait négy, különböző szintű korlátozásokkal járó időszakra, két átmeneti és két lazítási időszakra 2020–22-ben, és az eredményeket összehasonlítottuk a 2018–19-es megfelelő bázisértékekkel.

A következő szennyezőforrásokat azonosítottuk: talaj, tüzelés, biomasszaégetés, biogén (növényi eredetű) kibocsátás, közlekedés, másodlagos szulfát, tengeri só, építési munkálatok és útépités. A fűtési időszakban a biomassza égetése és a tüzelés volt a fő szennyező, míg nyáron a talaj mellett a másodlagos aeroszolok és a biogén kibocsátás adta a legnagyobb hozzájárulást (1. ábra).



1. ábra. A PM_{2.5} források relatív járuléka 2020–21-ben (a). A PM_{2.5} források járuléka havi bontásban 2020–21-ben (b). A Debrecenben mért szulfátaeroszol forrássterületei 2018–2021-ben (c), a saharaipor-epizód 2021. július 26-án (d)

2020 márciusától a világjárvány miatti korlátozások erősen befolyásolták valamennyi légszennyező koncentrációját, a két év átlagában 20–25%-os csökkenés volt kimutatható. A durva frakcióban (2,5 és 10 μm közötti átmérőjű részecskék) a közlekedés és a talaj hozzájárulása csökkent a legnagyobb mértékben, valamint kimutatható volt a város körüli mezőgazdasági tevékenység jelentős csökkenése is. PM_{2.5} esetében az energiatermeléssel kapcsolatos források csökkentek a legnagyobb mértékben. Ezzel szemben 2020 és 2021 tavaszán a kényszerű otthonmaradás és a hidegebb időjárás a háztartási fűtésből származó biomasszaégetés jelentős növekedéséhez vezetett. Jelentős időszakos helyi szennyező források voltak még az építkezések és az útépitések. A város határában megvalósuló nagyszabású ipari telephelyfejlesztés hatása 10 km-es távolságból is érzékelhető volt.

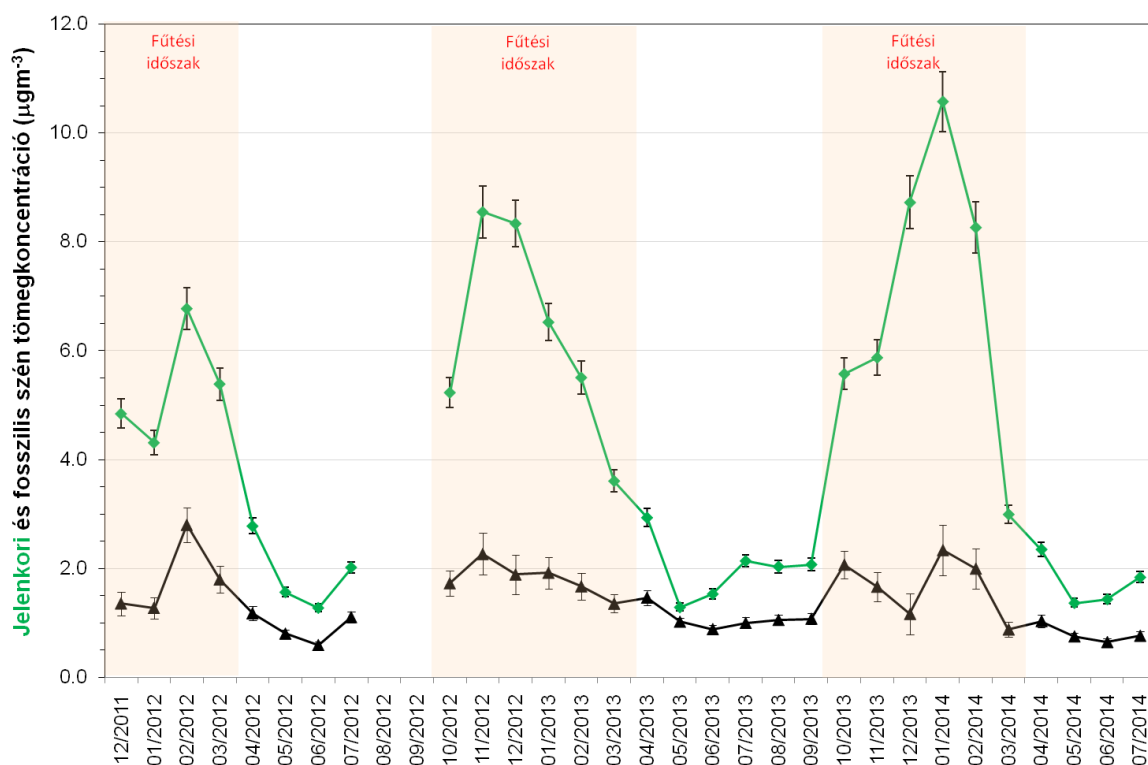
Debrecenben az aeroszolszennyezés nagy része regionális és nagy távolságú transzportból származik. A másodlagos szulfátaeroszol fő forrásvidékei a nyugat-balkáni országok és Délnyugat-Románia voltak (1. ábra), így a kibocsátás változása ezekben az országokban erősen befolyásolta a légszennyezettségi szintet Debrecenben. A helyi meteorológiai paraméterek, a légtömegek eredete és a nagy távolságú transzportfolyamatok, többek között az egyre gyakoribb saharaipor-epizódok szintén jelentős hatással voltak az aeroszolszennyezettség alakulására.

A széntartalmú aeroszol forrásai

A városi aeroszolrészecskék egyik fő összetevője a szén, amely főleg korom és szerves vegyületek formájában van jelen. A széntartalmú részecskék forrásai a biogén kibocsátás, a fosszilis tüzelőanyagok égetése, valamint a biomasszaégetés. A fosszilis és jelenkori szén tartalmazó összetevőket a szén 14-es tömegszámú izotópjának (radiokarbon) mérésével lehet elkülöníteni egymástól. A stabil szénizotópok aránya további információval szolgál az aeroszolrészecskék eredetéről.

Debrecenben 2011 óta folyamatosan gyűjtünk olyan PM2.5-mintákat, amelyek alkalmasak a széntartalmú aeroszol vizsgálatára. Meghatározzuk a PM2.5-minták teljes szén-, elemiszén- (korom – EC), szervesszén- (OC) koncentrációját, valamint a ¹⁴C és a stabil szénizotópok arányát. Az első 4 év adatainak feldolgozása alapján megállapítottuk, hogy minden mért paraméter erős szezonális ingadozást mutat, a fűtési időszakban 2–3-szor nagyobb koncentrációkkal a nyári hónapokhoz (vegetációs időszak) képest.

A fűtési időszakban mért viszonylag nagy másodlagos szerveaeroszol-koncentráció, valamint 6,9-es OC/EC arány arra utal, hogy az aeroszolrészecskék különböző égetési folyamatokból származnak. A jelenkori szén aránya a fosszilis szénhez képest pedig azt mutatta, hogy a fa és a biomassza tüzelőanyagok égetése dominált a szénrel vagy olajjal szemben (2. ábra). A stabilizotóp-vizsgálat kimutatta, hogy a fatüzeléshez főleg fehér akácot, tölgyet és bükkfát használtak a debreceni lakosok. Az őszi időszakokban kimutatható volt a mezőgazdasághulladék-égetés hatása a város levegőjében.



2. ábra. A jelenkori és a fosszilis szén tömegkoncentrációja a PM2.5-mintákban Debrecenben 2011–2014-ben

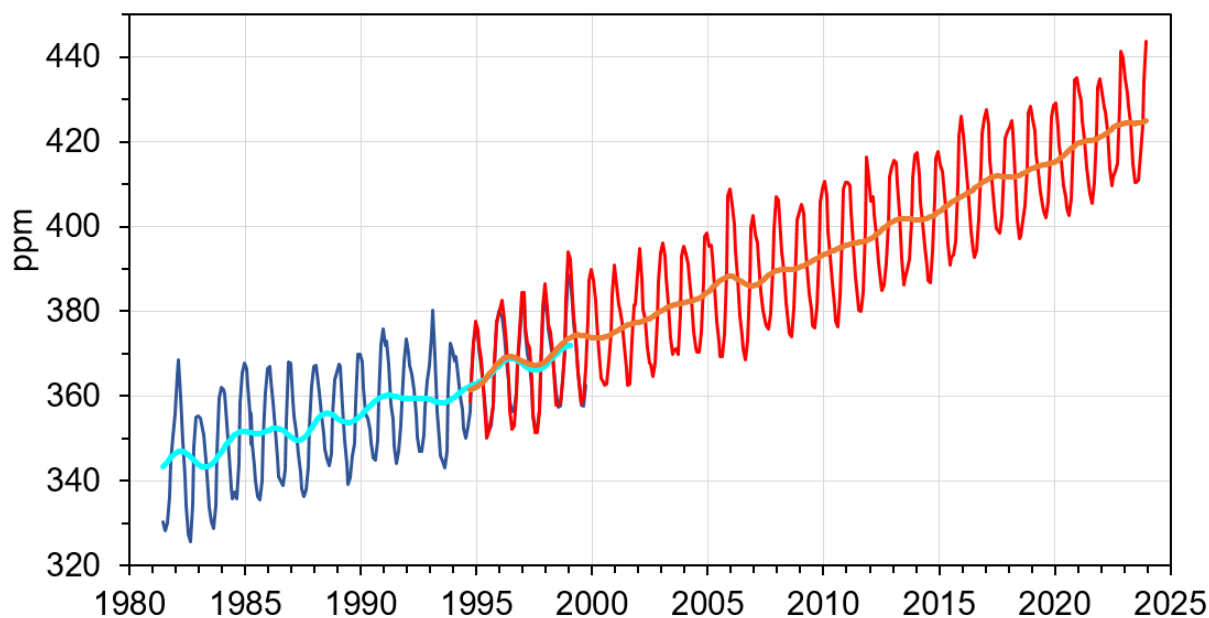
Az üvegházhatású gázok kutatása

A célzott légköri üvegházhatásúgáz-kutatásokba az ATOMKI 2008-ban kapcsolódott be egy nagy pontosságú városi (Debrecen) légköri monitoring rendszer fejlesztésével, valamint több hazai helyszínen (Debrecenben, Dunaföldváron és a hegyhátsági háttérállomáson) elindított folyamatos szénizotópos megfigyelésekkel. A légköri CO₂ mennyiségének és radiokarbon-tartalmának együttes mérésével lehetőség nyílik a fosszilis eredetű (¹⁴C-mentes) emberi hozzájárulás pontosabb mennyiségi becslésére. Ezzel eloszthatók a kételyek az emberi hozzájárulás jelentőségét és mértékét illetően. Műszaki fejlesztéseket végeztünk a üvegházhatású gázok megbízható méréséhez szükséges előkészítő berendezéseken, valamint szénizotópos mérési technikát fejlesztünk a CO₂ mellett a légköri metán elemzésére is, mely nagyban hozzájárulhat a nagyon összetett forrásszerkezet elemeinek és szerepének jobb megértéséhez.

Magyarországon európai viszonylatban az elsők között indult meg a légkör szén-dioxid-mennyiségének folyamatos mérése. Az Országos Meteorológiai Szolgálat által 1981-től a Kiskunságban lévő K-pusztán mérőállomáson megkezdett, majd 1993-tól a kibővített mérésprogramú hegyhátsági mérőállomáson folytatott méréseket 2020-tól az ATOMKI vette át. A mérőállomás a Meteorológiai Világszervezet globális légköri megfigyelési programjának (Global Atmosphere Watch), az amerikai Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatal (US National Oceanic and Atmospheric Administration) globális

mérőhálózatának és a páneurópai üvegházgáz-megfigyelő rendszernek (Integrated Carbon Observation System, ICOS ERIC) is tagja.

1982-ben, a mérések első teljes évében a lakott területektől, forgalmasabb utaktól távoli magyarországi mérőállomáson a szén-dioxid évi átlagos légköri koncentrációja 346 ppm (ppm = milliomod térfogatrészt) volt, míg ez az érték 2023-ra 424 ppm-re nőtt, azaz több mint 22%-kal emelkedett (3. ábra). A szén-dioxid hosszú légköri tartózkodási idejét és így a légkörben való egyenletes elkeveredését, globális hatását jól jelzi, hogy ezek az értékek mindössze 1%-kal magasabbak, mint a minden antropogén forrástól távoli óceáni szigeteken. Ismereteink szerint ezzel a jelenlegi légköri szén-dioxid-koncentráció már nagy valószínűséggel magasabb, mint bármikor az elmúlt bő 10 millió évben volt, ami az éghajlat várható alakulása szempontjából több mint aggasztó.



3. ábra. A légköri CO₂ koncentrációjának alakulása Magyarországon a K-pusztán (kék) és Hegyhátsálon (piros) mért adatok alapján

Nem biztató a kép az emberi tevékenység által a légkörbe juttatott második legfontosabb üvegházhatású gáz, a metán esetében sem. Ennek mennyisége a levegőben a 2000-es évek elejéig nagyjából összhangban emelkedett az emberi kibocsátás növekedésével, ezt követően azonban gyorsabb ütemre váltott. A metánnak jelentős természeti forrásai is vannak (mocsarak, lápos-vizenyős területek), amelyek kifejezetten érzékenyek az éghajlat alakulására. Az emberi hatások miatt változó éghajlat növeli a természetes források metánkibocsátását, ami ugyancsak hozzájárul a megindult éghajlatváltozás erősödéséhez a visszacsatolásokon keresztül. Fennáll a veszélye, hogy pusztán az emberi kibocsátás visszaszorításával már nem akadályozható meg a metánkoncentráció további emelkedése – az egy új egyensúlyi állapot eléréséig folytatódni fog, kihatva az éghajlat további alakulására.

Jelenleg az emberi eredetű üvegházhatású gázok kibocsátását statisztikai adatok alapján becsülik, ami részben a módszerek bizonytalansága, részben a forrásokra vonatkozó elégtelen ismereteink miatt nem feltétlenül adja meg a tényleges kibocsátást. Ha egy földrajzilag kiterjedt mérőhálózat állomásain ismerjük az egyes légköri anyagok koncentrációjának időbeli változásait és ismerjük a légköri áramlások aktuális alakulását is, akkor közvetlenül megbecsülhetjük, hogy mely területekről mekkora anyagmennyiség került a levegőbe. A tényleges kibocsátás pontosabb ismerete mind az éghajlatvédelmi intézkedések hatékonyságának, mind azok betartásának ellenőrzése szempontjából kulcskérdés. E célból indította az Európai Unió a Párizsi Megállapodásra is utaló Horizon Europe PARIS projektet (Process Attribution of Regional Emissions), melynek az ATOMKI is résztvevője. A kutató-fejlesztő munka során a partnerországokban, illetve Magyarországon végzett célzott üvegházgáz-mérésekből a légköri terjedési modellek felhasználásával országos kibocsátásleltár készül, mely a jövőbeni kibocsátáscsökkentési intézkedések alapját is adhatja.

Irodalom

1. Kertész Zsófia, et al.: Characterization of urban aerosol pollution before and during the COVID-19 crisis in a central-eastern European urban environment. *Atmospheric Environment*, 318 (2024) 120267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120267>
2. Major István, et al.: Source identification of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary. *Science of the Total Environment*, 782 (2021) 146520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>