

**HUN
REN**



MAK2026

XVII. Magyar Aeroszol Konferencia

2026. május 20-22.

Tiszafüred

ABSZTRAKT KÖTET

Köszöntő

A Szervező Bizottság nevében szeretettel és tisztelettel köszöntjük a XVII. Magyar Aeroszol Konferencia résztvevőit Tiszafüreden, 2026. május 20–22. között.

Nagy öröm számunkra, hogy 1992, 2002 és 2013 után ismét a debreceni Atommagkutató Intézet rendezheti meg a magyar aeroszolkutató közösség soron következő seregszemléjét.

A konferencia célja – ahogyan az előző rendezvényeké is – hogy átfogó szakmai fórumot biztosítson a hazai és nemzetközi aeroszoltudomány és -technológia legújabb kutatási eredményeinek, mérési módszereinek és alkalmazásainak bemutatására. Rendezvényünk egyben lehetőséget teremt a kutatók, szakemberek, hallgatók, ipari szereplők, hatósági szakértők és döntéshozók közötti szakmai párbeszédre, valamint elősegíti a nemzetközi kutatási trendek és a lehetséges közös kutatási irányok megvitatását. Kiemelt célunk továbbá az aeroszol-részecskék környezeti, egészségügyi, élettani és technológiai hatásainak mélyebb megértését előmozdító, multidiszciplináris együttműködések erősítése a hazai tudományos műhelyek, az ipar, a hatóságok és a döntéshozók között. A konferencia külön hangsúlyt fektet arra is, hogy teret adjon a fiatal kutatók szakmai bemutatkozásának és tudományos fejlődésének.

A MAK2026 programjának összeállításánál követtük az előző konferenciákon kialakult hagyományokat. Az aeroszolkutatás széles spektrumát lefedő 7 szekcióban összesen 37 előadás hangzik el, amelyet egy kerekasztal-beszélgetés egészít ki. Mindezek mellett igyekeztünk megfelelő időt biztosítani a kötetlen eszmecserékre, baráti beszélgetésekre és új szakmai kapcsolatok kialakítására is. Bízunk benne, hogy a Tisza-tó különleges természeti környezete és a közös programok egyaránt inspiráló légkört teremtenek majd.

Minden résztvevőnek eredményes és tartalmas munkát kívánunk, és reméljük, hogy a MAK2026 konferenciát szakmailag hasznosnak, tartalmasnak és eredményesnek találják majd, valamint örömmel találkoznak régi és új kollégáikkal, barátaikkal.

Kertész Zsófia

A MAK2026 Szervező Bizottsága nevében

RADIOCARBON AS A TRACER IN AEROSOLS AND THE ENVIRONMENT

A J Timothy Jull^{1,2}

¹ HUN-REN Institute for Nuclear Research
4026 Debrecen, Bem ter 18/c. Email: jull@atomki.hu

² Department of Geosciences, University of Arizona
Tucson, AZ 85721 USA.

Radiocarbon (¹⁴C) is produced in the upper atmosphere by the action of secondary cosmic rays on nitrogen. It is rapidly incorporated into the biosphere and is therefore an excellent tracer of carbon of biogenic origin. This means that aerosols of biogenic origin can be distinguished from aerosols originating from fossil carbon sources. We define the ¹⁴C content of any material as F, fraction of modern carbon, where:

$$F(^{14}\text{C}) = \left(\frac{{}^{14}\text{C}_{\text{sam}}}{{}^{12}\text{C}_{\text{std}}} \right) / \left(\frac{{}^{14}\text{C}_{\text{sam}}}{{}^{12}\text{C}_{\text{std}}} \right) \quad (1)$$

where ¹⁴C_{sam} is the atomic ratio of the sample relative to ¹⁴C_{std}, which is the normalized ¹⁴C standard, which has a value of $\sim 1.25 \times 10^{-12}$ ¹⁴C/¹²C. This is defined as “modern” or the pre-bomb ¹⁴C/¹²C, which can be absolutely defined as 0.95 x the value of the NIST SRM-4490A (oxalic 1) standard. Further, we can define $\Delta^{14}\text{C}$ as:

$$\Delta^{14}\text{C} = \left[\frac{\left(\frac{{}^{14}\text{C}}{\text{C}} \right)_{\text{samN}}}{\left(\frac{{}^{14}\text{C}}{\text{C}} \right)_{\text{abs}}} - 1 \right]. \quad (2)$$

Where the numerator is the measured ¹⁴C/¹²C ratio and the denominator is the value of the standard, as already defined.

For CO₂, we can then separate the fossil fuel component (Turnbull et al, 2009):

$$\text{CO}_{2\text{ff}} = \frac{\text{CO}_{2\text{bg}}(\Delta_{\text{obs}} - \Delta_{\text{bg}})}{\Delta_{\text{ff}} - \Delta_{\text{obs}}} - \frac{\text{CO}_{2\text{other}}(\Delta_{\text{other}} - \Delta_{\text{obs}})}{\Delta_{\text{ff}} - \Delta_{\text{obs}}}. \quad (3)$$

Where Δ_{ff} – fossil fuel component, obs – observed, bg – background value (if subtracted) and other components, if needed.

In the case of aerosols, a similar equation can be used. This allows us to separate different components based on their ¹⁴C composition. A common use of ¹⁴C in aerosol measurements is environmental monitoring. This is because we can identify fossil fuel components versus combustion of contemporary biogenic carbon (Szidat *et al.* 2004, Lim *et al.* 2022). Since plants fix carbon from the atmosphere every year, plants growing in one year will reflect the CO₂ in the atmosphere at that time. Naturally, for winter space heating using wood burning, the CO₂

and aerosols evolved with reflect an average of the growth period of the wood. This requires some assumptions about the age of the wood combusted, but 20-30 years is a typical value. This allows the determination of the relative contributions of fossil fuel and biogenic sources. Examples of these applications will be presented from Hungary and other locations.

References

Lim, S., Hwang, J., Lee, M., Czimczik, C. I., Xu, X. and Savarino, J. 2022. Robust evidence of ^{14}C , ^{13}C and ^{15}N analyses indicating fossil fuel sources for total carbon and ammonium in fine aerosols in Seoul megacity. *Environmental Science & Technology* 56: 6894-6904.

Szidat, S., Jenk, T.M., Gäggeler, H.W., Synal, H.A., Fisseha, R., Baltensperger, U., Kalberer, M., Samburova, V., Wacker, L., Saurer, M. Schwikowski, M. and Hajdas, I. 200r. Source apportionment of aerosols by ^{14}C measurements in different carbonaceous particle fractions. *Radiocarbon* 46(1): 475-484.

Turnbull, J., Rayner, P., Miller, J., Naegler, T., Ciasa, P. and Cozic, A. 2009.

On the use of $^{14}\text{CO}_2$ as a tracer for fossil fuel CO_2 : Quantifying uncertainties using an atmospheric transport model. *Journal of Geophysical Research* 114: D22302.

Acknowledgements

This work was supported in part by the European Union and the State of Hungary, co-financed by the European Regional Development Fund in the project GINOP-2.3.4-15-2020-00007 "INTERACT".

MULTIWAVELENGTH PHOTOACOUSTIC SPECTROSCOPY OF GASOLINE ENGINE AEROSOLS: FUEL EFFECTS AND COMPARISON WITH DIESEL PARTICULATE EMISSIONS

Abdul Rahman^{1,2,*}, Khawar Ashfaq¹, Jamshed Saeed¹, Haseeb Raza¹, Ajtai Tibor^{1,2}

¹ Department of Optics and Quantum Electronics, University of Szeged, Dóm Ter 9, Szeged, 6720, Hungary, * rahman.abdul@szte.hu

² HUN-REN-SZTE Research Group for Photoacoustic Monitoring of Environmental Processes, Dóm Ter 9, Szeged, 6720, Hungary

Introduction

Particulate matter (PM) emissions from internal combustion engines pose a major concern for air quality, climate, and human health. While diesel engines have long been associated with high black carbon (BC) emissions, modern gasoline direct injection (GDI) engines also produce significant amounts of nanoparticles. Characterizing the optical properties of these aerosols – particularly their wavelength-dependent light absorption – is essential for understanding their atmospheric impacts and for developing effective emission control strategies.

Photoacoustic spectroscopy (PAS) has been previously applied to measure soot from both diesel and gasoline vehicles. However, most earlier studies focused on single-wavelength BC detection, primarily at near-infrared wavelengths (Arnott et al., 2005). The present work goes beyond these earlier demonstrations by providing a comprehensive multi-wavelength characterization of gasoline engine aerosols, covering the UV–Vis–NIR range (355, 532, 1064 nm) and systematically investigating the volatility of different carbonaceous components using a thermodenuder for commercial gasoline (referred to as E95, a standard fuel with up to 5% ethanol) and a 20% biomass-derived ethanol blend (E20). The measurement campaign for the gasoline engine was conducted in Győr, Hungary, between 25 November and 3 December 2025. Seven engine operating points (from idle to full load) and three thermodenuder temperatures (50°C, 150°C, 300°C) were investigated. Diesel engine data were taken from peer-reviewed studies of modern Euro 5/6 diesel engines.

To our knowledge, this level of combined spectral and thermal analysis on a modern Euro 6 gasoline engine has not been reported before. This work presents a direct comparison of the comprehensive multi-wavelength (UV–Vis–NIR) photoacoustic characterization of particulate emissions from a modern Euro 6 gasoline engine (E95 fuel) and a diesel engine.

Experimental Approach for Gasoline Engine

The custom multiwavelength photoacoustic system (MuWaPAS) operated at 355, 532, and 1064 nm. A thermodenuder upstream enabled separation of volatile organic carbon (OC) and refractory BC absorption. A Euro 6 gasoline engine using commercial E95 fuel ($\leq 5\%$ ethanol) was tested at seven operating points (idle to full load). Figure 1 shows the setup. Diesel comparison data are from a Euro 4 common-rail diesel engine (Szabolcs et al., 2025). The schematics of the experimental setup are shown in Figure 1.

Results

Gasoline exhaust absorption increased sharply toward UV, indicating light-absorbing OC in addition to BC. Raising thermodenuder temperature from 50 °C to 300 °C reduced UV absorption, confirming that most UV-absorbing material is semi-volatile OC (Table 1). The higher AAE values for gasoline vs. diesel arise from two interconnected factors: (1) gasoline emissions are dominated by OC with strong wavelength-dependent absorption (high AAE), and

(2) the low BC mass fraction in gasoline reduces masking by BC's near-wavelength-independent absorption (low AAE), allowing the OC signature to dominate.

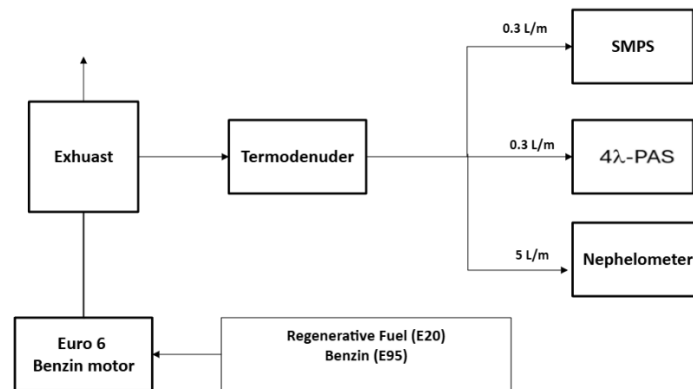


Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup showing the engine, gas handling system (including thermodenuder), and the three measurement instruments: MuWaPAS, nephelometer, and SMPS.

Table 1. AAE values for gasoline (E95) and diesel engine aerosols at three thermodenuder temperatures (50 °C, 150 °C, 300 °C) and three engine load conditions (idle, medium, high).

| Engine | Load | T=50°C | T=150°C | T=300°C |
|----------|--------|--------|---------|---------|
| Gasoline | Idle | 3.01 | 3.82 | 3.95 |
| Gasoline | Medium | 3.99 | 3.68 | 3.98 |
| Gasoline | High | 3.26 | 3.66 | 4.01 |
| Diesel | Idle | 1.92 | 1.34 | 1.17 |
| Diesel | Medium | 1.76 | 1.32 | 1.14 |
| Diesel | High | 1.43 | 1.28 | 1.10 |

Acknowledgments

The research was funded by the Sustainable Development and Technologies National Programme of the Hungarian Academy of Sciences (FFT NP FTA), and by the Hungarian Research and Technology Innovation Fund (OTKA), project no. K-138176.

References

- Arnott, W.P., Zielinska, B., Rogers, C.F., et al., 2005. Evaluation of 1047-nm photoacoustic instruments and photoelectric aerosol sensors in source-sampling of black carbon aerosol and particle-bound PAHs from gasoline and diesel powered vehicles. *Environmental Science & Technology* 39(14), 5398–5406.
- Ajtai, T., Utry, N., Pintér, M., et al., 2024. The investigation of diesel soot emission using instrument combination of multi-wavelength photoacoustic spectroscopy and scanning mobility particle sizer. *Scientific Reports* 14, 2254.

A NEW PORTABLE WATER CPC FOR MOBILE AND DRONE MEASUREMENTS

L. Bustin¹, D. Troolin², T. Tritscher¹, O.F. Bischof¹, Rzeszutek M.³, Jagoda P.³, Nędzka M.³, Bartyzel J.³, N. Bock²

¹TSI GmbH, Neuköllner Strasse 4, 52068 Aachen, Germany, lucia.bustin@tsi.com

²Research and Analytical Instruments, TSI Inc., St. Paul, MN, 55126, USA

³AGH University of Science and Technology, Mickiewicza 30 Av., 30-059 Krakow, Poland

Introduction

The water-based condensation particle counter (WCPC) has been in wide use since about 2004 when a continuous flow CPC that uses water as its condensation fluid was introduced by Hering and Stolzenburg (2004).

Since then, a number of commercial instruments based on this technology have been introduced for continuous measurement of ultrafine particles. In this work, we describe a new compact and portable, single and dual channel WCPC (model 3001/3002) that brings WCPC technology to mobile measurements. We also describe measurements taken with the dual-channel version of this compact, portable WCPC (model 3002) aboard an aerial drone for atmospheric air quality measurements.

3001/3002 CPC Characterization

The 3001 and 3002 use the same core technology as the TSI model 3789 versatile water CPC in a miniaturized format.

The detection efficiency of the single/dual-channel portable WCPC (Model 3001/3002) was characterized through the implementation of the setup shown in Fig 1. Five 3001 units were tested simultaneously on monodisperse NaCl particles generated in a tube furnace and classified by a 3082 classifier and 3085 differential mobility analyzer (DMA)..

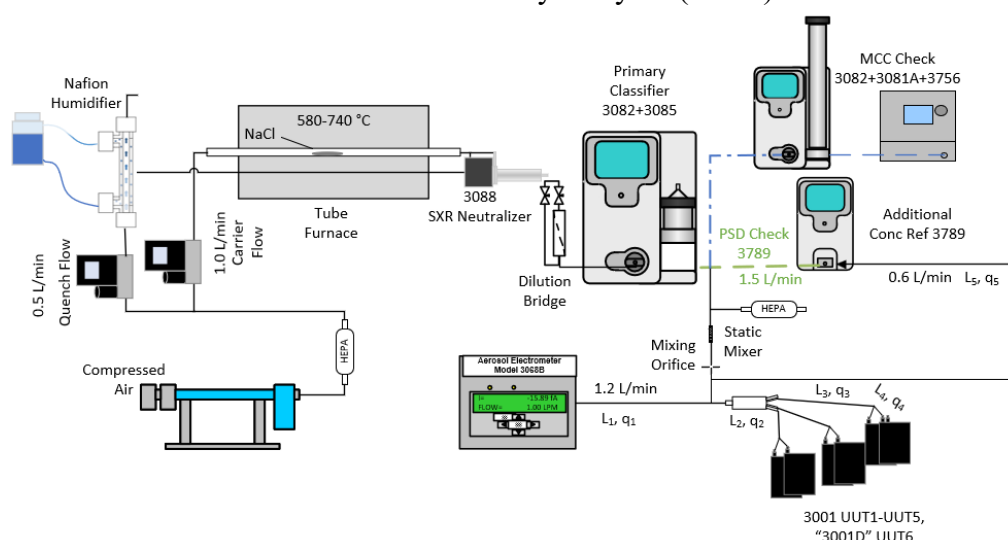


Figure 1: Setup to characterize five 3001 units for counting efficiency using NaCl aerosol

The results were compared with a 3068B aerosol electrometer and compiled. The detection efficiencies, and the resulting curve fit, can be seen in Fig. 2. The detection efficiency is greater than 50% for all units at 10nm.

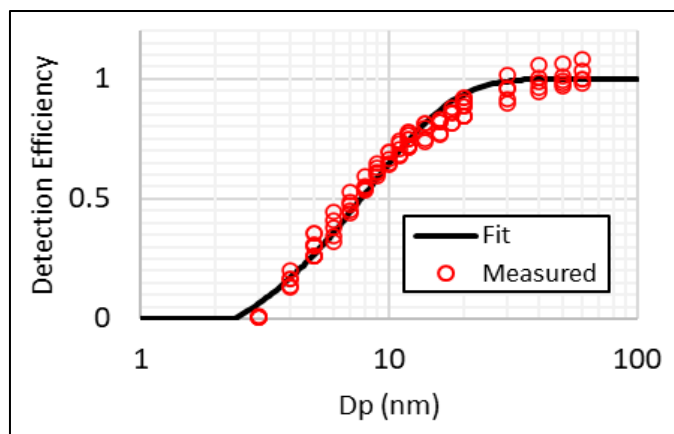


Figure 2. Particle detection efficiency.

3002 Aerial drone measurements

A dual channel 3002 was attached to a drone and measurements of particle concentrations in the atmosphere were taken on the campus of the AGH University of Krakow.

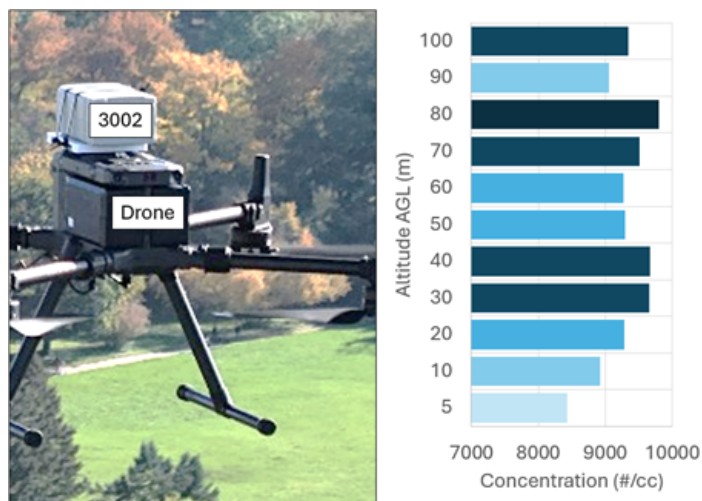


Figure 3. A 3002 attached to an aerial drone taking concentration measurements at altitude.

The 3001 WCPC characterization as well as the drone measurement results will be discussed in more detail in the conference presentation.

References

Hering, S. V., & Stolzenburg, M. R. (2004). Continuous, Laminar Flow Water-based Particle Condensation Device and Method. U.S. Patent 6,712,881, issued March 30, 2004.

SIZE-RESOLVED MONITORING OF MINERAL DUST EMISSIONS

Tomas Prokop¹, Agnesh Panta¹, Volker Ziegler¹, Frederik Weis¹
Hannah Meyer², Martina Klose², Carlos Pérez García-Pando³

¹ PALAS GmbH, Karlsruhe, Germany, tomas.prokop@palas.de

² Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Meteorology and Climate Research
Troposphere Research (IMKTRO), Karlsruhe, Germany, martina.klose@kit.edu

³ Barcelona Supercomputing Center (BSC), Catalan Institution for Research and Advanced
Studies (ICREA), Barcelona, Spain, carlos.perez@bsc.es

Introduction

Mineral dust is a crucial yet still underestimated factor in the global climate system. It influences air quality, cloud formation, Earth's radiation balance, and even precipitation. It is not only determined by the amount, shape, and mineralogical composition of the particles, but also by their particle size distribution (PSD, Mahowald et al., 2014). For dust, the PSD is divided into different size ranges: fine dust with a diameter smaller than $dp < 2.5\mu\text{m}$, coarse dust with $2.5 \leq dp < 10\mu\text{m}$, super-coarse dust with $10 \leq dp < 62.5\mu\text{m}$, and giant dust with $dp \geq 62.5\mu\text{m}$. Fine dust tend to cool the atmosphere while Coarse dust tend to warm it, much like greenhouse gases (Adebiyi et al., 2023). Particle size is also important for cloud microphysics and precipitation processes (Kok et al., 2023). Three international research projects — J-WADI, FRAGMENT, and HiLDA — have in recent years made decisive contributions to sharpening this picture.

Methods and Results

A multi-instrument strategy was applied to cover the full spectrum of particles from ultrafine to very large sizes (see Table 1). The aerosol spectrometer suite included the UCASS (Universal Cloud and Aerosol Sounding System, designed at the University of Hertfordshire; Smith et al. 2019), the saltation particle counter SANTRI2 (Standalone AeoliaN Transport Real-time Instrument, 160 second edition, designed at the Desert Research Institute; Etyemezian et al. 2017; Goossens et al. 2018). Extended by an EN 16450-certified fine dust monitoring device (Fidas® 200S, Palas GmbH) providing high-resolution real-time data for PM1, PM2.5, and PM10. As an EN 16450-certified reference instrument, which is used worldwide in official monitoring networks and provides validated, regulatory-grade data.

Table 1. Characteristics of the instruments used

| Instrument | Principle | Light | Inlet | Diameter | Scattering | Position | Resolution |
|------------|--------------|----------------|---------------------|--|------------|----------------|------------|
| UCASS | light scatt. | Laser 658nm | Nearly open path | 1-20 μm 2-80 μm | 16-104° | rotat. mast | 16 bins |
| Welas | light scatt. | Xenon | Directional | 1-100 μm | 90° | scaffold. | 256 bins |
| Fidas | light scatt. | LED | Directional | 0.4-37 μm | 90° | scaffold. | 256 bins |
| CDA | light scatt. | White | Sigma-2 | 0.75- 100 μm | 90° | scaffold. | 256 bins |
| SANTRI2 | shadowing | Diode 890nm | Open path | 85-200 μm | none | rotat. mast | 7 bins |

It was complemented by the high-resolution aerosol spectrometers (Promo® 2000 with welas® 2300/2500 aerosol sensors, Palas GmbH) to measure airborne dust concentration per size class at 1 Hz, measuring size distributions between 0.2 and 40 μm directly at the source, which provided time-resolved measurements that captured dynamic changes in particle fluxes. Samples were collected with impactors and samplers, then analyzed in the laboratory using scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Set-up was also combined with the Cloud Droplet Analyzer (CDA, Palas GmbH), which made large spherical particles and droplets measurable, and meteorological sensors and eddy covariance systems, this yielded a comprehensive picture of emission processes.

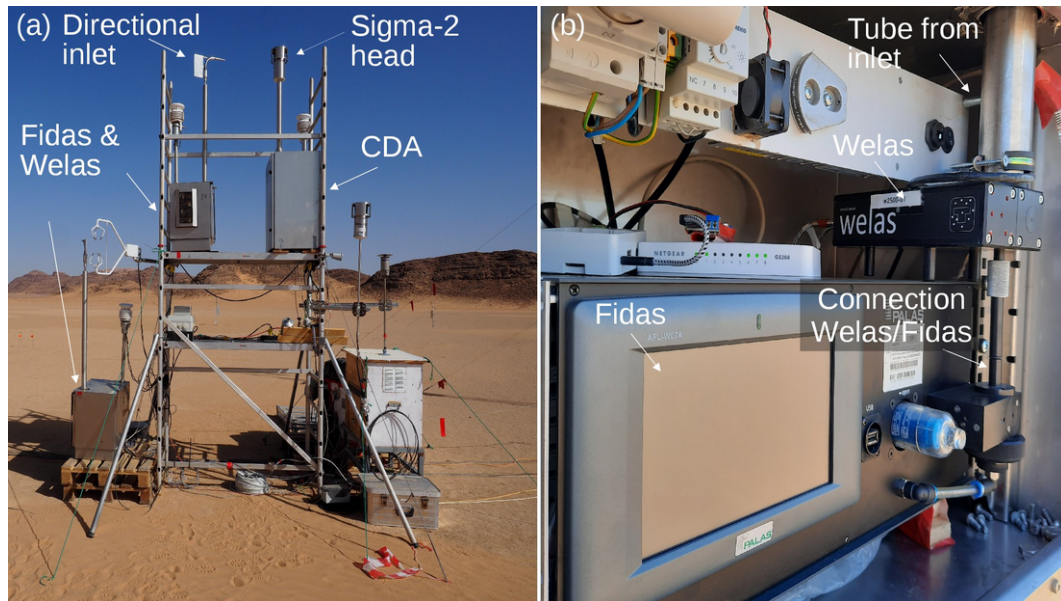


Figure 1. Field Set-up (J-WADI) - Welas, Fidas, and CDA

The measurements demonstrated that particles larger than ten micrometers can account for up to 90 percent of total dust mass. Particularly striking was a maximum at around 60 μm — a size class rarely considered in climate models (Meyer et al. 2025). Moreover, particles larger than 60 μm were still detectable at several meters above ground, indicating that such large particles can be transported by strong winds across several kilometers — significantly farther than previously assumed.

Acknowledgments

J-WADI was organized and funded through the ERC Consolidator Grant FRAGMENT (PI CPGP, grant no. 773051) and the Helmholtz Young Investigator Group “Mineral Dust” (PI MK, grant no. VH-NG-1533).

References

Mahowald, Natalie, Samuel Albani, Jasper F. Kok, Sebastian Engelstaeder, Rachel Scanza, Daniel S. Ward, and Mark G. Flanner. "The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system." *Aeolian Research* 15 (2014): 53-71.

Adebiyi, Adeyemi, Jasper F. Kok, Benjamin J. Murray, Claire L. Ryder, Jan-Berend W. Stuut, Ralph A. Kahn, Peter Knippertz et al. "A review of coarse mineral dust in the Earth system." *Aeolian Research* 60 (2023): 100849.

Kok, Jasper F., Trude Storelvmo, Vlassis A. Karydis, Adeyemi A. Adebiyi, Natalie M. Mahowald, Amato T. Evan, Cenlin He, and Danny M. Leung. "Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change." *Nature Reviews Earth & Environment* 4, no. 2 (2023): 71-86.

Helen R. Smith, Zbigniew Ulanowski, Paul H. Kaye, Edwin Hirst, Warren Stanley, Richard Kaye, Andreas Wieser, Chris Stopford, Maria Kezoudi, Joseph Girdwood, Richard Greenaway, and Robert Mackenzie „The Universal Cloud and Aerosol Sounding System (UCASS): a low-cost miniature optical particle counter for use in dropsonde or balloon-borne sounding systems“ *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 6579–6599, <https://doi.org/10.5194/amt-12-6579-2019>, (2019).

Etyemezian, V., Nikolich, G., Nickling, W. G., King, J., and Gillies, J. A.: Analysis of an optical gate device for measuring aeolian sand movement, *Aeolian Research*, 24, 65–79, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.11.005>, (2017).

Goossens, D., Nolet, C., Etyemezian, V., Duarte-Campos, L., Bakker, G., and Riksen, M.: Field testing, comparison, and discussion of five aeolian sand transport measuring devices operating on different measuring principles, *Aeolian Research*, 32, 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.01.001>, (2018).

Meyer, H., Kandler, K., Dupont, S., Escribano, J., Girdwood, J., Nikolich, G., Alastuey, A., Etyemezian, V., González Flórez, C., González-Romero, A., Hussein, T., Irvine, M., Knippertz, P., Möhler, O., Querol, X., Stopford, C., Vogel, F., Weis, F., Wieser, A., Pérez García-Pando, C., and Klose, M.: From fine to giant: Multi-instrument assessment of the dust particle size distribution at an emission source during the J-WADI field campaign, *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1531>, (2025).

KÉTKAMRÁS KÖZÉP-INFRAVÖRÖS VALÓS IDŐBEN KALIBRÁLT FOTOAKUSZTIKUS AEROSZOL SZENZOR

Ajtai Tibor^{1,2}, Abdul Rahman¹, Leits Bálint¹, Bozóki Zoltán,^{1,2}

¹ Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
6720 Szeged, Dóm tér 9., e-mail: ajtai@titan.physx.u-szeged.hu

² HUN-REN-SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport,
6720 Szeged, Dóm tér 9

Absztrakt

A közép-infravörös (mid-IR) spektrális tartomány kiemelt jelentőségű az aeroszokok kémiai összetételének vizsgálatában, mivel ebben a tartományban jelennek meg a szerves molekulák alapvető rezgési átmenetei, különösen a C–H nyújtási módusok. Az aeroszokok abszorpciós tulajdonságainak kvantitatív, valós idejű meghatározása kulcsfontosságú mind a légköri folyamatok megértése, mind ipari és környezetvédelmi alkalmazások szempontjából. Ugyanakkor a szórásból eredő torzítások és a komplex kalibrációs igények miatt a hagyományos optikai módszerek alkalmazása korlátozott. Jelen munkánkban egy új, kétkamrás fotoakusztikus mérőrendszert mutatunk be, amely képes aeroszokok abszolút abszorpciós együtthatójának meghatározására a 3,30–3,55 μm hullámhossz-tartományban. A rendszer egy hangolható külső üreges interband kaszkád lézeren (EC-ICL) alapul, amely kompakt felépítése és alacsony energiaigénye mellett széles spektrális hangolhatóságot biztosít. A mérőrendszer két azonos fotoakusztikus cellából áll: az egyik referencia gáz (propán), míg a másik az aeroszol mintát tartalmazza. A referencia csatornában mért jelből egy hullámhosszfüggő átviteli függvényt definiálunk, amely figyelembe veszi az összes rendszerparamétert (lézerteljesítmény, akusztikai válasz, optikai veszteségek), így lehetővé teszi az aeroszol abszorpciójának közvetlen, külső kalibráció nélküli meghatározását. A módszert di-etil-hexil-szebacát (DEHS) aeroszokokon validáltuk, amelyek jól definiált alifás szénhidrogén spektrummal rendelkeznek. A mért abszorpciós spektrumok jól reprodukálják a C–H rezgési sávokra jellemző struktúrákat. A kvantitatív eredményeket független, ellipszometriás mérésekből származtatott törésmutató-adatok alapján számított abszorpciós együtthatókkal vetettük össze. A két módszer közötti átlagos eltérés mindössze $\sim 2\%$, ami igazolja az alkalmazott átviteli függvényen alapuló megközelítés pontosságát. Az ismertetett kétkamrás fotoakusztikus technika jelentős előrelépést képvisel a közép-infravörös aeroszokabszorpciós spektroszkópiában, mivel lehetővé teszi a valós idejű, kvantitatív méréseket bonyolult kalibrációs eljárások nélkül. A módszer különösen ígéretes a légköri aeroszokok forrásazonosítása, a sugárzási kényszer vizsgálata, valamint ipari kibocsátások monitorozása terén. A jövőbeni fejlesztések célja a spektrális tartomány bővítése, valamint a szórás tulajdonságok integrált mérésével a teljes optikai karakterizáció megvalósítása.

Köszönetnyilvánítás: A kutatást a Magyar Tudományos Akadémia Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Programja (FFT NP FTA), valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (OTKA, K-138176 pályázat) támogatta.

AZ AEROSZOL RÉSZECSKESZÁM KONCENTRÁCIÓ TURBULENS FLUXUSÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Weidinger Tamás¹, Torma Péter², Rehák András Miklós² és Salma Imre³

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, E-mail: weidi@staff.elte.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., K épület magasföldszint 12.,
E-mail: torma.peter@emk.bme.hu, rehak.andras@emk.bme.hu

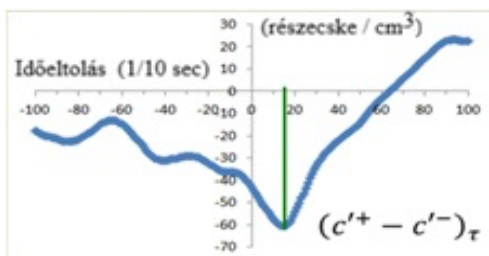
³ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Kémiai Intézet
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, E-mail: salma.imre@ttk.elte.hu

Bevezetés

Az aeroszol részecskék turbulens fluxusának ismerete fontos szerepet játszik a felszín-bioszféra-légkör rendszer folyamatainak számszerűsítésében, a száraz ülepedés leírásában. Áttekintjük a fluxus-számítási módszereket: i) a gradiens, illetve profilméréseken alapuló Monin–Obukhov-féle hasonlósági elméletet, ahol az átlagolási idő 1–10 perc, ii) az 1–20 s-os felbontású koncentráció méréseket és gyors válaszidejű szonikus anemométert igénylő eddy-akkumulációs (REA) mérési technikát. A fluxust a felfele ($w > 0$) és a lefele mozgó ($w < 0$) örvényekben mért átlagos részecskeszám koncentráció különbség, $(c^+ - c^-)$ és a vertikális szélkomponens szórása, σ_w alapján számítjuk. iii) Az eddy-kovariancia (EC) módszer, $Flux = -cov(w, c)$ alkalmazása már 10 Hz feletti mérési tartományú műszereket követel.

Mérési program, műszerezettség

Lehetőségünk nyílt egy új fejlesztésű léghőmérsékleti kondenzációs részecskeszámláló műszer (CPC-A30, Airmodus, Finnország) hazai tesztelésére az ELTE BpART Laboratóriumában (<http://salma.elte.hu/BpART/>) 2023 júniusában. A műszer butanol munkafolyadék használatával méri a 7 nm-nél nagyobb átmérőjű részecskéket egyedi részecskeszámlálási módban, $150\,000\text{ cm}^{-3}$ -ig, 1 s-os átlagolási idővel (1. ábra).



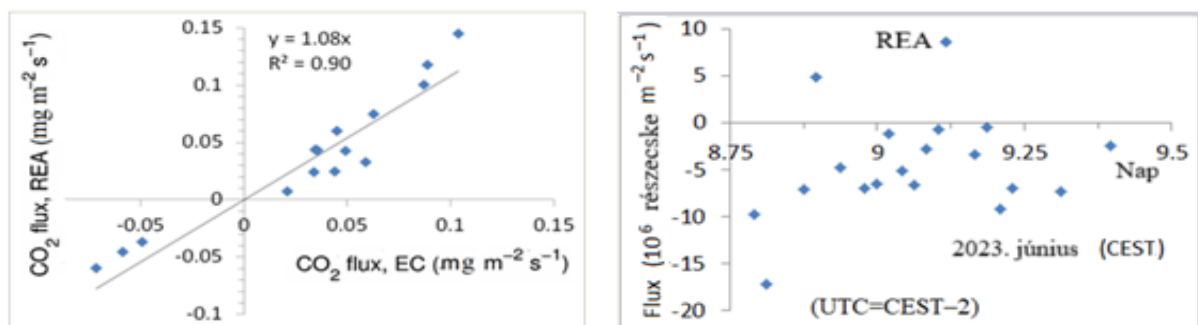
1. ábra. BpART mérőplatform, középen a CPC-A30 műszer (baloldal), beszívó csövek, az összeépített EC150 CO₂/H₂O mérő és a CSAT-3 szonikus anemométer (jobboldal). Középen a félórás átlagos részecskeszám koncentráció különbség $(c^+ - c^-)$ a CSAT-3 és a CPC-A30 közti időeltolás függvényében. Az autokovariancia függvény éles minimuma ülepedést jelez.

A gyors válaszidejű (10 Hz) turbulencia-méréseket EC150 nyitott CO₂/H₂O gázelemzővel és CSAT-3 ultrahangos anemométerrel végeztük. Meghatároztuk a két műszer közötti időeltolódást. Kiszámoltuk a vertikális sebesség és a részecskeszám koncentráció különbség autokovariancia függvényét. Az 1 másodperces átlagolási időn belüli koncentrációt i) állandónak vettük, illetve ii) lineáris interpolációval dolgoztunk. Nem rontottuk le a vertikális szélmerést. A számítások során félórás átlagolási időt használtunk (1. ábra).

Eredmények

Elkülönítettük a fel- és leszálló örvények által szállított aeroszol részecskék közötti részecskeszám koncentráció különbséget ($c^+ - c^-$), s így becsültük a fluxust. Amikor nem volt markáns csúcs az optimális időeltoláshoz tartozó koncentráció különbségekben, nem találtunk csúcsokat a vertikális sebesség és a hőmérséklet, nedvesség, CO₂ illetve az aeroszol számkoncentráció autokovariancia függvényekben sem. Nem volt fejlett a turbulencia. Az autokovariancia függvény a fluxus-számítás minőségbiztosítási eszköze lehet.

Az eddy-akkumulációs módszer ellenőrzéseként a 10 s-os átlagolással számolt nyers szenzibilis hő és CO₂ REA fluxusokat összehasonlítottuk a 10 Hz-es eddy-kovariációs módszerrel (EC) számított fluxusokkal. Jó egyezést kaptunk, hasonlóan Gaman et al. (2004) vizsgálataihoz. Ezután elvégeztük a nyers részecskeszám fluxusok meghatározását (2. ábra). Ülepedést tapasztaltunk.



2. ábra. Eddy-kovariációs (EC) és eddy-akkumulációs (REA) CO₂ fluxus mérések összehasonlítása (baloldal), részecskeszám koncentráció fluxusok (jobboldal), 2023. június.

Összefoglalás

Kidolgoztuk és ellenőriztük az eddy-kovariációs és eddy-akkumulációs módszertant (Weidinger et al., 2024). A kutatás aktualitását az adja, hogy 2026-ban beszerzésre került egy 20 Hz-es TSI CPC3752 részecskeszámláló műszer, ami alkalmas különböző felszínek feletti (víz, alacsony vegetáció, városi környezet) direkt (EC) aeroszol fluxus mérésekre.

Köszönetnyilvánítás

A Szerzők köszönetet mondanak az OTKA-K-138176 és az NKFI Advanced 150835 program támogatásáért.

Hivatkozások

- Gaman, A., Rannik, Ü., Aalto, P., Pohja, T., Siivola, E., Kulmala, M., & Vesala, T. (2004). Relaxed eddy accumulation system for size-resolved aerosol particle flux measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21(6), 933–943.
- Weidinger, T., Salma, I., Bozóki, Z., Horváth, L., Huszár, H., Gombi, C., Torma, P., Rehák, A., Nagy, Z., Pintér, K., & Szabó, A. (2004). Development of eddy accumulation

technique for aerosol particle number concentration and ammonia flux measurements.
EMS Annual Meeting 2024, Barcelona, Spain, 1–6 Sep 2024, EMS2024-564.

Periodikusan előállított részecskék tartózkodási idejének mérési módszere: szikrakísüléses nanorészecske generátor tartózkodási időeloszlása

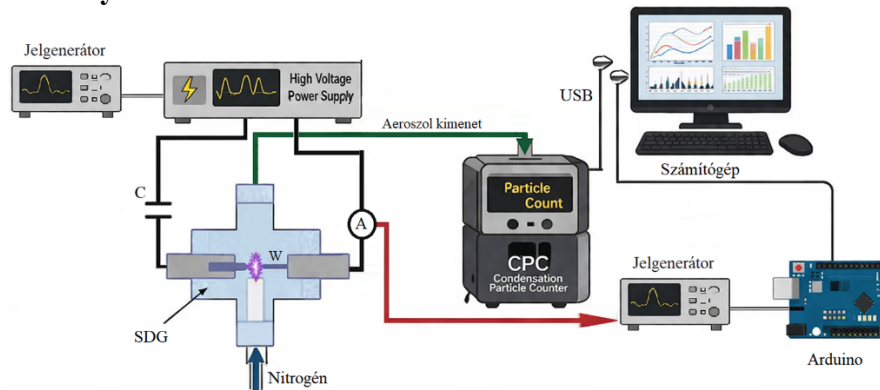
Megyeri Dániel, Leits Bálint, Kohut Attila és Geretovszky Zsolt

Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék,
6720 Szeged, Dóm tér 9., E-mail: megyeri.daniel@szte.hu

Bevezetés

Folyadékok, gázok, illetve az ezekben diszpergált szilárd részecskék viselkedésének és mozgásának tanulmányozására régóta alkalmazott eljárás a nyomjelző módszer. Ennek során a vizsgált, zárt rendszerbe $t=0$ időpontban előre preparált részecskéket juttatunk, majd a rendszer kimenetén mérjük a részecskék koncentrációját. Az így kapott koncentráció-idő görbét a rendszerre jellemző tartózkodási időeloszlásnak (*Residence Time Distribution – RTD*) nevezzük (Nechita *et al.* 2023). Munkánk során elsőként alkalmaztuk ezt a módszert szikrakísüléses nanorészecske generátor (*Spark Discharge Generator –SDG*) RTD-jének meghatározására, mégpedig úgy, hogy a nyomjelző szerepét maguk a szikrakísülésből származó nanorészecskék töltötték be. A módszer emellett lehetővé teszi az SDG effektív térfogatának pontos meghatározását, amelyre korábban csupán becslések álltak rendelkezésre (Feng *et al.* 2016).

Módszer és eredmények

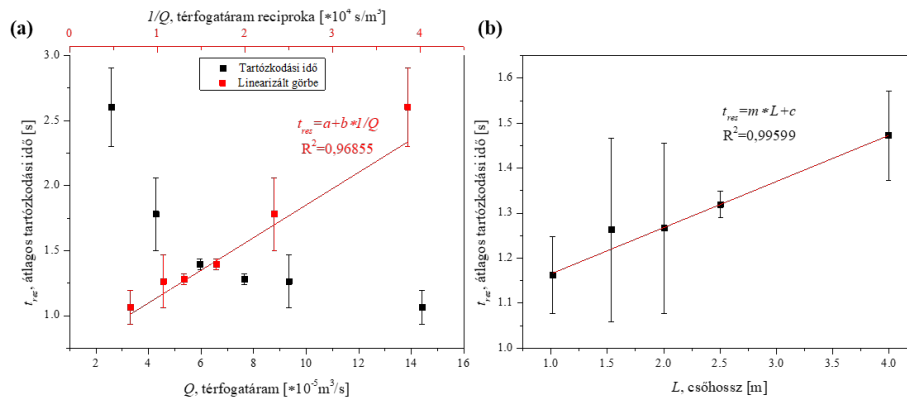


1. ábra. Mérési elrendezés.

Kísérletünkben egy 3,0 mm névleges átmérőjű volfrám (W) elektródpárral ellátott SDG-t használtunk, rod-to-rod elrendezésben és keresztirányú nitrogén gázvezetés mellett. Az elektródok közötti távolságot (szikraközt) 0,125 mm-re állítottuk be (Kohut *et al.* 2017). Az SDG kimenetén a részecskék koncentrációját egy CPC-vel (Condensation Particle Counter, TSI Model 3756) mértük. A szikrakísülést külső jelgenerátor segítségével szabályoztuk, míg az időmérést a CPC és PC óráinak szinkronizálásával, és a szikrakísülés idejét nagy pontossággal rögzítő mikrovezérlő alapú elektronikával valósítottuk meg (ld. 1. ábra). Ezáltal közvetlenül a részecskék RTD-jét mértük, amelynek módusza – azaz a tartózkodási idő – az elmélet szerint az alábbi összefüggéssel írható le a térfogatáram (Q) függvényében:

$$t_{res} = \frac{V_{eff}}{Q}, \quad (1)$$

ahol V_{eff} az effektív kamratérfogat. Az egyenlet érvényességének vizsgálatához és V_{eff} meghatározásához a térfogatáram függvényében mértük a részecskék átlagos tartózkodási idejét (2. ábra a). Ezt követően az SDG-t és CPC-t összekötő cső hosszát változtatva a kapott görbét extrapoláltuk, így meghatároztuk az adott SDG konfigurációra jellemző átlagos tartózkodási időt, és ebből az effektív térfogatot (2. ábra b). Eredményeink igazolják az (1) egyenlet helyességét, valamint azt, hogy az alkalmazott módszerrel meghatározható egy szikrakisüléses generátor effektív térfogata. A 2. ábra b egyenlete alapján a részecskék átlagos tartózkodási ideje a kamrában $t_{res} = (1,0625 \pm 0,01055)s$, amelyből a kamra effektív térfogata $V_{eff} = (9,9296 \pm 0,00986) * 10^{-5} m^3$. Ez az érték a kamra valós térfogatának 1/20-a.



2. ábra. Tartózkodási idő a térfogatáram függvényében, ill. az (1) egyenlet linearizált változatának illesztése (a). Az egyenletben $a = (0,7217 \pm 0,08126) s$ és $b = (4,1850 \pm 0,53755) * 10^{-5} m^3$ Az SDG átlagos tartózkodási idejének meghatározása a cső hosszának változtatásával (b). Az egyenletben $m = (0,1027 \pm 0,00533) s/m$ és $c = (1,0625 \pm 0,01342)s$.

Megmutattuk, hogy az SDG, mint periodikusan előállítható részecskék forrásul szolgáló eszköz segítségével az RTD meghatározható, amely kulcsfontosságú a nanorészecskék koagulációs és transzport folyamatainak, valamint azok időkarakterisztikájának meghatározásában. A módszer segítségével a koagulációs folyamatok vizsgálata egy újszerű megközelítésben vált lehetségessé.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a NKFI Alap (EKÖP-24-4-SZTE-653, KTNL 2022-2.1.1-NL-2022-00012 és K 146733 pályázatok) támogatta. Köszönet illeti továbbá a TSI Incorporated-et az AIM szoftver frissítéséért és a parancskódok biztosításáért.

Hivatkozások

- Feng, J., Huang, L., Ludvigsson, L., Messing, M.E., Maissner, A., Biskos, G., Schmidt-Ott, A., 2016. General approach to the evolution of singlet nanoparticles from a rapidly quenched point source. *J. Phys. Chem. C*, **120** (1), 621–630.
- Kohut, A., Ludvigsson, L., Meuller, B. O., Deppert, K., Messing, M. E., Galbács, G. and Geretovszky, Zs., 2017. From plasma to nanoparticles: Optical and particle emission of a spark discharge generator. *Nanotechnology*, **28** (47), Article 475603.

Nechita, M.T., Suditu, G.D., Puițel, A.C., Drăgoi, E.N., 2023. Residence time distribution: literature survey, functions, mathematical modeling, and case study - diagnosis for a photochemical reactor. *Processes* **11** (12), 3420.

A HIGROSZKÓPOS AEROSZOL RÉSZECSKÉK HATÁSA A CSAPADÉKKÉPZŐDÉSRE: AZ OSTWALD-FÉLE RIPENING HATÁS

Geresdi István és Sarkadi Noémi

Pécsi Tudományegyetem, Földrajzi és Földtudományi Intézet,

7626 Pécs, Ifjúság útja 6., e-mail: geresdi@gamma.ttk.pte.hu

Bevezetés

A vízcseppek méret szerinti eloszlását a felhőkben lejátszódó termodinamikai és dinamikai folyamatok mellett a légköri aeroszol részecskék koncentrációja és kémiai összetétele határozza meg. A vízcseppek a kialakulásukat követően kondenzációval növekednek. A kondenzációs folyamatot meglehetősen lassú. Átlagos környezeti feltételek mellett közel 20 percre van szükség ahhoz, hogy egy vízcsepp a kezdeti 1,0 μm -es méretről elérje a 10 μm -es méretet, és további órákra ahhoz, hogy elérje azt a kb. 100 μm -es méretet, amely ahhoz szükséges, hogy a felhőből kiesve elérje a talajt. Mivel a kondenzációs növekedés sebessége fordítottan arányos a vízcsepp méretével, az idő előrehaladtával a vízcseppek méret szerinti eloszlása folyamatosan szűkül. Így csökken a vízcseppek egymás közötti ütközésének gyakorisága, ami jelentősen megnövelheti a csapadékképződéshez szükséges időt. A tapasztalat azonban azt mutatja, hogy egy kisebb gomolyfelhő esetében is elegendő 10 – 15 perc a csapadék kialakulásához.

Módszer és eredmények

Napjainkban sem teljesen értjük, hogy milyen folyamatok kompenzálhatják a méret szerinti eloszlás szűkülést. Az elképzelések többnyire olyan hipotéziseken alapulnak, amelyeket nehéz (lehetetlen) felhőkben végzett mérésekkel egyértelműen igazolni, vagy cáfolni. A numerikus modellek és a laboratóriumi mérési technika (felhőkamrák) fejlődése reményt ad arra, hogy megértsük mely folyamatok vezethetnek a méret szerinti eloszlás kiszélesedéséhez. Leggyakrabban az alábbi hipotézisek merülnek fel:

- 1) 5,0 μm -nél nagyobb kondenzációs magvak jelenléte.
- 2) Sugárzás okozta hűlés hatása felhőtetőnél.
- 3) A levegő inhomogén, turbulens keveredése a felhők szélénél.
- 4) Az ún. Ostwald-féle 'ripening' hatás.

Az előadásban röviden áttekintést adok az egyes hipotézisek elméleti háttéréről, továbbá modell számítások eredményeire alapozva bemutatom, hogy az Ostwald-féle 'ripening' hatás milyen feltételek mellett lehet hatékony, és ezen hatás figyelembevételének milyen gyakorlati alkalmazása lehetséges.

SERS SZUBSZTRÁTOK AEROSZOL ALAPÚ ELŐÁLLÍTÁSA ÉS ALKALMAZÁSA TIRÁM KIMUTATÁSÁRA

**Horváth Viktória, Megyeri Dániel, Kopniczky Judit, Darwish Maher, Geretovszky
Zsolt, Kohut Attila**

Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet,
6720 Szeged, Dóm tér 9., E-mail: horvath.viktoria.03@szte.hu

Bevezetés

A felületerősített Raman spektroszkópia (SERS), egy elterjedten használt technika összetételmeghatározásra. A technika azon alapul, hogy a vizsgálandó mintát egy nanostruktúrált fém felület, ún. SERS-szubsztrát közvetlen közelébe helyezve a struktúra közelében kialakuló térerősítés a Raman jel több nagyságrenddel való növekedéséhez vezet. A térerősítés mértéke függ a felhasznált nanostruktúra tulajdonságaitól, annak összetételétől és geometriájától, melyeket a szubsztrát előállításának módja alapvetően meghatároz. SERS szubsztrátokat egyszerűen kialakíthatunk nanorészecskék hordozóra való leválasztásával. Szikrakisüléssel generált nanorészecske generálás során aeroszol fázisban hozunk létre fém részecskéket, melyeket az aeroszol filteren való átvezetése során a leválasztva egy lépésben alakíthatunk ki olyan nanostruktúrákat, melyek alkalmasak SERS szubsztrátnak (Kohut *et al.*, 2020; Horváth *et al.*, 2025). A szikrakisüléssel alapú előállítás előnyei közé tartozik, hogy segítségével tisztán fizikai úton állíthatunk elő rendkívül nagy tisztaságú részecskéket, valamint, hogy a módszer egyszerűen felskálázható. Az előállítás során többféleképpen befolyásolhatjuk a kialakított részecskék és a leválasztás – és ezeken keresztül a SERS szubsztrátok – tulajdonságait. Ezek szisztematikus vizsgálatával részletesen feltérképezhetők a szikra alapú nanorészecske generálásban rejlő lehetőségek, kifejezetten SERS szubsztrátok előállításának szempontjából. Az optimálisnak adódó szubsztrátokat felhasználtuk egy, az élelmiszerbiztonság szempontjából releváns analit, a tirám kimutatására. Direkt módon sikeresen mutattunk ki 1.2 ppm koncentrációjú tirám oldatot, ezen felül egy mély tanuló algoritmus felhasználásával 0.03 és 0.48 ppm koncentráció-tartományba eső tirám oldatokat is 94.44% pontossággal sikerült felismerni.

Eredmények

Szikrakisülésekben generáltunk nanorészecskéket, majd az ezeket tartalmazó aeroszolt filtereken átvezetve, a filter szálaira részecskéket leválasztva alakítottunk ki SERS szubsztrátokat. A szubsztrátok értékeléséhez vizsgáltuk a nanorészecskék tulajdonságainak és a hordozóként alkalmazott filter tulajdonságainak SERS aktivitásra gyakorolt hatását. Ezen tulajdonságok közé tartozott a nanorészecskék összetétele, alakja és méreteloszlása, valamint a filterek szerkezete és pórusmérete.

Arany, ezüst és arany-ezüst ötvözet részecskék felhasználásával készült szubsztrátokat összevetve, az arany-ezüst szubsztrátok az aragnál magasabb és hosszú távon stabil SERS aktivitást mutattak, így ezt az összetételt ítéltük a legalkalmasabbnak SERS szubsztrátok előállítására. Az aeroszol fázisban létrehozott nanorészecskék alakját és méretét hőkezeléssel, illetve a szikrázás ismétlési frekvenciájának változtatásával befolyásoltuk. A szikrázás frekvenciájának növelésével a generált részecskék mérete is megnő (Noh *et al.*, 2017), míg a hőkezelés során a részecske-aggregátumok kompaktálása, a méreteloszlás szórásának és az átlagos részecskeméretnek a csökkenése történik (Mueller *et al.*, 2012). Különböző

méreteloszlású aeroszolo kból kialakított SERS szubsztrátokon mérhető SERS intenzitásokat összehasonlítva meghatározható volt egy optimális aktivitást eredményező méreteloszlás-tartomány.

A SERS szubsztrátok kialakítása során filtereket használtunk hordozóként, melyek ekvivalens pórusmérete és szerkezete is hatással lehet a SERS aktivitásra. Nylon anyagú, 10 μm ekvivalens pórusméretű filterre egyre növekvő részecskemennyiséget leválasztva a SERS aktivitás is növekszik egy maximális érték eléréséig. Ennél nagyobb mennyiségű részecskét felhasználva a szubsztrát SERS aktivitása csökkeni kezd. Ezt összevetve kisebb és nagyobb pórusméretű nylon filterekkel hasonló tendencia mutatkozik, miközben az elérhető maximális SERS intenzitás abszolút értéke a pórusmérettől függetlenül ugyanakkora. Közel ugyanolyan ekvivalens pórusméretű, de különböző szerkezetű, papír és nylon filtereken kialakított SERS szubsztrátok közül a papír filtereken mértünk magasabb értékű intenzitásokat.

Az optimálisnak adódott SERS szubsztrátot tirám kimutatására használtuk fel. A linearitási tartomány 24 és 1.2 ppm közöttinek adódott, a direkt kimutatási határ pedig 1.2 ppm-nek. Az érzékenység növelésnek érdekében felvetettük egy kategorizáló mély tanuló algoritmus alkalmazását. Az algoritmus célja volt három különböző koncentráció-tartományba eső tirám spektrumok megkülönböztetése, ezek az 1.2 ppm feletti tirám spektrumok, a 0.48 ppm és 0.03 ppm közötti tirám spektrumok, illetve a tirámot nem tartalmazó oldószer spektrumai. A saját adatokon való tanítás után teszt adatsoron a modell 94.44%-os pontosságot ért el, ezzel olyan koncentráció-tartományban is sikeresen felismerve a tirám jelenlétét, mely esetén az már direkt módon nem mutatható ki.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők hálásak a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs alap által a Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriumon keresztül (a 2022-2.1.1-NL-2022-00012 projekt keretein belül) és az Egyetemi Kutatói Ösztöndíjprogramban (az EKÖP-24-3 - SZTE-511 projekt keretein belül) nyújtott támogatásnak. A szerzők köszönetüket fejezik ki a K 146733 számú OTKA projektből származó támogatásért is.

Irodalom

- Kohut, A., Kéri, A., Horváth, V., Kopniczky, J., Ajtai, T., Hopp, B., Galbács, G., Geretovszky, Zs., 2020. Facile and versatile substrate fabrication for surface enhanced Raman spectroscopy using spark discharge generation of Au/Ag nanoparticles. *Appl. Surf. Sci.* 531, 147268
- Horváth, V., Megyeri, D., Kopniczky, J., Darwish, M., Geretovszky, Zs., Kohut, A., 2025. Spark Ablation-Generated Nanoparticles on Filter Paper: A 3D SERS Platform for Cost-Effective and Rapid Thiram Sensing. *ACS Appl. Nano Mater.* 8, 37, 17934-17951
- Noh, S.R., Lee, D., Park, S.J., Kim., D.S., Choi, M., 2017. High throughput nanoparticle generation utilizing high-frequency spark discharges via rapid spark plasma removal. *Aerosol Sci. Tech.* 51, 1, 116-122
- Mueller, B.O., Messing, M. E., Engberg D.L.J., Jansson, A.M., Johansson, L. I. M., Norlén, S.M., Tureson, N., Deppert, K., 2012. Review of Spark Discharge Generators for Production of Nanoparticle Aerosols. *Aerosol Sci. Tech.* 46, 11, 1256-1270

Kamrakonfiguráció hatása a szikrakisüléses nanorészecske-generátorok részecskekibocsátására: kombinált kísérleti és szimulációs vizsgálat

M. Bermeo^{1*}, D. Megyeri^{2*}, M. H. Magnusson¹, A. Kohut², Zs. Geretovszky² és M. E. Messing^{1,3}

¹ Solid State Physics & NanoLund, Department of Physics, Lund University, Box 118, 22100 Lund, Sweden

² Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szegedi Tudományegyetem, Dóm tér 9., 6720 Szeged, Magyarország

³ Department of Microtechnology and Nanoscience, Chalmers University of Technology, 412 96 Gothenburg, Sweden

Levelező szerzők: megyeri.daniel@szte.hu, marie.bermeo_vargas@ftf.lth.se

*A szerzők egyenlő mértékben járultak hozzá a munkához.

Bevezetés

A szikrakisüléses nanorészecske-generálás ígéretes módszer tiszta, ligandum-mentes nanorészecskék előállítására (Schmidt-Ott, 2019), azonban a kihozatali hatékonyság és a részecsketulajdonságok erősen függenek a kamra kialakításától és az áramlási viszonyoktól. Jelen munkában különböző szikrakisüléses nanorészecske generátor (*Spark Discharge Generator* – *SDG*) kamrakonfigurációk (ld. 1. táblázat) hatását vizsgáltuk a részecsketranszportra numerikus áramlástani és részecskekövetési szimulációk segítségével, a szimulációs eredményeket kísérleti adatokkal összevetve. A szakirodalomban elterjedten alkalmazott, a Mueller *et al.* (2012) által is használt kamrakonfiguráció (E) különböző átalakításait (0B-6B) vizsgáltuk a gáz bevezetés és aeroszol kivezetés közötti távolság változtatása, valamint a kamra ösztérfogatanak szisztematikus csökkentése mellett.

Módszer és Eredmények

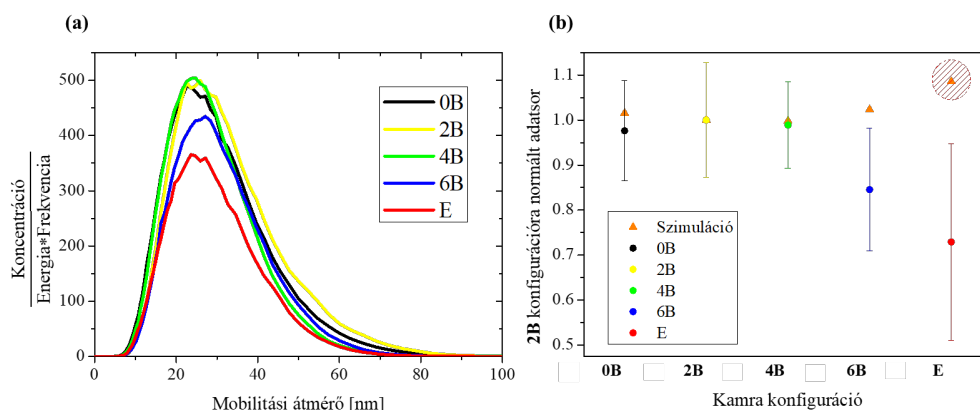
^a A be- és kimeneti cső felszíne az elektródoktól 47,2 mm távolságra van.

^b A be- és kimeneti cső felszíne az elektródoktól 10,0 mm távolságra van.

| Megnevezés | Kamra konfiguráció | Térfogat [cm ³] | 3D nézet | Szemből nézet | Sebesség profil [m/s] |
|------------|---|-----------------------------|----------|---------------|-----------------------|
| E | 0 db blokk ^a | 401 | | | |
| 0B | 0 db blokk ^b | 400 | | | |
| 2B | 2 db blokk (be- és kimenet felől) ^b | 291 | | | |
| 4B | 4 db blokk (bemenet, kimenet, anód és katód felől) ^b | 185 | | | |
| 6B | 6 db blokk (minden oldalról) ^b | 75.2 | | | |

1. táblázat. A vizsgált kamra konfigurációk és a hozzájuk tartozó sebesség- profilok az Y-Z síkban. Az áramlási sebesség nagyságát COMSOL szimulációval határoztuk meg.

Az SDG-ben uralkodó áramlási viszonyokat és a részecskék kihozatali valószínűségét COMSOL környezetben szimuláltuk. Az alkalmazott modell a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletek megoldásával adja meg a vivőgáz áramlását, amely áramlási térben a szikraközből indított 100 000 virtuális részecske trajektóriáját követi nyomon a Megyeri *et al.* (2021) alapján. A modell segítségével a kamra kimenetén meghatároztuk az egyes kamrakonfigurációkhoz tartozó tipikus átlagos tartózkodási időt és kimeneti valószínűséget. A különböző kamrakonfigurációk részecskekihozatalát és méreteloszlását kísérletileg egy elektrométerrel (TSI 3086B) és egy DMA segítségével (egyedi Vienna-típusú) határoztuk meg és ezen eredményeket vetettük össze a szimulációval.



1. ábra. Betáplált energiára normált méreteloszlások (a) és az így korigált normált teljes koncentrációk összevetve a szimulációs eredményekkel (b). A pirossal satírozott négyzet jelöli azt a tartományt, ahol a szimulációs feltevéseink nem érvényesek.

Megállapítottuk, hogy a vizsgált geometriák mindegyikével számottevő részecske kihozatal-növekedés érhető el az eredeti (E) konfigurációhoz képest. Ugyanakkor az 1b) ábrán az is látható, hogy a részecske koncentrációt egységnyi szikra energiára normalva számottevő csökkenés csak akkor tapasztalható, amikor a generátor minden oldala egyformán közel kerül a szikraközhöz. A szimulációink jól reprodukálják a kísérleti trendeket azokban az esetekben, ahol a részecskék tartózkodási ideje rövidebb, mint az egymást követő szikrakisülések közötti idő, vagyis nem várható kölcsönhatás az egyes kisülések hatására keletkező részecskepopulációk között. Eredményeink rávilágítanak arra, hogy a kamrageometria optimalizálása kulcsfontosságú a részecske-termelés hatékonyságának növelésében. A bemutatott megközelítés hasznos eszközt nyújt az SDG rendszerek tervezéséhez és skálázásához.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Swedish Foundation for Strategic Research (támogatási szám: FFL18-0282), az EU Horizon 2020 kutatási és innovációs programja a Marie Skłodowska-Curie támogatási megállapodás (No. 945378), valamint a NKFI Alap (EKÖP-24-4-SZTE-653, KTNL 2022-2.1.1-NL-2022-00012 és K 146733 pályázatok) támogatták.

Hivatkozások

Megyeri, D., Kohut, A. Geretovszky, Z. 2021. Effect of flow geometry on the nanoparticle output of a spark discharge generator. *Journal of Aerosol Science*, **154**, p. 105758.
 Mueller, B. O., et al. 2012. Review of Spark Discharge Generators for Production of Nanoparticle Aerosols. *Aerosol Science and Technology*, **46** (11), pp. 1256–1270.

Schmidt-Ott, A. 2019. Spark Ablation: Building Blocks for Nanotechnology. CRC Press.

FELHŐKONDEZÁCIÓS MAGVAK MÉRETELOSZTLÁSA VÁROSI KÖRNYEZETBEN

Vörösmarty Máté^{1*}, Salma Imre¹

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Kémiai Intézet,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, *e-mail: vorosmarty.mate@ttk.elte.hu

Bevezetés

A légköri aeroszolrészecskék egyik kiemelt halmaza a felhőkondenzációs magvak (CCN). Ezek a megfelelő kémiai és fizikai tulajdonságaik miatt vízgőzzel aktiválhatók, cseppként tovább növekedhetnek, így részt vesznek a csapadékelemek képzésében és befolyásolják az aeroszol-felhő kölcsönhatást. Városi környezetben az antropogén emisszió a részecskék (és a CCN-ek) jellemzőit befolyásolja, ezért elkészítettünk egy olyan műszert, mely a CCN-ek és az aeroszolrészecskék méreteloszlását és a teljes CCN populációt képes meghatározni egyidőben.

Eredmények

A magasabb túltelítettségeken egyre több részecske aktiválódik. 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 és 1,0 %-os túltelítettségen rendre 0,5; 1,2; 1,6; 2,1 és $2,8 \times 10^3$ CCN cm^{-3} koncentrációkat mértünk. A CCN méreteloszlást 20 és 370 nm között határoztuk meg, a méreteloszlások végei a különböző túltelítettségeken azonos módon végződtek, azonban egyre kisebb részecskék aktiválódását figyeltük meg a túltelítettség növelésével. A méreteloszlások így egyre szélesebbé váltak, ezt 1–3 módusra tudtuk felbontani, melyek a városban domináns közlekedéshez kapcsolható szilárd korommagvú frakció és a diffúz városi emissziók jellemző módusaihoz köthetők. A kisebb részecskék aktiválódásával a kritikus átmérő, mely felett a cseppképződés spontán folyamat, szintén csökken: 176; 107; 86; 67 és 44 nm értékeként határoztuk ezt meg. A kémiai összetételt becsülő higroszkopicitási paraméter csökkenése miatt kijelenthető, hogy a részecskék összetételét a kis méret esetén a kevésbé aktiválható korom és szerves eredetű részecskék, nagy méretben a jobban aktiválható szerves eredetű és kémiaiag öregedett részecskék határozzák meg. Az évszakok között hangsúlyos eltérést figyeltünk meg, mind a CCN koncentrációk, mind a méreteloszlások terén.

A mérési sorban azonosítottunk néhány különlegesebb légköri eseményt is, melyek közben az átlagos tapasztalatokhoz képest jelentős eltéréseket figyeltünk meg. Tűzijáték közben a szervesen sók jelenlétét tudtuk igazolni a higroszkopicitási paraméterrel, futóverseny közben lokalizált új részecske-képződési eseményt figyeltünk meg. Az eső kimoshatja a részecskéket (és CCN-eket is), köd esetén azonban viszonylag magasabb CCN koncentrációkat kaptunk. A regionális új részecske-képződés (légköri nukleáció) ellenben csak kevésbé, késleltetve jelent meg a CCN-ek adataiban.

Így a CCN-ek vizsgálata új eszközöket ad a városi éghajlat megértéséhez, melyet az éghajlati modellekben is fel lehet használni, valamint a részecskék forrásainak megismerését is segítheti.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka megvalósítását a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (Advanced 150835), az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program és a Német Szövetségi Környezetvédelmi Alapítvány támogatta.

„Az éltető semmi tudója” – In memoriam Mészáros Ernő

1 sor kimarad

Gelencsér András^{1,2}

1 sor kimarad

¹ Pannon Egyetem, Bio- Nano- és Műszaki Kémiai Kutatóintézet,
8200 Veszprém, Egyetem u. 10., E-mail: gelencser.andras@mk.uni-pannon.hu

² HUN-REN PE Levegőkémiai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.

2 sor kimarad

Mészáros Ernő közel hét évtizedes szakmai pályáíve néhány kiemelkedő külföldi tudóssal közösen egy új, interdiszciplináris tudományág, a levegőkémia megalapításával vette kezdetét, majd annak a tudományos körökben történő elfogadtatásával és tudományos műhelyek létrehozásával folytatódott. Mészáros Ernőt az azóta Nobel-díjasokkal is büszkélkedő tudományág alapító atyjai között tartják számon, neve világszerte mind a mai napig fogalom a szakma legkiválóbb képviselői körében. Visszaemlékezései alapján „a város pereméről” érkezve, a Budai Ciszterci Gimnázium kiváló tanáraitól kapott útravalóval ellátva, más tudományokra és a kultúrára nyitott személyisége megkönnyítette számára, hogy meteorológus végzettségét a kémiai folyamatokban szerzett jártassággal fejelje meg, és az időközben a társadalom számára is felismerhetően egyre fontosabbá váló tudományterületén többszörösen is maradandót alkosson. Ő írta a világon az első tankönyvet az új tudományág, a levegőkémia alapjairól, ami angolra is lefordítva a témával foglalkozó szakemberek generációinak szemléletét formálta. A levegőszennyezés meghatározó komponensei, a kén- és a nitrogénvegyületek legköri szerepének megértése is szegényebb lenne az ő munkássága nélkül, ahogy a légköri aeroszol jelentőségének felismerése is. A tudomány művelése mellett vezetői feladatait is emberséggel és lelkiismeretesen látta el több évtizeden keresztül, legyen az a Központi Légekfizikai Intézet igazgatói, az MTA Földtudományok Osztálya osztályelnöki tisztsége, vagy az MTA-VE Levegőkémiai Kutatócsoport vezetése. Felülmúlhatatlan érdeme, hogy egymás után az Országos Meteorológiai Szolgálatnál és a Veszprémi Egyetemen is, melyek között szakmai életútját közel igazságosan megosztotta, egy-egy tudományos iskolát teremtett, melyek „gyümölcsei” több akadémikus, akadémiai doktor és számos PhD fokozatot szerzett kutató, akiknek többsége ma is a tudományterület szenvedélyes művelőinek sorát gyarapítja, néhányan már Mészáros Ernő „tudományos dédunokáiként”. Sokoldalúságának és szellemi alkotásvágyának ékes bizonyítéka késői szépirodalmi munkássága, amely önéletrajzi írásoktól regényeken át tudománytörténeti munkákig és fordításokig terjed. De legfőképpen ember volt a szó azon nemes értelmében, ami mentén az életet élni és nyomot hagyni egyedül érdemes.

A LAPAROSZKÓPOS LÉZERES SEBÉSZETI BEAVATKOZÁSOK SORÁN KELETKEZŐ AEROSZOLÓK JELLEMZÉSE – MODELLKÍSÉRLET

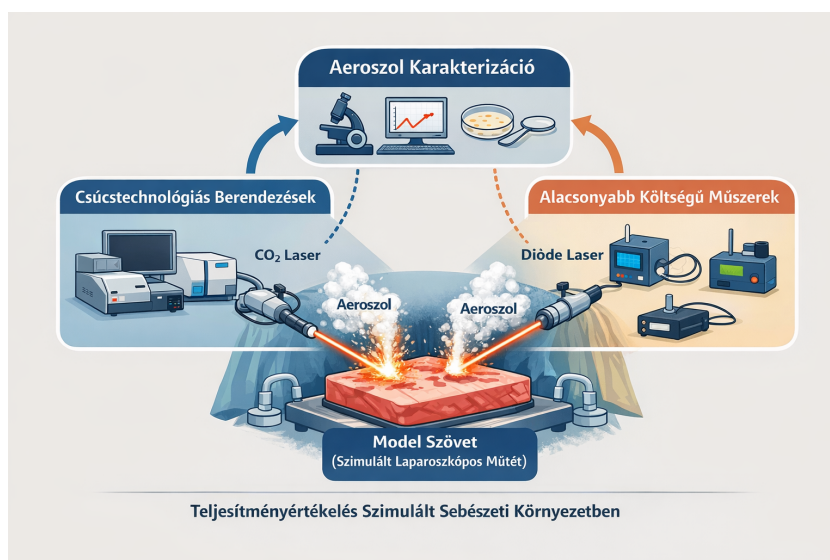
Nagy Attila¹, Kreisz Isztván², Rátkai László¹, Kocsor Laura¹ és Czitrovsky Aladár¹

¹ HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33., E-mail: nagy.attila@wigner.hun-ren.hu

² Lasram Engineering Kft.
1044 Budapest, Ezred u. 2.B2/2., E-mail: i.kreisz@lasram.hu

A lézeres műtétek során keletkező füst az egészségre veszélyes vegyi anyagokat tartalmazhat, többek között illékony szerves vegyületeket (pl. aldehideket és benzolt), poliaromás szénhidrogéneket (PAH-okat) és bioaeroszolókat (Benaim és Jaspers, 2024). Emiatt, a műtét alanya és a helyszínen tartózkodó személyzet potenciális egészségügyi kockázatoknak van kitéve, mint például légúti irritáció, rákkeltő hatás és fertőzésveszély. A pontos mérések elengedhetetlenek a kockázatértékeléshez és a megfelelő szellőzés vagy védelem megtervezéséhez. Az előadásban bemutatjuk egy modellkísérlet eredményeit, amelyben laparoszkópos műtéti körülményeket szimulálva vizsgáltuk a CO₂- és diódelézerek modellszövetekkel való kölcsönhatása során keletkező aeroszolt. A képződő aeroszol jellemzéséhez modern laboratóriumi berendezéseket és alacsonyabb költségű műszereket is használtunk, és tanulmányoztuk az utóbbiak teljesítményét ebben a környezetben. Eredményeink összhangban vannak a szakirodalomban közzétett adatokkal, ami arra utal, hogy hasonló kihívásokkal szembesülünk, mint a nyílt lézeres sebészet során, amelyeket a laparoszkópos beavatkozások sajátos körülményei tovább bonyolítanak.

Az egyik kulcskérdés, hogy az alacsony költségű szenzorok alkalmasak-e a műtőkben keletkező füst mérésére és az ebből adódó kockázatok értékelésére. Ez egy összetett, több tudományterületet érintő probléma, amely magában foglalja a fizikai mérés technikát, az egészségtudományokat és a környezetmonitorozást (1. ábra).



1. ábra. Grafikus absztrakt

Az alacsony költségű szenzorok széles körben elérhetők, és képesek különböző, a műtői környezet szempontjából releváns paraméterek mérésére. Ilyenek például a különböző méretű szálló porfrakciók (PM1.0, PM2.5, PM10), az illékony szerves vegyületek, valamint egyes

gázok, mint a szén-monoxid (CO), szén-dioxid (CO₂) és nitrogén-oxidok (NO_x). Ezek az eszközök jellemzően a részecskeméret és -koncentráció alapján határozzák meg a tömegkoncentrációt, illetve becslik a VOC-k és egyéb gázok mennyiségét.

Az ilyen szenzorok legnagyobb előnye az alacsony ár és a könnyű hozzáférhetőség. Ennek köszönhetően jól alkalmazhatók előzetes kutatásokban, illetve trendek megfigyelésére, például annak kimutatására, hogy egy adott időszakban magasabb vagy alacsonyabb a füst koncentrációja. Ugyanakkor jelentős korlátaik is vannak. Ezek közé tartozik az alacsony mérési pontosság, amely nem elegendő a klinikai szintű kockázatértékeléshez, a szenzorok közötti kölcsönhatások, amelyek torzíthatják az eredményeket, valamint az, hogy nem képesek pontosan meghatározni a jelen lévő kémiai komponenseket. További kihívást jelent a megfelelő kalibráció szükségessége (Bencs és Nagy, 2024), valamint az adott műtői környezetre szabott validálás.

A bemutatott kutatás célja egy alacsony költségű szenzorrendszer fejlesztése és alkalmazása volt, amely képes valós idejű légszennyezettségi adatok gyűjtésére egy szimulált sebészeti környezetben. A rendszer fő elemei közé tartoznak részecskeszámlálók (PM1.0, PM2.5, PM10 mérésére), többparaméteres szenzorok a VOC-k, valamint a hőmérséklet, páratartalom és nyomás mérésére, továbbá egy CO₂-érzékelő. Az adatgyűjtés 10 másodperces időközönként történt.

A mérések során vizsgáltuk a füst koncentrációjának időbeli változását, a csúcskoncentrációk megjelenését, valamint az egyes beavatkozástípusokhoz kapcsolódó légszennyezési mintázatokat. Az eredmények azt mutatták, hogy a lézeres beavatkozások során jelentősen megnő a PM2.5 és a VOC szintek koncentrációja, amelyek időnként rövid időre meghaladták az irodalomban megadott egészségügyi határértékeket. A rendszer képes volt azonosítani az aktív műtői fázist, valamint az azt követő lecsengési szakaszt is.

Az így kapott adatokat összehasonlítottuk modern laboratóriumi mérőműszerek eredményeivel. A vizsgálatok alapján az alacsony költségű rendszer alkalmas valós idejű, költséghatékony monitorozásra. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy ez a módszer nem helyettesíti a precíz laboratóriumi analitikai technikákat, például a gázkromatográfiát vagy tömegspektrometriát, amelyek szükségesek a részletes kémiai elemzéshez.

Összességében elmondható, hogy az alacsony költségű szenzorok hasznos eszközök lehetnek előzetes vizsgálatokhoz, trendek követéséhez és a füstképződés általános jellemzéséhez. Ugyanakkor nem alkalmasak arra, hogy kiváltsák a professzionális, szabványosított mérőrendszereket, amelyek elengedhetetlenek a pontos kockázatértékeléshez és a szabályozási követelmények teljesítéséhez.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alap 2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00020 számú támogatásával valósult meg.

Irodalom

- Benaim, E. H. és Jaspers, I., (2024) Surgical smoke and its components, effects, and mitigation: a contemporary review, *Toxicological Sciences*, 198 (2), 157–168
- Bencs, L. és Nagy, A., (2024) A Smoke Chamber Study on Some Low-Cost Sensors for Monitoring Size-Segregated Aerosol and Microclimatic Parameters. *Atmosphere*, 15, 304.

LÉZERES TECHNIKÁK ÉS NUMERIKUS MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA TÚLNYOMÁSOS BELÉGZŐK AEROSZOL RÉSZECSKÉINEK JELLEMZÉSÉRE ÉS LÉGÚTI KIÜLEPEDÉSÜK MEGHATÁROZÁSÁRA

Farkas Árpád¹, Nagy Attila²

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet,
1121 Budapest, Konkoly Thege Miklós út 29-33, E-mail: farkas.arpad@ek.hun-ren.hu

² HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33, E-mail: nagy.attila@wigner.hun-ren.hu

Bevezetés

Az inhalációs aeroszol gyógyszerek kulcsszerepet játszanak az asztma és a COPD kezelésében, mivel a hatóanyagot közvetlenül a légutakba juttatják. A terápia hatékonyságát azonban korlátozza, hogy az inhalátorba töltött dózisnak csak kis hányada éri el a tüdőt. A hatékonyabb gyógyszerbevitelhez elengedhetetlen az aeroszolak aerodinamikájának pontos ismerete és az optimális belégzési technika meghatározása. Jelen munka célja a Trimbrow® (a továbbiakban Trimbrow) és a Trixeo® Aerosphere® (továbbiakban Trixeo) túlnyomásos belégzők (pMDI) által kibocsátott permet jellemzése, valamint a belégzési térfogatáram depozícióra gyakorolt hatásának vizsgálata lézeres mérésekkel és számítógépes modellezéssel.

Módszer

Az emittált puff geometriai és dinamikai jellemzése

A permet legfontosabb tulajdonságait (időtartam, sebesség, kúpszög) ipari gyorskamerával határoztuk meg (Chronos, 1504 fps). Az emittált puff időtartamát automatizált képfeldolgozással határoztuk meg annak kezdeti és végső időpontjának azonosításával. A puff frontjának sebességét annak képkockánkénti elmozdulása követésével, majd egy hatványfüggvény-illesztéssel határoztuk meg. Egy Python-alapú algoritmus a háttérhez viszonyított pixelelintonzítás-eltérések alapján automatikusan azonosította a permetfrontot. A kúpszöveget félautomatikus módszerrel határoztuk meg.

Az emittált puff részecskéi méreteloszlásának meghatározása

A cseppméret-eloszlást Aerodynamic Particle Sizer (APS 3321) műszerrel mértük a 0,52–19,8 µm tartományban, 52 méretcsatornával. A mintavétel izokinetikus volt, a hígító pedig megakadályozta a részecskék mesterséges „összenövését”.

A részecskék légútitranszportjának és kiülepítésének modellezése

A depozíció becslésére hibrid modellt alkalmaztunk: a felső légutakban CFD-alapú Euler–Lagrange modellt, a mélyebb légutakban pedig egy sztochasztikus analitikus modellt. A CFD-modell háromkomponensű rendszert kezel (levegő, HFA-134a hajtógáz, cseppek), melyhez az ANSYS Fluent 2025 R1 szoftvert használtuk. A hajtógáz belépési hőmérséklete megfelelt az inhalátor szájrésztől 2,5 cm-re mért értéknek. A cseppeket 2 cm-rel a szájrész után injektáltuk a felső légúti geometriába, feltételezve, hogy ekkorra már elérték végső aerodinamikai méretüket. A kezdő sebességet és irányt a mért puff-sebesség és kúpszög alapján adták meg. Összesen 1 000 000 csepptrajektoriát számoltunk, figyelembe véve a súrlódási erőt, felhajtóerőt, nyomásgradiens-erőt, Brown-mozgást és turbulens diszperziót. A légút falai részecskecsapdaként viselkedtek, vagyis minden fallal ütköző részecske kiülepedett.

A tracheobronchiális és acináris régiókban a Koblinger–Hofmann-féle Sztochasztikus Tüdőmodell számította a impakciós, szedimentációs és diffúziós depozíciót. A szimulációk 30–120 L/min belégzési áramlási sebességre, 10 s levegőbenntartásra és 3 s kilégzésre vonatkoztak.

Eredmények

Emittált puff karakterisztikák

A spraykarakterisztikák elemzése azt mutatta, hogy a Trimbow puff időtartama 0,22 s, míg a Trixeoé csak 0,17 s. A frontsebesség a szájrész közelében (2 cm-re tőle) a Trixeo esetében nagyobb, mint a Trimbo esetében (21,9 m/s és 15,7 m/s), de gyorsan csökken és a szájrésztől távolabb (10 cm) már hasonló értékekkel jellemzett (Trimbow: 8,8 m/s, Trixeo: 5,3 m/s). A két gyógyszer puffjának kúpszöge is hasonló (Trimbow: 23°, Trixeo: 21°). A méreteloszlásokat 30, 60, 90 és 120 L/perc-es térfogatáramon határoztuk meg. Az eredmények alapján, a legkisebb térfogatáramról a 60 L/percre váltástól eltekintve, a méreteloszlások függetlenek a megszívás „erejétől” (térfogatáramtól). A két gyógyszer közötti lényeges különbség, hogy míg a Trixeo tömeg szerinti medián átmérője (MMAD) 2,4 µm, addig a Trimboé mindössze 1,2 µm, amely különböző aerodinamikai viselkedést vetít előre.

Légúti részecskekiülepedés

A két gyógyszer tüdőben kiülepedő frakciói egymáshoz hasonlóak minden térfogatáramra. Ezen értékek 30, 60, 90 és 120 L/perces térfogatáram mellett 32,1%, 39,8%, 41,2%, és 36,1% Trimbo-ra és 31,9%, 43,0%, 44,0%, és 38,9% Trixeo-ra. A tüdőn belüli lokális eloszlások azonban erősen inhalátor- és gyógyszerfüggők. Míg a Trimbow a nagy és kis légutak között közel egyenletesen ülepedett ki, addig a Trixeo esetében a centrális/perifériás arány 4,1–6,3 között változott. Ez a Trimbow kedvezőbb perifériás depozícióját jelzi, ami különösen releváns COPD-ben, ahol a kis légutak érintettek.

Következtetés

Jelen vizsgálat az első közvetlen összehasonlítás a Trimbow és a Trixeo spray gyógyszerek között egységes kísérleti és modellezési keretek mellett, több áramlási sebességen. A Trimbow kisebb MMAD-t, több extrafinom részecskét és alacsonyabb centrális/perifériás arányt mutatott, ami kedvez a perifériás légúti eloszlásnak. Összességében a vizsgálat új ismereteket szolgáltatott a hármas kombinációjú pMDI-k aerodinamikájáról. A módszertan egyúttal megbízható keretet ad a jövőbeli hasonló kutatásokhoz, és segíti az inhalációs terápia optimalizálását a megfelelő áramlási tartomány előrejelzésével.

BELTÉRI TESTMOZGÁS SORÁN AZ EGYÉNI PM_{2,5} TERHELÉS MEGHATÁROZÁSA

Kugler Szilvia¹, Nagy Attila², Kup Katica³, Varga János³, Müller Veronika³

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet, Környezetfizikai Laboratórium, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33., E-mail: kugler.szilvia@ek.hun-ren.hu

² HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Fotonika Osztály, 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

³ Semmelweis Egyetem, Pulmonológiai Klinika, 1083 Budapest, Tömő u. 25-29.

Bevezetés

Az aeroszolrészecskék finom frakciója különféle toxikus anyagokat hordozhat, amelyek képesek áthatolni a felső légutakon, és eljutni a perifériás kis légutakba, valamint az alveolusokba (Pope *et al.*, 2006). A zárt térben végzett testmozgás leggyakrabban edzőtermekben történik, amelyeket különösen városi környezetben, gyakran a kültéri légszennyezés elkerülése érdekében választanak. Ezek a létesítmények sok esetben viszonylag kis alapterületű, zárt helyiségek, amelyek nem minden esetben rendelkeznek megfelelő szellőztető- vagy légszűrő rendszerekkel. Jelen munkánk célja az volt, hogy meghatározzuk a különböző eszközök használata során jelentkező PM_{2,5}-terhelés mértékét nemek szerinti bontásban, valamint megbecsüljük az ezzel összefüggő potenciális egészségügyi kockázatokat.

Módszerek

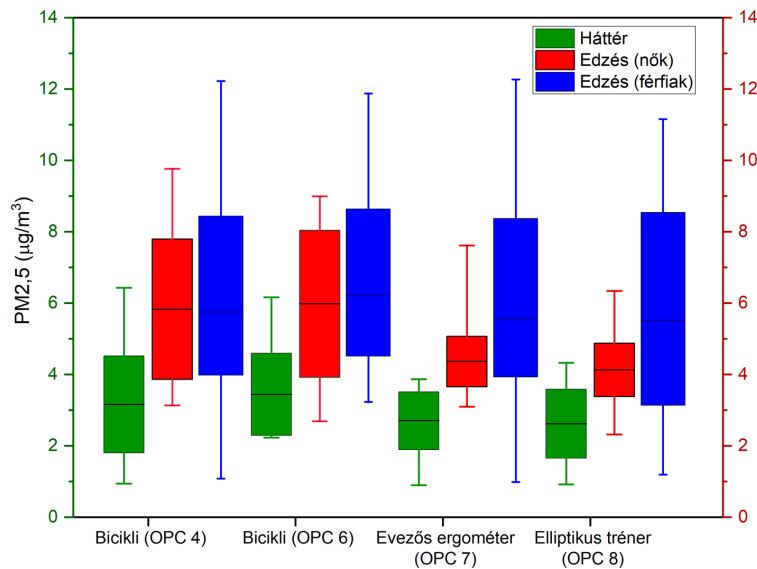
Nyolc optikai részecskeszámláló (OPC-N3, Alphasense, Essex, Egyesült Királyság) mérte a PM-tömeg koncentrációkat fejmagasságban a Semmelweis Egyetem Pulmonológiai Klinika fizioterápiás tornateremben, amely két szobabiciklivel, egy elliptikus trénerrel és egy evezős ergométerrel volt felszerelve. A háttérkoncentrációk meghatározása érdekében a helyiséget először alaposan kiszellőztettük, majd az összes nyílászárót becsuktuk, és vártunk legalább fél órát, hogy az ülepedés megtörténjen. Ezt követően négy egészséges önkéntes felnőtt (férfiak vagy nők külön csoportban) edzett az előbb felsorolt eszközökön 30 percen keresztül. A méréseket nyolc alkalommal ismételtük meg. Az 1. ábra mutatja a mérési elrendezést.



1. ábra. A tornaterem méretarányos sematikus rajza. (A számok az OPC-ket jelölik)

Eredmények

A 2. ábra szerint a testmozgások előtt a PM_{2,5} háttérkoncentrációja 3,15–3,44 ± 1,36 µg/m³ között változott. Közepes edzésintenzitás (53–96 watt) mellett a koncentrációk jelentősen megnöttek. Amikor a férfiak edzettek: evezős ergométeren 3,42 ± 1,30 µg/m³-rel és szobabiciklin 3,50 ± 1,35 µg/m³-rel nőtt a koncentráció a háttérhez képest. A nők esetében kisebb emelkedést figyeltek meg (a PM_{2,5} terhelés 1,17 ± 0,13 µg/m³ és 1,78 ± 0,69 µg/m³ között növekedett 35–60 wattos, azaz közepes edzésintenzitás mellett).



2. ábra. Az egészséges önkéntesek különböző tevékenységei során mért PM_{2,5}-koncentrációk. A dobozdiagramok az átlagértékeket és a szórásokat mutatják, a hibasávok pedig a legkisebb és legnagyobb értékeket jelzik.

Következtetések

A kerékpározáshoz kapcsolódott a legmarkánsabb PM_{2,5}-terhelésnövekedés az edzőtermi gépeken végzett munka során, különösen akkor, amikor férfiak használták az adott gépet. A zárt edzőtermekben megfigyelt magasabb PM_{2,5}-koncentráció kockázati tényezőnek minősül. A különböző edzőtermi gépek használata eltérő mértékű PM_{2,5}-növekedéssel jár. Ezzel együtt a testmozgás jótékony hatása meghaladja a megnövekedett PM_{2,5} terhelés okozta egészségügyi kockázatokat.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat (támogatási szám: SA-45/2021) és a Magyar Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal TKP2021-NKTA-46 számú kutatási pályázata finanszírozta.

Irodalom

Pope, C. A., & Dockery, D. W., 2006. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.

AMIT A DOHÁNYHEVÍTŐ TERMÉKEKRŐL EDDIG NEM TUDTUNK

D. Gáspár¹, J. Posta², Sz. Kugler³, V. Groma³, E. Papp¹, Zs. Kertész¹, Z. Szikszai¹, A. Angyal¹

¹Örökségtudományi kutatócsoport, HUN-REN Atommagkutató Intézet,
4026 Debrecen Bem tér 18/c

²DE-KK Igazságügyi Intézet Toxikológiai Laboratóriuma
4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.

³HUN-REN Központi Fizikai Kutatóintézet Energiabiztonsági Kutatócsoport
121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33

Bevezetés

Az elmúlt évtizedben a dohányzás alternatíváinak piaca jelentős mértékben bővült, amelyen belül a hevített dohánytermékek (HTP-k) a legelterjedtebb termékkategóriák közé tartoznak. Ezen termékek a dohányból hőátadás segítségével párologtatják a nikotint, elkerülve a hagyományos cigaretták használatához szükséges égést (Mallock *et al.* 2019). Jelen munka egy korábbi generációs HTP szerkezeti elemének, az IQOS HEETS lapított politejsav (PLA) főliakomponensének hőhatás alatti viselkedésére fókuszál. Ezen műanyag film a hevítő rendszer működési körülményei között oladási, majd keményedési jelenségeket mutat, továbbá termikus stabilitásával kapcsolatban korábban is merültek fel aggályok (Bechikhi *et al.* 2024).

Módszer

A hőhatásra bekövetkező változások jellemzése elsősorban szemikvantitatív, nem célzott gázkromatográfiás–tömegspektrometriás (GC–MS) megközelítéssel történt a DE-KK Igazságügyi Intézet Toxikológiai Laboratóriumában. A felületi komponensek változásainak leírására fold change (FC) alapú előtte–utána összehasonlítás szolgált, belső standard alkalmazása nélkül, az integrált csúcsterületek arányai alapján. Az eredmények értelmezését Raman-spektroszkópiai mérések egészítették ki (785 nm, 700–3200 cm⁻¹), HUN-REN Atommagkutató Intézet Örökségtudományi kutatócsoportja által. A szívóhatás során mechanikailag leváló rostos szűrőfragmentumok vizsgálatához 0,45 µm pórusméretű kvarcszűrőn gyűjtöttünk mintát. SMPS és OPC aeroszol méréseket a HUN-REN Központi Fizikai Kutatóintézet Energiabiztonsági Kutatócsoportja által végeztünk.

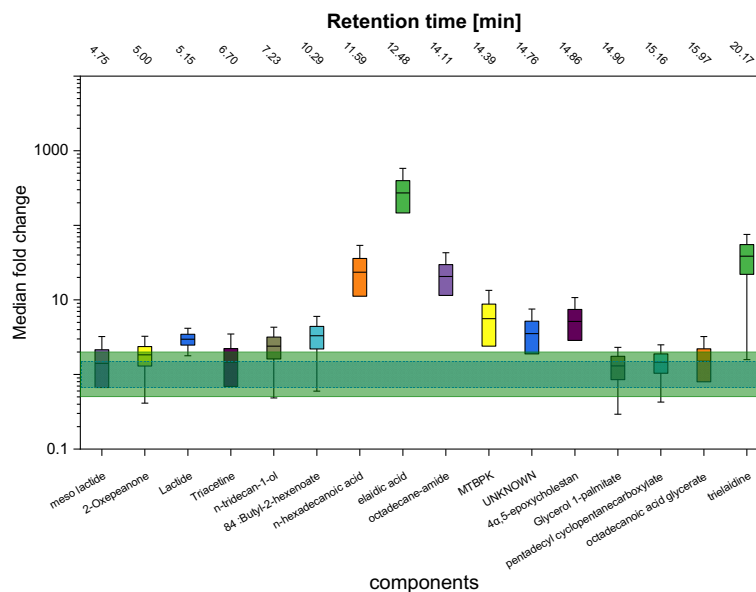
$$FC_{med} = \frac{\text{medián}(\text{csúcsterület})_{\text{hevítés-előtt}}}{\text{medián}(\text{csúcsterület})_{\text{hevítés-után}}}, \quad (1)$$

$$FC_{\text{átlag}} = \frac{\text{átlag}(\text{csúcsterület})_{\text{hevítés-előtt}}}{\text{átlag}(\text{csúcsterület})_{\text{hevítés-után}}}, \quad (2)$$

Eredmények és következtetések

A GC–MS mérések kimutatható összetételbeli változásokat mutatnak a PLA felületén. Az eredmények arra utalnak, hogy a ciklikus PLA-oligomerek a hevítési folyamat során termikus degradáción mennek keresztül, és a PLA fő láncának hasadása is bekövetkezhetett. A felületkezelő

komponensek közül az n-hexadékansav, az elaidinsav és a trieladin a hevítést követően kisebb mennyiségben volt kimutatható. A fold change megközelítés alkalmasnak bizonyult a változások irányának szemikvantitatív leírására, ahol az 1,0-nál nagyobb érték a komponens fogyását, az 1,0-nál kisebb érték pedig képződését jelzi. A Raman-spektroszkópiai eredmények ezzel összhangban a felület összetételének változását jelzik. A kvarcszűrőn 400–700 µm tipikus hosszúságú, mechanikai leválással keletkező rostos szűrőfragmentumok voltak csapdázhatóak. A cellulóz-acetát szűrőköteg egyes rostjain lokális hőkárosodásra utaló jelek jelentkeztek.



1. ábra: A műanyag felületi komponenseinek medián fold change értékei logaritmusos skálán.

A kapott eredmények eddig nem bemutatott változásokat tárnak fel a vizsgált HTP-szerkezeti elem hőhatás alatti viselkedésében. A következtethető a PLA termikus degradáció korrelál irodalmi TGA/DSC és Pyr-GC-MS mérésekkel (), és kiegészíti azokat. A felületi komponensek részleges eltávazása új információt jelenthet. Emellett a szűrőanyag cellulóz-acetát részleges dezacetileződése is felvethető mint lehetséges kémiai átalakulás. Ugyanakkor a jelentősen változó komponensek közül a hozzáférhető biztonsági adatok alapján egyik sem sorolható megbízhatóan a súlyos, inhaláció szempontjából kiemelt CLP/GHS veszélyességi osztályokba.

Köszönetnyilvánítás

Angyal Anikót (BO/00499/24/10) a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatta.

Irodalom

- Karkela et al. (2022). Comparison of 3R4F cigarette smoke and IQOS heated tobacco product aerosol emissions.
- Bechikhi et al. (2024). Tobacco conversion in electrically heated systems: effects of air and temperature on combustion onset and volatile species formation.
- Mallock et al. (2019). Heated tobacco products: current knowledge and initial assessments.

INHALÁCIÓS GYÓGYSZEREXPOZÍCIÓ VIZSGÁLATA MAGISZTRÁLIS GYÓGYSZERKÉSZÍTÉS SORÁN

Baka József¹, Papp Enikő², Angyal Anikó², Kertész Zsófia², Bácskay Ildikó¹

¹ Debreceni Egyetem, Gyógyszerésztudományi Kar, Gyógyszertechnológiai Tanszék
4002 Debrecen Rex Ferenc utca 1., E-mail: baka.jozsef@pharm.unideb.hu

² HUN-REN Atommagkutató Intézet
4026 Debrecen, Bem tér 18/c., E-mail: papp.eniko@atomki.hu

Bevezetés

A közvetlen lakossági gyógyszerellátást végző (közforgalmú) gyógyszertárakban vagy intézeti gyógyszertárakban gyógyszerész által, különböző szakmai előírások alapján, orvosi, vagy saját kezdeményezésre készülő *magisztrális gyógyszerek* az egyénre szabott gyógyszeres terápia alappillérei. Lehetőséget biztosítanak olyan hatóanyagok, hatáserőségek, gyógyszerformák alkalmazására, amelyek törzskönyvezett gyógyszerként nem elérhetőek, ugyanakkor alkalmazásuk bizonyos terápiás területeken (gyermekgyógyászat, bőrgyógyászat, időskori gyógyászat) kiemelt jelentőségű. A különböző gyógyszerformák készítése során a ható- és segédanyagok bemérése, aprítása, homogenizálása, a gyógyszerforma véglegesítése jellemzően a gyógyszerkészítő laboratórium légtérében, elszívófülkék alkalmazása nélkül történik. A gyógyszerkészítésben részt vevők kitettsége elsősorban a gyógyszeranyagok szálló porának, gőzének belégzéséből (inhalációs expozíció), valamint a gyógyszerek bőrrel való érintkezéséből (dermális expozíció) származik. Az alkalmazott alapanyagok egy része kémiai kockázatot hordoz (antibiotikumok, kortikoszteroidok, ásványi porok). Az ezekből képződő aeroszolok belégzése munkavédelmi kockázatot jelenthet, melynek vizsgálata nemzetközi szinten is alulreprezentált.

Célkitűzés:

A gyógyszerkészítés során képződő aeroszol-részecskék vizsgálata, a tömegkoncentráció meghatározása, valós expozíció számítása, ennek összevetése a munkavédelmi határértékekkel, javaslattétel az expozíció csökkentése érdekében.

Anyagok és módszerek:

Kísérleteinket a hazai gyógyszerkészítési gyakorlatban jellemző, jelentős porképződéssel járó vagy kémiai kockázatot hordozó alapanyagot tartalmazó gyógyszerek (predizolontartalmú végbélkúp, antibiotikum-tartalmú hüvelykúp, talkum-cink-oxid porkeverék, paracetamolt, acetil-szalicilsavat, koffeint tartalmazó osztott por) valós körülmények között, közforgalmú gyógyszertár laboratóriumában történő készítése során végeztük:

1. aeroszol-mintavétel kétfokozatú személyi mintavevővel a $PM_{2,5}$ és PM_{durva} tömegkoncentrációk meghatározására,
2. optikai részecskeszámláló (TSI OPS 3330) alkalmazása az aeroszol-tömegkoncentráció és részecskeméret-eloszlás időbeli változásának követésére, a koncentrációk összehasonlítása Mann-Whitney-próbával,
3. egyedi részecskeanalízis pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) és Raman-spektroszkópia alkalmazásával.

Eredmények:

A PM koncentrációk alapján meghatározott valós expozíció a talkum-cink-oxid tartalmú porkeverék, osztott por és antibiotikum tartalmú hüvelygolyó készítése esetében az expozíciós határértékekkel összevethető.

Minden vizsgált esetben a gyógyszerkészítési folyamatok jelentős aeroszolképződéssel járnak. A koncentráció a folyamat befejezését követően jelentősen csökken, ugyanakkor továbbra is magasabb marad a kiindulási szinthez képest.

Az egyedi aeroszol-részecskék SEM és Raman-spektroszkópia vizsgálata igazolta a gyógyszeranyagok jelenlétét a thoracalis frakcióban.

Diszkusszió:

Kísérleteink minden vizsgált esetben igazolták a készítők inhalációs expozícióját, mely megfelelő elszívás hiányában a gyógyszerkészítés befejeztével sem szűnik meg.

A foglalkozási talkum-, valamint antibiotikum-expozíció fokozza az allergia, a foglalkozási asztma és egyéb légzőszervi megbetegedések kockázatát (Cartier, 2021). Eredményeink további vizsgálatok és megfelelő óvintézkedések szükségességére hívják fel a figyelmet.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni kutatótársaimnak, valamint témavezetőmnek felbecsülhetetlen értékű szakmai segítségükért, támogatásukért.

A TKP2021-EGA-18 azonosítószerű számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-EGA-pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A TKP2021-EGA-19 azonosítószerű számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-EGA-pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom

Cartier A. (2021). New causes of immunologic occupational asthma 2014-2020. Current opinion in allergy and clinical immunology, 21(2), 110–113. <https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000716>

SEASONAL AND SPATIAL DYNAMICS OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN *GINKGO BILOBA* LEAVES FOR URBAN AIR POLLUTION BIOMONITORING

Semonti Mukherjee^{1,2}, Dina Bibi¹, Bianka Sipos^{1,2}, Vanda Éva Abriha-Molnár^{1,2}, László Orlóci³, Szilvia Kisvarga³, Katalin Horotán^{3,4,5}, Zsanett Istvánfi³, Viktor Oláh⁶, Béla Tóthmérész⁷, Tibor Magura^{1,2}, Edina Simon^{1,2}

1 Department of Ecology, University of Debrecen, H-4032 Debrecen, Hungary

2 HUN-REN-UD Anthropocene Ecology Research Group, University of Debrecen, H-4032 Debrecen, Hungary

3 Ornamental Plant and Green System Management Research Group, Institute of Landscape Architecture, Urban Planning and Garden Art, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, H-1223 Budapest, Hungary

4 Institute of Biology, Eszterházy Károly Catholic University, 3300 Eger, Hungary

5 Doctoral School of Plant Sciences, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences (MATE), 1223 Budapest, Hungary

6 Department of Botany, University of Debrecen, H-4032 Debrecen, Hungary

7 HUN-REN-UD Functional and Restoration Ecology Research Group, University of Debrecen, H-4032 Debrecen, Hungary

Existing limitations in biomonitoring highlight the need for more integrated approaches that link air exposure, particle deposition, and plant physiological response. Leaves are particularly suitable for this purpose because they form the interface between the atmosphere and plant tissues, where they trap particles and absorb gaseous pollutants over time, thereby reflecting cumulative exposure. This study examines seasonal changes in photosynthetic pigment concentrations in *Ginkgo biloba* leaves from July to October in an urban environment in Debrecen City, Hungary, to evaluate its suitability for urban air pollution biomonitoring. This study explores spatial and temporal changes in photosynthetic pigment concentrations in *G. biloba* leaves and integrates them into a new bioindicator index, the Pigment Integrity-to-Dust Ratio (PIDR), to assess urban air pollution stress on trees in Budapest, Hungary. Photosynthetic pigments, such as chlorophyll a (Chl a), chlorophyll b (Chl b), carotenoids, pheophytin concentration, and the Air Pollution Tolerance Index (APTI), were analyzed in relation to seasonal changes and environmental stress associated with urbanisation. We demonstrated that *G. biloba* was a good bioindicator of air pollution, as it was categorized as a sensitive species based on its APTI values. We found higher chlorophyll concentrations in summer than in autumn. During early summer, the highest concentrations of chlorophyll and carotenoids indicate peak pigment integrity and minimal stress at the control site. Reduced chlorophyll concentrations and higher pheophytin formation were seen in the leaves obtained from the high-traffic area, while variable pigment responses were seen in the area with moderate traffic. Our results demonstrated that PIDR is a reliable indicator of physiological stress, based on pigment concentration changes and deposited dust concentration.

Keywords: bioindicator species; photosynthetic pigments; chlorophyll; carotenoids; pheophytin; APTI; PIDR

A LEVEGŐMINŐSÉG BIOINDIKÁLÁSA BUSZMEGÁLLÓKBA TELEPÍTETT *HEDERA HELIX* L. VIZSGÁLATÁVAL

Sipos Bianka^{1,2}, Abriha-Molnár Vanda Éva^{1,2}, Bibi Dina¹, Mukherjee Semonti¹
és Simon Edina^{1,2}

¹ Debreceni Egyetem, Biológiai és Ökológiai Intézet, Ökológiai Tanszék,
4032 Debrecen, Egyetem tér 1. E-mail: sipos.bianka@science.unideb.hu

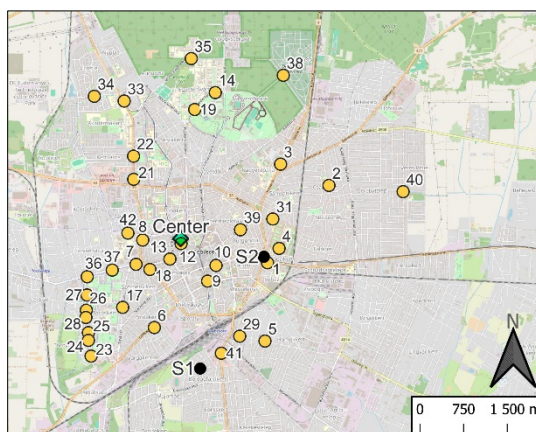
² HUN-REN-DE Antropocén Ökológia Kutatócsoport,
4032 Debrecen, Egyetem tér 1.

Bevezetés

A légszennyezés a városi területek egyik legjelentősebb környezeti problémája, különösen a közlekedésből származó finom és ultrafinom részecskék miatt, amelyek gyakran meghaladják a határértékeket. Kutatásunk során 12 hónapon keresztül vizsgáltuk a közönséges borostyán (*Hedera helix* L.) érzékenységét a légszennyezéssel szemben, a növény élettani paramétereinek, valamint a levélfelületen ülepedett por mennyiségének elemzésével. Célunk a városi levegőszennyezés térbeli és szezonális mintázatainak feltárása volt Debrecenben. A *H. helix* vertikális zöldfelületek részeként potenciálisan eltérő módon járulhat hozzá a részecskék megkötéséhez, mint a hagyományosan alkalmazott fák és cserjék.

Anyag és módszer

A mintavétel Debrecen 36 busz- és villamosmegállójánál, acélhálóra futtatott borostyánfalakról történt (1. ábra), míg kontrollterületként egy városi hatásoktól kevésbé terhelt terület szolgált. A mintagyűjtést 2023. július és 2024. június között, havi rendszerességgel végeztük, alkalmanként 15 azonos fejlettségű levél gyűjtésével mintavételi pontonként.



1. ábra. A vizsgált megállók térbeli elhelyezkedése

A levélfelületen lerakódott por mennyiségét és a relatív víztartalmat gravimetriás módszerrel, a klorofilltartalmat fotometriás, az aszkorbinsavtartalmat titrimetriás eljárással, míg a pH-értéket műszeresen, vizes kivonatból határoztuk meg. A mért paraméterek alapján légszennyezettségi tolerancia indexet (Air Pollution Tolerance Index, APTI) számoltunk a Singh és Rao (1983) kidolgozott képlete alapján, az általuk használt eredeti jelölésekkel:

$$\text{APTI} = [A \times (T + P) + R] / 10, \quad (1)$$

ahol A az aszkorbinsav, T az összklorofilltartalom, P a pH, R a relatív víztartalom.

A paraméterek eredményei alapján számszerűsíteni kívántuk az évszakok és a különböző városrészek közötti szennyezettségbeli különbséget. A vizsgált paraméterek (levélfelületi por, pigmenttartalom, aszkorbinsavtartalom, relatív víztartalom, pH és APTI) térbeli és szezonális különbségeit kétutas varianciaanalízissel (ANOVA) értékeltük, a kontrollterülettől való eltéréseket Dunnett-tesztel vizsgáltuk. A mért élettani paraméterek, valamint a városközponttól való távolság és levélméret közötti összefüggéseket korreláció- és regresszióanalízissel elemeztük, míg a szezonális mintázatok és a változók közötti kapcsolatok feltárására főkomponens-analízist (PCA) alkalmaztunk.

Eredmények és következtetések

Szignifikáns különbségeket mutattunk ki a levélfelületi por, valamint a klorofill-, karotinoid- és aszkorbinsav-tartalom esetében a vizsgált helyszínek és évszakok között. A porfelhalmozódás minden évszakban, különösen télen volt magasabb a kontrollhoz képest. A klorofill tavasszal, nyáron és ősszel, a karotinoidok ősszel, télen és tavasszal, míg az aszkorbinsav főként tavasszal mutatott szignifikáns eltérést.

A városközponttól való távolsággal a por-, klorofill- és karotinoidtartalom csökkent, míg az aszkorbinsav-tartalom télen nőtt. A levélméret minden évszakban negatívan, gyengén korrelált a pormennyiséggel.

A PCA egyértelmű szezonális mintázatot mutatott, az első két főkomponens minden esetben a variancia több mint felét magyarázta. A klorofill és karotinoid együtt csoportosult, míg a por, relatív víztartalom és aszkorbinsav viszonya évszakonként változott.

Az APTI értékek több városi helyszínen eltértek a kontrolltól, leginkább télen, amikor a legmagasabb értékeket kaptuk. Az APTI minden évszakban az „érzékeny” kategóriába esett (6,6–12,0). A nyári és őszi értékek nem különböztek egymástól, azonban szignifikánsan eltértek a téli és tavaszi értékektől, amelyek szintén nem mutattak különbséget egymás között.

Eredményeink alapján a városi környezeti tényezők, különösen a részecsketerhelés, jelentősen befolyásolják a levelek biokémiai jellemzőit és szezonálisan eltérő növényi választ váltanak ki. A *H. helix* érzékenysége korlátozza szennyezéstűrő fajként való alkalmazását, ugyanakkor alkalmassá teszi biomonitorozásra, így ígéretes modell a városi levegőminőség térbeli és szezonális vizsgálatára, bár további kutatások szükségesek.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24-3-II kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Irodalom

Singh, S. K., Rao, D. N., 1983. Evaluation of plants for their tolerance to air pollution. In: Symposium on Air Pollution Control. 218–224.

EFFECT OF URBANIZATION ON TERRESTRIAL ECOSYSTEM IN EUROPE (VIENNA) AND IN ASIA (PAKISTAN)

Dina Bibi^a, Dávid Tózsér^a, Bianka Sipos^{a,b}, Vanda Éva Molnár^b, Béla Tóthmérész^c, Edina Simon^{a,b}

¹ Department of Ecology, Faculty of Sciences and Technology, University of Debrecen, H-4032 Debrecen, Egyetem square 1., Hungary

² HUN-REN-UD Biodiversity and Ecosystem Services Research Group, H-4032 Debrecen, Egyetem square 1., Hungary

³ HUN-REN-UD Anthropocene Ecology Research Group, H-4032 Debrecen, Egyetem square 1., Hungary [*bibi.dina@science.unideb.hu](mailto:bibi.dina@science.unideb.hu)

Urbanization significantly influences air, soil and environmental quality through increased anthropogenic activities. In our study we studied the effects of urbanization on air pollution with using tree leaves. Sensitivity of *Acer platanoides*, *Fraxinus excelsior* and *Quercus robur* were examined using the Air Pollution Tolerance Index (APTI) and leaf heavy metal concentrations along an urbanization gradient in Vienna, Austria in our first study. The air pollution sensitivity index (APTI) of these tree species was determined by measuring the relative water content, ascorbic acid content, and chlorophyll content, as well as the pH of the leaf extract. In our second study metal accumulation in the soil and leaves of the neem tree (*Azadirachta indica*) was studied in Faisalabad, Pakistan with using bioaccumulation factor (BAF). We found significant difference among species in their relative water content, pH, and content of ascorbic acid and chlorophyll. Additionally, we found significant differences in chlorophyll content and pH based on sampling site. The highest chlorophyll content was found in *A. platanoides*. Based on APTI values, *A. platanoides*, *F. excelsior* and *Q. robur* are sensitive indicators of air pollution; thus, they are useful bioindicator species, and they are suitable for air pollution monitoring. In case of Faisalabad a significant difference was found along the urbanization gradient on the plant leaves except for Cd, Cu, and Zn; a high level of pollution was measured for Ba, Pb, Co, Ni, Cr, and Cd in the urban area. We also calculated the bioaccumulation factor (BAF), but no clear pattern was found. Our findings show that high concentrations in soil do not always turn into higher plant uptake for plants. Overall, the findings emphasize the effectiveness of soil and plant elemental analysis, along with pollution indices, as reliable tools for assessing environmental contamination in urban ecosystems.

Keywords: Urbanization, Air Pollution Tolerance Index (APTI), Heavy metals, Plant Leaves, Bioindicators, Bioaccumulation factor

ANOMÁLISAN GYORSAN VÁLTOZÓ RÉSZECSKESZÁM MÉRETELOSZLÁS ÉS A DUNAI HAJÓFORGALOM KAPCSOLATÁNAK SZÁMÍTÓGÉPES ELEMZÉSE

Rohonczy János* és Salma Imre

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Kémiai Intézet,
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A,
*E-mail: janos.rohonczy@ttk.elte.hu

Bevezetés

A BpART Laboratórium 15. éve folyamatosan méri és elemzi az ELTE Lágymányosi Kampuszában elhelyezett DMPS berendezéssel a budapesti dunaparti levegő légszennyezettségét. A 6-1000 nm mérettartományban 17 csatornában detektáljuk a részecskeszám méreteloszlásokat. Egy mérési ciklus kb. 8 percig tart. Az eloszlások időbeli változásának követésével következtetni lehet a forrásokra.

Jellegzetes lefutása van például a néhány órás időtartamú regionális és lokalizált nukleációs eseményeknek, amikről a légköri banán atlasz munkában referáltunk. Az akkumulációs módusban általában időben hosszabban elnyúló események jellemzők. A hirtelen változások a légkör meteorológia állapotának gyors megváltozásával hozhatók kapcsolatba.

Jelen munkánkban azokra a környezetétől eltérő, hirtelen megnövekedett koncentrációjú események eredetének a felderítésére teszünk kísérletet, melyek egy mérési cikluson belül lépnek fel, majd a méreteloszlás visszatér a korábbi alakra. Ezek a rövid idejű *spriccelések* leginkább az Aitken- és az akkumulációs módusban detektálhatók. A mérési fluktuációhoz vagy esetleges hibához kapcsolódó észlelést egy független, csak totálkoncentrációt mérő CPC másodperces időfelbontású adataival történő összevetéssel szűrjük ki.

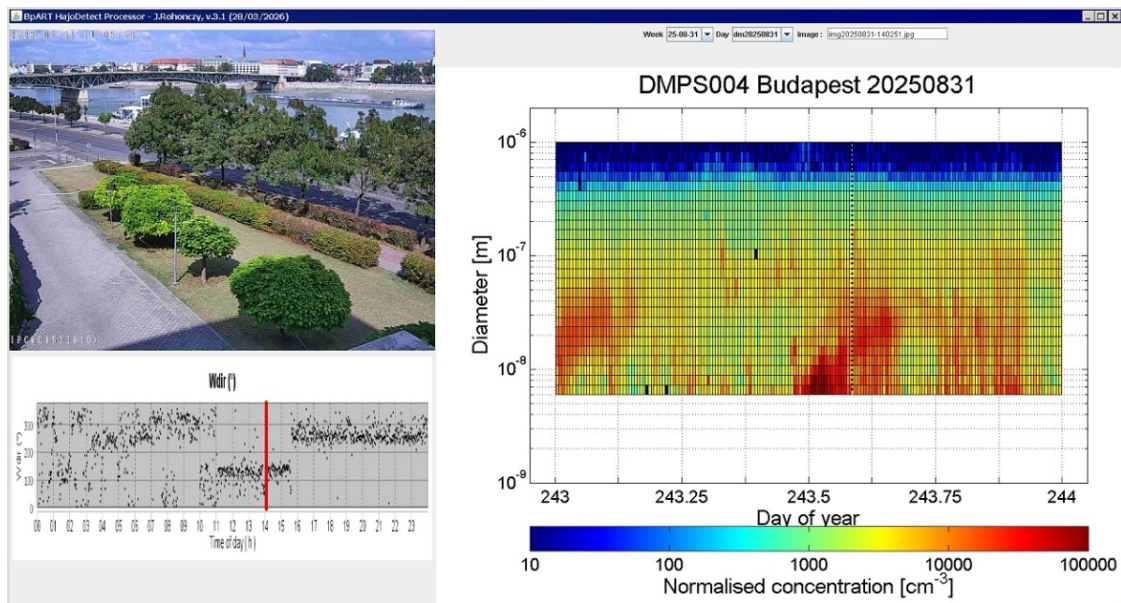
A tényleges események egyik gyanítható oka lehet a közeli Dunán közlekedő, bizonyos típusú hajók füstgáz emissziója. A Duna közelebbi partja kb. 100 m-re, a sodorvonala 260 m-re esik a mérőállomástól. A hajók áthaladási ideje több percet vesz igénybe és intenzív kibocsátást jelenthet, szemben a rakparton haladó közúti gépjárművek sokkal gyorsabb haladási sebességével és várhatóan kisebb intenzitású emissziójával.

Ennek felderítéséhez a dunai hajóforgalomról fényképeket gyűjtünk három másodperces mintavétellel. A képek megjelenítésére egy *opencv* könyvtárat felhasználó, *Java* nyelvű programot készítettünk. A program a DMPS 24 órás méreteloszlási térképén interaktív módon kijelölt időponthoz megjeleníti a Dunát ábrázoló képet, valamint egy 24 órás grafikonon az aktuális szélirányt is (1. ábra). Vízszintes kurzormozgatással lehetőség van az időtengely mentén előre-hátra mozogni. Gombnyomással rögzíthető a részecsketilövés és a hajó mint forrás áthaladásának az ideje.

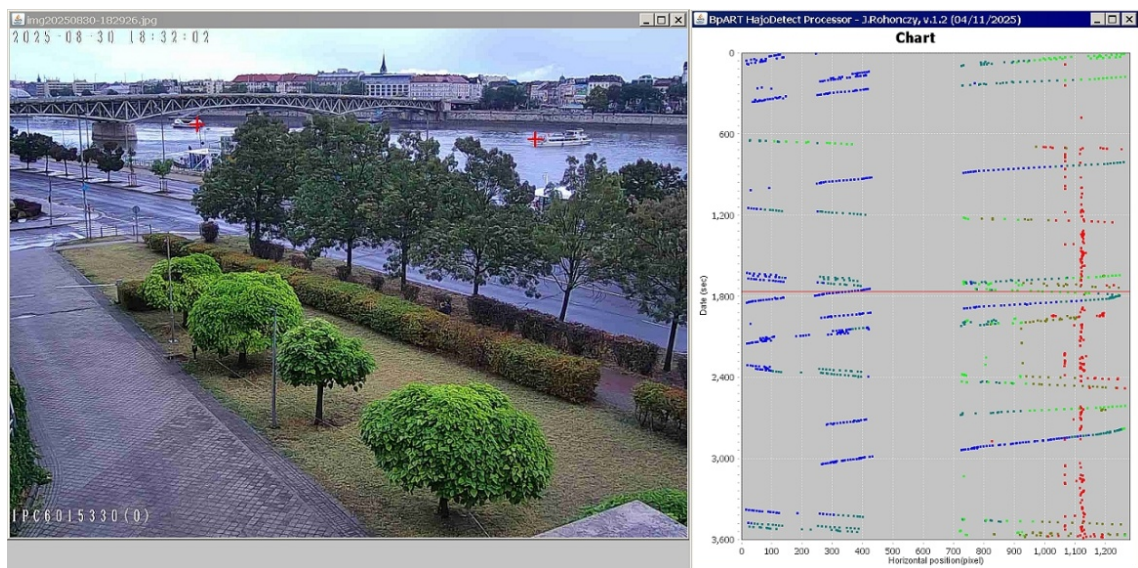
A hajómozgások automatikus nyomonkövetésére kifejlesztettünk egy másik, ugyancsak *opencv* és *Java* alapú programot. Ez a program automatikusan felismeri a Dunán haladó vízijárműveket a fényképek alapján, majd felrajzolja az objektum mozgásának az idődiagramját pozícióval és időponttal (2. ábra). Ezt a diagramot használjuk fel a hajómozgás és az anomális részecskekoncentráció korrelációjának a felderítésére.

További tennivalónk lesz az elmúlt félév ilyen detektálásainknak a szisztematikus kiértékelése, aminek alapján statisztikai elemzést készítünk.

Ábrák



1. ábra. Motoros uszály áthaladása 2025-08-31-én 14:03-kor a 1644 fkm-nél, a BpART mérőállomás előtt.



2. ábra. Két turistahajó mozgása a Dunán 2025-08-30-án 18:32 körül a 1644 fkm-nél, a BpART mérőállomás előtt (bal kép). A grafikonon (jobb ábra) színes pontok az adott órában detektált hajópozíciókat mutatják (kék pont bal part közeli, zöld pont jobb part közeli hajó). A piros vonal y koordinátája a vizsgált időpontot, míg a vonalon levő pontok a megtalált hajókat jelzik. Ezeket a fotón piros keresztet jelölik.

POR A LÉGKÖRBE, BIZONYTALANSÁG AZ ENERGIÁBAN: A SZAHARAI POR HATÁSA A FOTOVOLTAIKUS TERMELÉSRE

Rostási Ágnes¹, Gresina Fruzsina², Gelencsér András¹, Csávicz Adrienn² és Varga György^{1,2}

¹ Levegőkémia Kutatócsoport, Bio - nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet, Pannon Egyetem, Veszprém, 8200 Veszprém, Egyetem utca 10. E-mail: rostasi.agnes@mk.uni-pannon.hu

² HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont 1112 Budapest, Budaörsi út 45. E-mail: varga.gyorgy@csfk.org

Az európai energiarendszerekben a fotovoltaikus termelés gyors növekedése egyre nagyobb érzékenységet eredményez. A napsugárzás térbeli és időbeli változékonyságát nemcsak a felhőzet, hanem a légköri aeroszolok is meghatározzák, amelyek közül a Szaharából származó ásványi por kiemelt jelentőségű. Az utóbbi években a mediterrán térséget elérő poresemények gyakorisága és intenzitása növekedett, ami közvetlenül és közvetetten is befolyásolja a napelemes rendszerek teljesítményét. A kutatás célja a szaharai eredetű poresemények és a fotovoltaikus villamosenergia-termelés közötti összefüggések feltárása, valamint annak vizsgálata volt, hogy e jelenségek miként tükröződnek a termelési előrejelzések pontosságában. Az elemzés a 2019–2023 közötti időszakra terjed ki, Portugália, Spanyolország, Franciaország, Olaszország és Görögország adataira támaszkodva. A fotovoltaikus termelési és napelőrejelzési idősorok az ENTSO-E Transparency Platform adatbázisából származnak, amelyeket a nemzeti rendszerirányítók biztosítanak. Ezeket nagy időbeli felbontású légköri adatokkal egészítettük ki: a NASA MERRA-2 reanalíziséből származó sugárzási, felhőzeti és porterhelési paraméterekkel, a Copernicus CAMS rendszer globálsugárzásra vonatkozó komponenseivel, valamint MODIS és VIIRS műholdas megfigyelésekből nyert felhőborítottsági, cirrus-reflektancia- és felhőtető-hőmérsékleti adatokkal.

A poresemények hatása a vizsgált országokban markáns és konzisztens. A megnövekedett légköri porterhelés mellett a fotovoltaikus termelés jelentős visszaesést mutat, amely átlagosan több tíz százalékos nagyságrendű, egyes esetekben a termelés a potenciális maximum felére csökken. A kapcsolat monoton jellegű: a porterhelés növekedésével párhuzamosan a termelési hatékonyság csökken, ami regionális különbségek mellett is egységes mintázatot rajzol ki. A sugárzáscsökkenés mechanizmusa nem korlátozódik a por közvetlen optikai hatására. A részecskék jelenléte elősegíti a magas szintű felhőképződést, különösen a cirrus felhők kialakulását, amelyek nagyobb reflektivitásuk révén tovább csökkentik a felszínre jutó sugárzást. A két folyamat együttesen érvényesül: a direkt sugárzáscsillapítás és a felhőfizikai visszacsatolás egymást erősítve vezet a termelés csökkenéséhez. Az elemzések alapján a legerősebb hatás akkor jelentkezik, amikor a nagy porterhelés és a kiterjedt cirrus felhőzet egy időben van jelen. A menetrendezési adatok különbözők a vizsgált régiókban, de közös jellemző, hogy a poreseményekhez kapcsolódó folyamatokat nem kezelik megfelelően. Egyes országokban a modellek rendszeresen alulbecsülik, máshol túlbecsülik a tényleges termelést, ami arra utal, hogy az aeroszol–felhő kölcsönhatások jelenleg nem vagy csak erősen leegyszerűsítve jelennek meg az operatív előrejelzésekben. Ez a bizonytalanság különösen problémás nagy napelemes részarány mellett, ahol a termelési hibák közvetlen hatással vannak a rendszerirányításra.

Az időbeli bontás azt mutatja, hogy a poresemények hatása nem egyenletes az év során. A téli és tavaszi hónapokban a termelésesökkenés kifejezettebb, ami részben a szinoptikus helyzetek gyakoriságával, részben a napsugárzás geometriai feltételeivel magyarázható. A részletes esettanulmányok alapján a nagyléptékű légköri áramlási mintázatok – például ciklonokhoz kapcsolódó déli áramlások vagy blokkoló helyzetek – kulcsszerepet játszanak a por Európába jutásában és a kapcsolódó felhőzeti viszonyok kialakulásában. A vizsgálat rámutat arra, hogy a saharai por nemcsak lokális légszennyezési kérdés, hanem az energetikai rendszerek működését is befolyásoló tényező, melynek kezelése a jövőben elsősorban a légköri megfigyelések és az előrejelző modellek fejlesztésén keresztül válhat hatékonyabbá, különösen az aeroszolok és a felhők közötti kölcsönhatások részletesebb leírásával.

A kutatást a TKP2021-NKTA-21 és RRF-2.3.1-21-2021 projektek és a Magyar Tudományos Akadémia Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Programja (FFT NP FTA) támogatta.

Irodalom:

Varga Gy., Gresina F., Gelencsér A., Csávic A. Rostási Á. (2026) The shadow of the wind: the impact of Saharan dust on photovoltaic power generation in the Mediterranean. Renewable Energy 256, Part F, 124337, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124337>

A RESZUSZPENDÁLT VÁROSI AEROSZOL KÉMIAI JELLEMZÉSE ÉS LEHETSÉGES BIOLÓGIAI HATÁSAI

Varga Flóra Judit¹, Kakasi Balázs^{1,2}, Hopotószki Erik¹, Hoffer András^{1,2}, Gelencsér András^{1,2}, Jancsek-Turóczi Beatrix^{1,2}

¹ Pannon Egyetem, Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet, Levegőkémiai Kutatócsoport

8200 Veszprém, Egyetem utca 10., E-mail: varga.flora.judit@mk.uni-pannon.hu

² HUN-REN-PE Levegőkémiai Kutatócsoport

8200 Veszprém, Egyetem utca 10., E-mail: jancsek-turoczi.beatrix@mk.uni-pannon.hu

Bevezetés

Napjainkban a levegőminőség állandó probléma, hiszen a levegőben jelenlévő szennyezőanyagok közvetlen és közvetett módon is befolyásolják az emberi egészséget. Az Európai Unió levegőminőségi irányelvei (2008/50/EC) alapján a városokban kialakult levegőszennyezettség egyik legveszélyesebb alkotója a 10 µm-nél kisebb aerodinamikai átmérővel rendelkező aeroszol részecskék (PM₁₀), melyek a tüdőbe kerülve súlyos légzőszervi, valamint szív- és érrendszeri megbetegedéseket okoznak. A városi PM₁₀ aeroszol tömegkoncentrációjához a reszuszpendálható por hozzájárulása akár 30 % is lehet, mivel az utakra kiülepedett részecskék a mozgó gépjárművek és a szél hatására könnyen felverődnek (Pant *et al.*, 2017).

A különböző forrásokból származó légköri aeroszol részecskék számos mérgező, rákkeltő, mutagén és teratogén összetevőt tartalmaznak, például policiklusos aromás szénhidrogéneket (PAH) és nehézfémeket (Zn, Mn, Pb és Cu). A levegőszennyezettség és a különböző megbetegedések közötti összefüggéseket vizsgáló tanulmányok megállapították, hogy a PM₁₀ frakcióba tartozó részecskék nagy fajlagos felületük és magas reaktivitásuk miatt fokozott biológiai aktivitást mutatnak. Ennek eredményeként belégzésük esetén súlyos légúti, szív- és érrendszeri betegségeket okozhatnak (Losacco and Perillo, 2018). Ezen ismeretek ellenére továbbra is jelentős bizonytalanság övezi a PM₁₀ lehetséges káros humán egészségügyi hatásait, valamint az expozícióból eredő fiziológiai változások mögött meghúzódó sejtméchanizmusokat.

Anyag és módszer

Kutatásunk során építkezési- és bontási munkálatok környezetében (50–300 méteres távolságban) útfelszínről gyűjtött porminták belélegezhető frakciójának biológiai hatásait vizsgáltuk humán tüdő (BEAS-2B) sejtvonalon. A cito- és genotoxikológiai tesztek elvégzéséhez az egyes mintákat három koncentrációban (50, 150 és 300 µg ml⁻¹) vizsgáltuk. Az élő és elhalt sejtarányt áramlási citometriával határoztuk meg propidium-jodid és Hoechst33342 fluoreszcens festék kombinációjával, a sejtek viabilitását (életképességét) pedig a metabolikus aktivitáson alapuló MTT-tesztel vizsgáltuk. A genotoxikológiai hatásokat a DNS fragmentáció kimutatására alkalmas Comet-tesztel értékeltük.

Eredmények

Az áramlási citometriás mérés és az MTT teszt eredményeit tekintve megállapítottuk, hogy a sejtek életképessége minden minta esetében dóziszfüggő mértékben csökkent, továbbá két

reszuszpendált porminta is jelentős cito- és genotoxikus hatást mutatott 300 µg ml⁻¹ koncentrációban. A vizsgált mintákkal kapcsolatban megállapítottuk, hogy az építkezési – és bontási munkálatoktól távolabb gyűjtött minták fokozott egészségügyi kockázatot jelenthetnek a kombinált források (építkezés és közlekedés) jelenléte miatt. Az eredmények egyértelműen rávilágítanak a reszuszpendált porok inhalációjában rejlő jelentős egészségügyi kockázatokra, a levont következtetések pedig alátámasztják a téma fontosságát és aktualitását.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) és a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatta.

Irodalom

- Losacco, C., Perillo, A., 2018. Environmental Science and Pollution Research 25, 33901–33910.
- Pant, P., Shi, Z., Pope, F.D., Harrison, R.M., 2017. Aerosol Air Qual. Res. 17, 117–130.

KOMPLEX LEVEGŐMINŐSÉG ELEMZŐ RENDSZER „ATMOSENSE”

Sallai Edina Angéla¹, Kertesi Csongor², Gógh Zsolt² és Szalisznyó Ferenc³

¹ Környezetvédelmi technikus, E-mail: sallaiedina16@gmail.com

² BMSZC Petrik Lajos Két Tanítási Nyelvű Technikum
1146 Budapest, Thököly út 48-54, E-mail: csongor@kertesi.hu, zsgogh@gmail.com

³ Környezetmérnök, E-mail: szali.ferenc@gmail.com

Bevezetés

A szilárd aeroszokok nagypontosságú azonosítására létrehozott mobil levegőminőség-mérő rendszerünk nemcsak a szállópor mennyiségét detektálja, hanem mesterséges intelligenciával elemzi annak összetételét is. Frekvenciált kibocsátók környezetében így pontosan azonosítja a legveszélyesebb részecskéket, azok forrását, illetve elterjedését is. Rugalmas, sűrű hálózatban alkalmazható megoldás, amely új szintű, adatvezérelt átláthatóságot teremt.

Fejlesztésünk eszköz-, és módszertani innováció együttes kapcsolatát jelenti. Már meglévő, szabványos, hitelesített elemeket kapcsol össze egy folyamatba annak érdekében, hogy egy adott terület levegőminőségi értékelése szakmailag helytálló, az ott élők számára egyben hiteles és megnyugtató legyen.

Mérőállomás fejlesztése

Mérőállomásaink alapja a Német Mérnöki Kamara által szabványosított Sigma-2 passzív pormintavevő (VDI 2119:2013). A szállópor légköri mintavételezésére optimálisan kialakított ülepítő az általunk létrehozott állomáson kettős funkciót tölt be. Az egyik ülepítő tubusban az eredeti funkció szerint kialakított tényleges passzív mintavételezés történik, amelynek végső célja a porszemcsék minőségi elemzése, a kérdéses veszélyes alkotók százalékos meghatározása. A jelenlévő másik ülepítő tubust a légáram szempontjából átjárhatóvá tettük, ebbe Sensirion SEN50-SDN-T, gyárilag kalibrált, lézeres szenzort, és egy megfelelő mikrovezérlőt építettünk be szintén szabványos módon. Az így előállított mérőház folyamatos, jelen idejű adatkövetésre alkalmas eszköz.

Mobil, könnyen telepíthető kialakítást terveztünk. A szakértői vélemény megalkotásához 4-5 ilyen optimálisan kihelyezett állomás megfelelő adatszolgáltatást képes biztosítani. Kibocsátók közvetlen környezetében az állomáshálózat véglegesítése a monitoring rendszer alapját nyújthatja.

MI alapú minőségi szemcseanalízis

A minőségi értékelés lehetőségét több, különböző ülepítő felület használatával teremtjük meg. Az elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz szénszalagos, a fénymikroszkópos elemzésekhez speciális üveglemezek használata szükséges. A mintavételezés kéthetes intervallumokban történik.

Munkánk korábbi stádiumában az útfelületeken képződő mikroméretű gumialapú aggregátumok azonosítása járt sikerrel. A gumidarálék karakteres morfológiája lehetőséget adott akár a fénymikroszkópos, akár a lézermikroszkópos azonosításra, ez vezetett az MI általi nagypontosságú, sikeres osztályozásra. A mikro-aggregátumok gumi alapanyaga Raman

spektroszkópia által, a felületükön megtapadó nehézfém elemek SEM-EDX vizsgálatokkal váltak igazolhatóvá.

Az akkumulátorbontás során keletkező nehézfémkomplexum az un. „blackpowder” aeroszolkok minőségi analízisének módszertani kidolgozása is elindult.

Az AERMOD levegődiszperziós modellező rendszer beépítése

Rendszerünk szerves eleme az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) által kifejlesztett AERMOD levegődiszperziós modellező program alkalmazása is. A mérőállomásaink segítségével felállított monitoring rendszer adatai, egész éves időjárás, domborzati, épületállomány és egyéb adatok beépítésével igen pontos képet kaphatunk egy konkrét terület szélsőséges esetekben várható légszennyezetségi állapotáról, illetve annak területi eloszlásáról. Morfológiailag tagolt mintaterületen tesztelve – Budapest, M3 bevezetőszakasz, lakóövezeti terület – meggyőződhattünk a modell igen jó felbontóképességéről. Célunk, hogy a Magyar Mérnöki Kamara vizsgálati eredményeinkre alapozva az ajánlott státuszon változtatva kötelezővé tegye ennek a programnak használatát.

Modellterületeink, mintaprojektjeink

Háromhónapnyi összehasonlító méréssel rendelkezőnk karakteresen eltérő nagyvárosi területekről. Az M3-as autópálya budapesti bevezető szakaszának lakótelepi övezetében teszteltük először mennyiségi mérőeszközünket, illetve az AERMOD szoftver felbontási képességét. Féléves belső és külső eredményssal rendelkezőnk a bátonyterenyi SungEel HiTech akkumulátorbontó üzem területén.

Üzletfejlesztés

2025 elején a Nemzeti Innovációs Ügynökség IMPULSE, kisvállalkozóknak meghirdetett programjában alap üzleti fejlesztésben, míg 2025 novembere és 2026 februárja között a Kék Bolygó Alapítvány .wave akcelerációs programjában vettünk részt. A NIÜ értékelése szerint a fejlesztési fázisban lévő projektekre vonatkozó Technology Readiness Level (TRL) 9 fokozatú skáláján már a 6-os értékelési szintet értük el.

Elismeréseink

2025-ben projektünk az OTDK különdíját, valamint az Országos Tudományos és Innovációs Olimpia II. helyezését érte el. Egyetlen középiskolai projektként résztvevői lehettünk az I. innOTDK döntőjének, ahol közönségdíjat nyertünk. 2026-ban elnyertük a Foxconn cég Jövő Innovátora Díját, illetve Kertesi Csongor bekerült Magyarország TOP20 ifjú innovátora közé.

Köszönetnyilvánítás

A BMSZC Petrik Technikum által elindított projektben elengedhetetlen segítséget nyújtottak a BME VIK Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszéke, Holczbauer Tamás (HUN-REN TTK), Veres Miklós (HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont), Migh Ede (HUN-REN Szegedi Biológiai Kutatóközpont), Jakab András (Jakab és Társai Kft.), a SungEel HiTech Hungary Kft. tulajdonosa, a Budapest Közút Zrt., az UNITEF83 Zrt., munkatársai, a Compact Nature Kft. vezetősége, valamint Nagy Dénes (.wave project manager).

A PM_{2.5}/PM₁₀ ARÁNY ELEMZÉSE MAGYARORSZÁGON MÉRÉSEK ÉS CAMS ADATOK ALAPJÁN

Vértesi-Nagy Anita

HungaroMet Nonprofit Zrt.
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., E-mail: toth.a@met.hu

Bevezetés

A durva (PM_{2.5-10}) és a finom (PM_{2.5}) részecskék eltérő fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek. A PM_{2.5}/PM₁₀ arány vizsgálata fontos kiegészítő információt nyújthat az aeroszol-szennyezettség eredetéről (Ilieva és Metodiev, 2023). Az alacsonyabb PM_{2.5}/PM₁₀ arány azt jelzi, hogy a szennyezés főként természetes források aktivitásának köszönhető, míg a magas PM_{2.5}/PM₁₀ arány az emberi eredetű szennyeződés túlsúlyát igazolja (Fan *et al.*, 2021). Magyar mérési adatok és a CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) modellezett adatai alapján elemezzük a PM_{2.5}/PM₁₀ arányok időbeli változását. Az arányok vizsgálata lehetővé teszi az aeroszol-szennyezés jellegének és összetételének pontosabb meghatározását. Továbbá az eredmények hozzájárulnak annak megértéséhez, hogy a különböző típusú aeroszol-szennyeződések milyen mértékben és módon módosítják a légköri napsugárzást, ami lényeges a napenergia-potenciál és a légköri szennyezettség közötti kölcsönhatások átfogó elemzéséhez.

Felhasznált adatok

A PM_{2.5}/PM₁₀ arányok elemzését a 2022–2025 időszakra vonatkozóan végezzük el. A PM₁₀ és PM_{2.5} mérési adatokat a HungaroMet Légszennyezettségi Adatközpont Osztálya bocsátotta a rendelkezésünkre. A vizsgált időszakban 57 mérőállomás szolgáltatott órás PM₁₀ és/vagy PM_{2.5} adatokat.

A modellezett PM₁₀ és PM_{2.5} adatokat a CAMS központi adattáráról, az ADS-ről (Atmosphere Data Store) töltjük le. 2022 és 2023 évekre validált európai reanalízis adatok, 2024-re és 2025-re pedig köztes európai reanalízis adatok érhetők el az ADS-en. A vizsgálathoz az ensemble modellt használjuk fel. Adott állomás modellezett koncentráció idősorának előállításához leválogatjuk a közel 10 km-es horizontális felbontású, felszíni modell adatokból a mérőállomásokhoz legközelebb eső rácscella koncentrációit.

A statisztikai elemzések használata előtt fontos megvizsgálni, hogy a felhasznált adatok teljessége megfelelő-e. Az adott év órás adataira vonatkozóan azt követeltük meg, hogy a mérőállomás legalább 75%-os rendelkezésre állással rendelkezzen. A modelleredmények kiértékelését is elvégezzük, hogy lássuk, milyen pontosan közelíti a modell a mért koncentrációkat. A modell teljesítményét a főbb statisztikai mutatók (BIAS, RMSE, R) számításával, valamint a FAIRMODE által javasolt teljesítményértékelési módszertan alapján készített target diagram segítségével értékeljük. A 2022-es évre vonatkozó statisztikai mutatók átlagos értékei az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat. Átlagos BIAS, RMSE és R értékek 2022-es adatok alapján

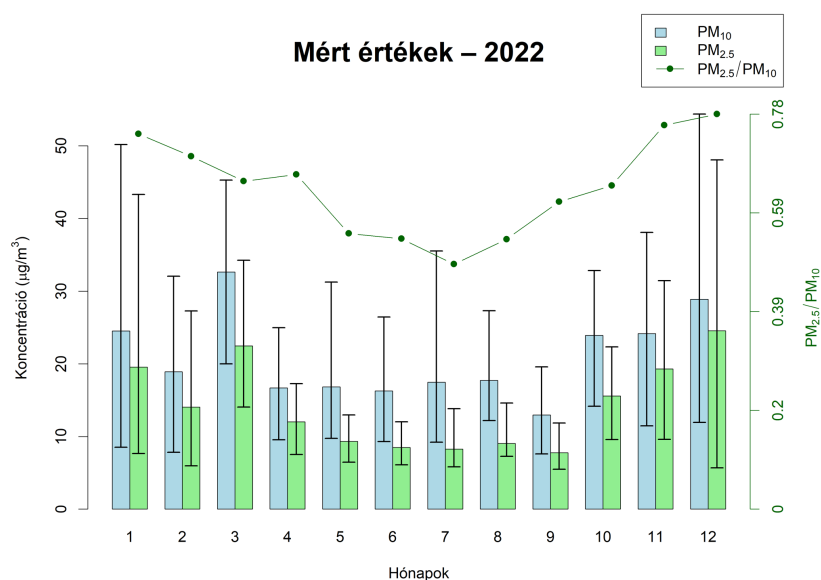
| | BIAS | RMSE | R |
|-------------------|-------|-------|------|
| PM ₁₀ | -2.40 | 11.19 | 0.64 |
| PM _{2.5} | -0.30 | 7.34 | 0.72 |

Eredmények

A $PM_{2.5}/PM_{10}$ arányok elemzése során először havi meneteket számítunk, hogy feltérképezzük az arány tipikus alakulását az év során. Az 1. ábrán a 2022-es mért adatok szerepelnek. A kék oszlopok a PM_{10} , a zöld oszlopok a $PM_{2.5}$ havi koncentrációk átlagát jelentik meg, a kapcsolódó fekete vonal a havi átlagok minimumát és maximumát jelölik. A sötétzöld vonal a mért $PM_{2.5}/PM_{10}$ arányok havi átlagát jeleníti meg.

Megvizsgáljuk, hogy a speciális meteorológiai helyzetekben (sivatagi poros események, téli ködös időszakok), milyen tipikus $PM_{2.5}/PM_{10}$ arányok figyelhetők meg az állomásokon. A vizsgálatot kiterjesztjük modellezett adatokra is, hogy összehasonlíthassuk a tényleges mérések és az előrejelzések közötti egyezést. Ez segíthet annak megítélésében, hogy az előrejelzésekből számított arány mennyire lehet hasznos az energiaipari döntéshozatalban, vagy a légszennyezéshez kapcsolódó intézkedések tervezésében.

Az elemzés kiterjed az évek közötti változások vizsgálatára is, ezzel a hosszútávú trendeket és a helyi különbségeket tudjuk tanulmányozni.



1. ábra. A PM_{10} és $PM_{2.5}$ mérések havi átlagának alakulása a mérőállomásokon, valamint a $PM_{2.5}/PM_{10}$ arányok havi átlaga 2022-re

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a CAMS National Collaboration Program (CAMS2_72HU_bis) támogatta.

Irodalom

Fan, H., Zhao, C., Yang, Y., Yang, X., 2021. Spatio-Temporal variations of the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratios and its application to air pollution type classification in China. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.692440>

Ilieva, N., Metodiev, V., 2023. Analysis of measured $PM_{2.5}$ concentrations and method for determining their origin. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 58(5), 937–944. <https://doi.org/10.59957/jctm.v58i5.130>

A PM SZABÁLYOZÁS VÁLTOZÁSA AZ ÚJ LEVEGŐMINŐSÉGI IRÁNYELV TÜKRÉBEN

Varga Judit

HungaroMet Nonprofit Zrt.
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., e-mail: varga.j@met.hu

Bevezetés

Az Európai Unió levegőminőségi céljai az emberi egészség védelmét szolgálják. Mivel a részecskeszennyezettség a légszennyező anyagok között is kiemelkedő egészségkárosító hatással bír, így csökkentése elsődleges feladat. Ennek megfelelően a levegőminőségi irányelv 2024-ben elfogadott átdolgozása ((EU) 2024/2881, továbbiakban AQD) számos szigorítást tartalmaz a részecske (PM₁₀, PM_{2,5}, UFP) szabályozásban. Az új követelmények egy része, melyek teljesítése kihívást jelent, felkeltheti a tudományos közösség érdeklődését.

Irányelvi változások

Az AQD irányelv szigorítja a **levegőminőségi mérésekkel** kapcsolatos követelményeket, mellyel nemcsak a mérőpontok szükséges számát növeli, de a mérendő anyagok körét is bővíti. Kötelezővé teszi például az ultrafinom részecskék (UFP) mérését, melyet hazánkban legalább 4 ponton kell majd végezni. Megfigyelési szuperhelyszíneket vezet be, ahol a nagyszámú komponens körében az UFP koncentrációját és méreteloszlását is mérni kell, de mérésre javasolt a PM oxidatív potenciálja is. Módosulnak a mérőpontok kis- és nagyléptékű elhelyezésének kritériumai, az áthelyezés szabályai.

A **levegőminőség értékelése** során szigorodó vagy új előírásokat vezet be mind az emberi egészség védelme érdekében meghatározott határértékek (1. táblázat), mind a szmogriadó küszöbértékek vonatkozásában.

1. táblázat. Egészségi PM_{2,5} és PM₁₀ határértékek a jelenlegi hazai, EU közösségi és az AQD szabályozásban, valamint az Egészségügyi Világszervezet (WHO) ajánlásai

| | 24 órás | | | | éves | | | |
|-------------------|---------|---------|---------|--------|------|----|-----|-----|
| | HU | EU | AQD | WHO | HU | EU | AQD | WHO |
| PM _{2,5} | - | - | 25 (18) | 15 (3) | 25 | 25 | 10 | 5 |
| PM ₁₀ | 50 (35) | 50 (35) | 45 (18) | 45 (3) | 40 | 40 | 20 | 15 |

Új területi alapra helyezi az átlagos expozíciócsökkentési kötelezettségeket, ezzel felveti a hazai szabályozás egyéb elemeinek (pl. a levegőminőségi zónarendszernek) módosítását és kihat a **levegőminőség kezelésére**, melynek bizonyos vonatkozásai is bemutatásra kerülnek majd.

Irodalom

AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2024/2881 IRÁNYELVE (2024. október 23.) a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról (átdolgozás)

A JÖVŐBELI ÉGHAJLATI ÉS KIBOCSÁTÁSI VÁLTOZÁSOK HATÁSA A PM-KONCENTRÁCIÓ ALAKULÁSÁRA MAGYARORSZÁGON

Ferenczi Zita¹, Vértesi-Nagy Anita¹ és Varga-Balogh Adrienn¹

¹ HungaroMet Nonprofit Zrt.
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1., E-mail: ferenczi.z@met.hu

Bevezetés

A szennyező anyagok helyi és regionális eloszlását jelentősen befolyásolják az időjárási és a kibocsátási térbeli mintázatok. Éppen ezért, ha szeretnénk megérteni, hogyan változhat a levegő minősége a jövőben a klímaváltozás hatására, modellekre van szükség. Több kutatás is foglalkozott már ezzel a kérdéssel és elsősorban regionális léptékű modellekkel elemezték az éghajlatváltozás levegőminőségre gyakorolt hatását. A modellek szerint a 21. század közepéig a változások még viszonylag mérsékelték (Juda-Rezler *et al.* 2012), azonban a század végére jelentős nyári ózon növekedés (Meleux *et al.* 2007) valamint a PM₁₀ éves átlagának csökkenése várható Közép- és Kelet-Európában (Juda-Rezler *et al.* 2012).

Az eredmények hangsúlyozzák, hogy az antropogén kibocsátások változása nagyobb hatással van a levegőminőségre, mint maga a klímaváltozás, kivéve például PM₁₀ esetében, ahol a távoli területekről érkező transzport hatása is jelentős lehet (Cholakian *et al.* 2019). A nyári ózonszintek Európában várhatóan jelentősen emelkedni fognak, ami növeli az egészségügyi és ökológiai kockázatokat. Összességében a klímaváltozás és a kibocsátások együttes hatását figyelembe kell venni a jövőbeli levegőminőség-szabályozásban.

Modell beállítások

Az éghajlatváltozás levegőminőségre gyakorolt várható hatásának vizsgálatához a CHIMERE kémiai transzport modellt alkalmaztuk. Ez egy korszerű, több európai országban is széles körben használt eszköz levegőminőségi elemzésekhez. A modell számítási tartománya a teljes Kárpát-medencére kiterjedt, 10 km-es térbeli felbontással.

A kísérletek során a jelenlegi állapotot egy 5 éves időszak (2006–2010) szimulációjával jellemeztük, míg a jövőbeli viszonyok vizsgálatához a modellt a 2021–2050 közötti időszakra futtattuk le, az erre az időszakra vonatkozó kibocsátási projekciók figyelembevételével. A referenciaidőszak antropogén eredetű kibocsátási adatai a 2005-re vonatkozó EMEP adatbázisból származnak. A 2021–2050 közötti időszak esetében a pesszimistább, úgynevezett Baseline projekciót használtuk.

A CHIMERE működéséhez meteorológiai bemenő adatok is szükségesek: a referenciaidőszakra vonatkozóan és a jövőbeli szimulációkhoz is az ALADIN Climate modell adatait használtuk fel. A kémiai értelemben vett kezdeti és peremfeltételek ugyancsak megegyeztek a jelenkori és a projekció-alapú szimulációk esetében.

Modell validálás

Első lépésként azt vizsgáltuk meg, hogy a modell milyen megbízhatósággal képes reprodukálni a levegőminőség állapotát Magyarországon. Ennek érdekében a 2006–2010 közötti időszakra elvégzett modellszimulációkat hasonlítottuk össze a tényleges mérési adatokkal. Ez az ellenőrzés alapvető jelentőségű, mivel a jövőre vonatkozó becslések csak akkor tekinthetők hitelesnek, ha a modell a múltbeli viszonyokat is megfelelően írta le.

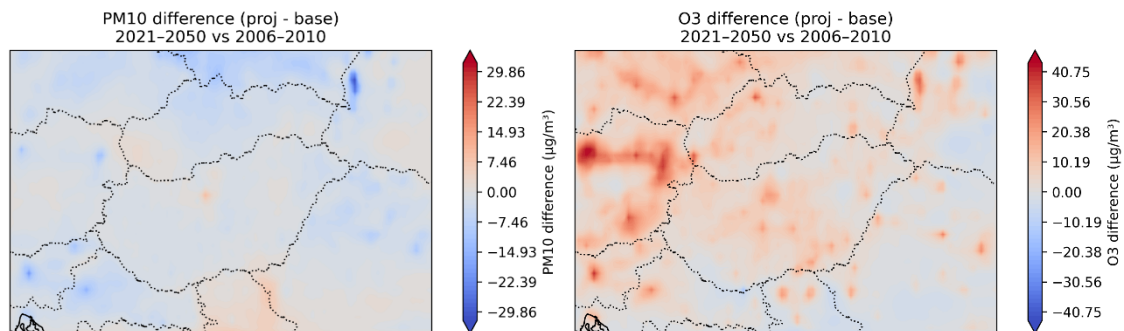
A validáció eredményei alapján a modell jól visszaadta az egyes légszennyezők általános tendenciáit, ugyanakkor az abszolút értékek tekintetében eltérések mutatkoznak. Az ózon koncentrációját például hajlamos a modell túlbecsülni, különösen a nyári időszakban, míg a PM₁₀ szintjét inkább alulbecsli, főként télen. Ez azt jelenti, hogy a modell használható, de az eredmények értelmezésekor ezeket az eltéréseket figyelembe kell venni.

Eredmények

A modell validálása után a jövőre vonatkozó szimulációkat is elvégeztük, amelyek a 2021 és 2050 közötti időszakot fedik le. Az eredmények alapján a legtöbb szennyezőanyag esetében javulás várható, ami elsősorban a kibocsátáscsökkentési intézkedéseknek köszönhető. Ez kedvező fejlemény, és azt mutatja, hogy a környezetvédelmi szabályozásoknak valóban van hatása.

Ugyanakkor nem minden szennyezőanyag viselkedik ugyanígy. Az ózon koncentrációja a jövőben várhatóan növekedni fog, amely összhangban van a klímaváltozás hatásaival. A hőmérséklet várható emelkedése felgyorsítja az ózonképződést a gyorsabb fotokémiai reakciók következtében.

A vizsgálatok arra is rávilágítottak, hogy a változások nem egyformán érintik az ország minden részét. Vannak területek, ahol jelentősebb javulás várható, míg máshol bizonyos szempontból romolhat a helyzet. Különösen a növényzetet érő ózonterhelés esetében figyelhetők meg kedvezőtlenebb tendenciák egyes térségekben.



1. ábra. A PM₁₀ és az ózon koncentrációban várható változás 2021-2050 időszakra a 2006-2010 referencia időszakhoz képest

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az RRF-2.3.1-21-2022-00014 Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium az Éghajlatváltozásért projekt támogatásával valósult meg.

Irodalom

- Cholakian, A., Colette, A., Coll, I., Ciarelli, G., & Beekmann, M. (2019). Future climatic drivers and their effect on PM 10 components in Europe and the Mediterranean Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(7), 4459-4484.
- Juda-Rezler, K., Reizer, M., Huszar, P., Krüger, B. C., Zanis, P., Syrakov, D., ... & Halenka, T. (2012). Modelling the effects of climate change on air quality over Central and Eastern Europe: concept, evaluation and projections. *Climate Research*, 53, 179-203.
- Meleux, Frederik, Fabien Solmon, and Filippo Giorgi. "Increase in summer European ozone amounts due to climate change." *Atmospheric environment* 41.35 (2007): 7577-7587.

PM MONITORING RENDSZER ADATÉRTÉKELÉSI TAPASZTALATAI A HUNGAI RY PROJEKT 5 ÉVES ADATSORAI ALAPJÁN

Uramné Dr. Lantai Katalin

Miskolc MJV Önkormányzat HungAIRy LIFE IP projekt
3525 Miskolc, Városház tér 8., E-mail: katalin.uranne@miskolc.hu

A LIFE HungAIRy 8 évig futó projekt az egyik legjelentősebb környezetvédelmi probléma megoldását, a levegőminőség javítását célozza 8 régiót lefedve 10 magyar településen, köztük Miskolcon is.

A HungAIRy-projektben Miskolc Megyei Jogú Város Önkormányzata a Miskolci Egyetemmel együttműködésben, pilot akció keretén belül 2021. évben 60 helyen telepített mérőegységeket városszerte, majd 2024. évben 10 mérőegységet a környező településekre helyezett át. A mérőegységekbe beépített szenzorok a levegőben lévő szilárd részecskék – a köznyelvben szállópor – mennyiségének mérésére alkalmasak. A mért adatokat a <https://pmmonitoring.hu/> weboldalon és pmmonitoring applikációban bárki nyomon követheti. A felületen közérthető módon, emoji jelzik az aktuális levegőminőséget. Ezen felül az érdeklődő egészség- és életmódtanácsokat is kaphat a levegőszennyezés megelőzéséhez, vagy az ahhoz történő alkalmazkodáshoz kapcsolódóan. A rendszert egyre többen használják, a lakosság és a közigazgatás részéről több pozitív visszajelzés is érkezett.

A mérőhálózat eddigi eredményei jól mutatják, hogy Miskolcon a légszennyezésért elsősorban a helytelenül alkalmazott szilárd tüzelés a felelős. Az éves adatsorok értékelésénél figyelembe vettük a jelenleg hatályos jogszabályban foglalt határértékek betartását, de a WHO 2021. évi ajánlásában szereplő szigorúbb értékekre is elvégeztük az elemzést. Négy teljes év adatsora áll jelenleg rendelkezésre, melyek alapján már megalapozottan kiszűrhetők a város azon pontjai, ahol intenzívebb beavatkozás, hatékonyabb szemléletformálás szükséges.

Külön diagramban jelenítjük meg az átlagkoncentráció változást havi bontásban, továbbá az egészségügyi határérték és a tájékoztatási, riasztási küszöbérték túllépések számát. Képviselői körzetek szerint is értékeljük a PM szennyezettségi helyzetet, így a városvezetők és a képviselők figyelmét felhívhatjuk a gócpontokra, rávilágíthatunk a problémás területekre.

A környező települések esetében 1 teljes év adatsora áll rendelkezésre. Az értékelés alapján azt vizsgáljuk, hogy az ott kialakuló légszennyezettség mennyire tér el a miskolcitolól illetve gyakorolhat-e hatást a város levegőminőségére.

A város teljes területét áttekintő térkép segítségével elemezhetők az egyes terjedési folyamatok. Ugyanezt a célt szolgálja a 24 órás változást megjelenítő videó is, melyen a kritikus lakossági tüzelési időszakok jól nyomon követhetőek.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a közhiedelemmel ellentétben a város levegőminősége folyamatosan javul és a PM szennyezettségi tendenciák kedvezően alakulnak.

ATMOSPHERIC BANANA ATLAS

Imre Salma^{1,*}, Máté Vörösmarty¹, János Rohonczy¹, Tamás Weidinger²

¹ Eötvös Loránd University, Institute of Chemistry, * E-mail: salma.imre@ttk.elte.hu

² Eötvös Loránd University, Department of Meteorology

Introduction

Urban areas exhibit complex atmospheric compositions and dynamic processes that distinguish them from the surrounding rural regions. These unique conditions also lead to greater variability in the temporal evolution of particle number size distributions. Consequently, urban studies that typify regional new aerosol particle formation and growth (NPF&G) and consider generalised source-related factors can provide valuable insights into the development of NPF&G. Urban processes are inherently more complex and, therefore, more challenging to interpret as well.

Results and discussion

We systematically categorised and characterised the NPF&G events observed over 13 years (Y1–Y13) at the Budapest platform for Research and Training (BpART) Laboratory. Utilising the conventional (visual) classification decision schema (Dal Maso et al., 2005), we identified 949 days with NPF&G (21% of all relevant days), 3369 days with no event (74%), and 210 undefined days (4.6%). The share of the quantifiable (class 1A) days within all NPF&G days was 66%. The measured data in the relevant midday time period were missing on 1.1% of all days. There were no measurements performed on the remaining 3.5% of all days.

The quantifiable NPF&G processes were grouped into distinct types based on their characteristic patterns in particle number size distribution contour plots and the time series of environmental properties (Salma et al., 2025). The latter group included a) particle number concentrations in the diameter ranges 6–25, 100–1000 and 6–1000 nm; b) condensation sink for vapour molecules, proxy for atmospheric concentrations of photochemically produced H₂SO₄ molecules and H₂SO₄ dimers, c) air temperature, relative humidity, absolute humidity and global solar radiation; d) wind direction and speed both on the site where the aerosol measurements are made and above rooftop level; and e) particle volume size distributions.

Six regional-scale banana plot types with narrow onset (with a relative occurrence frequency of 46%), broad onset (37%), arch shape (8%), double onset (6%), tandem growth (3 cases) and nocturnal occurrence (2 cases) were identified. Their median formation rate J_6 and growth rate GR_{10} were $4.9 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ and 6.7 nm h^{-1} , respectively.

Here, increasing attention is being given to two localised types: one exhibiting multiple, but underdeveloped banana shapes, and another with diverse angulate structures, both being limited in time. The latter group can take triangular or shark-fin-like shapes, rectangular shapes and various irregular shapes. Strong sources are thought to be present, while the spatial extent is likely governed by sharp horizontal gradients in precursor chemicals and vapours. They typically occurred on 7% of days, and produced high (up to $60 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) ultrafine particle number concentrations. Regional and localised processes can happen on the same day.

When analysing the relationship between the J_6 and GR_{10} , a set of 46 extreme data pairs was separated in the form of a data cloud (Fig. 1). The isolated pairs were related to localised NPF&G, mostly with shark-fin or triangle (angulate) shapes. The subset was characterised by median J_6 and GR_{10} of $22 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ and 8.9 nm h^{-1} .

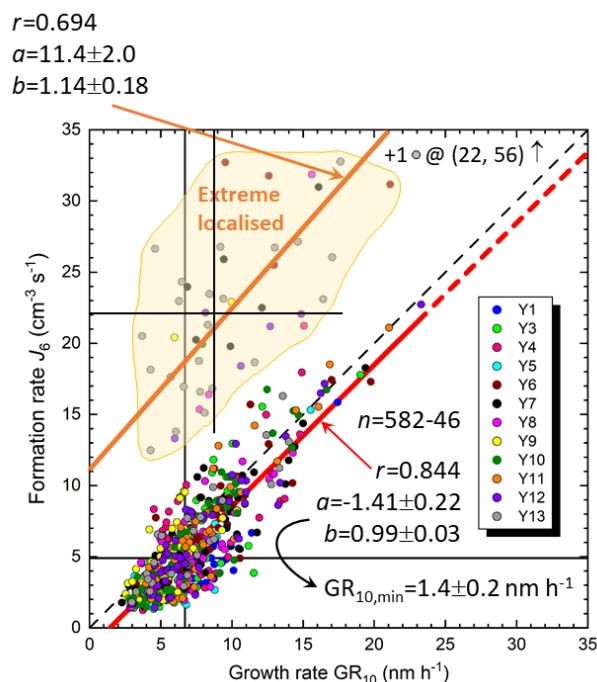


Figure 1. Regression lines between J_6 and GR_{10} for the regional (red) and extreme localised (orange) NPF&G in the urban background over 12 measurement years. Median J_6 and GR_{10} are indicated by horizontal and vertical black lines for the two subsets. The number of the data pairs (n), coefficients of correlation (r); intercepts (a) and slopes (b) of the regression lines with SDs are also shown. The dashed line marks the 1:1 line for comparative purposes.

The structure and variability of NPF&G processes provide valuable insights into the underlying chemical, physical and meteorological mechanisms including atmospheric mixing and transport-related effects. Our findings highlight the need to extend current NPF&G identification and classification frameworks by incorporating an additional step to distinguish localised events from regional processes. The recently introduced nanoparticle ranking analysis offers a potentially more objective and different approach for a complementary characterisation (Aliaga et al., 2023), which will be performed on our data in the future.

Acknowledgement

This study was funded by the Hungarian Research, Development and Innovation Office (Advanced 150835).

References

- Dal Maso, M., Kulmala, M., Riipinen, I., Wagner, R., Hussein, T., Aalto, P. P., Lehtinen, K. E. J.: Formation and growth of fresh atmospheric aerosols: eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland, *Boreal Environ. Res.*, 10, 323–336, 2005.
- Salma, I., Weidinger, T., Rohonczy, J., Vörösmarty, M.: Types of regional and localised new aerosol particle formation and growth processes: Atmospheric Banana Atlas, *npj Clim. Atmos. Sci.*, 8, 261, 2025.
- Aliaga, D., Tuovinen, S., Zhang, T., Lampilahti, J., Li, X., Ahonen, L., Kokkonen, T., Nieminen, T., Hakala, S., Paasonen, P., Bianchi, F., Worsnop, D., Kerminen, V.-M., Kulmala, M.: Nanoparticle ranking analysis: determining new particle formation event occurrence and intensity based on the concentration spectrum of formed (sub-5 nm) particles, *AR*, 1, 81–92, 2023.

A DEBRECENI KÖRNYEZETI ELLENŐRZŐ RENDSZER LEVEGŐMINŐSÉG-MONITORING HÁLÓZATÁNAK BEMUTATÁSA ÉS ELSŐ EREDMÉNYEI

Kertész Zsófia¹, Bán Sándor¹, Molnár Mihály¹, Angyal Anikó¹, Balázs Krisztina¹, Baranyai Edina², Baráth Balázs Áron^{1,3,4}, Furu Enikő¹, Gáspár Dávid¹, Lakatos Csilla⁵, Nagy Lajos⁵, Papp Enikő¹, Sajtos Zsófi², Víg Ildikó¹, Kéki Sándor⁵

¹ HUN-REN Atommagkutató Intézet,

4026 Debrecen, Bem tér 18/c, E-mail: zsofi@atomki.hu

² Debreceni Egyetem TTK Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék Környezetanalitikai Kutatócsoport, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1.

³ Környezettudományi Doktori Iskola, ELTE, 1117 Budapest

⁴ Isotoptech Zrt., 4026 Debrecen,

⁵ Debreceni Egyetem TTK Alkalmazott Kémiai Tanszék, 4032 Debrecen, Egyetem tér 1.

Bevezetés

A gyors ütemű ipari fejlődés egyre nagyobb nyomást gyakorol a városi környezetre, és fokozza a helyi lakosság körében a környezeti kockázatokkal kapcsolatos aggodalmakat. Erre válaszul hozta létre Debrecen Városa a Debreceni Környezetellenőrző Rendszer (KER)-t együttműködésben többek között a Debreceni Egyetemmel és az Atommagkutató Intézettel. A tudományos alapokon nyugvó, független monitoring rendszer 16 komplex mérőállomással és 2 felszíni vízvizsgáló ponttal fedi le a város teljes közigazgatási területét, lakóövezetektől az erdős területeken át az iparterületekig beleértve a szomszédos Mikepércset is. A KER állomások folyamatosan gyűjtik az adatokat a levegő, a víz, a talaj, a zaj és a biodiverzitás állapotáról.

A KER levegőminőség-monitoring rendszere több egymást kiegészítő elemből épül fel:

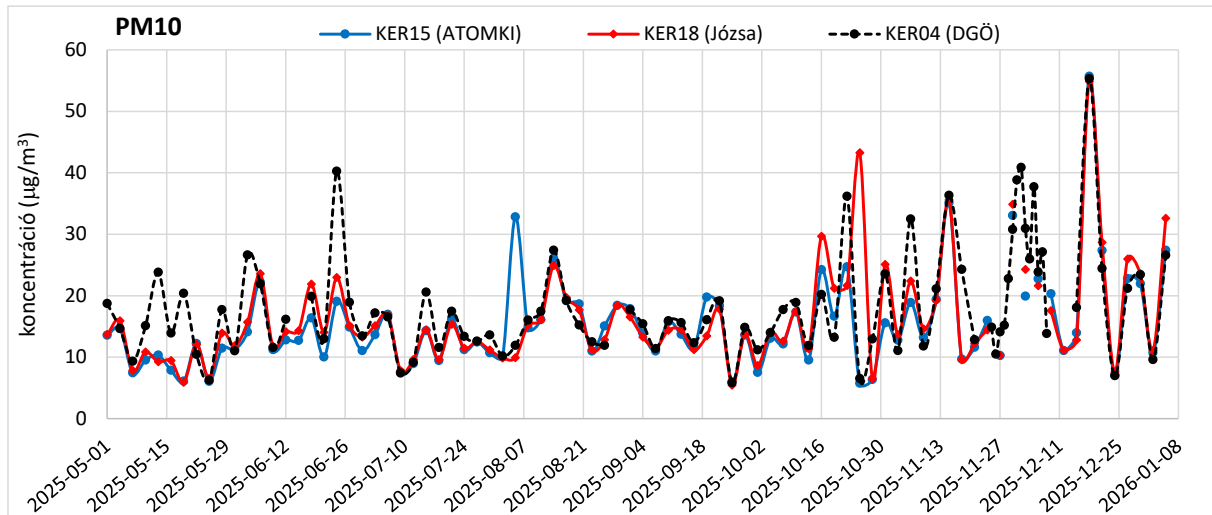
- (1) Online mérések. A város 16 pontján kihelyezett levegőminőségi szenzorállomások 15 perc időfeloldással folyamatosan mérik a főbb légszennyező anyagok (NO, NO₂, O₃, CO, TVOC, PM₁, PM_{2.5}, PM₄, PM₁₀) koncentrációját, a CO₂-t és a meteorológiai paramétereket.
- (2) Offline vizsgálatok. Három mérőponton, amelyek különböző városi környezeteket reprezentálnak (belvárosi háttér, ipari övezet és kertváros) 24 órás PM₁₀ és PM_{2.5} minták gyűjtése történik minden harmadik napon. A minták komplex fizikai és kémiai analízisére a Debreceni Egyetem, valamint az ATOMKI laboratóriumaiban kerül sor. Meghatározásra kerül többek között az aeroszol koncentrációja, elemi összetétele, szerves és szervetlen szén-, fém-, policiklikus aromás szénhidrogén (PAH) és NMP tartalma is.
- (3) Üvegházhatású gázok (ÜHG) monitorozása. A városi háttérállomáson (ATOMKI) folyamatosan mérjük a levegő CO₂ és CH₄ koncentrációját. Emellett vizsgáljuk a fosszilis és biogén szén arányát a széndioxidban, valamint a 16 KER állomás mellett gyűjtött falevelekben.

Eredmények

Ebben az előadásban a PM mintavételek első eredményeit mutatjuk be.

Az 1. ábrán a PM₁₀ koncentrációjának alakulása látható 2025. május 1. – december 31. között a három mérőponton. Megfigyelhető, hogy október közepétől kezdve jelentősen nőtt a PM koncentrációja mindhárom mérőponton. Ennek ellenére a PM₁₀ koncentrációja egyetlen alkalommal, december 18-án lépte túl az 50 µg/m³-es 24 órás egészségügyi határétéket, mindhárom mérőponton. A PM_{2.5} koncentrációja ugyanakkor októbertől kezdődően több alkalommal is meghaladta a WHO által ajánlott 15 µg/m³ értéket. A PM_{2.5} frakció aránya a

PM₁₀-en belül a hideg idő beköszöntével szintén jelentősen megnőtt, a nyári 50-60%-ról a hideg hónapokban 80-90%-t is meghaladta. A tömegkoncentrációk alakulásában októbertől jelentős eltérések voltak megfigyelhetők a mérőpontok között, amely helyi szennyező források megjelenésére mutat. A Déli Gazdasági Övezetben mért tavaszi–kora nyári kiugrásokat helyi mezőgazdasági és földmunkák, míg az ATOMKI-ban augusztus 5-én tapasztalt növekedést a kerítéscsiszolási munkálatok okozták.



1. ábra. PM₁₀ koncentrációk alakulása a mérőpontokon 2025. május 1. - december 31. között.

A kémiai összetétel vizsgálata alapján a PM_{2.5} frakció fő komponensei a korom (BC), a kén – döntően szulfát formájában –, a talajeredetű elemek (Al, Si, Ca, Fe), valamint a kálium voltak. A nehézfémek koncentrációja általában alacsony volt, kivéve egy lokális epizódot az ATOMKI állomáson 2025 augusztusában, amikor kerítés karbantartási munkák miatt átmenetileg megnövekedett több nehézfém koncentrációja. Az ősz előrehaladtával a biomassza- és tüzelési eredetű komponensek (K, Cl, BC, Zn, Pb) koncentrációja jelentősen növekedett, míg a talajeredetű elemek aránya csökkent.

Május és szeptember között a PAH-komponensek jellemzően alacsony koncentrációban, sok esetben a kimutatási határ alatt voltak jelen. A fűtési időszak beköszöntével mindhárom ponton előfordultak határérték-túllépések. A legmagasabb benzo(a)pirén értéket december 18-án mértük mindhárom mérőponton, ami több, mint négyszeres határérték-túllépést jelentett. A legmagasabb koncentrációk a kertvárosi mérőállomáson jelentek meg, ami a lakossági szilárd tüzelés jelentőségét mutatja a PAH koncentrációk alakulásában.

A PM₁₀ szennyezés forrásait EPA PMF 5.0 receptormodell segítségével határoztuk meg. A modell kilenc forrást azonosított: két talaj (löss és homok), másodlagos szulfát aeroszol, nátriumhoz köthető másodlagos aeroszol, két közlekedési komponens, valamint három tüzelési forrás (friss biomassza-égetés, öregedett biomassza-égetés és háztartási szilárd tüzelés). A talajeredetű komponensek a PM₁₀ tömegének mintegy 21%-át, a másodlagos szulfát aeroszol körülbelül 20%-át adta. A közlekedési források hozzájárulása 15% és 9% volt, míg a biomassza- és tüzelési eredetű komponensek együttesen mintegy 28%-ot tettek ki. A források hozzájárulása erősen szezonális volt. Nyáron a másodlagos aeroszol és a talajeredetű komponensek domináltak, míg a téli hónapokban a biomassza- és szilárd tüzelési források váltak meghatározóvá. A legnagyobb szezonális különbség a Józsa kertvárosi mérőponton volt megfigyelhető, ahol a téli koncentrációk jelentősen meghaladták a nyári értékeket.

Köszönetnyilvánítás

Az itt bemutatott kutatás a Zöld Őrszem Debreceni Környezeti Ellenőrző Rendszer keretében valósult meg.

SZÉNTARTALMÚ AEROSZOL IZOTÓPOS MEGFIGYELÉSEK A DEBRECENI ZÖLD ÓRSZEM MONITORING HÁLÓZATÁBAN - AZ ELSŐ ÉV TAPASZTALATAI

**Molnár Mihály¹, Bán Sándor¹, Nagy Dominik¹, Baráth Balázs Áron^{1,2,3},
Kertész Zsófia¹, Balázs Krisztina¹, Angyal Anikó¹, Papp Enikő¹, Furu Enikő¹, Víg
Ildikó¹, Gáspár Dávid¹, Futó István¹**

¹ HUN-REN Atommagkutató Intézet,

4026 Debrecen, Bem tér 18/c, E-mail: mmol@atomki.hu

² Környezettudományi Doktori Iskola, ELTE, 1117 Budapest, Hungary

³ Isotoptech Zrt., 4026 Debrecen, Hungary

Bevezetés

A légköri aeroszol tömegének legalább a negyede, de gyakran akár a fele is szén, így az alkotóelemek sorában mindenképpen az egyik meghatározó, fő összetevő. A szén többféle forrásból érkezik: szerves, elemi vagy szervesetlen formában is jelen lehet a szállóporban. A forrásai egyaránt lehetnek természetesek és emberi hatások is, a lakosság, a közlekedés vagy az ipar oldaláról. Az emberi hatások egy jó része lehet mai, biogén szén alapú (például tűzifa égetés) vagy fosszilis alapú (kőszén, olaj vagy földgáz elégetése).

A lehetséges sokféle szénforrások részvételi arányának azonosítása egyik igen hatékony eszköze a radioaktív szén-izotópos, azaz radiokarbonos (C-14) elemzés, ami nulla (0,0) értéket ad tisztán fosszilis források esetén (mert a geológiai tartózkodási idők alatt teljesen elbomlott) és 1,0 „modern” értékhez közelít a tisztán recens, biogén szénforrások esetén (mai természetes, kozmogén egyensúlyi szint a légkörben).

Ebben a tanulmányban a széntartalmú aeroszol izotópos megfigyeléseinek első éves tapasztalatait mutatjuk be, a debreceni Zöld Őrszem monitoring hálózatában.

Köszönetnyilvánítás

Az itt bemutatott kutatás a Zöld Őrszem Debreceni Környezeti Ellenőrző Rendszer keretében valósult meg.

Légköri fosszilis CO₂ megfigyelések az aeroszolok mellett a debreceni Zöld Őrszem monitoring hálózatában

Baráth Balázs Áron^{1,2,3}, Bán Sándor², Varga Tamás^{2,3,4}, Kertész Zsófia², Balázs Krisztina², Angyal Anikó², Papp Enikő², Furu Enikő², Víg Ildikó², Gáspár Dávid², Molnár Mihály².

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, Magyarország (barath.balazs@atomki.hu)

²HUN-REN ATOMKI, Debrecen, H-4026, Magyarország

³Isotoptech Ltd., Debrecen, H-4026, Magyarország

⁴Department of Biogeochemical Processes, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Németország

Az elmúlt évek debreceni nagy ipari beruházásai mellett elindult a város magas minőségű környezeti monitorozása. Ennek egyik alapja a levegő vizsgálata, azon belül is a széntartalmú aeroszolok és e mellett az üvegházhatású gázok lokális emissziójának precíz nyomon követése. Az előadás fókuszában a Debreceni Egyetem, Atomki és a város együttműködésében létrejött „Zöld Őrszem” monitoringhálózat légköri méréseinek eredményei állnak, melyeket egy hazánkban egyedülálló, komplex műszerpark tesz lehetővé.

Előadásunkban bemutatjuk a városi környezet szén-dioxid (CO₂) és metán (CH₄) koncentrációjának napi-havi változásainak a dinamikáit, valamint a kéthetes integrációs idő mellett gyűjtött CO₂-mintákon mért C-14-es eredményeket és az abból származtatott tisztán fosszilis CO₂-hányadot is. Ezen debreceni adatsorokat a regionális tiszta háttérlevegőt reprezentáló hegyhátsági HUN mérőtorony állomás, mint az európai Integrated Carbon Observation System (ICOS) tagja, adataival vetem össze. A légköri fosszilis CO₂-mennyiséget összevetjük a városi többlet fosszilis széntartalmú aeroszol-adatokkal, melyeket 3 naponta 3 helyszínen mér a városi hálózat.

Köszönetnyilvánítás

A C2295145-s projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium által a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatás segítségével valósult meg a KDP-2023 finanszírozási konstrukció keretében.

Az itt bemutatott kutatás a Zöld Őrszem Debreceni Környezeti Ellenőrző Rendszer keretében valósult meg.

Irodalom

Haszpra, L., Molnár, M. (2026). ICOS ATC NRT CO₂ growing time series from Hegyhátsál háttérszennyezettség-mérő állomás (115.0m), 2025-04-01–2026-04-19, ICOS RI, <https://hdl.handle.net/11676/uFyhrzE2DXzxQix2Wnk932Mv>

<https://zoldorszem.debrecen.hu/>

A LAKOSSÁGI HULLADÉKÉGETÉS SORÁN KELETKEZŐ AEROSZOLRÉSZECSKÉK LÉGÚTI KIÜLEPEDÉSELOSZTLÁSA

Füri Péter¹, Börcsök Berta¹, Groma Veronika¹, Osán János¹

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet,
Környezetfizikai Laboratórium
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33., E-mail: furi.peter@ek.hun-ren.hu

Bevezetés

A lakossági hulladékégetés sok esetben jelentős légszennyezést okoz. A kibocsátott aeroszolrészecskék biológiai hatása – az összetételükön túl – jelentősen függ a belélegzés során a légutakban kiülepedett mennyiségüktől is.

A belélegzett részecskék légúti kiülepedés-eloszlását a Sztochasztikus Tüdőmodellel számítottuk laboratóriumi környezetben végzett kísérletsorozat során Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) műszerrel mért részecskeméret-eloszlásokat felhasználva. A modellezett egyének egészséges felnőtt férfi ülés közben és könnyű fizikai munka végzésekor, ülő egészséges felnőtt nő, illetve ötéves gyermek voltak. Az egészséges mellett asztmás felnőttet is vizsgáltunk. A légutakban kiülepedett részecskemennyiség több változótól függ, melyek: i. a részecskék méreteloszlása és koncentrációja, ii. a légzési mintázat (belélegzési térfogat, be- és kilégzés hossza), iii. a modellezett egyén légútjainak mérete és felépítése. A légzési adatok az egészséges alanyok esetén az ICRP (1994) modellből származtak. Asztmás esetben sekélyebb (500 cm³ vs. 750 cm³), de gyorsabb (20 vs. 12/min) légzéssel számoltunk.

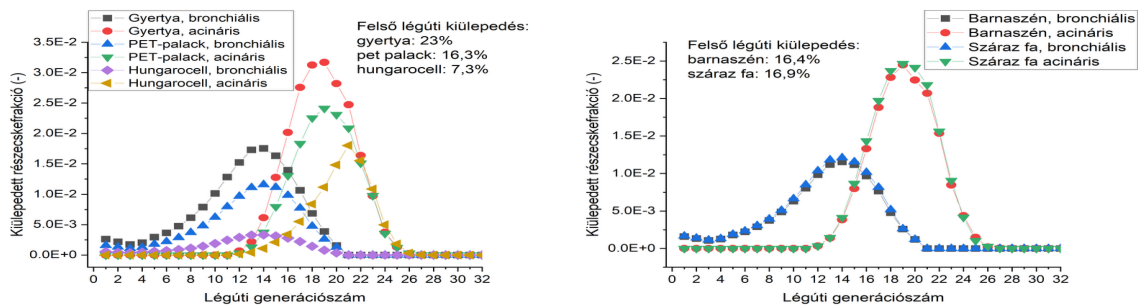
Eredmények

Az eltüzelt hulladékok közül a legkisebb részecskéket a gyertya égetése során mértük. Ennél nagyobbak voltak a PET palack égetésekor keletkezett részecskék, de a hungarocell égetésekor még nagyobb, sok esetben több száz nanométeres átmérőjű részecskék keletkeztek. A barnaszén és a száraz fa égetésekor keletkezett aeroszolrészecskék méreteloszlása hasonló volt a PET palack esetén mérthez.

A Sztochasztikus Tüdőmodellel elvégzett számítások alapján kijelenthető, hogy egészséges felnőtt férfi esetén mindhárom hulladéktípus, a szén és a száraz fa esetén is viszonylag kicsi a felső légúti kiülepedés, így a belélegzett részecskék jelentős hányada eljut a tüdőbe. Ahogy a részecskeméret csökken, a diffúzió okozta kiülepedés nő a légutakban. Ennek köszönhetően a legnagyobb bronchiális és acináris kiülepedett részecskefrakciót a gyertya esetén kaptuk (1. ábra). A kiülepedett részecskehányadok legkisebbek a nagyobb részecskéket adó hungarocell égetése esetén voltak. Ötéves gyermek esetén kisebb, míg asztmás személyeknél a 18. légúti generációig nagyobb a légúti kiülepedési valószínűség.

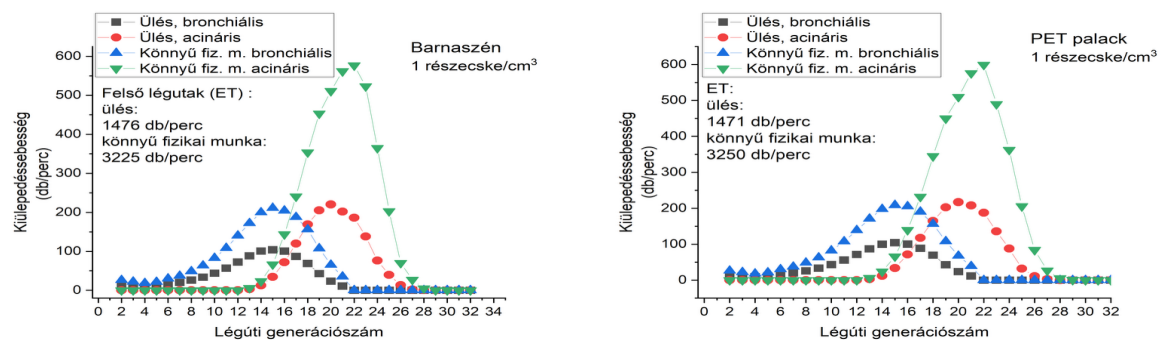
Mindegyik vizsgált tüzelőanyag és mindkét fizikai aktivitás (ülés, illetve könnyű fizikai aktivitás) esetén igaz, hogy sok részecske ülepszik ki az acináris légutakban, melyek irritálják a hámszövetet, így súlyosbíthatják az asztma tüneteit. Károsíthatják továbbá a kiülepedett részecskék az alveolusokat is, ettől hosszú kitérttség esetén krónikus obstruktív tüdőbetegség (COPD) alakulhat ki, mely akár halálos kimenetelű is lehet. Gyermkek esetén kisebb az bronchiális és az acináris kiülepedés is. A belélegzett részecskék kiülepedése sebessége (kiülepedett részecskeszám/perc) a kiülepedett részecskefrakción túl függ a belélegzett

részecskemennyiségtől is. Ez természetesen függ az égetett anyagtól, az égési körülményektől és attól is, hogy mennyire hígul fel a csóva, mire elér hozzánk.



1. ábra: A gyertya, a PET palack és a hungarocell égetése során keletkező részecskék felső légúti, bronchiális és acináris kiülepedési valószínűsége (kiülepedett részecskefrakció) ülő, egészséges felnőtt férfi esetén az egyes légúti generációkban

Fokozott fizikai aktivitás, például egy tempós séta vagy könnyed kocogás esetén megnő a belégzési térfogat és gyorsabbá válik a légzés, mely sokkal több belélegzett részecskét eredményez (2. ábra). Könnyű fizikai munka esetén 2,77-szer több levegőt lélegzünk be, mint ülésnél és 3,3-szor többet, mint alvásakor. A diffúzió és a gravitációs ülepedés hatását csökkenti a gyorsabb légzés, de ennek a kiülepedés-csökkentő hatása kisebb a több belélegzett részecske kiülepedés-növelő hatásánál (2. ábra). Könnyű fizikai munka esetén sokkal több barnaszén vagy PET palack égetésekor keletkező részecske ülepszik ki a tüdőben, mint üléskor. Egyes acináris légutakban több, mint egy nagyságrenddel több részecske ülepszik ki könnyű fizikai munka során. Ez jelzi, hogy szennyezett levegőben lehetőség szerint kerülni kell minden fokozott fizikai aktivitást. Erősen ajánlott továbbá jól szűrő (pl. FFP2) maszkok használata is ilyen égéstermékeket és aeroszol-részecskéket tartalmazó levegőjű helyeken.



2. ábra: A fizikai aktivitás hatása a felső légúti, a bronchiális és az acináris kiülepedés-sebességre (ülés vs. könnyű fizikai munka)

Eredményeink alapján kijelenthető, hogy kerülni kell a lakossági hulladékégetést és lehetőség szerint fontos minimalizálni a szilárd tüzelőanyagok használatát is a légszennyezés és az okozott káros egészségi hatások csökkentéséhez.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az NKFI Alap támogatta az SNN-150615 projekten keresztül.

Irodalom

ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).

CHARACTERIZATION OF CARBONACEOUS AEROSOL PARTICLES EMITTED BY SOLID FUEL COMBUSTION IN RURAL AREAS

Sally Kheirandish¹, Bálint Alföldy³, Péter Fűri², János Osán², Árpád Farkas², Martin Rigler³, Asta Gregorič^{3,4} and Veronika Groma²

¹Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary

²Institute for Energy Security and Environmental Safety, HUN-REN Centre for Energy Research, Budapest, Hungary

³Aerosol d.o.o., Ljubljana, Slovenia

⁴Centre for Atmospheric Research, University of Nova Gorica, Ajdovščina, Slovenia

Introduction

Combustion of solid fuels and household waste is a major source of air pollution in residential areas, emitting fine and ultrafine particulate matter (PM_{2.5}, PM₁) and carbonaceous components such as organic carbon (OC), elemental carbon (EC), and black carbon (BC), which are linked to adverse health effects. In Central and Eastern Europe, residential heating, including illegal waste burning, is a dominant wintertime emission source but is often underestimated in emission inventories.

Distinguishing biomass burning, fossil fuel combustion, and mixed or waste combustion under real-world conditions is challenging due to overlapping source signatures. Field-based markers for identifying non-standard combustion processes are limited.

This study characterizes carbonaceous aerosol particles in a rural residential area near Budapest (Solymár, Hungary), focusing on source-specific carbon signatures and detecting deviations that indicate inefficient or waste combustion.

Measurement and Methods

A winter campaign (10 January–20 February 2025) was conducted in a residential area influenced by traffic and domestic heating. Particle size distribution and PM concentrations were measured with a Grimm 1.109 Optical Particle Counter (1-min resolution), and BC was monitored using a 7-wavelength AE42 Aethalometer (2-min resolution).

Twenty-five PM_{2.5} samples were collected on quartz filters (24-hour resolution), and OC (OC1–OC4) and EC (EC1–EC4) fractions were determined using the thermo-optical EUSAAR2 protocol (Cavalli *et al.*, 2010).

Source apportionment was performed using the Aethalometer model (Sandradewi *et al.*, 2008) with optimized Ångström exponents ($\alpha_{FF} = 1.15$; $\alpha_{BB} = 2.2$), derived from correlations between BC components and OC fractions. Deviations from typical correlations between normalized carbon fractions (OC/TOC, EC/TEC) and BC components were used to identify additional emission sources.

Results and Discussion

Severe pollution episodes were observed. Out of 41 days, 39 exceeded the WHO PM_{2.5} daily guideline (15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). One-minute PM_{2.5} reached 205 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and BC peaked at 23.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicating strong local emissions. PM₁ accounted for ~95% of PM_{2.5}, confirming the dominance of fine combustion particles.

TOC and TEC were strongly correlated ($r = 0.89$), suggesting common sources. The TOC/TEC ratio exceeded 8 in more than half of the samples, indicating biomass burning dominance, though several days showed clear deviations. The elevated biomass-burning Ångström exponent ($\alpha_{BB} = 2.2$) suggests additional light-absorbing components beyond wood combustion.

Atypical days, identified via deviation analysis, showed increased EC₂/TEC ratios ($r = 0.65$), consistent with mixed-fuel or plastic-containing waste combustion (Wang *et al.*, 2023). Although no single tracer was definitive, the combined indicators consistently revealed these sources.

Particles in the 253–298 nm range strongly correlated with BC and biomass-burning components, highlighting the predominance of ultrafine particles and their health relevance.

Conclusions

Combining Aethalometer source apportionment with thermo-optical carbon analysis and deviation-based methods provides an effective approach for identifying complex emission sources in residential environments.

While biomass burning and traffic emissions can be distinguished, this method also reveals non-standard combustion processes, including inefficient stove operation and likely waste burning.

The results indicate that:

- Residential combustion dominates winter air pollution
- Fine and ultrafine particles are the primary emissions
- Deviations in carbon fractions are useful indicators of atypical sources

These findings improve source identification and support targeted air quality mitigation strategies.

Acknowledgement

This study was funded by the Hungarian Ministry of Culture and Innovation (SNN_24, Project No. SNN 150615).

References

- Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K.E., Genberg, J., Putaud, J.-P., 2010. Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon. *Atmos. Meas. Tech.* 3, 79–89.
- Nakkasem, K., Thepanondh, S., Yabueng, N., Chantara, S., 2024. Organic and elemental carbon characteristics in PM_{2.5} across diverse landscapes. *Atmos. Environ.*
- Rigler, M., Drinovec, L., Lavrič, G., Vlachou, A., Prévôt, A.S.H., Jaffrezo, J.L., Stavroulas, I., Sciare, J., Burger, J., Kranjc, I., Turšič, J., Hansen, A.D.A., Močnik, G., 2020. Intercomparison of EC and BC measurement techniques. *Atmosphere.*
- Sandradewi, J., Prévôt, A.S.H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M.R., Lanz, V.A., Weingartner, E., Baltensperger, U., 2008. Aethalometer model for source apportionment of aerosol sources. *Environ. Sci. Technol.*
- Wang, X., Firouzkhohi, H., Chow, J.C., Watson, J.G., Ho, S.S.H., Carter, W., De Vos, A.S.M., 2023. Chemically speciated air pollutant emissions from open burning of household solid waste. *Sci. Total Environ.*

LAKOSSÁGI TÜZELÉSBŐL SZÁRMAZÓ AEROSZOLRÉSZECSEKÉK MÉRETELOSZLÁSA ÉS ELEMÖSSZETÉTELE

Osán János¹, Börcsök Berta¹, Groma Veronika¹, Alföldy Bálint²

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet,
Környezetfizikai Laboratórium
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33., E-mail: osan.janos@ek.hun-ren.hu

² Aerosol d.o.o.
Kamniška 39, 1000 Ljubljana, Slovenia, E-mail: balfoldy@aerosolimageesci.com

Bevezetés

A szilárd tüzelőanyagok (szén, fa, vagy alkalmanként háztartási hulladék) lakossági elégetése jelentős aeroszol szennyező forrás a vidéki településeken, különösen a fűtési idényben. Célzott laboratóriumi kísérlettel vizsgáltuk háztartási kályhák részecske kibocsátását különböző szilárd tüzelőanyagok (fa, barnaszén, háztartási hulladékok) égetése során. A laboratóriumi kísérleteket egy kéthetes téli mintavételi kampánnyal egészítettük ki, egy szlovéniai vidéki helyszínen, ahol nagy arányú a fűtési célú lakossági fatüzelés.

A hígított füstgázban, illetve a környezeti levegőben a részecskék méreteloszlásának monitorozása Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) és Optical Particle Counter (OPC) berendezésekkel történt, ezzel párhuzamosan aethalométer és Total Carbon Analyzer (TCA) is működött. Az aeroszol-részecskék méretfrakcionált mintavétele 9 fokozatú May-típusú kaszkádimpaktorral Si-lapokra történt. A kaszkádimpaktoros mintavételezés és a Total-reflection X-ray Fluorescence (TXRF) analízis kombinációja hatékony módszernek bizonyult a kémiai elemek vagy vegyületek tömeg szerinti méreteloszlásának meghatározására 70 nm – 10 µm tartományban (Osán et al., 2020; Czömpöly et al., 2021). Kiegészítésként a PM_{2.5} részecskefrakciót kvarcszűrőre gyűjtöttük.

Eredmények

A kályhas kísérlet füstgázában mért részecskeszám szerinti méreteloszlások alakjában az elégetett tüzelőanyagok esetén különbségeket tapasztaltunk. A méreteloszlások maximuma 20–70 nm közé esett a legtöbb tüzelőanyag esetén, míg kerékpárgumi, kartonpapír és polisztirol habanyag égetésekor a maximum 200–500 nm között volt.

A kaszkádimpaktorral vett füstgázminták TXRF eredményei azt mutatták, hogy a K, Cl, Br és Zn kibocsátása jelentős a szubmikronos mérettartományban a fatüzelés során. Ezek az elemek a kiválasztott vidéki helyszín levegőjében is jelen voltak, koncentrációjuk a 0,25-0,5 µm frakcióban mutatott maximumot, ami megerősíti, hogy a fatüzelés a fő aeroszolforrás. A parketta égetése a kibocsátott aeroszol finom frakciójában megnövekedett ólom- és cinktartalommal járt, míg a finom frakciójú réz és bróm a színes ágy nemű, illetve a karton égetésére volt jellemző.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az NKFI Alap támogatta az SNN-150615 projekten keresztül.

Irodalom

- Osán, J., Börcsök, E., Czömpöly O., et al., 2020. Experimental evaluation of the in-the-field capabilities of total-reflection X-ray fluorescence analysis to trace fine and ultrafine aerosol particles in populated areas, *Spectrochim. Acta Part B* 167: 105852
- Czömpöly, O., Börcsök, E., Groma V., et al., 2021. Characterization of unique aerosol pollution episodes in urban areas using TXRF and TXRF-XANES, *Atmos. Pollut. Res.* 12: 101214.

HÁZTARTÁSI CÉLÚ SZILÁRD ÜZEMANYAGÚ TÜZELŐ BERENDEZÉSEK ÁLTAL KIBOCSÁTOTT AEROSZOL RÉSZECSKÉK ÖSSZETÉTELE ÉS OPTIKAI TULAJDONSÁGAI

Alföldy Bálint¹, Groma Veronika², Börcsök Berta², Asta Gregoric¹, Osán János², Kugler
Szilvia², és Martin Rigler¹

¹ Aerosol d.o.o.

Ljubljana-1000, Szlovénia, E-mail: balfoldy@aerosolmageesci.com

² HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklos ut 29-33.

Bevezetés

A globális energiaválság hatására Közép-Európa számos térségében ismét növekvő szerepet kap a háztartási célú fatüzelés. Télen a levegőminőség romlásának egyik legfőbb forrása a fűtési célú szilárd üzemanyagú tüzelés, amely nagyban hozzájárul a lakosság aeroszol terheléséhez. A helyzetet súlyosbítja, hogy egyes szegényebb régiókban a lakosság mezőgazdasági vagy háztartási hulladékot is eléget, ami jelentősen növeli a légkörbe kerülő részecskék toxicitását (Hoffer *et al.*, 2020). Munkánkban a háztartási szilárd tüzelőberendezésekből származó aeroszolak kémiai összetételét és optikai tulajdonságait vizsgáltuk.

Metodika

A kutatás első fázisában tisztán fatüzelésből származó részecskéket vizsgáltunk, melyek jellemzőit később összevetjük a hulladéktüzelésből származó részecskékkel. Ennek érdekében intenzív mérési kampányt végeztünk a szlovéniai Júliai-Alpok egy kis településén, Ratečében, 2026. január 26. és február 8. között. A szigorú szlovén jogszabályi környezet, valamint a bőségesen rendelkezésre álló faanyag biztosította, hogy a vizsgált kibocsátásokban hulladékégetésből származó részecskék ne jelenjenek meg.

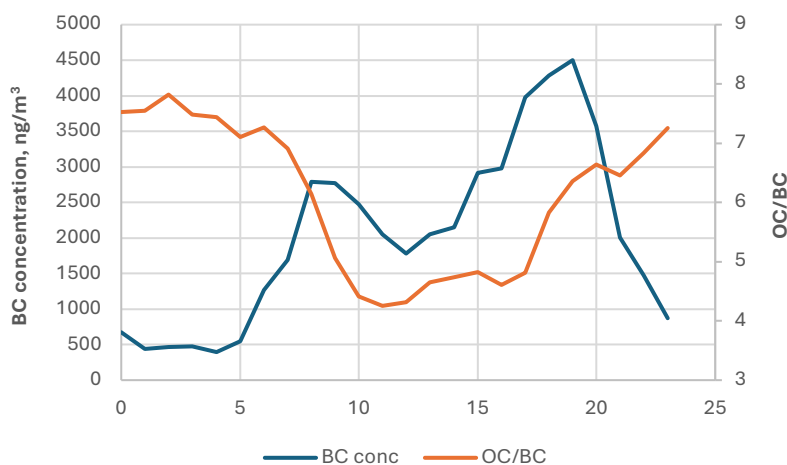
A mérési kampány során valós idejű korom- (BC) és szerves szén- (OC) monitorozást végeztünk az Aerosol d.o.o. által gyártott Aethalometerrel és Total Carbon Analyserrel (TCA). Az Aethalometer kilenc hullámhosszon szolgáltat abszorpciós adatokat az aeroszol részecskékről, valamint ezek alapján meghatározza a BC koncentrációt, míg a TCA az aeroszol teljes széntartalmát méri. A két érték különbségéből meghatározható a szerves szén koncentrációja. Az ultrafinom részecskefrakció méreteloszlását Grimm SMPS rendszerrel határoztuk meg, míg a PM₁₀ tartomány méreteloszlását egy szintén Grimm gyártmányú OPC optikai részecskeszámlálóval mértük. A későbbi kémiai analízis céljából kvarcszűrőkre PM_{2.5} mintákat gyűjtöttünk. A szűrőminták OC/BC analízisét az Aerosol d.o.o. termo-optikai berendezésén végeztük, az EUSAAR2 protokoll előírásai szerint.

Eredmények

Az 1. ábra a BC koncentráció átlagos napi menetét mutatja, valamint feltüntettük rajta az OC/BC arány napszaki változását is. Jól látható, hogy a BC koncentrációt két markáns csúcs jellemzi: egy reggeli és egy délutáni/esti maximum.

Az éjszakai alacsony BC-szinthez tartozó magas OC/BC arány arra utal, hogy az esti intenzív kibocsátást követően a parázsló, hamvadó égés válik dominánssá, amely főként szerves aeroszoloikat bocsát ki. A reggeli BC-csúcs időszakában megfigyelhető OC/BC aránycsökkenés ezzel szemben a közlekedési eredetű BC jelentős hozzájárulását jelzi.

A délutáni BC-emelkedés több lépcsőben zajlik. Az utolsó koncentrációlépcső – amely 16 óra után indul – már ismét növekvő OC/BC aránnyal jár együtt, ami arra utal, hogy az esti lakossági tüzelés válik meghatározó tényezővé a levegőminőség alakulásában.



1. ábra. A BC koncentráció és az OC/BC arány átlagos napi menete

Az aeroszoloik abszorpciós tulajdonságai is jellegzetes ciklust követnek a nap folyamán, amelyet elsősorban a változó mértékű légköri keveredés határoz meg a dízel eredetű részecskék, valamint a lángoló és parázsló égésből származó komponensek között. A részecskék kémiai és fizikai öregedése (aging) szintén jelentős szerepet játszik az abszorpciós karakter alakulásában; ez a több hullámhossz tartományon értelmezett Absorption Ångström Exponent (multiple-AAE, m-AAE) reprezentációban jól nyomon követhető (Gregoric *et al.*, 2023).

Eredményeink rávilágítanak a fatüzelésből frissen kibocsátott aeroszoloik összetételére és optikai sajátosságaira, amelyek megbízható alapot nyújtanak a hulladéktüzelésből származó részecskékkel való összehasonlításhoz.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Slovenian Research and Innovation Agency (ARIS, project szám: N1-0414), valamint Magyarország Kulturális és Innovációs Minisztériuma támogatta (SNN_24, projekt szám: SNN 150615).

Irodalom

- Gregoric, A., Alföldy, B., Lavric, G., Ivancic, M., Jezek-Brecelj, I., Munoz, A., Rodenas, M., Soler, R., Borrás, E., Vera, T., Yubero, E., Podlipec, R., and Rigler, M., 2023. Advanced characterization of aerosol sources and aging state with the new 9λ Aethalometer model AE36s. European Aerosol Conference (EAC'23), Malaga, Spain, September 3-8, 2023.
- Hoffer, A., Jancsek-Turóczi, B., Tóth, Á., Kiss, G., Naghiu, A., Levei, E.A., Marmureanu, L., Machon, A., and Gelencsér, A., 2020. Emission factors for PM10 and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from illegal burning of different types of municipal waste in households. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 17855–17864.

HULLADÉKÉGETÉS AZONOSÍTÁSA KÉMÉNYBEN KIÜLEPEDETT KOROMBAN NYOMJELZŐ VEGYÜLETEKKEL

Hopótószki Márk¹, Jancsek-Turóczy Beatrix^{1,2}, Gelencsér András^{1,2}, Hoffer András^{1,2}

¹ Pannon Egyetem, Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet, 8200 Veszprém, Egyetem u. 10. E-mail: hoffer.andras@mk.uni-pannon.hu

² HUN-REN-PE Levegőkémiai Kutatócsoport
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.

Bevezetés

A szilárd tüzelőanyagok fűtési célból történő égetése a légköri finom aeroszol részecskék egyik jelentős forrása. A legális tüzelőanyagok (biomassza, szén) felhasználása mellett azonban számolnunk kell a háztartási hulladékok illegális égetésével is (Hoffer et al., 2024). Ez a tevékenység hozzájárul a levegőminőség romlásához és jelentős egészségügyi kockázattal is jár (Hoffer et al., 2020). A hulladékokkal tüzelő háztartások felderítése tehát fontos feladat, mely hozzájárul a levegőminőség javításához, az ezt segítő analitikai módszer pedig lehetőséget ad lakossági panaszok kivizsgálására is. Az illegális hulladékégetés kimutatása legtöbbször csak utólagos mérésekkel lehetséges. Az égetés helyszínén, a beltéri tüzelőberendezésekből gyűjtött hamu fémtartalmának elemzése lehetőséget adhat a hulladékégetés utólagos kimutatására, azonban a hamu eltávolításával a bizonyítékok könnyen megsemmisíthetők még a mintavétel előtt. Ezzel szemben a kéményeket jellemzően ritkábban tisztítják, ráadásul az ezekben lerakódott korom megőrzi az égetett tüzelőanyagok anyagai lenyomatát. A kutatás célja a beltéri hulladékégetés utólagos kimutatására alkalmas eljárás kifejlesztése volt, mely kéményekből származó korom mintákban a hulladékok égetésére jellemző szerves nyomjelző vegyületek (Hoffer et al., 2021) mérésén alapul.

Módszer

A munka során háztartások kéményében lerakódott korom mintákat gyűjtöttünk 2024 januárja és áprilisa között Veszprémben és környékén, valamint Miskolcon. Mintákat vettünk a saját bevallásuk szerint hulladékot is égető háztartások kéményéből, de olyan háztartások kéményeiből is, melyek kizárólag tűzifával fűtöttek. A mintákat a kémények alsó- és felső részéből is gyűjtöttük. A biomassza- és a hulladékégetésére jellemző szerves nyomjelző vegyületek mennyiségét a minták oldószeres extrakciója után gázkromatográfia-tömegspektrometria módszerével határoztuk meg.

Eredmények

A hulladékot nem égető háztartásokban gyűjtött mintákban mért komponensek koncentrációi alapján az egyes nyomjelző vegyületekre határértékeket határoztunk meg, amelyek alapján a hulladékot égető háztartásokban gyűjtött mintákat értékeltük. Vizsgáltuk a különböző hulladéktípusok égetésekor keletkező aromás komponensek (terfenilek, kvaterfenilek, trifenil-benzol izomerek és p-pentafenil), valamint specifikus nyomjelző vegyületek (pirólízis termékek) mennyiségét és ezek arányát.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a hulladékégetés azonosításához a nagyobb molekulatömegű, kevésbé illékony aromás komponensek eredményesebben alkalmazhatók,

mint a kisebb molekulatömegű terfenilek, azonban ez utóbbiak jelenléte a mintákban jelentős mértékű hulladékégetést jelez. A kémények alsó és felső részéből vett mintákban azonosított aromás vegyületek alapján az égetett hulladékokra nagyon hasonló következtetéseket vonhatunk le.

A polietilén-tereftalát (PET) tartalmú hulladékok égetésére jellemző három pirolízis termék mennyiségét is vizsgáltuk a mintákban. Néhány alsó mintában e komponensek mennyisége a határértéknél kisebb volt, azonban ugyan ezeknek a kéményeknek a felső részéből származó mintákban a határértéket meghaladó koncentrációkat mértünk, ami arra utal, hogy a felső mintavételi pontból származó minták jobban használhatóak a hulladékégetés detektálására. A PET égetését a vizsgált felső minták 75%-ában sikerült azonosítani. Mértük a sztírol tartalmú polimerek égetésére jellemző nyomjelző vegyület (sztírol trimer), illetve ennek oxidációs termékét is. A felső mintákban ezeknek a komponenseknek általában nagyobb volt a koncentrációja, mint az alsó mintákban. A hulladékot égető háztartások kéményeinek felső részéről gyűjtött minták mintegy háromnegyedében mindkét vegyület mennyisége meghaladta a referencia minták alapján számított határértéket. A bútortalpakok égetésére jellemző melamin a minták többségében kimutattuk.

Bár az aromás komponensek nem specifikus nyomjelzői a különböző hulladékok égetésének, mennyiségük (egymáshoz viszonyított arányuk) a mintákban függ az égetett hulladékok anyagi minőségétől is. A különböző hulladékok égetésére jellemző aromás komponensek arányának változása az egyes mintákban alátámasztotta a specifikus nyomjelző vegyületek alapján levont következtetéseket. A mintákban a hulladékok égetésére jellemző új aromás komponens, a p-pentafenilt azonosítottuk, amelyet korábban nem írtak le hulladékégetésből származó mintákban. E komponens mennyisége a hulladékot égető háztartásokból származó minták ~85%-ban nagyobb volt, mint a megállapított határérték. A p-pentafenil alacsony illékonyasága és kémiai stabilitása alapján ígéretes nyomjelző vegyület lehet a hulladékégetés azonosítására a kéményekben kiülepedett koromban.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) és a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatta.

Irodalom

Hoffer, A., Meiramova, A., Tóth, Á., Jancsek-Turóczi, B., Kiss, G., Rostási, Á., Levei, E.A., Marmureanu, L., Machon, A., Gelencsér, A., 2024. Assessment of the contribution of residential waste burning to ambient PM10 concentrations in Hungary and Romania. *Atmos. Chem. Phys.* 24, 1659–1671. <https://doi.org/10.5194/acp-24-1659-2024>

Hoffer, A., Jancsek-Turóczi, B., Tóth, Á., Kiss, G., Naghiu, A., Levei, E.A., Marmureanu, L., Machon, A., Gelencsér, A., 2020. Emission factors for PM10 and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from illegal burning of different types of municipal waste in households. *Atmos. Chem. Phys.* 20, 16135–16144. <https://doi.org/10.5194/acp-20-16135-2020>

Hoffer, A., Tóth, Á., Jancsek-Turóczi, B., Machon, A., Meiramova, A., Nagy, A., Marmureanu, L., Gelencsér, A., 2021. Potential new tracers and their mass fraction in the emitted PM10 from the burning of household waste in stoves. *Atmos. Chem. Phys.* 21, 17855–17864. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17855-2021>

A KONFERENCIA TÁMOGATÓI



PALAS GMBH



TSI INCORPORATED



KER DEBRECEN NONPROFIT KFT.



**AEROSOL
MAGEE SCIENTIFIC**

AEROSOL MAGEE SCIENTIFIC