

A széntartalmú léghőri aeroszol forrásai és jelentősége

SALMA Imre^{a,*}, WEIDINGER Tamás^b, ZSIGRAINÉ VASANITS Anikó^a, NÉMETH Zoltán^a,
FARKAS Gergő^a, VARGA Veronika^a

^aELTE Kémiai Intézet, Pázmány Péter stny. 1/A, 1117 Budapest, Magyarország

^bELTE Meteorológiai Tanszék, Pázmány Péter stny. 1/A, 1117 Budapest, Magyarország

1. Bevezetés

A Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (Budapest platform for Aerosol Research and Training, BpART, <http://salma.web.elte.hu/BpArt>, 1. Ábra) 2013. október óta működik.¹ Fő céljai között szerepel a levegőkörnyezetre vonatkozó tudományos ismeretek megszerzése és bővítése. A kutatási irányok az aeroszol keletkezését, kémiai és fizikai tulajdonságait, illetve folyamatait, valamint az egészségi, az éghajlati és a környezeti hatásait egyaránt magukba foglalják. A BpART csapata és infrastruktúrája az ELTE Kémiai Intézet önálló kutatólaboratóriumává vált, és bekapcsolódott a klímaadaptív és fenntartható hazai mezőgazdaságot szolgáló, multidiszciplináris kutatóműhely (AGROMO) munkájába is. A kutatóállomás többször helyszíniül szolgált nemzetközi és hazai tudományos együttműködéseknek. Az elért eredmények sajátos alkalmazása a levegőminőségre vonatkozó háttér-információk és értékelések készítése fővárosi szakreferensek vagy döntést előkészítők számára.² Az egyik legfőbb kutatási témánkat, a budapesti léghőri nukleáció jelenségét és következményeit az elmúlt évben tárgyaltuk e folyóirat lapjain.³ A jelenlegi, munkabeszámoló jellegű összefoglalójában ezért egy másik fontos témakörben, a széntartalmú aeroszol komponensek keletkezésének és tulajdonságainak a területén elért, újabb tudományos eredményeinket és következtetéseinket ismertettjük tömören.

2. Széntartalmú aeroszol komponensek

A széntartalmú aeroszol összetevők főleg kormot és szerves vegyületeket foglalnak magukba. A kormot elemi szénnel (elemental carbon, EC) lehet közelíteni. A szerves összetevők csoportját ezret meghaladó számú, egyedi vegyület alkotja, amelyet a szerves vegyületekben lévő szénnel (organic carbon, OC) lehet összefoglalóan jellemezni. A széntartalmú összetevők a finom méretű aeroszol részecskék tömegének akár 50%-át is alkotják.⁴ Ennek köszönhetően, illetve egyedi vegyületeik különleges tulajdonságai és hatásai miatt fontos szerepet játszanak életünkben az egészségügyi, éghajlati és környezeti jelentőségüket tekintve, ezért szükséges a fő forrástípusaik és relatív jelentőségük megismerése a Kárpát-medencében és azon belül Budapesten.⁵ A fő források a biogén (leginkább növényi) emissziót követő légkörkémiai képződési folyamatok, valamint a széntartalmú anyagok, nevezetesen a fosszilis üzemanyagok (fossil fuel, FF) tüzelése, illetve a

biomassza égetése (biomass burning, BB). Ezek a források finom méretfrakciójú részecskéket eredményeznek, amelyeket a 2,5 μm -nél kisebb aerodinamikai átmérővel rendelkező részecskék halmazával (PM_{2,5} mérettartomány) jellemezhetünk.



1. Ábra. A Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (BpART) kutatólaboratórium látképe 2019. áprilisban (Fotó: Csomós Attila).

A biomassza égetése erdőtüzeket, mezőgazdasági tüzeket, illetve fa, szalma és szerves hulladék háztartási és ipari méretű égetését foglalja magába fűtési, főzési vagy kedvelési céllal.⁶ A háztartási és ipari égetési formáknak fontos szerepe lehet a decentralizált energiatermelésben, illetve a fosszilis tüzelőanyagok helyettesítésében. A legnagyobb mennyiségben égetett biomassza a fa, amelynek fő kémiai építőelemei a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin. A cellulóz lineáris biopolimer, amely D-glükóz monomer egységekből épül fel.⁷ A hemicellulóz kevésbé szabályos szerkezetű, fő monomerjei a glükóz, a mannóz, a galaktóz és a xilóz. A fa lángoló égése közben (300 °C feletti hőmérsékleten) anhidrocukrok, illetve illékony szerves vegyületek keletkeznek, amelyek a lángban tovább oxidálódnak. Az égéstermékek közül jelentős mennyiségben előforduló komponensek a levoglükozán (LVG, 1,6-anhidro- β -D-glükopiránóz) és terezomerjei, a mannozán (1,6-anhidro- β -D-mannopiránóz), illetve a galaktózán (1,6-anhidro- β -D-galaktopiránóz). Ezek a vegyületek az aeroszol részecskékre kondenzálódnak, amikor a füstgáz hőmérséklete csökken. A vegyületek stabilnak tekinthetők a levegőben az aeroszol 7–10 napos léghőri tartózkodási ideje alatt, ezért a BB molekuláris markereként alkalmazhatók.⁸ A fosszilis anyagok égetésével keletkezett széntartalmú összetevőket a ¹⁴C (radiokarbon) mérésével lehet megkülönböztetni a többi forrástól.⁹

* Fő szerző. Tel.: +1 372–26–15; E-mail: salma@chem.elte.hu.

3. Módszerek

Aeroszol mintákat gyűjtöttünk többféle módszerrel, majd ezeket különböző analitikai módszerekkel mértük. A kísérleti eredményeket modellszámítások keretében értékeltük és értelmeztük.

3.1. Aeroszol mintavétel és in situ mérések

Egy évet átfogó, összehasonlító vizsgálatokhoz azonos típusú (Digital DHA-80 nagy térfogatú) mintavevővel gyűjtöttünk napi aeroszol mintákat kvarcszálás szűrőkre, párhuzamosan 3 helyszínen 2017. október, 2018. január, április és július hónapokban, évszakonként 2 hétig. A mintagyűjtések a BpART Laboratóriumban, az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Marcell György Főobszervatóriumában és a K-pusztai mérőállomáson történtek, amelyek a budapesti belváros, a külváros és a regionális (vidéki) háttér levegőkörnyezeteket képviselik. A BpART Laboratóriumban 11 fokozatú, MOUDI kaszkád impaktorról is gyűjtöttünk aeroszol mintákat polikarbonát fóliákra a 0,053–9,9 µm aerodinamikai átmérőtartományban. A mintagyűjtéseket a kulcsfontosságú légszennyezők (SO₂, CO, NO, NO_x, O₃, PM₁₀ tömeg) és meteorológiai adatok (levegőhőmérséklet, relatív páratartalom, szélesség és -irány, globális napsugárzás) standardizált, on-line mérésével egészítettük ki.

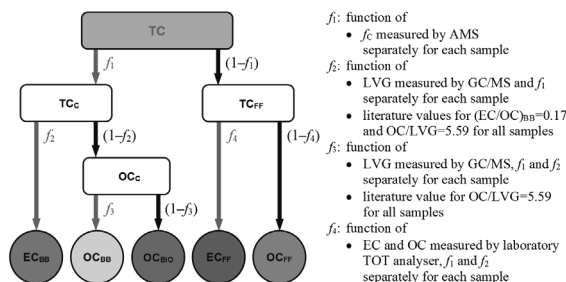
3.2. Laboratóriumi mérések

Az aeroszol minták tömegét gravimetriával mértük, elemi összetételét atomabszopciós spektrometriával határoztuk meg, EC és OC tartalmát termikus–optikai transzmisszió (TOT) módszerrel állapítottuk meg EUSAAR2 hőmérsékleti protokollt használva, míg az anhidrocukrok meghatározását származékképzést követően gázkromatográfia tömegspektrométerrel (GC-MS)^{10,11} mértük. Ez utóbbi analitikai módszerhez a mintákat diklór-metán és metanol elegyében oldottuk, az extraktumokat metil-β-L-arabinopiranoz, standard oldattal adalékoltuk, majd piridin és hexametil-diszilizán (szililezőszer) és trifluór-ecetsav (katalizátor) elegyével kezeltük. A GC-MS méréseket on-column injektálási módban végeztük. A teljes szén modern szénre korrigált $f_c = (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{minta}} / (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{OA}}$ arányát (ahol OA alsó index az oxálsav II standard referencia anyagot jelöli) Mini Carbon Dating System gyorsító-tömegspektrometria (accelerator mass spectrometry, AMS) módszerrel határozták meg részünkre az MTA ATOMKI szakemberei.¹²

3.3. Adatkiértékelés és modellezés

A biomassza égetés járulékát a PM_{2,5} aeroszol tömeghez LVG marker modellel számoltuk.¹³ Az EC és OC specieszek forrásmegosztását a fosszilis tüzelés, a biomassza égetés és biogén emisszió tekintetében az összekapcsolt LVG-radiokarbon marker modellel végeztük el.⁵ A forrásmegosztás folyamatát a 2. Ábrán szemléltetjük: $f_1 = f_c$; $f_2 = (\text{OC}/\text{LVG})_{\text{BB}} \times \text{LVG} \times (\text{EC}/\text{OC})_{\text{BB}} / \text{TC}$; $f_3 = (\text{OC}/\text{LVG})_{\text{BB}} \times \text{LVG} / f_1 (1-f_2)$

TC és $f_4 = (\text{EC}/\text{TC} - f_1 \times f_2) / (1-f_1)$, ahol TC=EC+OC, illetve $(\text{EC}/\text{OC})_{\text{BB}} = 17\%$ és $(\text{OC}/\text{LVG})_{\text{BB}} = 5,59$ irodalmi forrásokból származó értékek.^{5,9,14}



2. Ábra. Az elemi szén (EC) és a szerves szén (OC) forrásmegosztása a fosszilis anyagok (FF) tüzelése, a biomassza égetés (BB) és biogén források (BIO) között a levoglükozán-radiokarbon összekapcsolt marker modellel. A c alsó index a modern eredetű (contemporary/modern; BB és BIO eredetű) szén-specieszeket jelöli, illetve TC=EC+OC.

Az anhidrocukrok méreteloszlásainak meghatározását MICRON adat inverziós számítógépes eljárással valósítottuk meg.^{11,15–16} A módus paramétereket lognormális eloszlás-függvények illesztésével számítottuk ki.

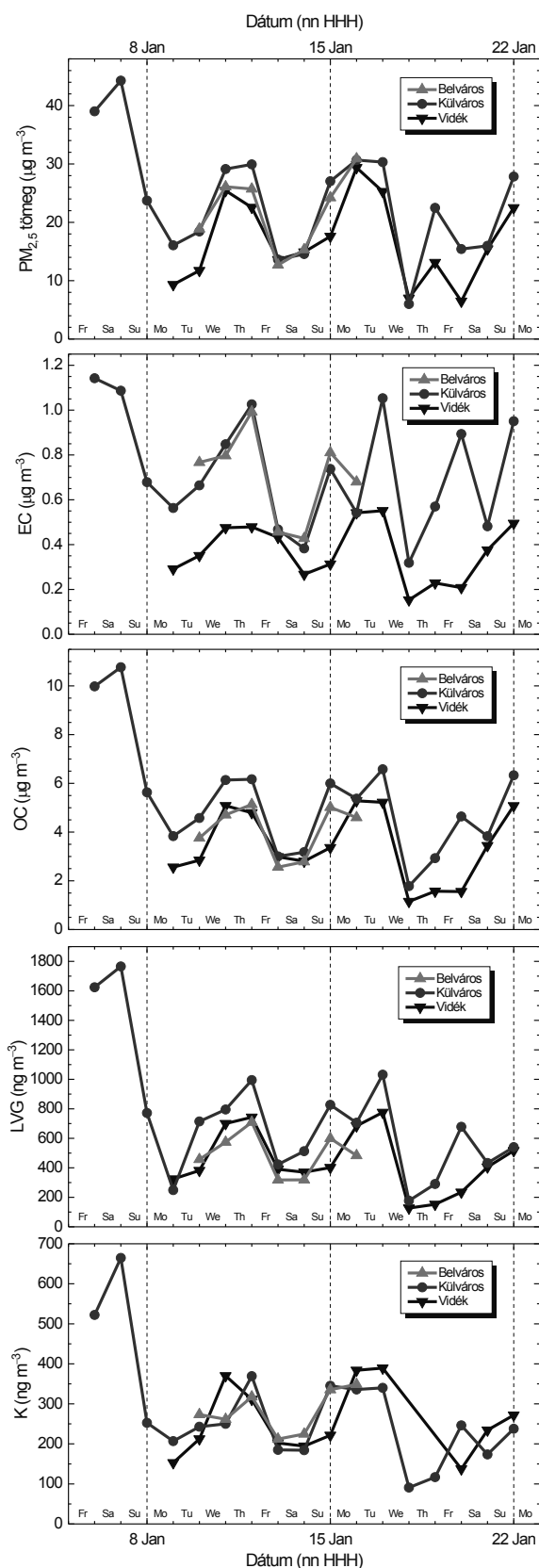
4. Eredmények és következtetések

4.1. Légköri koncentrációk

A fontosabb aeroszol összetevők légköri koncentrációi jelentős és tendenciózus változást mutattak a különböző levegőkörnyezeteket, illetve évszakokat tekintve (1. Táblázat).

Összetevő	Helyszín	Ősz	Tél	Tavaszi	Nyár
PM _{2,5} (µg m ⁻³)	vidék	12,5	15,4	7,9	10,7
	külváros	25	27	9,7	11,7
	belváros	28	24	13,3	8,1
EC (µg m ⁻³)	vidék	0,41	0,36	0,20	0,12
	külváros	0,42	0,68	0,51	0,35
OC (µg m ⁻³)	vidék	1,00	0,77	0,79	0,37
	külváros	4,0	5,4	2,4	2,7
LVG (µg m ⁻³)	vidék	6,6	4,6	2,8	2,6
	külváros	0,172	0,40	0,0180	0,0081
	belváros	0,44	0,71	0,040	0,0124
K (µg m ⁻³)	vidék	0,38	0,48	0,036	0,0103
	külváros	0,182	0,23	0,088	0,081
	belváros	0,22	0,25	0,097	0,075
f_c (%)	vidék	0,26	0,27	0,106	0,057
	külváros	69	75	61	74
	belváros	66	74	48	60
	belváros	76	74	48	60

1. Táblázat. A PM_{2,5} méretfrakciójú aeroszol tömeg, elemi szén (EC), szerves szén (OC), levoglükozán (LVG) és K medián koncentrációi és a teljes széntartalom modern-szén tartalma (f_c) Budapest regionális háttérben (vidék), külvárosában és belvárosában, a 4 évszakban.



3. Ábra. A $PM_{2,5}$ méretfrakciójú aeroszol tömeg, elemi szén (EC), szerves szén (OC), levoglükozán (LVG) és K napi átlagos koncentrációjának változékonysága Budapest belvárosában, külvárosában és regionális háttérkörnyezetében (vidék) télen. A hét napjait szintén jelöltük az ábrákon.

Több, különböző forrásból származó aeroszol összetevő (és légszennyező gáz) napi átlagos légköri koncentrációja együtt változott a mérési kampány alatt ősszel és különösen télen (3. Ábra). Mindez a helyi és regionális meteorológiai viszonyok és a nagy hatótávolságú transzport folyamatok fontosabb, meghatározóbb szerepét jelzi a helyi vagy regionális forrásokkal összehasonlítva.¹⁷ Nyáron nem volt kimutatható hasonló kapcsolat. Mindez egybevág a Kárpát-medencében télen, anticiklonális időjárási helyzetekben tapasztalható, nagyobb kiterjedésű, időnként komolyabb levegőszennyezettség kialakulásával, valamint ennek térbeli és időbeli eloszlásával kapcsolatos elképzelésekkel, amelyek elsősorban az ún. hidegpárna meteorológiai helyzetekkel magyarázhatók.

4.2. Járulékok

A fontosabb járulékokat a 2. Táblázatban összegeztük.¹⁸ A korom az aeroszol tömeg 1–5%-át teszi ki, és járuléka, valamint koncentrációja is növekvő tendenciát mutat a vidéki háttértől a külvároson keresztül a belváros felé. Ez elsősorban a közlekedési eredetű EC-vel magyarázható. Az őszi járuléka a regionális háttérben a mezőgazdasági tüzekkel lehet kapcsolatban. A szerves anyag (organic matter, OM) mennyiségét a belvárosban, illetve a külvárosban és a vidéki háttérhelyen $OM/OC=1,6$, illetve $1,4$ konverziós tényezővel becsültük, tekintettel a belvárosi levegő várhatóan nagyobb oxidációs hatására a másik 2 helyszínnel összehasonlítva.¹⁴ Az OM járulékanak nincs markáns évszakos, továbbá a levegőkörnyezet típusával kapcsolatos tendenciózus változása. Járuléka lényegében állandó: $(33\pm 4)\%$, ami a legnagyobb egyedi járulékot képviseli. Mindez azzal függ össze, hogy az OC sokféle típusú és elhelyezkedésű emissziós és képződési folyamatban keletkezik, amelyek kiegészítik vagy kiegyenlítik egymást. A BB járuléka a szerves szénhez télen tipikusan eléri a kb. 70%-ot, és jelentősen csökkent az ősz, tavasz és nyár sorrendben. A regionális érték ősszel itt is kissé nagyobbak tűnik a másik kettővel összehasonlítva. A nyári értékek csupán 2–3% körüliek. A BB járulékanak a külvárosban alakult ki maximuma a helyszínek tekintetében, ami a fátüzelés sajátosságaival, főleg időbeli és térbeli előfordulásával magyarázható.

Arány	Helyszín	Ősz	Tél	Tavasz	Nyár
$EC/PM_{2,5}$ (%)	vidék	$4,0\pm 1,8$	$2,3\pm 0,5$	$2,3\pm 0,7$	$1,24\pm 0,32$
	külváros	$2,7\pm 1,5$	$3,1\pm 0,9$	$4,9\pm 2,2$	$3,5\pm 1,1$
	belváros	$4,3\pm 2,4$	$3,3\pm 0,6$	$6,4\pm 1,7$	$4,6\pm 0,9$
$OM/PM_{2,5}$ (%)	vidék	33 ± 6	29 ± 5	32 ± 5	30 ± 4
	külváros	32 ± 9	31 ± 5	32 ± 6	33 ± 5
	belváros	36 ± 5	30 ± 3	30 ± 4	43 ± 5
OC_{BB}/OC (%)	vidék	37 ± 6	72 ± 10	$5,3\pm 3,0$	$2,0\pm 0,5$
	külváros	35 ± 9	74 ± 17	$11,0\pm 5,0$	$3,1\pm 1,8$
	belváros	37 ± 13	67 ± 6	$9,6\pm 4,0$	$2,4\pm 0,5$

2. Táblázat. Az elemi szén (EC) és szerves anyag (OM) átlagos járuléka és szórása a $PM_{2,5}$ aeroszol tömeghez, valamint a biomassza égetésből származó szerves szén (OC_{BB}) átlagos járuléka és szórása a szerves szénhez (OC) Budapest regionális háttérben (vidék), külvárosában és belvárosában a 4 évszakban.

4.3. Forrásmegoszlás

A széntartalmú kémiai specieszek felosztásának főbb eredményeit a 3 forrástípus között a 3. Táblázatban foglaltuk össze.¹⁸ A fosszilis üzemanyagok tüzelése viszonylag állandó arányban járul hozzá a TC-hez, míg a BB és a biogén források járuléka nagymértékben változik évszakonként. Összesen a 3 fő forrástípus közel azonos jelentőségű, télen a BB a meghatározó forrás mindegyik környezetben, tavasszal az FF és a biogén források dominálnak, míg nyáron a biogén forrástípus válik meghatározóvá. Nyáron a BB alig kvantifikálható, míg a biogén forrás jelentősége télen sem elhanyagolható. A részecskék higroszkópos, illetve illékony tulajdonságaiból az aeroszol rendszer keveredési állapotára és az egyedi részecskék szerkezetére következtettünk.¹⁹

Helyszín	Speciesz	Ősz	Tél	Tavasz	Nyár
vidék	TC ($\mu\text{g m}^{-3}$)	4,7	3,7	2,4	2,4
	EC _{FF} (%)	9	2	10	5
	OC _{FF} (%)	22	26	32	24
	EC _{BB} (%)	5	9	1	<1
	OC _{BB} (%)	31	61	6	2
	OC _{BIO} (%)	33	5	56	72
külváros	TC ($\mu\text{g m}^{-3}$)	8,1	5,9	3,2	3,0
	EC _{FF} (%)	4	2	18	13
	OC _{FF} (%)	28	22	32	26
	EC _{BB} (%)	6	11	2	<1
	OC _{BB} (%)	33	61	10	2
	OC _{BIO} (%)	30	8	38	59
belváros	TC ($\mu\text{g m}^{-3}$)	8,4	5,3	3,6	2,9
	EC _{FF} (%)	7	5	22	13
	OC _{FF} (%)	20	21	28	29
	EC _{BB} (%)	4	10	1	<1
	OC _{BB} (%)	26	57	8	2
	OC _{BIO} (%)	43	8	41	56

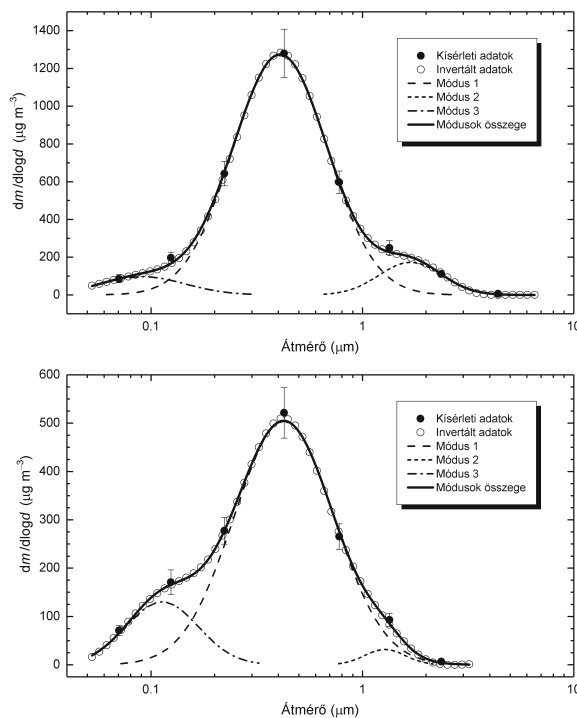
3. Táblázat. A fosszilis (FF) tüzelésből származó elemi szén (EC) és szerves szén (OC), a biomassza égetésből (BB) keletkező EC és OC, illetve a biogén emisszióból (BIO) létrejött OC medián járuléka a teljes szénhez (TC=EC+OC) Budapest regionális háttérében (vidék), külvárosában és belvárosában a 4 évszakban.

4.4. Méreteloszlások

Az anhidrocukrok tömeg méreteloszlásában 3 módus jelent meg (4. Ábra).¹¹ A legnagyobb csúcst (Módus 1) a biomassza égetéshez rendelhetjük (kondenzációs almódus). A Módus 2 (csepp almódus) az előbbi csúcstól alakult ki a részecskék és a vízgőz közötti kölcsönhatással (víz-processzá-lással), míg a Módus 3 a lignin égetéssel lehet kapcsolatos. A módusok medián átmérője rendre 0,42, 1,62 és 0,11 μm , geometriai szórása 1,70, 1,71 és 1,39, relatív módusterülete pedig 90%, 9% és 9%. Mindez azt jelzi, hogy a lignitből származó LVG mennyiség általában elhanyagolható arányú, és ezért a LVG-t a biomassza (fa) égetés alkalmas molekularis markerének tekinthetjük a Kárpát-medencében.

5. Összefoglalás és kitekintés

Jelen tanulmányban tömör áttekintést adtunk az ELTE BpART Laboratórium keretében az elmúlt 3 évben végzett munka egyik fontos területéről, a széntartalmú aeroszol összetevők kémiai és fizikai folyamatairól, jelentőségéről, illetve környezeti és éghajlati hatásairól. Az elért tudományos eredmények és következtetések teljesebb, illetve részletesebb bemutatása, megvitatása és értelmezése megtalálható a feltüntetett közleményeinkben,²⁰ valamint a BpART Laboratórium honlapján.



4. Ábra. A levoglükózán tömeg méreteloszlása Budapest belvárosában két, különböző napon a téli időszakban.

Végezetül megjegyezzük, hogy a levegőminőség javítását célzó országos programokban érdemes nagyobb hangsúlyt fektetni a biomassza égetésre, mert kedvező fejleményeket lehet elérni a háztartási fűtés és tüzelés korszerűsítésével, különösen pedig a lakosság felvilágosításával és oktatásával, illetve a környezettudatos szemléletének erősítésével.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát az NKFIH (K116788, K132254), valamint a Széchenyi 2020 program, Magyarország Kormánya és az Európai Regionális Fejlesztési Alap (GINOP-2.3.2-15-2016-00028 és GINOP-2.3.2-15-2016-00055) támogatta. Köszönetünket fejezzük ki Varga J. Debóra hallgatónak a GC-MS analízis mintáinak előkészítéséért, Blumberger Zoltán hallgatónak a kaszkád impaktor minták gyűjtéséért és feldolgozásáért, Machon Attilának (OMSz) a nagyterefogató aeroszol minták gyűjtésében nyújtott segítségével, valamint Molnár Mihálynak és kutatócsoportjának (ATOMKI) az AMS mérésekért.

Hivatkozások

- Salma, I., Németh, Z., Weidinger, T., Kovács, B., Kristóf, G.: *Atmos. Chem. Phys.* **2016**, *16*, 7837–7851, <https://doi.org/10.5194/acp-16-7837-2016>
- Molnár, Zs. (szerk.): *Budapest Környezeti Állapotértékelése 2013–2017*, Budapest Főváros Önkormányzata, Budapest.
- Salma, I., Németh, Z., Varga, V., Weidinger, T.: *Magy. Kém. Foly.* **2019**, *125*, 64–68, <https://doi.org/10.24100/MKF.2019.02.64>
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier van der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., Nemitz, E., Pandis, S., Riipinen, I., Rudich, Y., Schaap, M., Slowik, J. G., Spracklen, D. V., Vignati, E., Wild, M., Williams, M., Gilardoni, S.: *Atmos. Chem. Phys.* **2015**, *15*, 8217–8299, <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>
- Salma, I., Németh, Z., Weidinger, T., Maenhaut, W., Claeys, M., Molnár, M., Major, I., Ajtai, T., Utry, N., Bozóki, Z.: *Atmos. Chem. Phys.* **2017**, *17*, 13767–13781, <https://doi.org/10.5194/acp-17-13767-2017>
- Vicente, E. D., Alves, C. A.: *Atmos. Res.* **2018**, *199*, 159–185, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.027>
- Simoneit, B. R. T., Schauer, J. J., Nolte, C. G., Oros, D. R., Elias, V. O., Fraser, M. P., Rogge, W. F., Cass, G. R.: *Atmos. Environ.* **1999**, *33*, 173–182, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00145-9)
- Hennigan, C. J., Sullivan, A. P., Collett, Jr. J. L., Robinson, A. L.: *Geophys. Res. Lett.* **2010**, *37*, L09806, <https://doi.org/10.1029/2010GL043088>
- Szidat, S., Jenk, T. M., Synal, H. A., Kalberer, M., Wacker, L., Hajdas, I., Kasper-Giebl, A., Baltensperger, U.: *J. Geophys. Res.* **2006**, *111*, D07206, <https://doi.org/10.1029/2005JD006590>
- Pashynska, V., Vermeylen, R., Vas, G., Maenhaut, W., Claeys, M.: *J. Mass Spectrom.* **2002**, *37*, 1249–125, <https://doi.org/10.1002/jms.391>
- Blumberger, Z. I., Vasanits-Zsigrai, A., Farkas, G., Salma, I.: *Atmos. Res.* **2019**, *220*, 1–9, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.001>
- Molnár, M., Rinyu, L., Veres, M., Seiler, M., Wacker, L., Synal, H.-A.: *Radiocarbon* **2013**, *55*, 338–344, <https://doi.org/10.1017/S0033822200057453>
- Schmidl, C., Marr, L. L., Caseiro, A., Kotianova, P., Berner, A., Bauer, H., Kasper-Giebl, A., Puxbaum, H.: *Atmos. Environ.* **2008**, *42*, 126–141, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.010>
- Russell, L. M.: *Environ. Sci. Technol.* **2003**, *37*, 2982–2987, <https://doi.org/10.1021/es026123w>
- Wolfenbarger, J. K., Seinfeld, J. H.: *J. Aerosol Sci.* **1990**, *21*, 227–247, [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(90\)90007-K](https://doi.org/10.1016/0021-8502(90)90007-K)
- Salma, I., Mészáros, T., Maenhaut, W.: *J. Aerosol Sci.* **2013**, *56*, 53–60, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2012.06.006>
- Salma, I., Chi, X., Maenhaut, W.: *Atmos. Environ.* **2004**, *38*, 27–36, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.047>
- Salma, I., Vasanits-Zsigrai, A., Machon, A., Varga, T., Major, I., Gergely, V., Molnár, *Atmos. Chem. Phys.*, **2020**, *20*, 4295–4312, <https://doi.org/10.5194/acp-20-4295-2020>
- Enroth, J., Mikkilä, J., Németh, Z., Kulmala, M., Salma, I.: *Atmos. Chem. Phys.* **2018**, *18*, 4533–4548, <https://doi.org/10.5194/acp-18-4533-2018>
- Salma, I., Borsós, T., Németh, Z.: *Magy. Kém. Foly.* **2012**, *118*, 107–114.