



**Aeroszol mozgékonyági spektrométerek
összehasonlító vizsgálata és a mérési módszer
optimalizálása**

TDK dolgozat

Szerző: Bángi-Magyar Ignác, Vegyész MSc

Témavezető: Dr. Salma Imre, egyetemi tanár

Analitikai kémiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

2025

Lezárva: 2025. január 5.

Összefoglaló

A légkori aeroszolk vizsgálata éghajlati és egészségre gyakorolt hatásuk miatt kiemelten fontos. A légkör változékonysága miatt, annak vizsgálata és pontos modellezése és megértése csak hosszútávú mérésekkel lehetséges. Munkám során a légkori aeroszolk eloszlását mérő készülékeket hasonlítottam össze. Erre azért volt szükség, mert a régi készülék elöregedett, így le kellett cserélni. Az aeroszolk méréséhez használt készülékeknél nincs lehetőség kalibrációt végezni, ezért több készülék azonos időben történő, párhuzamos mérését kell összehasonlítani. Feladatomb volt a mérési eredmények matematikai analízise és kiértékelése, majd összehasonlítása. Célob volt megállapítani, hogy az új készülék mérései milyen feltételek mellett mondhatók folytonosnak, illetve az esetleges mérési hibák javítása. A munka elvégzése után, megállapítottam, hogy a kisméretű részecskék mérésénél jelentős veszteség tapasztalható. Ezek alapján meghatároztuk, hogy a készülék áramlási rendszerében mi okozza a veszteséget. A hiba kiküszöbölése után a mérési adatokban jelentős javulást tapasztaltunk.

Tartalom

1	Bevezetés és célkitűzések.....	4
2	Irodalmi háttér	6
	2.1 Méreteloszlásokról	6
	2.2 A részecskeszám méreteloszlás meghatározása	8
	2.3 Diffúziós veszteségéről	12
3	Módszerek	13
	3.1 Mérés helyszíne és időszakai	13
	3.2 Vizsgált spektrométerek.....	14
	3.3 Adatfeldolgozás	17
4	Mérési eredmények és kiértékelésük	18
	4.1 Koncentráció arányok.....	18
	4.2 Idősorok	19
	4.3 Regressziós egyenesek	23
	4.4 Méreteloszlások arányai	28
5	Az áramlási rendszer módosítása.....	30
6	Összefoglalás.....	33
7	Köszönetnyilvánítás.....	35
8	Irodalomjegyzék	36

1 Bevezetés és célkitűzések

Az urbanizáció során egyre több és egyre nagyobb városok jönnek létre. A folyamat mértéke növekvő tendenciát mutat (Ritchie és Roxer, 2018). Jelenleg a világ népessége 8 milliárd fő, melynek 57%-a városokban él (UN,2022). A fejlett országokban ez az arány meghaladja a 70%-ot. A városok természetes velejárója az intenzív közlekedés. A lakosság egy jelentős része közlekedik személygépkocsikkal. Ezen kívül számos szolgáltatás (pl. élelmiszer és más szükségletek kereskedelme, egészségügy, szórakozás) fenntartásához is a szükséges jelentős mértékű közlekedés. Az így kialakult városi közlekedés egyre nagyobb méreteket ölt, és folyamatosan fejlődik (Zornoza-Gallego, 2022). A legtöbb nagyvárosban a szolgáltatások biztosítása belső égésű motorok használatával valósul meg (Wu és Avner, 2021; Brunner et al., 2018). Egyéb közlekedési formák (gyaloglás, kerékpározás, illetve tömegközlekedés) aránya is jelentős, és növekvő tendenciát mutat.

A közlekedés és fűtés következtében nagymennyiségű szennyező anyag jut a levegőbe gázok (NO, SO₂, CO és CO₂) és aeroszol részecskék formájában. Ezek hosszú távon károsítják az ott élők egészségét (Liang és Gong, 2020; Riediker, 2019), és befolyásolják az éghajlatot.

Ezen okokból szükségessé vált a levegő minőségének vizsgálata (Durke, 1991). A levegő azonban egy folyamatosan változó, kolloid rendszer, amelyben fizikai, kémiai, meteorológiai és biológiai folyamatok játszódnak le, illetve ezek egymással is kölcsönhatásban vannak. A levegőminőség megvalósítása tehát egy összetett feladat mind a szennyezők, mind a térbeli felbontás, mind pedig az időskála tekintetében.

A levegő minőségét a kulcsfontosságú légszennyező anyagokkal jellemezzük. Ezek a szennyező anyagok a következők: SO₂, CO, NO, NO₂, O₃, valamint a szálló por (Particulate Matter, PM; Salma, 2010). Ezek közül a legnagyobb kockázattal a levegőben lévő részecskék rendelkeznek. Hatásuk nagyban függ a részecskék méretétől, ezért bevezették a PM_{2.5} és a PM₁₀ méretfrakciókat. Az egészségi hatások kialakításában azonban további mennyiségek is szerepet játszanak, azonban ezeket egyelőre nem szabályozzák. Ilyenek a korom vagy az aeroszol részecskék száma. Ezen anyagok vizsgálata jelenleg kutatások keretében történik.

Ebből a célból jött létre a Budapesti Aeroszol Kutató és Oktató Platform (Budapest platform for Aerosol Research and Training, BpART Laboratórium,

<http://salma.elte.hu/BpART>), melynek keretében folyamatos mérések történnek a részecskeszám vizsgálatának céljából. Az egyik, fő műszer a részecskék számának méreteloszlását határozza meg. A légköri folyamatok tekintetében a megalapozott következtetésekhez hosszú idejű mérésekre van szükség. Ennek oka a levegőben lejátszódó folyamatok változékonysága és összetettsége, ami miatt a mérések a klasszikus értelemben nem tekinthetők ismételhetőnek vagy reprodukálhatónak (Salma, 2020).

A részecskeszám koncentrációjának és különösen a méreteloszlásának standardizálására jelenleg nem léteznek módszerek. Közepes ($100\text{ nm} < d < 800\text{ nm}$) átmérőknél lehetséges átmérő kalibrációt végezni hitelesített monodiszperz polisztrén latex (PSL) gömbökkel ($100\text{--}500\text{ nm}$ között), ami azonban nem fedi le az érzékenyebb átmérőtartományokat. Az általános gyakorlat az, hogy az új mérőrendszereket egy másik, kalibrációs célú berendezéshez viszonyítják (Wiedensohler et al., 2012). Ilyen ellenőrzést a mérési sorozat kezdetén, majd 3-4 évente mi is elvégeztünk a saját rendszereinkkel, a World Calibration Center for Aerosol Physics (Lipcse, Németország) vagy a University of Helsinki (Finnország) kutatóival közösen. A koncentrációs arányok szokásos, elfogadott eltérései 10% a $20\text{--}200\text{ nm}$ átmérő tartományban, és 20% $200\text{--}800\text{ nm}$ között.

Tudományos diákköri munkám keretében a régi és az új differenciális mozgékonyági spektrométer (Differential Mobility Particle Sizer, DMPS) mérőrendszerek összehasonlításába kapcsolódtam be. Munkám konkrét célja az volt, hogy elvégezzem a két műszerrel mért adatsorok kiértékelését és ennek alapján megállapítsam, milyen eltérések tapasztalhatóak a két készülékegyüttes között, és hogy milyen feltételek mellett tekinthetjük a folytatólagosnak méréseket.

2 Irodalmi háttér

2.1 Méreteloszlásokról

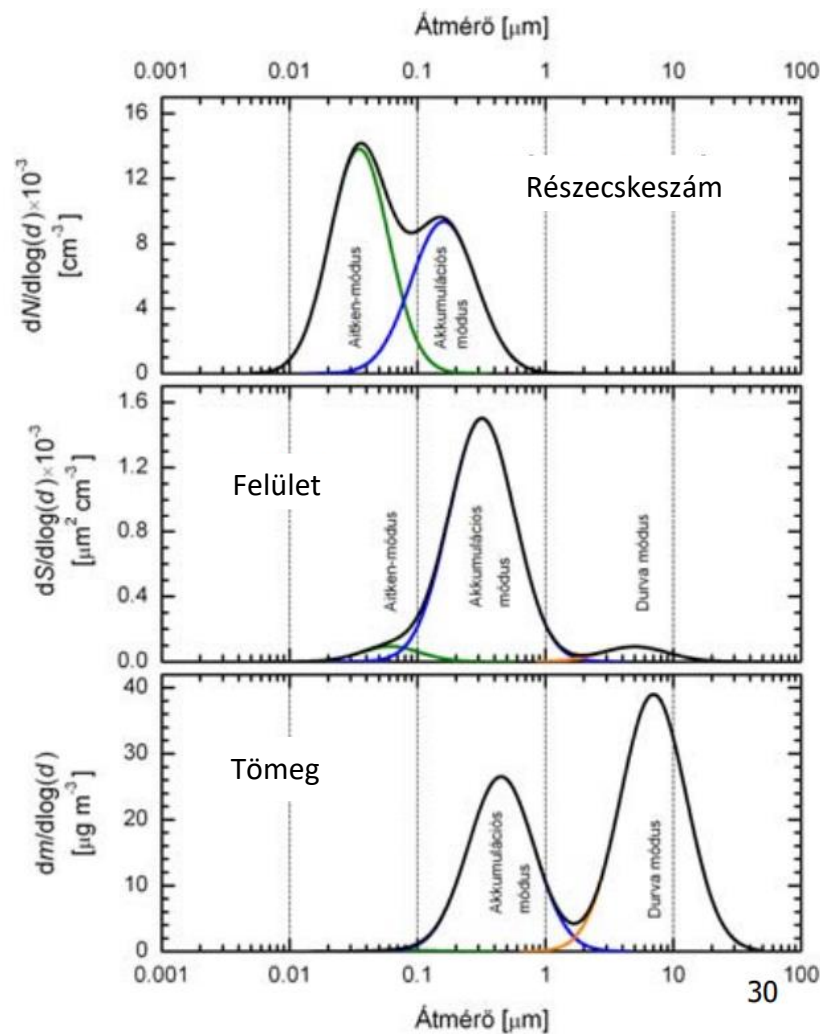
A levegőt kolloid rendszer mert gáznemű anyagok keverékében szuszpendált szilárd és folyékony részecskéket is tartalmaz (Hinds, 1999; Salma, 2006). A részecskék lehetnek fizikai, kémiai vagy biológiai eredetűek (Bozóki, 2014). A részecskék mérete nagyban függ attól, hogy milyen forrásból származnak és 1 nm-től 10 µm-ig terjedhetnek (Gelencsér et al., 2012).

A részecskék viselkedése, környezeti, egészségi és éghajlati hatásai számos tulajdonságtól (átmérő, kémiai összetétel, optikai paraméterek, toxikus tulajdonságok) függhetnek. A leggyakrabban figyelembe vett metrika a részecskék tömege, felülete és száma. Ezen paraméterek részletesebb vizsgálatát méreteloszlásukkal lehetséges elvégezni.

A részecskék méretének egységes jellemzésére bevezetjük az ekvivalens átmérő fogalmát. Ezalatt azt értjük, hogy bármely részecskéhez (akár szabálytalan alakúhoz is) átmérőt rendelünk, mely azonos fajlagos tulajdonságokkal rendelkezik, mint a vizsgált részecske. Az ekvivalens átmérőnek számos fajtája létezik. A leggyakrabban használtak az aerodinamikai átmérő és az elektromos mozgékonyági átmérő, de van ekvivalens, térfogati, felszíni és tömeg átmérő is.

Az 1. ábrán az előbb említett három méreteloszlást mutatom be Budapesten az aerodinamikai átmérő függvényében (Salma, 2012; Horvath, 1996). Az 1. ábrán az abszcissa logaritmikus skálán vannak feltüntetve. Erre azért van szükség, mert a légköri aeroszol részecskék tipikus méreteloszlása logaritmikusan normális, így a logaritmikus skálán a jól ismert normális eloszlást (harang alakú görbét) kapunk.

A méreteloszlások általában három módusból állnak. A legnagyobb átmérővel rendelkező csúcsot durva módusnak nevezzük. Ezek a részecskék aprózódással vagy fizikai málással keletkeznek. A középső csúcs az akkumulációs csúcs, mert ezen részecskék tartózkodási ideje a légkörben a legnagyobb. A legkisebb átmérőhöz tartozó csúcsot Aitken-módusnak hívjuk. Ezen részecskék magas hőmérsékletű emissziós folyamatokban vagy a környezeti (alacsony) hőmérsékleten, nukleációval (gőz-részecske fázisváltozással) keletkeznek. A durva módus tipikus példája a por míg a füst, illetve a korom részecskék az Aitken-módusba tartoznak.

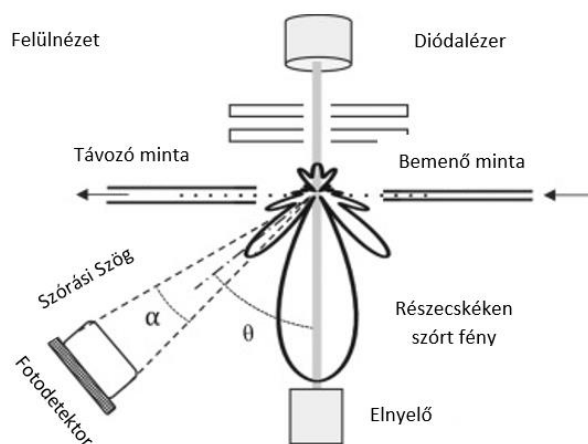


1. ábra: A részecskeszám, a részecskék felületének és a részecskék tömegének eloszlásai Budapest belvárosában.

A három konjugált ábra összehasonlításával megállapítható, hogy a részecskék tömegéhez legnagyobb járulékot a durva részecskék adnak (Roy, 2023). Ezek száma azonban elhanyagolható az Aitken-részecskékhez viszonyítva. Legnagyobb számban a legkisebb részecskék vannak a levegőben, míg tömegük elhanyagolható. A tömegeloszlás az egészségi hatások szempontjából kiemelkedő jelentőséggel bír. A részecskék felületének eloszlása a légköri, multifázisú kémiai reakciók és például a vírusok terjedése miatt fontos (Willeke, 1975). A részecskeszám méreteloszlás optikai, gázfázisú kémiai reakciók és éghajlati okok miatt meghatározó. A dolgozat további részében a részecskeszám méreteloszlással és mérésével foglalkozom.

2.2 A részecskeszám méreteloszlás meghatározása

Az optikai részecske-méretező és -számláló (Optical Particle Sizer, OPS) működési elve a mintában lévő részecskéken szóródó fény detektálásán alapul (ahogy a 2. ábrán láthatjuk) (Sang-Nourpour, 2019). A mintát, amely polidiszperz részecskéket tartalmaz vékony sugárban, a minta áramlására merőleges lézernyalábbba irányítjuk. Az egyedi részecskéken szóródó fény intenzitásából számoljuk ki a részecskék nagyságát és számát. Ennél a módszernél a részecskék átmérőjének nagyobbak kell lennie a mérés során alkalmazott fény hullámhosszánál. Ebből következik, a használt fény hullámhossza miatt, hogy ez a készüléktípus 300 nm átmérő felett alkalmas részecskék vizsgálatára. Abban az esetben is ha simitációs háttérkorrekció alkalmazunk (Hinds, 1999; Njalsson, 2017). A részecskeszám méreteloszlásából (1. ábra) azonban látható, hogy a legtöbb légköri aeroszol részecske kisebb ennél a tartománynál, ezért a mérésük más elven alapuló módszert igényel.



2. ábra: Az Optikai Részecske Méretező és Számláló működési elve

Kisebb méretű részecskék vizsgálatához több alrendszerből álló készülékre van szükség. A differenciális mobilitási részecske szeparátor (Differential Mobility Partical Sizer, DMPS; Wiedensohler, 2017) rendszer alkalmas kis átmérőjű részecskék mérésére is. A DMPS a következő fő alrendszerekből áll: szárító, neutralizáló/bipoláris töltő, differenciális mozgékonyági analízátor (Differential Mobility Analyser, DMA) és kondenzációs részecskeszámláló (Condensation Partical Counter, CPC).

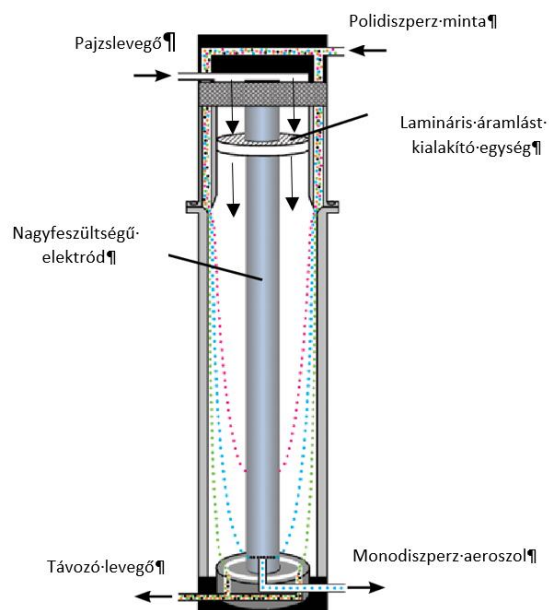
A szárító szerepe, hogy a relatív páratartalmat 30%-nál kisebb értékre csökkentse le. Ennek célja, hogy a külső, esetlegesen magas ($R_{rel}>80\%$) relatív páratartalommal bíró levegőben a vizsgálni kívánt részecskék higroszkópos növekedését, és az ezzel járó átmérő ingadozást elkerüljük. A szárító segítségével a részecskék mérése száraz állapotban történik, így jól reprodukálható és összehasonlítható átmérőt regisztrálunk (Salma, 2017; Ziese, 2008).

1. táblázat: Adott elemi elektromos töltésű aeroszol részecskék számának relatív aránya (f) egyensúlyi töltéseloszlás esetén

$f(N)$ (%)					
Átmérő (nm)	-2	-1	0	1	2
2	0	0.85	98.38	0.77	0
5	0	2.21	95.92	1.86	0
7	0	3.28	94.03	2.69	0
10	0	5.03	90.96	4.02	0
13	0	6.87	87.73	5.40	0
50	1.13	22.94	58.10	17.20	0.63
100	5.67	27.42	42.36	20.75	3.24
200	12.18	25.54	29.96	19.65	7.21
500	15.09	18.60	18.28	14.33	8.95
1000	12.86	13.33	12.36	10.24	7.59

Egyensúlyi töltéseloszlás esetén a részecskék között jól meghatározott arányban vannak jelen semleges és töltött (negatív vagy pozitív) részecskék (Wiedensohler, 1991). A kis részecskék nagy része semleges, és csak sokkal kisebb részük rendelkezik elektromos töltéssel. A részecskék méretének növekedésével - a mérettől függően - a töltött részecskék aránya változik. A neutralizáló/bipoláris töltő segítségével elektromos töltés egyensúlyi állapotot hozunk létre az aeroszol mintában, és így a konstans arányokat használhatjuk a mérési adatok kiszámolásánál, az 1. táblázat alapján.

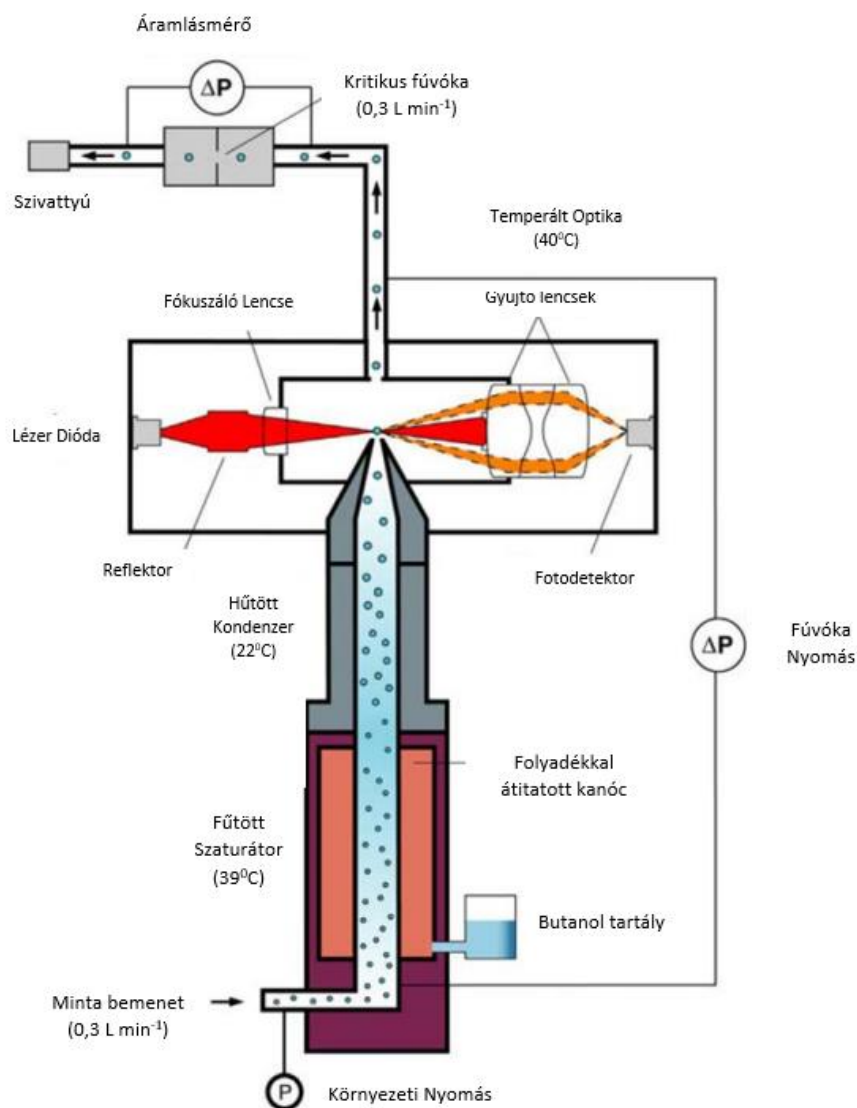
Az aeroszoláram ezután a DMA-ba kerül, melyben két hengeres elektródból áll. Az elektródok koaxiális helyzetben vannak egymáshoz képest. A légáram a külső elektród palástjánál lép be a hengerbe, míg a belső elektródot egy nagy tisztaságú, részecskementes (HEPA-szűrővel) tisztított levegőáram védi. Ezt zárt rendszerben folyamatosan keringettjük. Az elektródokra fokozatosan növekvő feszültséget kapcsolunk, mely segítségével a megfelelő méretű részecskéket el tudjuk választani a többi részecskétől (3. ábra). Az így létrehozott monodiszperz aeroszolt egy mintaelvezető nyíláson keresztül a CPC-be vezetjük. A nagyfeszültség változtatásával különböző mobilitási átmérőjű részecskéket juttatunk tovább a CPC-be, ahol a részecskék számát mérjük, tehát részecskeszám méreteloszlást határozunk meg.



3. ábra: A differenciált mozgékonyági analízátor működési elve

A CPC működési elve a fényszóródáson alapuló részecskeszámlálás (4. ábra) (Brachert, 2014). A részecskék detektálásához a fény hullámhossza és a részecskék mérete összemérhető kell hogy legyen, ezért egy munkafolyadékot gőzként, a részecskékre kondenzáltatunk. A kondenzációval jelentős mértékben megnöveljük a részecskék méretét, ami így nagyobb lesz a fény hullámhosszánál. A kondenzációs egység egy fűtött (39 °C hőmérsékletű) (Bezantakos, 2022) egységből áll, amelyben n-butanol gőz található. A részecskék áthaladva ezen az

egységen n-butanollal keverednek, majd egy hűtött szakaszba (14 °C) érve, a túltelítettség miatt az aeroszol részecskékre kondenzálódik az n-butanol, amitől a részecskék megnövekednek. Az így megnövelt méretű részecskéket a számlálóba vezetjük. A számlálóban lézer segítségével detektáljuk a fényszóródás eseményét, tehát a részecskék számát. A számláló a készülék legmelegebb része (40 °C), aminek célja, hogy a lencsékre való kicsapódást elkerüljük (Brachert, 2014; Kuang, 2019).



4. ábra: A kondenzációs részecske számláló sematikus működési elve

2.3 Diffúziós veszteségéről

A diffúziós veszteség egy olyan jelenség, amelyet gázok áramlásának vizsgálatakor figyelhetünk meg (Hinds, 1999). Akkor jelentkezik, amikor az anyag vagy az energia diffúzióval, azaz a részecskék véletlenszerű mozgásakor, távozik az eredeti közegből. A légköri aeroszolk vizsgálatakor ez a jelenség szignifikáns eltérést okozhat a legkisebb méretű részecskéknél. Ennek számolásához matematikai összefüggéseket tudunk alkalmazni lamináris áramlás esetén. A mintavételtől a részecskék mérésének helyéig nagy utat kell megtennie a mintának. A minta kör keresztmetszetű csöveken áramlik, amelyre érvényes az 1. egyenlet:

$$\mu = \frac{4DL}{\pi d^2 U} = \frac{DL}{Q} \quad (1)$$

ahol μ diffúziós veszteségi paraméter, d a cső átmérője, L a cső hossza, D diffúziós együttható, U áramlási sebesség és Q térfogatáram. Ez a korrekció főleg a kisebb méretű ($d_A \leq 0.1 \mu\text{m}$) részecskékre szükséges. A diffúziós veszteség minimalizálása során figyelni kell arra, hogy a rendszerben fennmaradjon a lamináris áramlás. Az 1. egyenlet azt mutatja, hogy a diffúziós veszteség a mintavezető tömlő hosszának minimalizálásával csökkenthető, és nem függ a cső átmérőjétől.

3 Módszerek

3.1 Mérés helyszíne és időszakai

A mérés helyszíne Budapesten egy városi környezetben elhelyezett mérőállomás (5. ábra), amely az utcafelszín felett 11 méteren, a Duna partjától körülbelül 85 méterre, az ELTE Lágymányosi Campus Északi tömbjének teraszán található. (koordináták: N 47° 28' 29,944, E 19° 03' 44,629, 158,7 m). A konténernél az uralkodó szélirány északi, így a belvárosból érkező jól átkevert levegőt tudjuk mérni. A konténer elhelyezésének jelentősége abban rejlik, hogy a belvárosra érvényes információkat nyerhetünk. A várost kettészelő Duna egy széles légfolyósóként is funkcionál, mely nagyban hozzájárul a város levegőjének cseréjéhez és tisztulásához.

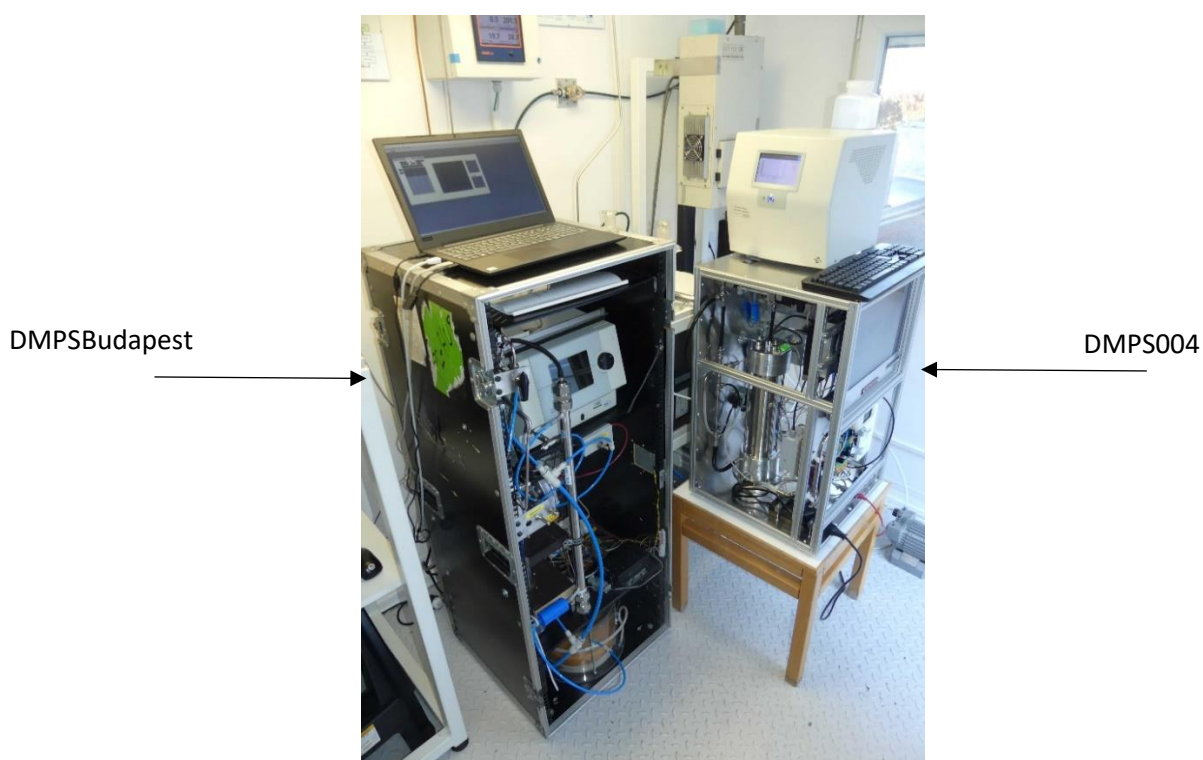


5. ábra: A BpART Laboratórium kutató konténere az északi tömb teraszán

Az összehasonlító méréseket 2022 decemberétől kezdve végeztünk, melyekkel az új készülék optimális konfigurációjának megtalálása volt a célja. A dolgozatban felhasznált adatokat 2023. február 16 és 21 között mértük. Az adatokat helyi időben (UTC+1) fejeztem ki.

3.2 Vizsgált spektrométerek

A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerek működési elve és mérési paramétereik megegyeznek. Különbség a két készülék között a több mint tíz év különbség miatt van. Bár az elmúlt évek során a DMPSBudapest készülékbe miniatürizált fejlesztések beépítésre kerültek. A spektrométerek elhelyezése az összehasonlító mérések során a 6. ábrán látható, míg a két mintavevőcső (inlet) a 7. ábrán tekinthető meg.



6.ábra: A képen a dolgozatban összehasonlításra kerülő differenciált mozgékonyági részecske számlálók láthatóak. A bal oldalon a DMPSBudapest, a jobb oldalon a DMPS004 mérőrendszerek.

A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerek mérési ciklusideje körülbelül azonos (8 min), de nem teljesen megegyező. Ennek oka, hogy a pontos áramlási sebességek és az elektródokra kapcsolt feszültség stabil beállításának ideje a két készülékben kissé eltérő. Érdeemes megemlíteni, hogy a két DMPS rendszer fő egységei azonosak, kivéve a CPC-t. A régebbi műszerben 3775, míg az újabb rendszerben 3752 típusú CPC található (gyártó TSI, USA).



7. ábra: A konténer tetején található mintavevő csövek (inletek)

A beszívó csövek eső elleni védelemmel (fordított tölcsér) és bogárvédelemmel (nylon harisnya) vannak ellátva, és a BpART laboratórium konténerének tetején, egymástól kb. 1 méter távolságra helyezkednek el. A levegőmintát először egy szárítón vezetjük keresztül. Az eszköz egy Narion-cső, melyben a friss mintát egy ellenáramú, száraz levegőárammal szárítjuk. Ezután egy szelep átkapcsolásával megmérjük a teljes részecskeszám koncentrációt. Ez a ciklus első lépése. Ez az adat azért szükséges, mert így a csatornában mért részecskék koncentrációjának összege összehasonlíthatóvá válik a teljes részecskeszám koncentrációval. A szelep visszaváltásával a polidiszperz mintát átvezetjük a neutralizálón/bipoláris töltőn, ezzel elektromos töltésegyensúlyt hozunk létre benne. A bipoláris töltőben egy lágy β -sugárzó forrás van, mely ^{60}Ni -t tartalmaz. A polidiszperz mintaáramot a DMA-ba vezetve monodiszperz mintává alakítjuk.

A DMA-ban a levegőáram kétféle áramlási sebességgel mozog. Ennek oka, hogy a DMA-ban az elektródokra kapcsolt feszültség nem haladhat meg egy bizonyos értéket, mert a két elektród között szikrázás jönne létre. Ez tönkretenné a mérést. A szikrázás megakadályozása érdekében a méréstartomány két részre lett bontva. Az első szakasz a 6–250 nm részecske átmérő tartomány, amelynek mérésekor nagy áramlási sebességgel (high-flow mode) működik a mérőrendszer. A minta áramlása 2.0 L min^{-1} , a DMA pajzslevegőjének áramlása ennek tízszerese, 20 L min^{-1} . Az elektródokra kapcsolt feszültség 9 V-tól növekszik lépésenként

8.3 kV-ig, 20 lépésben, ami 20 részecskecsatornát eredményez. A csatornák a részecskék méretét határozzák meg. Az első csatorna a 6 nm átmérőjű részecskéket, míg a 20. csatorna a 250 nm-es részecskéket méri. Az egyes csatornáknál a részecskeméret úgy lett beállítva, hogy egyenletesen lefedje a vizsgált átmérőtartományt a logaritmikus skálán.

Ezután kezdődik a második szakasz, a lassú áramlási szakasz (*low-flow mode*). Ekkor a minta áramlási sebessége 0.3 L min^{-1} értékre csökken, a pajzslevegő áramlása pedig 3.0 L min^{-1} . Ezáltal az elektródokra kapcsolt feszültség maximumát csökkenthetjük. Erre azért van lehetőségünk, mert a nagyobb méretű részecskék a kisebb mobilitásuknak köszönhetően később érik el a kivezető nyílást. A második szakaszban 10 különböző csatornában mérünk. Az első csatorna 169 nm, míg az utolsó 997 nm átmérőjű részecskéket mér.

A két szakaszban összesen három olyan csatorna van, amelyek átfedik egymást (169, 205 és 250 nm). Erre azért van szükség, hogy az átfedő csatornáknál az adatok folytonosságának érdekében az azonos méretű részecskéket mérő csatornák koncentrációit átlagoljuk. A két szakaszban mért 30 csatornából így összesen 27 csatornát kapunk.

A konténerben légkondicionáló működik az állandó mérési körülmények biztosítása érdekében. A belső nominális hőmérséklet $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ami $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ intervallumon belül ingadozik. A CPC-ből távozó mintákat a konténer alján, egy csövön keresztül, a konténertől 3 méterrel elvezetve eresztjük ki a szabad levegőbe, így elkerülve az esetleges minta szennyezést.

3.3 Adatfeldolgozás

A mért adatokból a spektrométerek kontúrgörbéket hozunk létre és a mért adatokat mérési fájlokba rendezzük, napi szinten. A kontúrgörbék az abszcisszán az idő függvényében, az ordinátán a részecske átmérők függvényében, színskálával jelölve ábrázolták a részecskeszám koncentrációkat.

A mérési fájlokat Excel-táblázatban dolgoztam fel. A matematikai analízis során az egyes csatornákra lebontva kiszámoltattam a leíró statisztikákat, tehát az adatok mediánját, középértékét és szórását. A kapott adatok ellenőrzéséhez a csatornák minimum és maximum értékeit használtam fel. Erre azért van szükség, mert számos olyan adatpont is megtalálható az adathalmazban, amelyek kiugró értékek lehetnek, mérési okok miatt.

A két műszer ciklusideje kissé eltér egymástól, ami kommulálódott és emiatt az adatsorokat korrigálni kellett, hogy lehetőleg minél kisebb legyen az időbeli eltérés a mért adatpárok között. Az adatok feldolgozása előtt ezt a korrekciót elvégeztem, úgy, hogy a két műszer adatsorainak időbélyegét megvizsgálva a 4 percet meghaladó időbeli eltérés esetén, a DMPS004 műszer adatsorát elcsúsztattam későbbre. Ebből kifolyólag az időbeli eltérések maximális értéke 4 min volt.

A részecskeszám koncentrációkat néhány kiemelten fontos mérettartományban is megvizsgáltam. Ezek a tartományok különböző légköri folyamatok és egészségi hatások miatt vannak meghatározva. A következő öt, különböző tartományt választottuk: nukleációs tartomány (6–25 nm), emissziós tartomány (25–100 nm), ultrafinom tartomány (6–100 nm), regionális részecske tartomány (100–1000 nm) és az összes részecske tartománya (6–1000 nm; Salma et al., 2011, 2017). A mérettartományok koncentrációját a meghatározott csatornába eső adatok összeadásával kaptam meg, mely összeget az első csatorna és a második csatorna átmérőinek hányadosának logaritmusával szoroztam meg $[\log(d_2/d_1)]$, annak érdekében, hogy légköri koncentrációt kapjak. Ezekből idősorokat készítettem és vizsgáltam.

4 Mérési eredmények és kiértékelésük

4.1 Koncentráció arányok

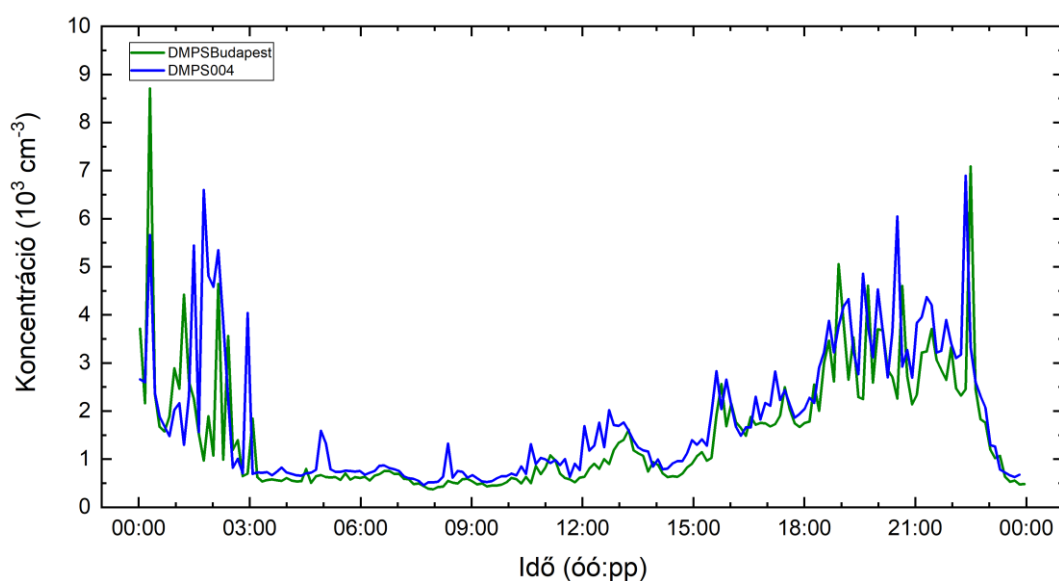
A 2. táblázatban láthatjuk, hogy az új műszer (DMPS004) általában valamivel kisebb koncentrációkat mér a vizsgált koncentráció-tartományokban a középértékek a hibahatáron belül, 1 körül mozognak. A teljes részecskeszám esetén ez az arány 0.92. A leginkább eltérő arány (0.82) az emissziós részecskék esetében tapasztalható, ezek koncentrációja viszonylag kicsi, ami kihat az arány értékére. A minimum és maximum értékek a középértékhez viszonyítva 5–6 faktoron belül mozognak, ami az adatok torzítatlanságát mutatja. Az adatok relatív szórása általában 30%-nál kisebbek, ami a légkörkémi méréseknél nem számít kiugróan nagyoknak, de további összehasonlítást igényel. Az N_{6-25} tartományban, ahol a relatív szórás értéke elérte a 40%-ot. Ezen tartományt az időváltozékonyság és a légköri dinamika miatt is tovább vizsgáltam, idősorok segítségével. Az összehasonlítás eredményeinek értékeléséhez célszerű figyelembe venni, hogy a DMPS spektrométerek detektorának (a CPC-nek) a gyártója a két eszköz között $\pm 10\%$ -on belüli egyezést garantál.

2. táblázat: A DMPSBudapest és a DMPS004 készülékkel mért koncentrációarányok leíró statisztikai adatai a 6–25 nm (N_{6-25}), 25–100 nm (N_{25-100}), 6–100 nm (N_{6-100}), 100–1000 nm ($N_{100-1000}$), 6–1000 nm (N_{6-1000}) mérettartományokban.

	Minimum 1	Minimum 2	Minimum 3	Medián	Maximum 3	Maximum 2	Maximum 1	Középérték	Szórás
N_{6-25}	0.19	0.19	0.19	0.99	3.62	4.40	6.36	1.04	0.40
N_{25-100}	0.18	0.20	0.22	0.80	2.66	3.35	4.77	0.82	0.24
N_{6-100}	0.24	0.29	0.29	0.89	3.09	3.61	3.92	0.92	0.28
$N_{100-1000}$	0.56	0.58	0.65	0.90	1.38	1.42	1.57	0.90	0.08
N_{6-1000}	0.26	0.32	0.33	0.89	2.56	2.85	3.31	0.92	0.22

4.2 Idősorok

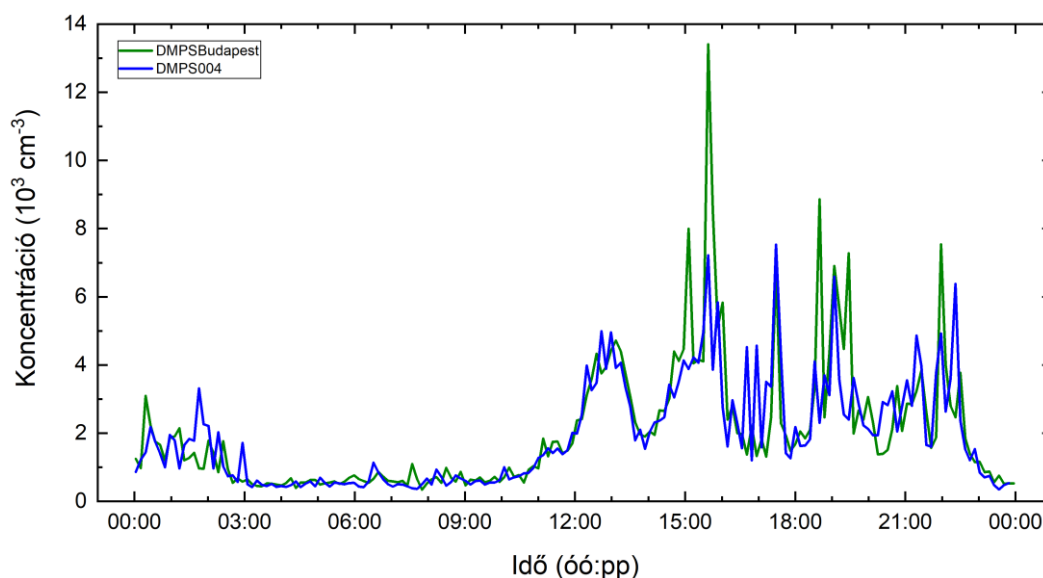
A nukleációs részecsketartomány idősorában a két mobilitási spektrométer által mért egyedi koncentrációk is jó egyezést mutatnak egymással. Csúcsszerűen, csak rövid időszakok alatt tapasztaltam eltéréseket. A csúcsszerű eltérések az adatok fluktuációjával, és a készülékek eltérő ciklus idejével, a két CPC mérési dinamikája közötti lehetséges különbségekkel, illetve a nem teljesen azonos inlettal magyarázható. A két készülék mintavételének ideje időszakosan maximum négy perc eltérést is mutathat. Ennyi idő alatt a részecske méreteloszlása megváltozhat. A két idősor között nem fedeztem fel szisztematikus eltérést. Kisebb és nagyobb koncentráció esetén is, azonos relatívméretű eltérés tapasztalható. 2023 február 18-án 11 órától 14 óráig, majd 14 órától 16 óráig ismét nukleációt azonosítottunk, amelyek kedveztek ezen koncentráció-tartomány összehasonlításának.



8. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerekkel a 6–25 nm átmérőtartományban mért koncentrációk idősora 2023. 02. 18-án

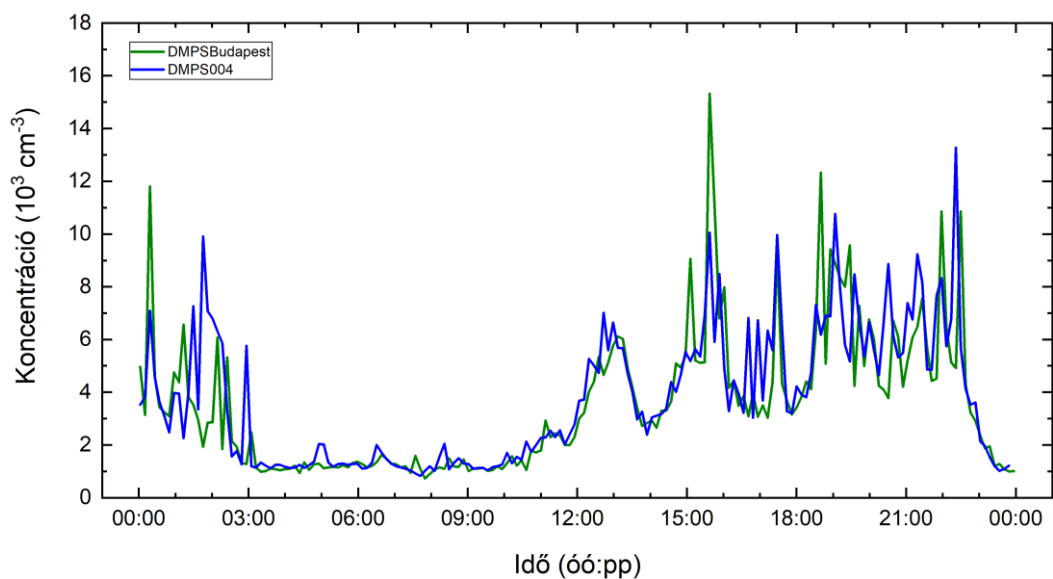
Az emissziós részecsketartomány ábrázolt idősorában (9. ábra) a két mobilitási spektrométerrel mért koncentrációk között nincs szisztematikus eltérés. A DMPS004 készülék nagyobb értékeket mért a DMPSBudapestnél, azonban, ennek oka valószínűleg a régi készülék előregedéséből származó detektálási határfok csökkenés. Kisebb koncentrációk esetén a két készülékkel mért adatok aránya azonos a nagyobb koncentrációknál megfigyelhető

arányokkal. Csúcsszerűen, rövid időszakok alatt itt is tapasztaltam nagyobb eltéréseket, amelyek okai a korábban említettekkel azonosak.



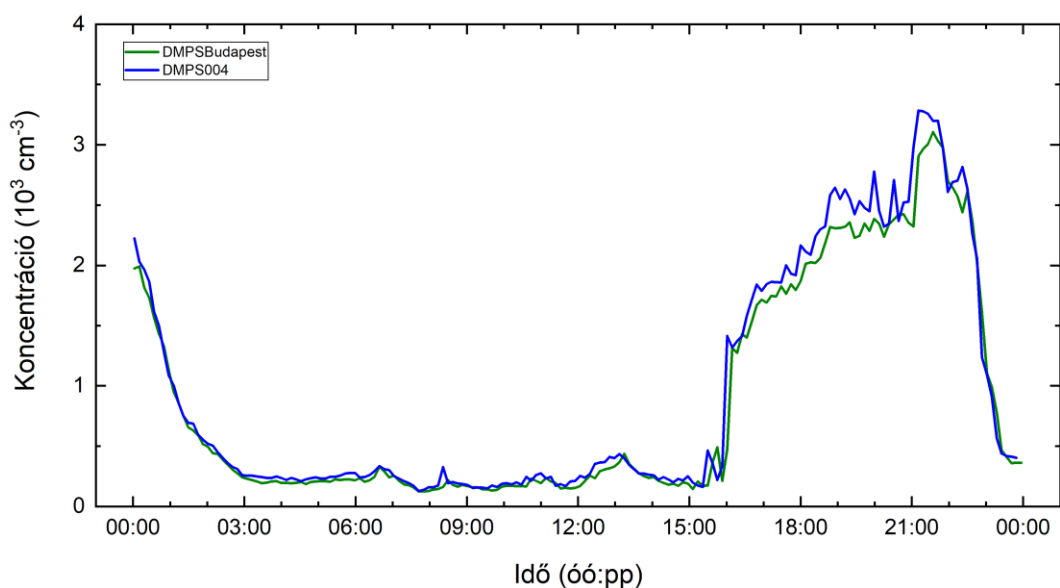
9. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerekkel a 25–100 nm tartományban mért koncentrációk időszora 2023. 02. 18-án

Az ultrafinom részecsketartományban sem látható szisztematikus eltérés a koncentrációkban. Ennek a méret tartománynak az idősorában megjelennek a nukleációs és az emissziós tartományban lévő motívumok. Csúcsszerű eltérések itt is rövid időszakokban megfigyelhetők. Az alacsony koncentrációknál a két műszer által mért koncentrációk aránya hasonló a magas koncentrációkéhoz, tehát nem mutat szisztematikus eltérést.



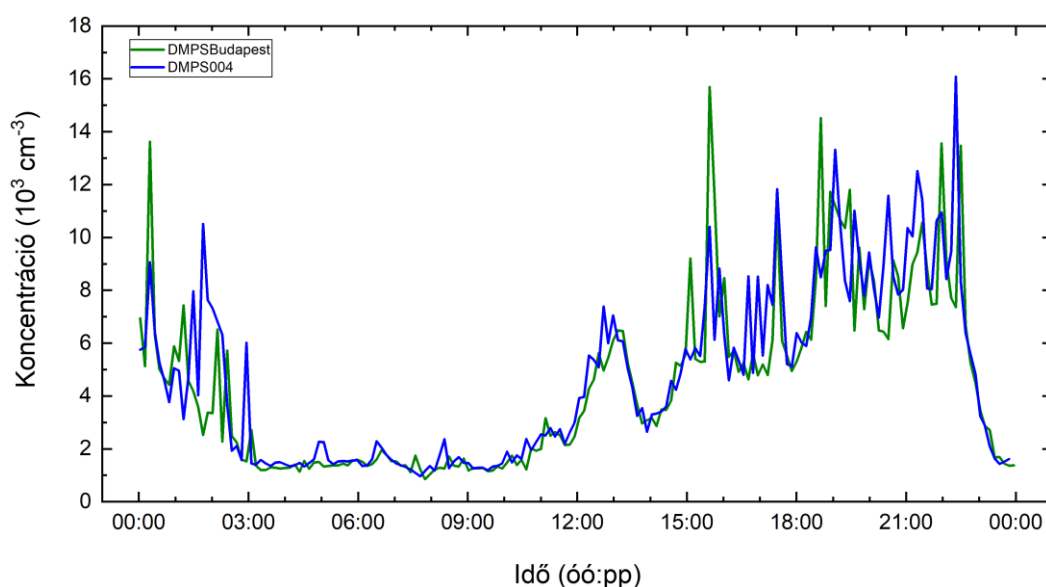
10. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerekkel a 6–100 nm átmérőtartományban mért koncentrációk időszora 2023. 02. 18-án

A regionális részecskék koncentrációja többszörösen kisebb a többi koncentrációs tartománynál, ezért nem kifejezetten alkalmas az összehasonlításra. Ezzel együtt a munkát elvégeztem a következetesség miatt. A regionális részecskeméret tartományban a két mozgékonyági spektrométerrel mért koncentrációk nem mutatnak szisztematikus eltérést. Az alacsony koncentrációk aránya megegyezik a nagy koncentrációk arányával. A két készülék-együttes ebben a részecskeméret tartományban egybevágóan mért.



11. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerekkel a 100–1000 nm átmérőtartományban mért koncentrációk időszora 2023. 02. 18-án

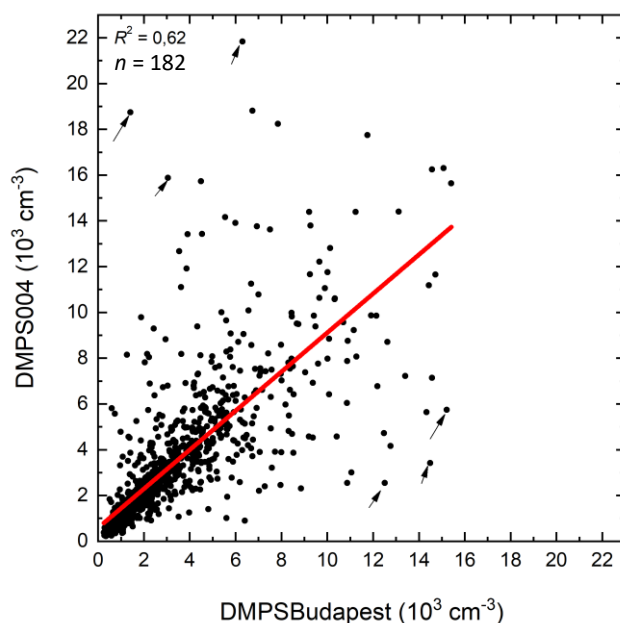
A teljes részecske tartomány koncentrációjának idősorát ábrázolva a két mobilitási spektrométer koncentrációi között nem fedezhető fel szisztematikus eltérés. Csúcsszerűen, rövid időszakok alatt tapasztalható csak néhány kiugró érték, amelyek a korábbi okokkal magyarázhatók. A koncentrációk arányai kis és nagy értékeknél közel azonosak.



12. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerekkel a 6–1000 nm átmérőtartományban mért koncentrációk idősora 2023. 02. 18-án

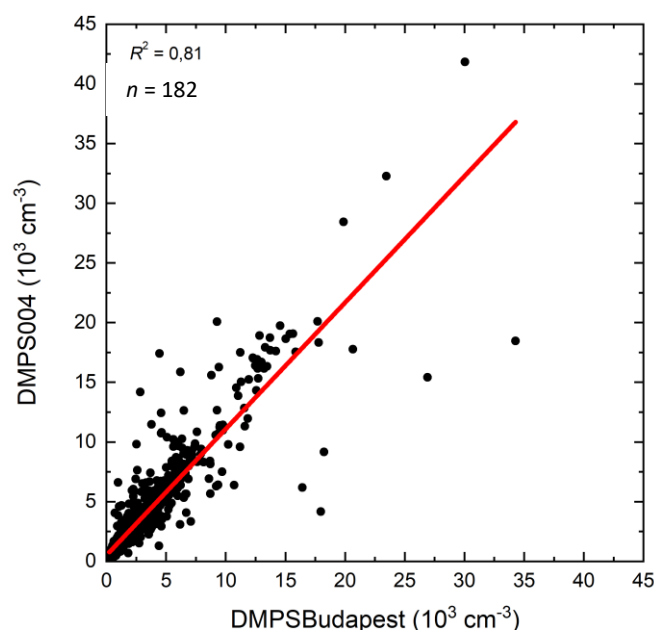
4.3 Regressziós egyenesek

A 13. ábra regressziós egyenese azt mutatja, hogy a 6–25 nm átmérőjű részecsketartományban a DMPSBudapest és a DMPS004 készülékek által mért adatok jelentős mértékben fluktuálnak. A regressziós egyenest az $y=mx + b$ egyenlet írja le, ahol az egyenes meredeksége és szórása: $m = 0.82 \pm 0.02$, tengelymetszete és szórása $714 \pm 98 \text{ cm}^{-3}$. A variancia koefficiens az illesztett egyenesnél: $R^2 = 0.62$. Ebből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy ebben a mérettartományban a két mozgékonyasági spektrofotométer mérési adatai jelentősen eltérnek 1-től, ami a CPC-k eltéréseivel magyarázható, de azért érdemes tovább vizsgálni, azonban az egyes adatai jelentős bizonytalansággal lehetnek terheltek. A DMPS004 általánosságban valamivel kisebb koncentrációkat mér, mint a DMPSBudapest. Ennek oka az lehet, hogy a készülék-együttesben nem optimális a fizikai konfiguráció, és emiatt a legkisebb mérendő részecskék elveszhetnek. A 13. ábra alapján az adatfelhőnek nincs strukturált vagy szisztematikus eltérése az egyenes környezetében, ami miatt a nagyobb vagy rendszerszerű eltérések, illetve hibák kizárhatóak.



13. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerek a 6–25 nm átmérő- tartományban mért koncentrációk regressziós egyenese. Az ábrázolt koncentrációk a mérés teljes időtartamára vonatkoznak. A nyíllal jelölt pontokat kieső értékeknek tekintettem. A mintaszámot (n) és a regressziós egyenes variancia koefficiensét (R^2) is feltüntettem.

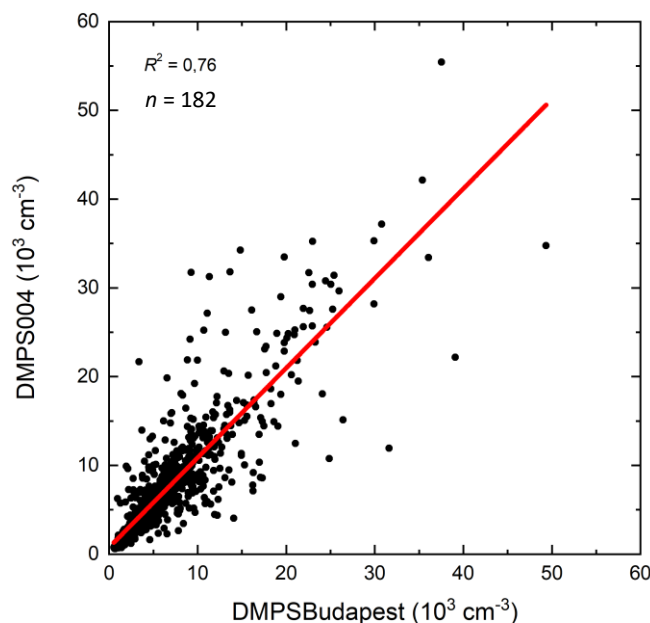
A két spektrométer mérési adatainak regressziója a 25–100 nm részecske átmérő tartományban (14. ábra) jóval kisebb fluktuációt mutat a 6–25 nm átmérőtartományhoz képest. Ez azt jelenti, hogy a két készülék mérései nagyobb mértékben egyeznek meg. Az illesztett egyenes $m = 1.01 \pm 0.02$, $b = 757 \pm 15 \text{ cm}^{-3}$. Az egyenes meredekége azt mutatja, hogy a mérési adatok várható értéke nagymértékben megegyezik, és hogy a két spektrométer adatsorai között nagyfokú az egyezés. A variancia koefficiens értéke $R^2 = 0.81$, ami azt mutatja, hogy a lineáris összefüggéstől kicsi az adatok eltérése. A 14. ábra alapján is kijelenthető, hogy a két adatsor között nincs szisztematikus eltérés.



14. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerek a 25–100 nm részecske átmérő- tartományban mért koncentrációk regressziós egyenese. Az ábrázolt koncentrációk a mérés teljes időtartamára vonatkoznak.

A mintaszámot (n) és a regressziós egyenes variancia koefficiensét (R^2) is feltüntettem.

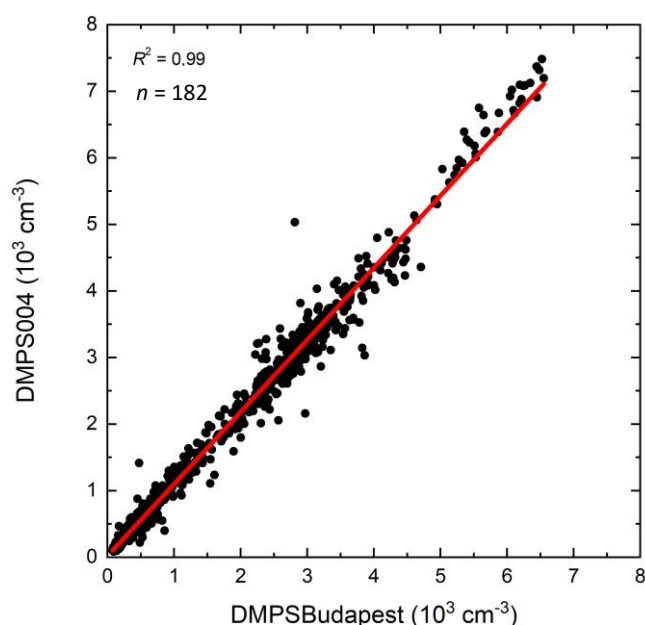
Az ultrafinom részecskék tartományában (6–100 nm) az adatok mutatnak kisebb méretű fluktuációt, de ennek jelenetősége nem elfogadhatatlan. Az illesztett egyenes $m = 1.05 \pm 0.02$, $b = 635 \pm 158 \text{ cm}^{-3}$. A variancia koefficiens értéke $R^2 = 0.76$. Az egyenes meredeksége a hibahatáron kívül esik az 1 értéktől, amit tovább kell vizsgálni, de szerencsére nem fedezhető fel szisztematikus, szerkezeti jellegű eltérés a két adatsor között. Az ábrázolt koncentrációk nem mutatnak strukturált vagy szisztematikus eltérést az egyenes környezetében.



15. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerrel a 6–100 nm részecske átmérő-tartományban mért koncentrációk regressziós egyenese. Az ábrázolt koncentrációk a mérés teljes időtartamára vonatkoznak.

A mintaszámot (n) és a regressziós egyenes variancia koefficiensét (R^2) is feltüntettem.

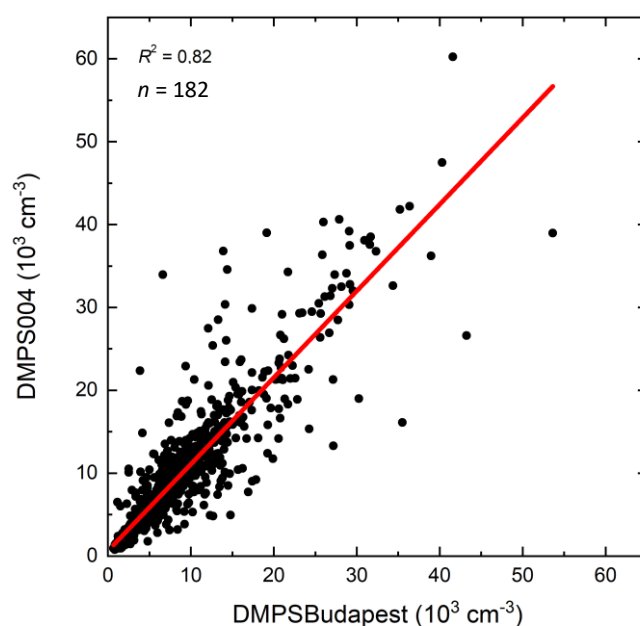
A regionális részecskék tartományában tapasztaltuk a két mobilitási spektrométer legnagyobb egymáshoz viszonyított pontosságát. Jól látható, hogy az adatpárok szinte teljes egésze közvetlenül a regressziós egyenes körül találhatóak. Az illesztett egyenes $m = 1.06 \pm 0.02$, tengelymetszete $= 503 \pm 72 \text{ cm}^{-3}$. Az adatpárok további pontosságát mutatja a variancia koefficiens értéke is $R^2 = 0.99$. Az adatpárok alig mutatnak fluktuációt. Ezek alapján megállapítható, hogy ebben a részecske méret tartományban a két készülék mérése közel azonosnak mondható. az ábrázolt koncentrációk nem mutatnak szisztematikus eltérést az egyenes körül. A regressziós egyenes meredekségében kapott jelentős eltérés van az 1 értéktől, ami ismételten felveti ennek az okának a felderítését.



16. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerrel a 100–1000 nm átmérő- tartományban mért koncentrációk regressziós egyenese. Az ábrázolt koncentrációk a mérés teljes időtartamára vonatkoznak.

A mintaszámot (n) és a regressziós egyenes variancia koefficiensét (R^2) is feltüntettem.

A teljes részecske méret tartományt lefedő koncentrációk adatként ábrázolása mutat némi fluktuációt az adatokban, azonban ennek mértéke csak az adatok kis hányadát érinti. Strukturált eltérés nem tapasztalható. Az adatként nagyrésze a regressziós egyenes alapján a várható tartományba esik. Az illesztett egyenes $m = 1.08 \pm 0.01$, $b = 15 \pm 8 \text{ cm}^{-3}$. A meredekség abszolútértéke (különösen a két CPC közötti lehetséges különbsége tekintettel) elfogadható. A variancia koefficiens, $R^2 = 0.82$, ami szintén teljesen elfogadható érték.



17. ábra: A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerrel a 6–100 nm átmérőtartományban mért koncentrációk regressziós egyenese. Az ábrázolt koncentrációk a mérés teljes időtartamára vonatkoznak.

A mintaszámot (n) és a regressziós egyenes variancia koefficiensét (R^2) is feltüntettem.

4.4 Méreteloszlások arányai

A 4.3 fejezetben megfigyelt különbségek további tanulmányozása érdekében összehasonlítottam minden a 27 méretcsatornában mért koncentrációkat, tehát a teljes méreteloszlásokat is.

3. táblázat: A DMPS rendszerek által 1-27 csatornában (6–1000 nm részecske átmérő mért koncentrációik arányai.

Csatorna	Átmérő (nm)	Minimum 1	Minimum 2	Minimum 3	Medián	Maximum 3	Maximum 2	Maximum 1	Középérték	Szórás
1	6	0.07	0.11	0.12	1.65	9.32	9.38	9.64	2.25	1.93
2	7	0.07	0.07	0.11	1.64	6.24	6.29	6.39	1.82	1.19
3	9	0.10	0.11	0.12	1.29	5.24	6.45	7.66	1.49	0.88
4	11	0.04	0.12	0.15	1.09	3.12	4.47	4.56	1.16	0.51
5	13	0.08	0.09	0.10	0.94	2.81	3.18	3.18	0.99	0.37
6	16	0.09	0.16	0.16	0.84	2.36	2.38	2.59	0.88	0.30
7	20	0.14	0.14	0.16	0.81	2.37	2.75	2.76	0.84	0.28
8	24	0.12	0.13	0.13	0.79	2.49	3.50	3.79	0.82	0.27
9	29	0.18	0.18	0.20	0.78	2.71	3.18	3.21	0.81	0.27
10	35	0.09	0.12	0.14	0.78	3.18	3.89	4.40	0.81	0.30
11	43	0.12	0.14	0.14	0.79	2.65	3.56	3.84	0.81	0.26
12	52	0.15	0.19	0.20	0.78	2.58	2.71	3.00	0.80	0.22
13	63	0.12	0.19	0.31	0.80	2.34	2.71	3.18	0.82	0.21
14	77	0.20	0.20	0.29	0.85	1.92	1.95	1.96	0.87	0.19
15	94	0.28	0.30	0.30	0.84	1.54	1.59	1.72	0.85	1.93
16	114	0.14	0.25	0.37	0.73	1.36	1.42	1.46	0.74	1.93
17	139	0.27	0.31	0.32	0.71	1.27	1.34	1.60	0.72	0.12
18	169	0.64	0.65	0.66	1.03	2.88	2.93	3.10	1.04	0.16
19	206	0.56	0.61	0.63	0.97	1.61	1.64	1.73	0.98	0.12
20	250	0.60	0.60	0.60	0.96	2.36	3.63	3.83	0.97	0.19
21	305	0.14	0.31	0.49	1.19	3.00	3.59	3.77	1.19	0.30
22	371	0.11	0.14	0.17	1.28	4.69	4.92	5.19	1.31	0.50
23	453	0.03	0.17	0.27	1.38	8.56	8.87	9.03	1.65	1.04
24	551	0.00	0.01	0.02	1.36	7.14	7.18	7.53	1.56	0.96
25	672	0.00	0.00	0.01	0.93	8.99	9.06	9.87	1.16	1.09
26	818	0.05	0.05	0.05	0.83	6.59	7.42	8.63	1.02	1.02
27	997	0.00	0.01	0.01	0.50	5.58	5.59	5.69	0.90	1.17

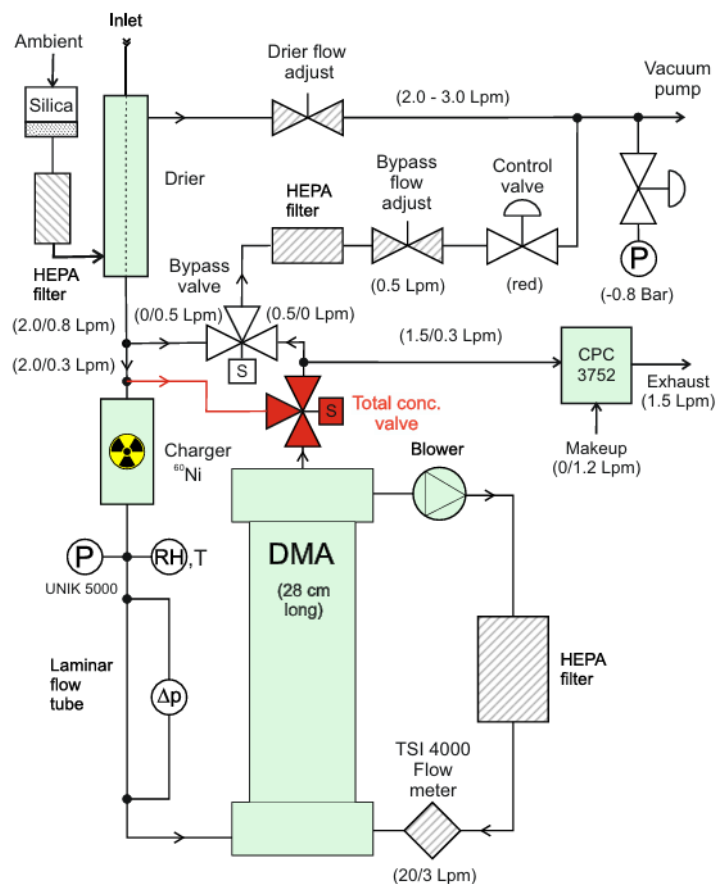
A csatornák összehasonlításakor jelentős eltéréseket láthatunk az egyes csatornákhöz tartozó arányok között. Ez az eltérés jól látható az 1-3. csatornáknál. Az eltérések egyik magyarázata, hogy a felsorolt csatornáknál a mért adatok számossága jóval kisebb, mint a többi csatornában. Az érzékenység oka, hogy ezekben a mérettartományokban kevés elektromosan töltött részecskéből következtetünk a valós, teljes részecskeszámra, így ha

elveszik néhány töltött részecske, akkor jelentős mennyiségű részecskéről nem kapunk információt. Az eltérések magyarázata az lehet, hogy a két készülék mintavétele nem azonos időben történik. Ennek az a jelentősége, hogy a részecskékre valamilyen gyenge elektromágneses tér hat az áramlási útvonal valamilyen, akár lokalizált szakaszán, ami komoly veszteségeket okozhat. Ezt a magyarázatot kiegészíti, hogy a mérettartomány legelején és a vége felé a mobilitási átmérők meghatározását, tehát a méretcsatornák határait nagyobb bizonytalansággal tudjuk csak elvégezni. Ez elvezethet a nem azonos szélességű csatornákhöz, ami szintén érzékenyen alakítja a csatornában mért koncentrációkat. További effektust a nagyfeszültség beállításának bizonytalansága is eredményezhet.

A többi csatornában (3–26) az adatok alapján a két műszer hasonló koncentrációkat mér. Az egyes csatornák között azonban láthatunk viszonylag nagy eltéréseket. Ilyenek a 21–24 csatornák, ahol a koncentrációk arányának középértéke és mediánja jóval magasabb, mint a 4–20. csatornában.

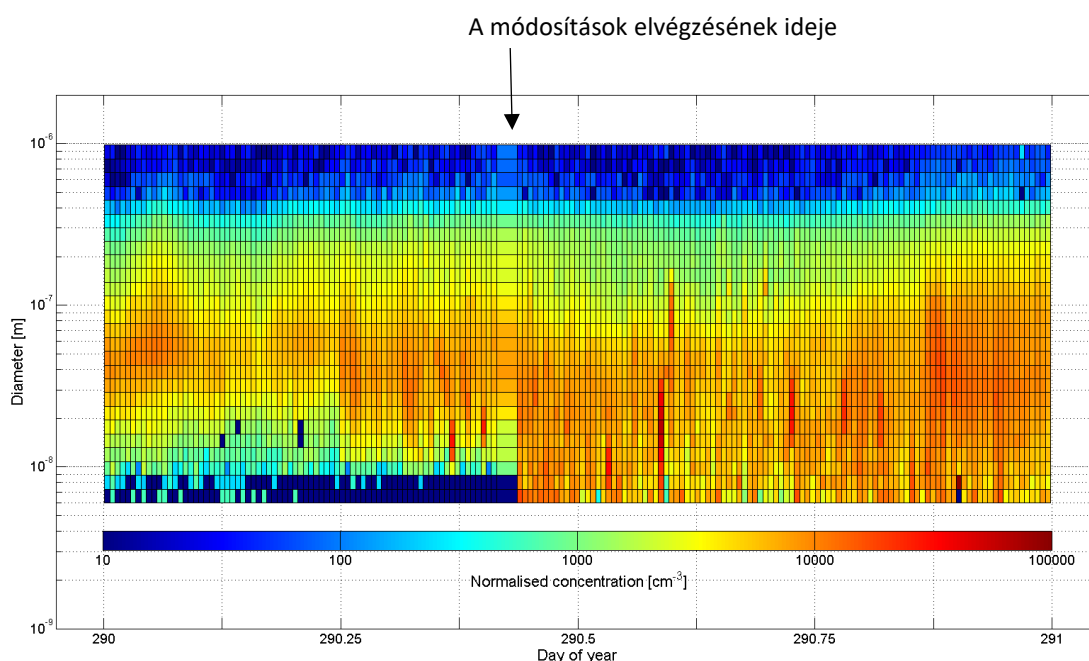
5 Az áramlási rendszer módosítása

Az összehasonlító mérések elvégzése után az új differenciális mozgékonyági spektrométert abba a fizikai konfigurációba lett beállítva, melyben a méréseket folytatni fogja. A régi készülék leszerelésre került. Az elvégzett összehasonlító vizsgálatok azonban kimutatták, hogy az újabb (DMPS004) spektrométer az első néhány csatornában kisebb koncentrációkat mér a korábbi spektrométernél. Ennek valószínű oka a legkisebb részecskék megnövekedett vesztesége. A műszer konfigurációját részletesen átvizsgálva egy szoleonid szelep hátrányos szerepére kezdtünk gyanakodni. A szelep felépítési szerkezete és a benne kialakuló, gyenge elektromágneses tér azonban komoly veszteségeket okozhatott. Ennek alapján kikötöttük a szelepet az aeroszol áram útjából, és egy új, szigetelt, inert csővel helyettesítettük. Ezzel a változtatással egy ellenőrzőmennyiséget elveszítettünk (teljes részecskeszám monitorozását), de a legkisebb részecskék veszteségét markánsan csökkentettük. Az új konfigurációt a 18. ábrán mutatom be.



18. ábra: A DMPS004 műszer sematikus működési ábrája
Piros színnel jelölve a kiiktatott áramlási szakasz és a szelep

A műszer átalakítása után azonnali javult a helyzet az első három csatornában. Ezt a 19. ábrán szemléltetem. Az áramlási rendszer módosítására 10 óra 30 perckor került sor. A megváltoztatott rendszer először még nagyobb koncentrációkat mért, az 1. csatornában nagyjából másfél óráig, majd jobb adatokat szolgáltatott. A változtatást eredményesnek és sikeresnek tartjuk. A kis méretű részecsketartományokban figyelhető meg a leginkább, hogy a beavatkozás sikeres volt. Az eddig alacsony részecskekoncentrációt mutató csatornában a részecskéket újra mérni tudtuk. Ez azért fontos, mert így újra megfigyelhető az a mérettartomány, ahol a nukleációért felelős részecskék vannak. A változás megfigyelhető a nagyobb részecskék csatornáinál is. Az itt mért mérési adatok nem mutatnak jelentős eltérést az eddig mértetekhez képest, azonban mindenképpen szignifikáns a mérési eljárás javulásának szempontjából. A DMPS004 spektrométer azóta reguláris módon működik a BpART Laboratóriumban. Jelenlegi látképét a 20. ábrán mutatom be.



19. ábra: A hiba kijavítása után mért adatok 3D-s ábrázolása



20.ábra: A DMPS004 készülék az végső konfigurációjában.

6 Összefoglalás

Tudományos diákköri munkám során két, nagyban azonos felépítésű differenciális mozgékonyági spektrométer, a DMPSBudapest és a DMPS004, összehasonlító vizsgálatát végeztem el, abból a célból, hogy a többéves adatsorok folytonosságát és koherenciáját megvizsgáljam, illetve biztosítsam.

Az összehasonlításhoz olyan időszakot kerestünk, amely során minél többféle légköri folyamatot figyelembe tudunk venni. A változatos (pl. napsütéses, felhős, esős, szeles) időjárás mellett olyan időszakot kerestünk, amely során nukleáció is történt. A két készülék-együttes azonos elven működik, de jelentősebb műszaki eltérések is vannak közöttük. Ezek befolyásolhatják a mért adatokat. A változatos körülmények és események miatt számos olyan helyzetet vizsgálhattunk meg, amelyekből fontos következtetéseket vonhattunk le a két mozgékonyági spektrofotométer adatainak összevethetőségéről.

Az adatsorok mérési napokra bontva tartalmazták a készülékek működési paramétereit és a mért részecskeszámokat összesen 27 csatornában, 6–1000 nm átmérőtartományban. A részecskeszámok feldolgozásához létrehoztam egy Excel-táblázatot, melyet a DMPSBudapest és a DMPS004 készülékek adataival töltöttem fel. Az adatokat közös időrendbe állítottam a táblázatban a kismértékben eltérő ciklusidők figyelembevételével. Az adatbázis létrehozása után több céllal statisztikai vizsgálatot végeztem. A táblázatban szereplő minden fajtájú adatot kiértékeltem (ciklusidők, nyomásértékek, hőmérsékletek, teljes CPC koncentrációk és a csatornák adatai). Kiszámoltam mindegyik adatoszlop három szomszédos minimumát, mediánját, három szomszédos maximumát, középértékét és szórását. Ezeknek az adatoknak a segítségével tudtam kiszűrni az adathalmazokból a kiugró (pl.: kalibráció, karbantartás, szerelés során keletkezett) értékeket, melyek torzíthatják az adatsorokat.

Öt kiemelt részecskeméret-tartományban kiszámoltam a légköri koncentrációkat, amelyeket szintén összehasonlítottam. Ezek a nukleációs tartomány (6–25 nm), az emissziós tartomány (25–100 nm), az ultrafinom tartomány (6–100 nm), a regionális tartomány (100–1000 nm) és a teljes részecse átmérő tartomány (6–1000 nm). A mérettartományok adatait is a fent említett módszerrel jellemeztem.

A két mobilitási spektrométer feldolgozott adatait ezután hasonlítottam össze. Az összehasonlítás alapját az képezte, hogy a DMPSBudapest-hez képest a DMPS004 milyen adatokat mért, pontosabban, hogyan aránylanak ezek egymáshoz. Az összehasonlításakor figyelembe kellett vennem, hogy a két készülék működési ciklusa nem teljesen egyezik meg, azért fokozatosan távoluló időre keletkezett az adatsorok között. Az összehasonlítandó adatsorokat úgy rendeztem, hogy az egyes mintavételek között maximálisan 4 perc eltérés legyen. Erre a légkör dinamikus jellege miatt volt szükség.

A feldolgozott adatokat négy lépésben értékeltem ki. Elsőként az öt mérettartomány koncentrációinak arányait elemeztem a teljes mérési időszakban leíró statisztikai paraméterekkel. Az eredmények alapján a két készülékegyüttessel kapott koncentráció tartományok arányai elfogadhatóak. Az adatok relatív szórása 30–40 % között változott, ami megfelel a légköri mérések tipikus értékének. Látszott azonban, hogy a nukleációs mérettartományban volt a legnagyobb a szórás. Második lépésben, a 2023. 02. 18-i napon mért koncentrációkat ábrázoltam és értékeltem idősorok formájában. Megállapítottam, hogy az öt koncentrációtartományban a két készüléknek nincsenek szisztematikus eltérései egymáshoz képest, különösen a két eltérő CPC garantált ($\pm 10\%$) egyezését tekintve. Csak csúcscsúszó, rövid időszakokban találtam jelentősebb eltéréseket. Az ábrázolt idősorok koncentrációinak az aránya kis és nagy koncentráció értékeknél is megegyeztek. A harmadik lépésben, a teljes mérés időtartama alatt mért, egyedi koncentrációkat vizsgáltam. A DMPSBudapest és a DMPS004 spektrométerek koncentrációira regressziós egyenest illesztettem külön-külön az öt mérettartomány esetében. A regressziós egyenesek meredeksége és tengelymetszete kielégítő egyezést mutattak. Az adatok eloszlásába szerkezetre utaló hatásokat és eltéréseket nem találtam. Ez alól kivétel volt a nukleációs mérettartomány. Valószínűleg a DMPS004 készülék töltött részecskéket veszít, a nem megfelelő fizikai konfiguráció miatt. Utolsó lépésként a két készülékegyüttessel által mért koncentrációk arányait vizsgáltam meg az egyes csatornában. Ennek a vizsgálatnak az eredménye az lett, hogy az első néhány csatornában, illetve az utolsó csatornában nem elfogadható arányokat kaptam. Ráadásul ezen csatornák kisebb számossággal rendelkeznek, mint a középső csatornák, ami befolyásolhatja az arányokat is. A többi csatorna (3–26) arányait elfogadhatónak találtam.

Az összehasonlítás eredményeként néhány szerkezeti változtatás eszközöltünk az áramlási rendszerben. A gyártóval való egyeztetés után egy elektromágneses vezérlésű szelep kiiktatását és megkerülését végeztük el. A változtatásnak köszönhetően jelentős javulást értünk el, a 1–3 mérési csatornáknál. Az átalakítás után kijelenthető, hogy az újabb DMPS004 készülék mérései folytonosan és koherensen követik a régebbi, DMPSBudapest adatait.

7 Köszönetnyilvánítás

A 18. ábra elkészítéséért szeretnék köszönetet mondani Dr. Rohonczy Jánosnak.

8 Irodalomjegyzék

- Bezantakos, S., Biskos, G.: Temperature and pressure effects on the performance of the portable TSI 3007 condensation particle counter: Implications on ground and aerial observations; Journal of Aerosol Science, 2022, Volume 159, 105877; doi.org/10.1016/j.jaerosci.2021.105877
- Bozóki Z., Ajtai T.: Honnan származik a légköri aeroszol?; Élet és Tudomány, 2014, 144, 1366-1368
- Brachert, L., Mertens, J., Khakharia, P., Schaber, K.: The challenge of measuring sulfuric acid aerosols: Number concentration and size evaluation using a condensation particle counter (CPC) and an electrical low pressure impactor (ELPIp); Journal of Aerosol Science, 2014, Volume 67, 21-27; doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.09.006
- Brunner, H., Hirz, M., Hirschberg, W., Fallast K.: Evaluation of various means of transport for urban areas; Energy, Sustainability and Society, 2018, Article number 8, 9; [doi:10.1186/s13705-018-0149-0](https://doi.org/10.1186/s13705-018-0149-0)
- Durkee P.A., Pfeil, E., Frost, R., Shema: Global analysis of aerosol particle characteristics; Atmospheric Environment, 1991, Volume 25, Issue 11, 2457-2471; [doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90163-2](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90163-2)
- Gelencsér A., Molnár Á., Imre K.: Levegőkörnyezet és az emberi tevékenység; Pannon Egyetem, Veszprém, (2012)
- Iedensohler A., H. J. Fissan: Bipolar Charge Distributions of Aerosol Particles in High-Purity Argon and Nitrogen; Aerosol Science and Technology, 1991, Volume 14, 358-364; <https://doi.org/10.1080/02786829108959498>
- Hinds W. C.: Aerosol Technology; Wiley, New York, (1999)
- Horvath H., Kasaharat M., Peter Pesava: The size distribution and composition of the atmospheric aerosol at a rural and nearby urban location; Journal of Aerosol Science, 1996, Volume 27, 417-435; [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00546-3](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00546-3)
- Kertész Zs.: Városi és barlangi aeroszokok vizsgálata PIXE és mikro-Pixe módszerrel. Doktori értekezés; Debreceni Egyetem, (2000)
- Kuang, C., Mei, F.: Condensation Particle Counter (CPC); Instrument Handbook – Airborne Version, 2019, <https://DOE/SC-ARM-TR-227>
- Liang, L., Gong, P.: Urban and air pollution: a multi-city study of long-term effects of urban landscape patterns on air quality trends; Nature: Scientific reports: 10, 2020, Article number: 18618; doi.org/10.1038/s41598-020-74524-9

- Lohmann U., Feichter J.: Global indirect aerosol effects: a review; *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, ACP, 5, 715-737; doi.org/10.5194/acp-5-715-2005
- McDonagh, M.A., Byrne: A study of the size distribution of aerosol particles resuspended from clothing surfaces; *Journal of Aerosol Science*, 2014, Volume 75; 94-103; doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.05.007
- Michael L. Larsen: Spatial distributions of aerosol particles: Investigation of the Poisson assumption; *Journal of Aerosol Science*, 2007, Volume 38, Issue 8, 807-822; doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.06.007
- Njalsson, T., Novosselov, I.: Design and optimization of a compact low-cost optical particle sizer; *Journal of Aerosol Science*, 2017, Volume 119, 1-12; doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.01.003
- Riediker, M., Zink, D., Kreyling, W., Oberdörster, G., Elder, A., Graham, U., Lynch, I., Duschl, A., Ichihara, G., Ichihara, S., Kobayashi, T., Hisanaga, N., Umezawa, M., Cheng, T., Handy, R., Gulumian, M., Tinkle, S. and Cassee, F.: Particle toxicology and health - where are we?; *Particle and Fibre Toxicology*, 2019, volume 16, Article number 19; doi.org/10.1186/s12989-019-0302-8
- Ritchie, H., Roser, M.: Urbanization, 2018, (<https://ourworldindata.org/urbanization#summary>) (Utoljára megnyitva 2024. 11. 15.)
- Parmar R.S., Satsangi G.S., Kumari M., Lakhani A., Srivastava S.S., Prakash S.: Study of size distribution of atmospheric aerosol at Agra; *Atmospheric Environment*, 2001, Volume 35, Issue 4, 693-702 [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00317-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00317-4)
- Roy, R., Schooff, B., Li, X., Montgomery, S., Tuttle, J., Wendt, J. O.L., Dickson, K., Iverson, B., Fry, A.: Ash aerosol particle size distribution, composition, and deposition behavior while co-firing coal and steam-exploded biomass in a 1.5 MWth combustor; *Fuel Processing Technology*, 2023, Volume 243, 107674; doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107674
- Salma, I.: A légköri aeroszol szerepe a globális éghajlatváltozásban; *Magyar Tudomány*, 2006, 167/2 205-211,
- Salma, I.: Banángörbe Budapesten; *Élet és Tudomány*, 2010, 65/11, 643, (2010).
- Salma, I.: Tendenciák a városi levegő alakulásában; *Magyar Tudomány*, 2010, 171/3 288-199
- Salma I. (szerkesztő): *Környezetkémia*; Typotex Kiadó, Budapest, (2012)
- Salma, I.: Légkörkémi folyamatok és éghajlatváltozás; *Magyar Kémikusok Lapja*, 2020, 75/12, 33-36
- Salma, I., Maenhaut, W., Cafmeyer, J., Annegarn, H.J., Andreae, M.O.: Regional aerosol composition in Kruger National Park, South Africa, and impact of biomass burning; *Annales Geophysicae*, 1993, volume 11 C228

- Salma, I., Németh, Z., Weidinger, T., Kovács, B. and Kristóf, G.: Measurement, growth types and shrinkage of newly formed aerosol particles at an urban research platform; *Atmospheric chemistry and Physics*, 2016, Volume 16; 7837-7851; [doi:10.5194/acp-16-7837-2016](https://doi.org/10.5194/acp-16-7837-2016)
- Salma, I., Németh, Z., Varga, V., Weidinger, T.: Légtörő nukleáció és következményei; *Magyar Kémiai Folyóirat*, 2019, 125, 64-69
- Salma, I., Thén, W., Aalto, P., Kerminen, V.-M., Kern, A., Barcza, Z., Petäjä, T., and Kulmala, M.: Influence of vegetation on occurrence and time distributions of regional new aerosol particle formation and growth; *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21, 2861–2880, <https://doi.org/10.5194/acp-21-2861-2021>
- Sang-Nourpour, N., Olfert, J. S.: Calibration of optical particle counters with an aerodynamic aerosol classifier; *Journal of Aerosol Science*, 2019, Volume 138; 105452 doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.105452
- Wiedensohler, A., Wiesner, A., Weinhold, K., Birmili, W., Hermann, M., Merkel, M., Müller, T., Pfeifer, S., Schmidt, A., Tuch, T., Velarde, F., Quincey, P., Seeger, S. & Nowak, A.: Mobility particle size spectrometers: Calibration procedures and measurement uncertainty; *Aerosol Science and Technology*, 2017, Volume 52, 146-164; doi.org/10.1080/02786826.2017.1387229
- UNCTAD: Total and urban population; (hbs.unctad.org/total-and-urban-population) (Utolsó 2023.05.30-án megnyitva.)
- Väkevä M., Hämeri K., Puhakka T., Nilsson E. D., Hohti H., Mäkelä J. M.: Effects of meteorological processes on aerosol particle size distribution in an urban background area; *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, Volume 10, 9807-9821, <https://doi.org/10.1029/1999JD901143>
- Wiedensohler, A., Birmili, W., Nowak, A., Sonntag, A., Weinhold, K., Merkel, M., Wehner, B., Tuch, T., Pfeifer, S., Fiebig, M., Fjåraa, A. M., Asmi, E., Sellegri, K., Depuy, R., Venzac, H., Villani, P., Laj, P., Aalto, P., Ogren, J. A., Swietlicki, E., Williams, P., Roldin, P., Quincey, P., Hüglin, C., Fierz-Schmidhauser, R., Gysel, M., Weingartner, E., Riccobono, F., Santos, S., Gröning, C., Faloon, K., Beddows, D., Harrison, R., Monahan, C., Jennings, S. G., O'Dowd, C. D., Marinoni, A., Horn, H.-G., Keck, L., Jiang, J., Scheckman, J., McMurry, P. H., Deng, Z., Zhao, C. S., Moerman, M., Henzing, B., de Leeuw, G., Löschau, G., and Bastian, S.: Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions; *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5, 657–685; <https://doi.org/10.5194/amt-5-657-2012>
- Willeke K. Whitby K. T.: *Atmospheric Aerosols: Size Distribution Interpretation*; *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1975, Volume 25, 529-539 doi.org/10.1080/00022470.1975.10470110

- Wittmaack, K.: Advanced evaluation of size-differential distributions of aerosol particles; Journal of Aerosol Science, 2002, Volume 33, Issue 71009-1025
[doi.org/10.1016/S0021-8502\(02\)00052-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(02)00052-6)
- Wu, H., Avner, P., Boisjoly, G., Braga, C. K. V., El-Geneidy, A., Huang, J., Kerzhner T., Murphy, B., Niedzielski, M. A., Pereira, R. H. M., Pritchard, J. P., Stewart, A., Wang J. and Levinson, D.: Urban access across the globe: an international comparison of different transport modes; Nature: npj Urban Sustainability, 2021, Article number: 16
doi.org/10.1038/s42949-021-00020-2
- Zornoza-Gallego, C.: Means of Transport and Population Distribution in Metropolitan Areas: An Evolutionary Analysis of the Valencia Metropolitan Area; MDPI, 2022
doi.org/10.3390/land11050657
- Ziese M., Wex H., Nilsson E., Salma I., Ocskay R., Hennig T., Massling A., Stratmann F.: Hygroscopic growth and activation of HULIS particles: experimental data and a new iterative parameterization scheme for complex aerosol particles; Atmospheric Chemistry and Physics, 2008 Volume 8, 1855-1866; <https://doi.org/10.5194/acp-8-1855-2008>