

## KERÉKPÁROS AEROSZOLMÉRÉSEK ELŐFELDOLGOZÁSA SORÁN ALKALMAZOTT KORREKCIÓK ÉS HATÁSUK ESETTANULMÁNYOK ALAPJÁN

Tordai Ágoston Vilmos , Mészáros Róbert 

ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,  
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.  
e-mail: tordai@student.elte.hu; meszaros.robort@ttk.elte.hu

### Bevezetés

A városi aeroszol (különösen a PM<sub>2,5</sub> és az ultrafinom részecskék) jelentős népegészségügyi kockázatot jelentenek: a WHO becslése szerint a világ lakosságának döntő többsége az irányelveket meghaladó koncentrációknak van kitéve, ami számottevő morbiditási és mortalitási terhekkel jár (WHO, 2023). A PM<sub>2,5</sub> tartós csökkentése érdemben növelné a várható élettartamot globális szinten, ami jól jelzi a probléma súlyát és a mérési, értékelési rendszerek gyakorlati jelentőségét (Greenstone et al., 2023; WHO, 2023).

Bár a hagyományosan használt, fix állomáshálózatok precízek, de ritka térbeli lefedettségük miatt korlátozottan képesek megragadni a városi levegőminőség utcáról utcára változó mintázatait és a rövid idejű csúcsokat. E korlátokra számos áttekintő munka és nagy presztízsű terepi vizsgálat is rámutatott: a nagy tér- és időbeli variabilitás miatt a lakossági expozíció és a források részletesebb azonosítása sűrű, mobil mintavételezést kíván (Apte et al., 2017; Xie et al., 2017).

Ezen a ponton kap szerepet a kerékpáros (mobil) aeroszolmérés: költséghatékony, rugalmas és a mikrokörnyezeti különbségekre érzékeny módszer, amely képes több tíz méteres felbontásban feltárni a forgalmi és lokális források hatását, miközben a közlekedők valós expozícióját is megközelíti. Korai fejlesztések (pl. Aeroflex) és számos alkalmazott tanulmány igazolta, hogy a kerékpáros platformokkal gyűjtött adatok informatívak mind a térbeli mintázatok, mind a közlekedési útvonalak összehasonlítása szempontjából; újabb európai esettanulmányok (pl. Kolozsvár) pedig a módszer regionális alkalmazhatóságát is alátámasztják (Elen et al., 2012; Hankey & Marshall, 2015; Wang et al., 2021; Van Poppel et al., 2023).

A városi környezet ugyanakkor mérési és adatfeldolgozási kihívásokkal jár. Az utcakanyon hatások (szél-épület kölcsönhatások, keveredés), a járműforgalom-eredetű emissziók rövid idejű csúcsai és a mikrometeorológiai ingadozások erős tér- és időbeli heterogenitást hoznak létre, ami megnehezíti a háttér és a forrás-hatás szétválasztását (Vardoulakis et al., 2003). Emellett az optikai aeroszolmérő műszerek (pl. TSI DustTrak) higroszkóposság miatti RH-érzékenysége, a szenzorok közti eltérő skálázás, valamint a GPS pontatlanság és az időszinkron hibái mind olyan tényezők, amelyek automatikus adatminőségi eljárásokat és gondos korrekciót igényelnek a torzítások mérsékléséhez (Javed & Guo, 2021; Kushwaha et al., 2022).

Módszertani oldalról mindez standardizált, megismételhető feldolgozási láncot indokol: időszinkronizálás és pozíciószűrés (pl. utcakanyon GPS-hibák kezelése), outlier-detektálás és plume-detection (pl. sűrűség alapú klaszterezéssel, lásd Ester et al., 1996; Sander et al., 1998), háttér-szétválasztás (pl. HMM-alapú SIBaR, lásd Actkinson et al., 2021), valamint óvatos, paraméterezetten dokumentált simítás a jel torzítása nélkül (lásd Cleveland, 1979). A vizuális analitika (pl. interaktív térképek, idősor- és percentilis-nézetek, útvonal-összehasonlítás) kulcsszerepet tölt be a minőségbiztosítási és minőségellenőrzési (QA/QC) folyamatokban és a döntéstámogatásban, mert átláthatóvá teszi a feldolgozási lépések hatását, és segít a valós jel elkülönítésében (Du et al., 2016; Actkinson et al., 2021; 2023).

E tanulmány célja ezért nem egy konkrét kampány részletes bemutatása, hanem a budapesti kerékpáros aeroszolmérésekben alkalmazott korrekciók és szűrési stratégiák áttekintése, és hatásuk illusztrálása városi esettanulmány-részletekkel. A fókusz az automatizált korrekciókon és a vizuális analitikán van: azt szeretnénk megmutatni, hogyan javítható az adatmegbízhatóság és az interpretálhatóság úgy, hogy közben megőrizzük a mobil mérések legfőbb értékét, a nagy térbeli felbontást és a forráshoz közeli információt (Miller et al., 2020; Kerckhoffs et al., 2025).

## **Módszertani háttér**

### ***Mérőrendszer és műszerezettség***

A budapesti városi levegőminőség térbeli heterogenitásának feltérképezésére kerékpáros mobil mérőplatformot fejlesztettünk. A mérőrendszer központi eleme két TSI DustTrak II 8532 (TSI Incorporated, Shoreview, MN, USA) típusú aeroszol monitor, amelyek párhuzamosan, fizikai impaktorokkal ellátva végezték a PM<sub>10</sub> és PM<sub>2,5</sub> tömegkoncentráció méréseket. A műszerek 90°-os fényszórás elvén működnek, 10 másodperces időbeli felbontással, 0,001 mg/m<sup>3</sup> érzékenységgel. A meteorológiai paraméterek rögzítésére Testo 635-2 (Testo SE & Co. KGaA, Titisee-Neustadt, Germany) hőmérséklet és relatív nedvesség adatgyűjtőt alkalmaztunk sugárvédő árnyékolóval, amely a környezeti hőmérséklet ( $\pm 0,2$  °C) és relatív páratartalom ( $\pm 2\%$  RH) pontos meghatározását biztosította. A térbeli referenciát 1 Hz mintavételezési frekvenciájú GPS Logger alkalmazás szolgáltatta, jellemzően 3–5 m-es horizontális pontossággal (Merry & Bettinger, 2019; Zheng et al., 2023).

### ***Mérési útvonalak és adatgyűjtési stratégia***

A kampány során négy, gondosan megtervezett útvonalat (R1-R4) jelöltünk ki Budapest különböző városszerkezeti zónáiban, egyenként ~13–17 km hosszúságban. Az útvonalak kiválasztásánál törekedtünk a változatos városi környezetek reprezentatív mintavételezésére: nagy forgalmú főútvonalak, csendes lakóutcák, parkok, ipari területek és átmeneti zónák egyaránt szerepeltek. A méréseket különböző meteorológiai viszonyok mellett, eltérő napszakokban végeztük, biztosítva az időbeli változékonyság dokumentálását. Jelenleg több mint 200 sikeres mérési útvonal adatai állnak rendelkezésünkre, amelyek összességében több mint 2 millió georeferált adatpontot jelentenek.

### ***Adatfeldolgozási módszertan***

A heterogén szenzorállományból származó adatfolyamok feldolgozására részben automatizált, MATLAB R2023b (The MathWorks Inc., 2023) környezetben futó algoritmusrendszert fejlesztettünk (Tordai & Mészáros, 2023; 2024). Az időbélyegek UTC-re történő konverziója után a különböző mintavételi frekvenciájú idősorokat közös időrácsra interpoláltuk. Az adatminőség-biztosítás (QA/QC) többlépcsős folyamatot követett: először mozgó medián alapú outlier detektálást alkalmaztunk (90 s ablak), majd robusztus Loess-simítást végeztünk a magas frekvenciájú zaj eltávolítására (Cleveland, 1979). Később, az outlier korrekciós módszerek tesztelése, összehasonlítása után összetettebb korrekciókat alkalmaztunk. A változéspont-detektáló algoritmus (Killick et al., 2012) segítségével azonosítottuk a lokális levegőminőségi zónákat és a városi átmenetek helyeit. A térbeli elemzéshez az adatokat  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  felbontású ( $\approx 110 \text{ m} \times 110 \text{ m}$ ) szabályos földrajzi rácsra vetítettük, cellánként összesítve a mérési eredményeket. A nem-izokinetikus mintavétel, a relatív páratartalom okozta, és más mérési bizonytalanságok kompenzálására korrekciós protokollt alkalmaztunk (lásd később), amely figyelembe veszi a kerékpározási sebesség és a meteorológiai paraméterek hatását az aeroszol mintavételre.

### ***Mobil mérések hibái és forrásaik***

A városi környezetben a mért adat (jel) tipikusan mikrometeorológiai és forrásközei hatásoktól ingadozik (utcakanyon-áramlás, gyorsan mozgó plume-ok), ami erős tér- és időbeli heterogenitást okoz; ez már az alapszint (kvázi-háttér, immisszió) becslését is megnehezíti. Az ilyen kutatások esetén kulcsfontosságú a vizsgálni kívánt fizikai mennyiség pontos definiálása: más-más megközelítés szükséges a városi háttérkoncentráció, az emissziók forrása vagy például a humán-expozíció vizsgálatához. Mi elsősorban a városi immisszió nagyfelbontású vizsgálatára fókuszálunk, fenntartva a lehetőséget más mennyiségek későbbi elemzéséhez is.

Szintén figyelembe kell vennünk az optikai PM-műszer-specifikus torzításokat, mindenekelőtt a higroszkóposág miatti RH-érzékenységet (méretnövekedés → túlbecslés), amely különösen jellemző a hordozható OPC (Optical Particle Counter) műszerekre. A szakirodalom tipikusan  $f(\text{RH})$  vagy  $\kappa$ -Köhler alapú korrekciókat javasol a relatív páratartalom okozta hatások korrigálására (Petters & Kreidenweis, 2007; Titos et al., 2014).

A fentiekén túl minden városi környezetben végzett mobil mérés tipikus hibaforrásai a helymeghatározáshoz (GPS) és az időméréshez kapcsolódó bizonytalanságok. Ide tartozik a városi kanyonban, a nagy épületek között fellépő ún. „GPS-multipath” és pozíció-szórás, illetve a műszerek közti időbélyeg-eltolódás/válaszidő-különbség, ami torz térképezéshez vezet, ha nem korrigáljuk (Groves, 2013; Merry & Bettinger, 2019).

A mobil mérések további hibaforrása kifejezetten a mozgáshoz kapcsolódik: ritkán biztosítható teljesen a keletkező rezgések okozta jel-degradáció minimalizálása mozgás közben. E jelenség jellemzően magasabb frekvenciájú zajként jelenik meg a mérési idősorokban.

Lényeges megemlítenünk a nem-izokinetikus mintavételből származó hiba lehetőségét is, illetve az ebből adódó bizonytalanságot.

Az *izokinetikus mintavétel* mobil (pl. kerékpáros) aeroszolméréseknél azt jelenti, hogy a mintavevő fej beömlőnyílásánál a belépő levegő átlagos sebessége -  $U_{in}$  és iránya megegyezik a „látszólagos” szabad áramlásával -  $U_{\infty}$  (a menetszél és a meteorológiai szél vektori összege) a nyílás normális irányában, így a beáramló áramvonalak nem is sűrűsödnek, és nem is ritkulnak a beszívónyílásnál, és a légbeszívási hatásfok közel 1 (vagyis a mintavétel részecske méret- és tehetetlenség-független). Ennek feltételei a következők:  $U_{in} \approx U_{\infty}$  (mérnöki gyakorlatban  $\pm 10\%$  pontosság), kicsi yaw-szög (szélirány eltérés szöge,  $\approx < 10-15^\circ$ ), az áramlási tengely a „látszólagos” szél irányába áll, rövid, egyenes, vezetéképes csőszakaszok, kis görbületi és felületi veszteségek. Ha ezen feltételek nem teljesülnek, akkor a mintavétel vagy szubizokinetikus ( $U_{in} < U_{\infty}$ ), ami azt jelenti, hogy a részecskék tehetetlensége a nagyobb aerodinamikai átmérőjű frakciót túlerepresentálja (felülszámlálás/-tömegelés), vagy szuperizokinetikus ( $U_{in} > U_{\infty}$ ), amikor a durvább frakció alulmintázódik, és a finom/ultrafinom dúsul. Az anizokinetika (szögeltérés) Stokes-szám-függő, méretnövekvő torzítást okoz. Ennek csökkentésére többféle korrekció lehetséges: 1) az aerodinamikailag zavartalan helyre szerelt, előre néző (isoaxiális) légbeszívó egység alkalmazásával, amely a kerékpáros és a váz mögött kialakuló utánáramlási (wake) tartományon kívül helyezkedik el; 2) a „látszólagos” szél becslése által (GPS-átlag sebesség, illetve együttes szél mérés); 3) zárt hurkú áramlásszabályzás segítségével (tömegáram-szabályzóval) az  $U_{in}$  követésére; 4) dokumentált légbeszívási-karakterisztikájú PM-fejek (pl. FRM/VSCC/WINS) és rövid, sima csövezés alkalmazásával; 5) az elemzésben a kevésbé érzékeny mérettartományok (BC/PNC/PM1) preferálása által; valamint 6) utólagos korrekció során, aspirációs modelleket alkalmazva a mért koncentrációk súlyozására (Hinds, 1999; Kulkarni et al., 2011; Watson & Chow, 2011).

További tudományos kihívást jelent a korszerű mobil aeroszol mérések során a változó aeroszol-összetételből származó tömegkoncentráció-számítás hibája. Mivel az OPC-k a

tömegkoncentrációt a mért darabkoncentrációból indirekt módon, feltételezett aeroszol-összetétel alapján számítják, figyelembe véve, hogy az aeroszolrészecskék tömege adott összetétel mellett jellemzően az aerodinamikai átmérő függvénye, ezért a PM-frakciók meghatározása ezen alapul. Így az útvonal mentén folytonosan változó összetétel (valamint a vizsgált aeroszlok optikai tulajdonságainak változása) a tömegkoncentráció számításában bizonytalanságot okoz. E bizonytalanság kizárólag az aeroszol összetétel folyamatos ismeretével lenne eliminálható, mely jelentős technikai és elméleti korlátot szab a pontos mérés tekintetében. Terveink között szerepel a párhuzamos, útvonalra és útvonal-részekre végzett aeroszol-összetétel mérések kivitelezése, melyek adatainak segítségével igyekszünk a hibaforrás nagyságrendjét megbecsülni és így a mérési adatokat korrigálni.

### ***Létező gyakorlati megközelítések***

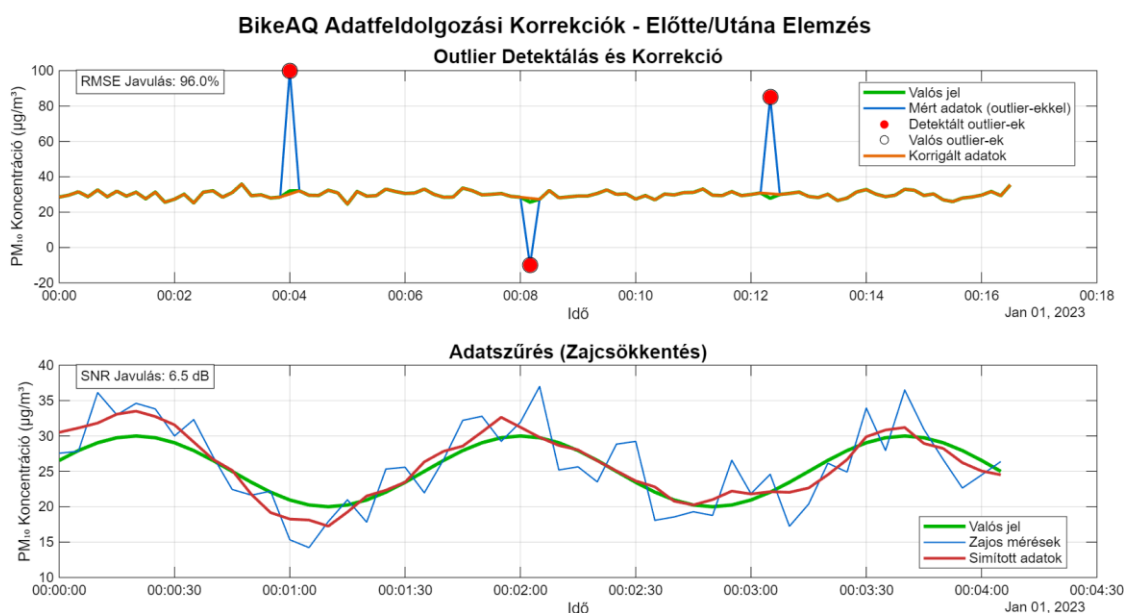
A nagyobb mérési kampányok bevett gyakorlata közé tartozik az útvonal-ismétlések alkalmazása, a plume-ok, valamint háttérszintek szétválasztása (Apte et al., 2017; Actkinson et al., 2021; 2023), a szegmens-szintű átlagolás és percentilisek számítása (Brantley et al., 2014; Van den Bossche et al., 2015), majd az eredmények validációja fix állomások melletti együtt-méréssel (Wang et al., 2021; Manchanda et al., 2024) és/vagy független ismétlésekkel (Messier et al., 2018; Miller et al., 2020).

A feldolgozási lépések sorrendje és paraméterezése döntően befolyásolja a kapott térképek megbízhatóságát és a forrás-attribúciót (Wilson et al., 2005; Karner et al., 2010; Wang et al., 2021). Ezért a reprodukálható, dokumentált feldolgozási lánc – részletes módszertani jellemzéssel és vizuális analitikával – kulcsfontosságú (Du et al., 2016; Xie et al., 2017).

Megjegyezzük, hogy a mobil aeroszol- és levegőminőségi mérések módszertani, adatminőségi és QA/QC kérdései jelenleg is széles körben kutatott és folyamatos fejlődés alatt álló tudományos témák (Wang et al., 2021; Van Poppel et al., 2023; Kerckhoffs et al., 2025). Számos módszertani probléma továbbra is nyitott, amelyekre az általunk végzett kutatás is igyekszik adekvát válaszokat találni (Tordai & Mészáros, 2023; 2024).

### **Esettanulmányok**

Ebben az alfejezetben esettanulmányokon keresztül adunk példát (a teljesség igénye nélkül) az általunk alkalmazott korrekciókra, valós mérési adatsorokat bemutatva. Az általunk fejlesztett korrekciókat optimalizáló algoritmus két lépcsős: i) először mesterségesen generált adatokon teszteljük az alkalmazható korrekciók viselkedését, majd ii) valós mérési adatsorokon finomhangoljuk a korrekciók paramétereit. Ez utóbbi nélkülözhetetlen lépés; a mobil mérések során ténylegesen fellépő hibák és zajok nem feltétlenül követik az idealizált mintát, sőt, akár mérési utanként is mutathatnak eltéréseket. Lényeges így a korrekciók hatékonyságának statisztikai- és vizuális vizsgálata. Jelen cikkben a vizuális analitikai vonatkozásokra fókuszálunk, mely valamennyi mobil mérési kampány adatfeldolgozási eljárásának kulcseleme – még automatizált QA/QC lánc mellett is. Az *1. ábra* egy idealizált esetet mutat be (szintetikus adat), amely az outlier-szűrés és adatsimítás paraméter-optimalizációja során használt.



*I. ábra:* Szintetikus (generált) mérési adatsor az outlier-detektálás és zajcsökkentés (simítás) bemutatására és paraméterezésére. Az outlier-ek mesterségesen beillesztett kiugró értékek, amelyek eltávolítását lineáris interpolációval végeztük. Az algoritmus teljesítményét a „valós jelhez” (referencia sorozathoz) viszonyított hibametrikák jelzik: az outlier-korrekció után a négyzetes középhiba gyöke (RMSE) 96%-kal csökkent, míg a zajcsökkentés eredményeként a jel-zaj arány (SNR) 6,5 dB-vel javult. A statisztikai mutatók mellett a grafikon vizuális visszajelzést ad a korrekciók hatásáról.

A további korrekciókat esettanulmányok formájában igyekszünk illusztrálni. Mint korábban említettük, a higroszkóposság miatt az aeroszol részecskék növekedése negatívan befolyásolja a mérés pontosságát; 90% relatív nedvesség felett ellehetetleníti a hordozható optikai műszerek használatát. Bár az általunk használt TSI DustTrak II (8532) műszer technikai leírása (TSI Inc., 2012) szerint a műszer 0–95% relatív nedvesség tartományban képes üzemelni, gyakorlati szemszögből és speciális fűtött légbemlő hiányában 1) a 90% feletti értékek esetén jelentős túlbecslés is lehetséges az aeroszolok aerodinamikai átmérőjében (így az abból számított tömegkoncentrációban), illetve 2) a 60–90% közötti relatív nedvesség tartományban szintén feltételezhető valamekkora nedvességfüggő torzítás. Ennek a legpontosabb korrekciója szintén aeroszol-összetétel függő (ahogyan a higroszkóposság mértéke is), így a szakirodalom empirikusan illesztett formulákat használ, melyek gravimetrikus referenciával (TEOM) történő együtt mérés során illeszthetők (Kingham et al., 2006; Javed & Guo, 2021).

Bár e módszer adná a legpontosabb ismert korrekciót, ugyanakkor az útvonal mentén történő folyamatos összetétel-változás bizonytalanságot okoz a korrekció mértékében. Léteznek egyszerűbb, empirikus formulák is, melyek egyszerűbb számíthatóság mellett közelítő eredményeket adnak. Ilyen például – a gyakran a WHO városi pilotjaiban is szereplő módszer (WHO, 2023) – a 90% feletti értékek esetén történő teljes szűrés, majd az alacsonyabb nedvességtartományokban végzett ún. Köhler-féle korrekció (Petters & Kreidenweis, 2007; Titos et al., 2014). A Köhler-féle korrekció során a részecskék nedvességtartalmát egy  $\kappa$  paraméter állítja be, melyre jellemzően városi környezetben a  $\kappa \approx 0,3–0,5$  érték használata a legelterjedtebb.

A korrekció formája így:

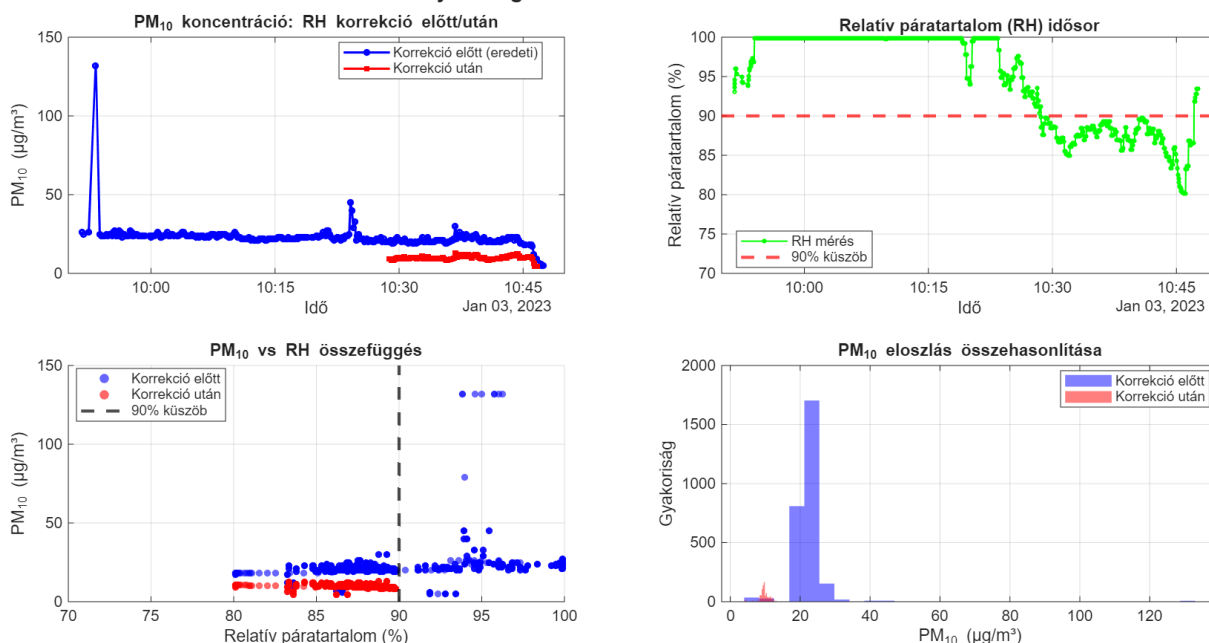
$$GF(RH) = \left(1 + \kappa \frac{RH}{100 - RH}\right)^{1/3},$$

ahol  $GF(RH)$  a részecskeátmérő növekedési tényező. Ebből a tömegkoncentráció:

$$C_{korrigált}(RH) = \frac{C_{nyers}(RH)}{GF(RH)^\beta},$$

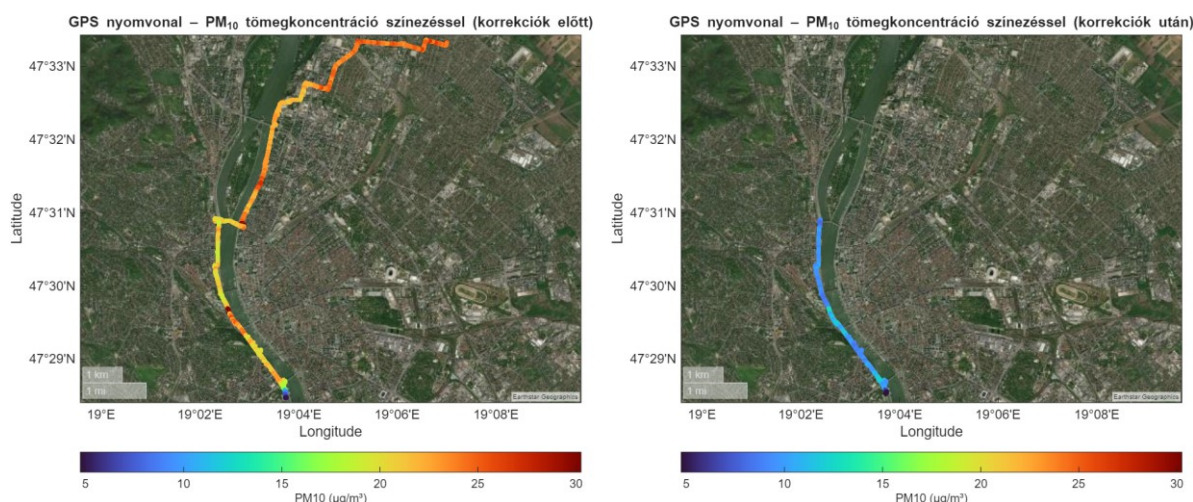
ahol  $\beta$  empirikus exponens értéke  $PM_{10}$  esetén 2,  $PM_{2.5}$  esetén 2.2. Az ilyen egyszerűsített korrekció alkalmazására mutat be egy példát a 2. ábra. 2023. január 3-án, kedden, Budapesten a hajnali párák, ködös időjárás még a délelőtti órákban is meghatározó maradt, a köd lassan kezdett feloszlani egy érkező hidegfront előoldalán. Mérési adatsorunkon jól látszik a teljes adatsorra jellemző magas relatív nedvességtartalom, szignifikáns mennyiségben 90% feletti értékekkel. A köd és párásság vizuálisan is jól kivehető volt a mérési út során. Itt az adatkezelés során – a korábbiak alapján – a 90% feletti értékekhez kapcsolódó tömegkoncentráció-méréseket nem vettük figyelembe, azokat levágtuk. A 60–90% közötti relatív nedvesség értékek esetén pedig  $\kappa = 0.3$  paraméterű Köhler-korrekciót alkalmaztunk.

Esettanulmány 1: Magas RH korrekció hatása  $PM_{10}$  mérésekre



2. ábra: A 2023. január 1. délelőtti mérési út esetén rögzített és korrigált  $PM_{10}$ , valamint relatív nedvesség (RH) értékek bemutatása. Jól látszik a 90% RH feletti értékek szűrése, valamint a 60–90% közötti RH értékek esetén történő korrekció hatása; alacsonyabb  $PM_{10}$  tömegkoncentrációk és így a mért  $PM_{10}$  tömegkoncentrációk eloszlásának eltolódása.

Megjegyezzük, hogy e korrekciót a későbbiekben tervezzük aeroszol-összetétel mérések segítségével verifikálni, jelenleg, mint egy lehetséges, valószínű scenáriót mutatjuk be. A 3. ábra a mért  $PM_{10}$  értékek területi eloszlását mutatja be korrekció előtt és korrekció után.



3. ábra: A 2023. január 1. délelőtti mérési útvonal során rögzített PM<sub>10</sub> tömegkoncentráció területi eloszlása korrekciók előtt (balra) és korrekciók után (jobbra).

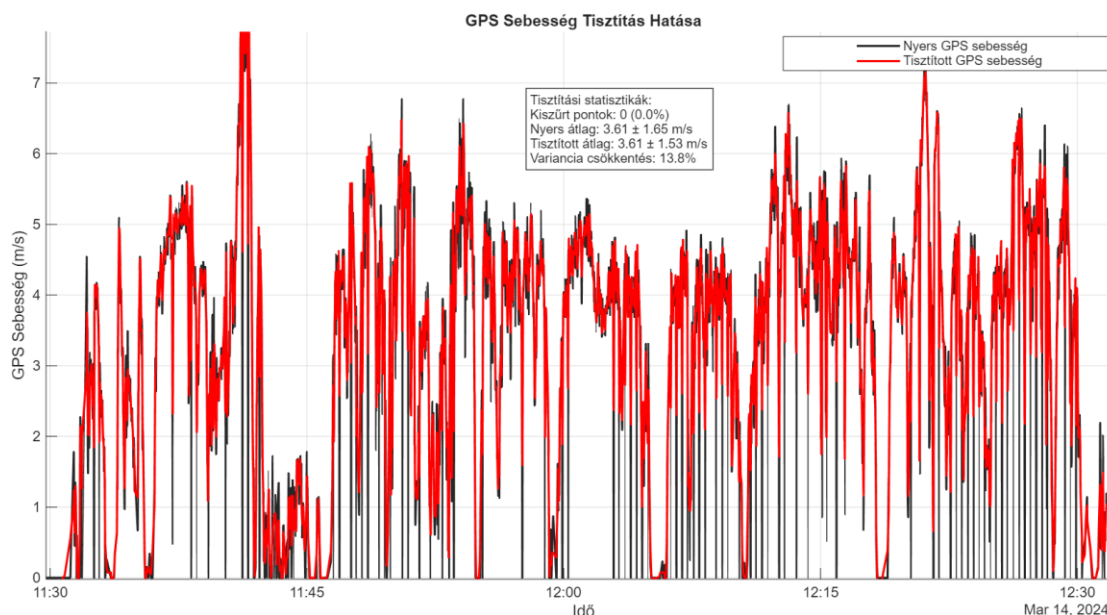
### **Sebességfüggő korrekciók**

A mobil mérések sajátja a mozgás során jelentkező mérési bizonytalanság megjelenése. Mind a mozgás, így az áramlási rendszer folytonos változása befolyásolja a mintavételt, mind a mozgás követésére alkalmazott GPS-vevő is hibaforrásként jelenhet meg. A mérési adatok előfeldolgozása során ezeket a leggyakoribb problémákat feltétlenül kezelniük kell – még az összetettebb korrekciók alkalmazása előtt.

A GPS-alapú sebesség- és pozícióadatokat mobil méréseknél gyakran hibával terheltek városi környezetben. Ennek elsődleges oka a magas épületek, szűk utcák és alagutak által kiváltott multipath-jelenség és NLOS (íránytávrolól érkező) jelek: ezek drámaian ronthatják az egyszerű pozíció pontosságát, ami gyakran nullára leeső sebességértékekben, kiugró sebességtüskékben, vagy akár irreális pozícióugrásokban („teleport”) manifesztálódik. Empirikus adatok szerint az átlagos pozíciós hiba akár 7–13 m is lehet GPS-only üzemmódban, kifejezetten az elmúlt tíz év okostelefon-jellegű GPS-vevőinél (Merry & Bettinger, 2019). Különösen súlyos esetekben – ún. utcakanyon szituációkban – a hiba elérheti a 12–18 m-t, míg 3D városi térképeket és posztprocesszálást alkalmazó finomításokkal ez 4 m alá csökkenthető (Ben-Moshe et al., 2011; Zheng et al., 2023). Ezek a hibák jelentősen torzíthatják a kerékpáros mobil légszennyezés-méréseket, ezért elengedhetetlen a GPS-idősorok előzetes tisztítása és az anomáliák szűrése (pl. sebességkülöbségekkel, mozgóátlagos simítással vagy térbeli pálya-rekonstrukcióval; Merry & Bettinger, 2019).

### **GPS sebességadatok tisztítása**

Az előfeldolgozás során több lépcsős outlier-detekciót alkalmaztunk: azonnali nullára eső szakaszokat időtartam szerint különítettük el ( $\leq 2$  s: GPS hiba,  $> 2$  s: valós megállás), majd 3-pontos mozgóátlag-simítást végeztünk. A fennmaradó extrém tüskéket IQR-alapú outlier-szűréssel távolítottuk el, a negatív sebességértékeket pedig 0 m/s-nak állítottuk be. A 4. ábra példája mutatja, hogy e tisztítási lépések a nyers idősor variációját ~14%-kal csökkentették, miközben a valós menetdinamika megmaradt.



4. ábra: A GPS-sebesség tisztításának hatása. A fekete vonal a nyers sebesség adatokat, a piros a tisztított idősort mutatja. A tisztítás során azonnali nullára eső hibák kiszűrésére, mozgóátlag-simításra és outlier-detekcióra került sor. A módszer az adott esetben ~14%-kal csökkentette a varianciát, miközben a menetdinamika megőrződött.

### Start–stop korrekció

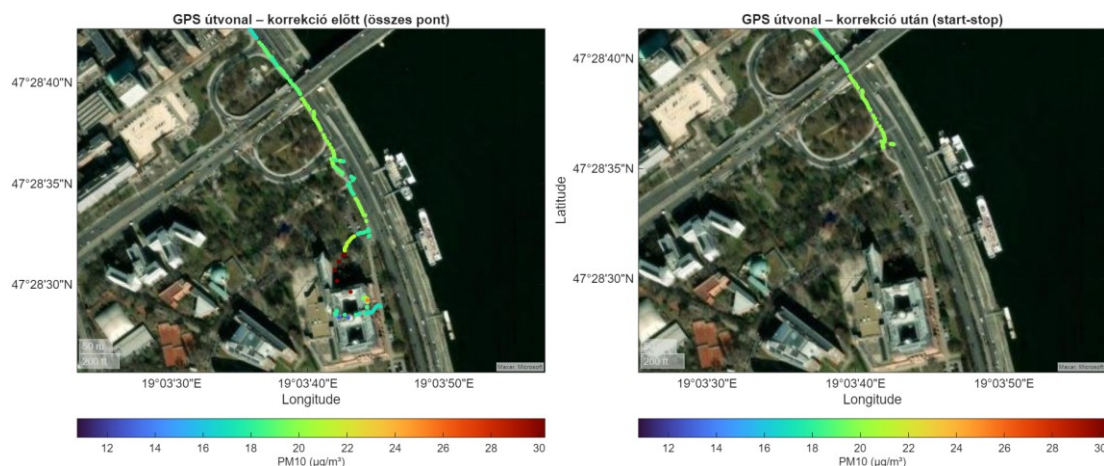
Az útvonal első és utolsó szakaszain, a kiindulási és érkezési pont 200 m-es környezetében a GPS adatokhoz rendelt koncentrációk rendszerint torzítanak: az épületek, a lokális források és a járműparkoló területek rövidtávú hatása dominál. Ezek a pontok nem reprezentálják az útvonal átlagos környezeti szennyezettségét, ezért Haversine-képleten alapuló távolságkülönbözet szerint kiszűrtük.

A Haversine-képlet két földrajzi pont közötti nagy körív távolságát számítja a Föld gömbmodelljén. Képlete:

$$d = 2R \cdot \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2 \left( \frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right),$$

ahol  $R$  a Föld sugara (6371 km),  $\varphi$  a földrajzi szélesség,  $\lambda$  a földrajzi hosszúság,  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ,  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ . A módszer előnye, hogy egyszerű trigonometrikus formában, nagy pontossággal adja meg a két pont közötti távolságot, így alkalmas a GPS-koordináták körüli sugár alapú szűréshez. Jelen esetben a kiindulási és érkezési pont 200 m-es körzetébe eső méréseket zártuk ki, mert ezen szakaszokon a mérési adatok gyakran torzulnak: induláskor és megálláskor a lokális források (járművek motorindítása, parkoló környezet, műszerek épületből ki- és beszállítása) rövid távon extrém koncentrációcsúcsokat eredményezhetnek, amelyek nem reprezentálják az útvonal átlagos környezeti állapotát. A Haversine-távolság a geodéziai számítások egyik klasszikus és legszélesebb körben alkalmazott képlete, amelyet már a 19. század elején leírtak (Inman, 1851), és ma is az egyik standard eljárás a GPS-koordináták közötti távolság számítására (Sinnott, 1984).

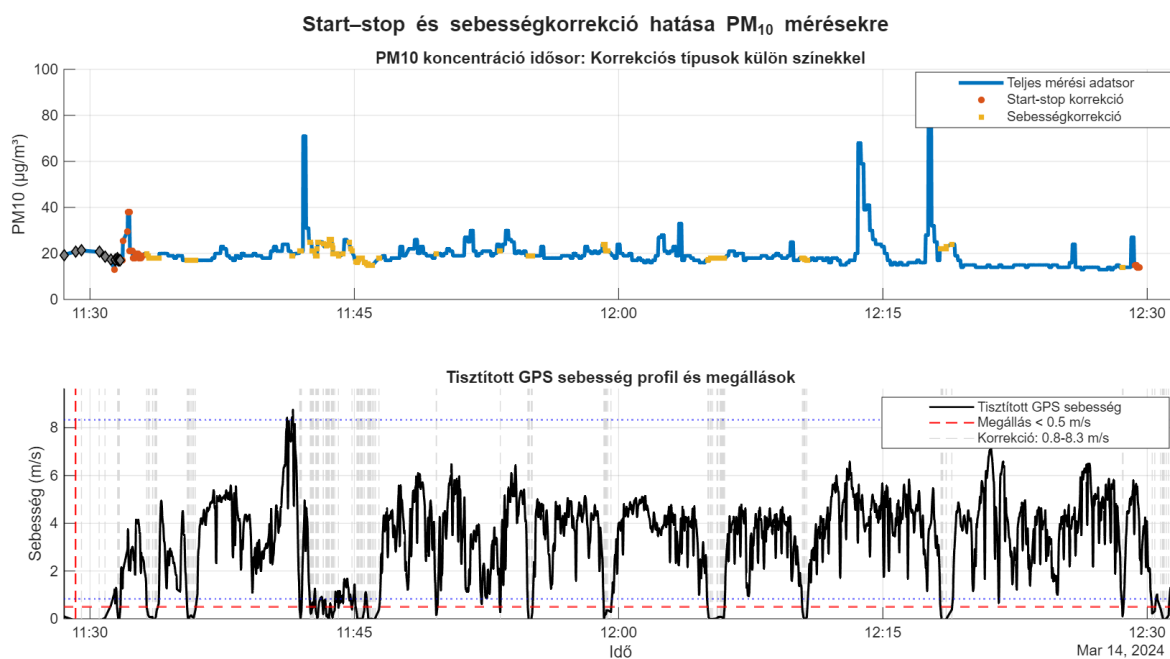
Az 5. ábra illusztrálja a start–stop levágás hatását az ELTE Lágymányosi Kampusza környezetében: a nyers adatokban még jelenlévő torz pontfelhők eltűnnek, az útvonal reprezentatív szakasza kiemelhetővé válik.



5. ábra: GPS-útvonal korrekció előtt (balra) és után (jobbra). A Haversine-képlettel számított 200 m-es sugár alapján a start- és végpont körüli adatok kizárásra kerültek. Az eredeti útvonalon a kezdő- és végszakaszokon látható torz pontfelhők (teleportok, indulás/megállás körüli anomáliák) a korrekció után eltűntek, így a vizsgálat az útvonal reprezentatív szakaszaira korlátozódik.

### Sebességkorrekció

A mobil mérések értelmezését a kerékpáros sebesség-tartománya is befolyásolja. Városi környezetben a 3 km/h alatti értékek jellemzően lassulást vagy teljes megállást, míg a 30 km/h feletti értékek a méréshez túlzottan gyors haladást vagy GPS hibákat jelentenek. Ezeket NaN értékre cseréltük, interpoláció nélkül. A 6. ábra mutatja, hogy a sebességkorrekció révén a PM<sub>10</sub> koncentráció idősorában a kiugró értékek megszűntek, a jellemző tartományban maradó szakaszok pedig jobban követik a környezeti változások valós menetét.



6. ábra: A start-stop és sebességkorrekció hatása a PM<sub>10</sub> idősorra. Felül a teljes mért koncentráció-idősor látható, a színes jelölések a különböző korrekciós lépésekben kiszűrt értékeket mutatják (piros: start-stop, sárga: sebességkorrekció, szürke rombusz: mindkettő). Alul a tisztított sebességprofil látható a megállási és kerékpáros tartomány küszöbökkel. A 3–30 km/h közötti adatok reprezentálják a tényleges, felhasználható kerékpáros mozgást; a küszöbön kívüli értékeket NaN-ra állítottuk.

## Összefoglalás

Jelen tanulmányban több, a mobil légszennyezettség-mérésekhez kapcsolódó előfeldolgozási és korrekciós eljárást mutattunk be. A szintetikus adatokon illusztrált outlier-szűrés és simítás mellett négy valós esettanulmányt ismertettünk: a relatív nedvességfüggő (RH) korrekciót, a GPS-sebesség előfeldolgozását, a start–stop pontok körüli adatok kizárását, valamint a kerékpáros mérési tartományra vonatkozó sebességkorrekciót. Az eredmények azt mutatják, hogy már ezek az önállóan is viszonylag egyszerű módszerek is jelentős mértékben hozzájárulnak a mérések értelmezhetőségének és megbízhatóságának növeléséhez, és képesek kiszűrni a városi környezetben gyakran fellépő torzításokat.

Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy a bemutatott példák nem fedik le a teljes adatfeldolgozási protokollt. A gyakorlatban további eljárásokat is alkalmazunk – többek között fejlettebb outlier-korrekciókat, idősorok simítását, változáspont-detekciót és szakaszolást (Savitzky & Golay, 1964; Killick et al., 2012) – amelyek szintén hozzájárulnak a mobil mérések értelmezhetőségéhez. Terjedelmi korlátok miatt ezekre nem térünk ki részletesen; célunk az volt, hogy esettanulmányokon keresztül szemléltessük a korrekciók szükségességét és azok gyakorlati hatását.

Összességében a példák rávilágítanak arra, hogy a nyers mobil mérési adatok közvetlenül nem alkalmasak sem térbeli elemzésekre, sem összehasonlításra. A különböző hibák és torzítások kezelésére kialakított, több lépcsős korrekciós protokoll elengedhetetlen ahhoz, hogy a mérések megbízható, a környezeti állapotot tükröző képet adjanak.

## Köszönetnyilvánítás

Készült az RRF-2.3.1-21-2022-00014 azonosítószámú „Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium létrehozása” elnevezésű projektben a Magyarország Helyreállítási és Ellenállóképességi Tervének keretében, az Európai Unió Helyreállítási és Ellenállóképességi Eszközének támogatásával. A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap K-146315 és K-146322 pályázatai támogatták.

## Hivatkozások


- Atkinson, B., Ensor, K., Griffin, R. J., 2021: SIBaR: a new method for background quantification and removal from mobile air pollution measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(8): 5809–5821. <https://doi.org/10.5194/amt-14-5809-2021>
- Atkinson, B., Drummond, J., Messier, K. P., Marshall, J. D., Apte, J. S., 2023: Detecting plumes in mobile air quality monitoring time series with density-based spatial clustering of applications with noise. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(6): 3547–3564. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3547-2023>
- Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., Marshall, J. D., Portier, C. J., Vermeulen, R. C. H., Hamburg, S. P., 2017: High-resolution air pollution mapping with Google Street View cars: exploiting big data. *Environmental Science & Technology*, 51(12): 6999–7008. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00891>
- Ben-Moshe, B., Elkin, E., Levi, H., Weissman, A., 2011: Improving accuracy of GNSS devices in urban canyons. Conference proceedings. In: *Canadian Conference on Computational Geometry (CCCG 2011)*. Toronto, August 10–12, 2011.
- Brantley, H. L., Hagler, G. S. W., Kimbrough, E. S., Williams, R. W., Mukerjee, S., Neas, L. M., 2014: Mobile air monitoring data-processing strategies and effects on spatial air pollution trends. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(7): 2169–2183. <https://doi.org/10.5194/amt-7-2169-2014>

- Cleveland, W. S., 1979: Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74(368): 829–836. <https://doi.org/10.1080/01621459.1979.10481038>
- Du, Y., Ma, C., Wu, C., Xu, X., Guo, Y., Zhou, Y., Li, J., 2016: A visual analytics approach for station-based air quality data. *Sensors*, 17(1): 30. <https://doi.org/10.3390/s17010030>
- Elen, B., Peters, J., Van Poppel, M., Bleux, N., Theunis, J., Reggente, M., Standaert, A., 2012: The Aeroflex: a bicycle for mobile air quality measurements. *Sensors*, 13(1), 221–240. <https://doi.org/10.3390/s130100221>
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X., 1996: A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '96)*, 226–231. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3001460.3001507>
- Greenstone, M., He, G., Li, S., Liu, T., 2023: Air Quality Life Index (AQLI) Annual Update. *Report. Energy Policy Institute, University of Chicago (EPIC)*. <https://aqli.epic.uchicago.edu/reports/>
- Groves, P. D., 2013: Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems. Artech House, Boston/London. ISBN: 978-1608070053
- Hankey, S., Marshall, J. D., 2015: On-bicycle exposure to particulate air pollution: particle number, black carbon, PM<sub>2.5</sub>, and particle size. *Atmospheric Environment*, 122: 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.025>
- Hinds, W. C., 1999: Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. 2nd edition. Wiley-Interscience, New York. 504 p. ISBN: 978-0471194101
- Inman, J., 1851: Navigation and nautical astronomy, for the use of British seamen. London, F. and J. Rivington.
- Javed, W., Guo, B., 2021: Performance evaluation of real-time DustTrak monitors for outdoor particulate mass measurements in a desert environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(6): 200631. <https://doi.org/10.4209/aaqr.200631>
- Karner, A. A., Eisinger, D. S., Niemeier, D. A., 2010: Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data. *Environmental Science & Technology*, 44(14): 5334–5344. <https://doi.org/10.1021/es100008x>
- Kerckhoffs, J., Hofman, J., Khan, J., Peters, J., Van Poppel, M., Theunis, J., ... & Lefebvre, W., 2025: Mobile monitoring of air pollution—A position paper on use cases, good practices, challenges, and opportunities. *Environment International*, 202: 109582. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109582>
- Killick, R., Fearnhead, P., Eckley, I. A., 2012: Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *Journal of the American Statistical Association*, 107(500): 1590–1598. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>
- Kingham, S., Durand, M., Aberkane, T., Harrison, J., Wilson, J. G., Epton, M., 2006: Winter comparison of TEOM, MiniVol and DustTrak PM monitors in a woodsmoke environment. *Atmospheric Environment*, 40(2): 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.042>
- Kulkarni, P., Baron, P. A., Willeke, K. (Eds.), 2011: Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. 3rd ed. Wiley, New York. <https://doi.org/10.1002/9781118001684>
- Kushwaha, M., Kumar, P., Agrawal, P., 2022: Bias in PM<sub>2.5</sub> measurements using collocated reference-grade and optical instruments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194: 610. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10293-4>
- Manchanda, C., Harley, R. A., Marshall, J. D., Turner, A. J., Apte, J. S., 2024: Integrating mobile and fixed-site black carbon measurements to bridge spatiotemporal gaps in urban air quality. *Environmental Science & Technology*, 58(28): 12563–12574. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10829>

- Merry, K., Bettinger, P., 2019: Smartphone GPS accuracy study in an urban environment. *PLoS ONE*, 14(7): e0219890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219890>
- Messier, K. P., Chambliss, S. E., Gani, S., Alvarez, R., Brauer, M., Choi, J. J., ... & Apte, J. S., 2018: Mapping air pollution with Google Street View cars: efficient approaches with mobile monitoring and land use regression. *Environmental Science & Technology*, 52(21): 12563–12572. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03395>
- Miller, D. J., Actkinson, B., Padilla, L., Griffin, R. J., Moore, K., Lewis, P. G. T., ... & Alvarez, R. A., 2020: Characterizing elevated urban air pollutant spatial patterns with mobile monitoring in Houston, Texas. *Environmental Science & Technology*, 54(4): 2133–2142. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05523>
- Petters, M. D., Kreidenweis, S. M., 2007: A single-parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(8): 1961–1971. <https://doi.org/10.5194/acp-7-1961-2007>
- Sander, J., Ester, M., Kriegel, H.-P., Xu, X., 1998: Density-based clustering in spatial databases: The algorithm GDBSCAN and its applications. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(2), 169–194. <https://doi.org/10.1023/A:1009745219419>
- Savitzky, A., Golay, M. J. E., 1964: Smoothing and differentiation of data by simplified least-squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Sinnott, R. W., 1984: Virtues of the Haversine. *Sky and Telescope*, 68(2): 159.
- The MathWorks Inc., 2023: *MATLAB (Version R2023b)* [Computer software]. Natick, Massachusetts, United States: The MathWorks, Inc.
- Titos, G., Jefferson, A., Sheridan, P. J., Andrews, E., Lyamani, H., Alados-Arboledas, L., 2014: Aerosol light-scattering enhancement due to water uptake during the TCAP campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14: 7031–7043. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7031-2014>
- Tordai, Á. V., Mészáros, R., 2023: Városi légszennyezettség finom tér- és időbeli felbontású vizsgálata. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 35: 99–109. <https://doi.org/10.31852/emf.35.2023.099.109>
- Tordai, Á. V., Mészáros, R., 2024: Bicycle-based aerosol measurements in the inner city of Budapest. *EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024*, EGU24-12180. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-12180>
- TSI Inc., 2012: DustTrak II Aerosol Monitor 8530/8531/8532/8533 User Manual. TSI Incorporated, Shoreview, MN. <https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/aerosol-and-dust-monitors/dusttrak%E2%84%A2-ii-aerosol-monitor-8532>
- Van den Bossche, J., Peters, J., Verwaeren, J., Botteldooren, D., Theunis, J., De Baets, B., 2015: Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmospheric Environment*, 105: 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>
- Van Poppel, M., Peters, J., Levei, E. A., Mărmureanu, L., Moldovan, A., Hoaghia, M.-A., ... & Van Laer, J., 2023: Mobile measurements of black carbon: Comparison of normal traffic with reduced traffic conditions during COVID-19 lock-down. *Atmospheric Environment* 297: 119594. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119594>
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., 2003: Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37(2): 155–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)
- Wang, S., Ma, Y., Wang, Z., Wang, L., Chi, X., Ding, A., ... & Zhang, Y., 2021: Mobile monitoring of urban air quality at high spatial resolution by low-cost sensors: Impacts of covid-19 pandemic lockdown. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21: 7199–7215. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7199-2021>

- Watson, J. G., Chow, J. C., 2011: Ambient aerosol sampling. In: Kulkarni, P., Baron, P. A., Willeke, K. (Eds.), *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications* (3rd ed.), 591–613. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118001684.ch26>
- WHO, 2023: WHO Air Quality Database & AQE portal. World Health Organization, Geneva. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/who-air-quality-database>
- Wilson, J. G., Kingham, S., Pearce, J., Sturman, A. P., 2005: A review of intraurban variations in particulate air pollution: implications for epidemiological research. *Atmospheric Environment*, 39(34): 6444–6462. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.030>
- Xie, X., Semanjski, I., Gautama, S., Tsiligianni, E., Deligiannis, N., Rajan, R., ... & Philips, W., 2017: A review of urban air pollution monitoring and exposure assessment methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6. <https://doi.org/10.3390/ijgi6120389>
- Zheng, S., Li, Z., Wang, Q., Xie, K., Liu, M., Xie, S., Polycarpou, M., 2023: Improving prediction of gnss satellite visibility in urban canyon based on graph transformer. Paper presented at the Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023). <http://dx.doi.org/10.33012/2023.19346>
- 

## ORCID

Tordai Á. V.  <https://orcid.org/0000-0002-8617-0531>  
Mészáros R.  <https://orcid.org/0000-0002-0550-9266>