

VÁROSI LÉGSZENNYEZETTSÉG FINOM TÉR- ÉS IDŐBELI FELBONTÁSÚ VIZSGÁLATA

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.robert@ttk.elte.hu

Bevezetés

A levegőszennyezés emberi egészségre és környezetre gyakorolt hatása sürgető globális probléma. A hatásokat mérséklő stratégiák és irányelvek kidolgozásához elengedhetetlenül szükséges a levegőminőség pontos és részletes mérése, különösen a sűrűn lakott városi területeken, ahol a légszennyező anyagok koncentrációja magasabb – komplex területi eloszlás mellett. E tanulmány egy Budapesten végzett kerékpár-alapú levegőminőség mérési program céljait, módszertani megközelítéseit, valamint előzetes eredményeit hivatott bemutatni. A jelenleg is zajló kampány célja a városi levegőszennyezettség finom tér- és időbeli felbontású felmérése volt, melynek első fázisában az aeroszol részecskék két mérettartománya ($PM_{2.5}$ és PM_{10}) mellett a környezeti hőmérséklet, relatív páratartalom és részletes GPS adatok rögzítésére került sor a városban előre kiválasztott két útvonal mentén.

A mért adatok feldolgozására egy automatizált, majd egy manuális minőségellenőrzési eljárást dolgoztunk ki, melyből – a rögzített metaadatokkal együtt – összetett adatbázist építettünk. A nagymennyiségű adat egyszerű és hatékony kezeléséhez komplex adatfeldolgozó algoritmust fejlesztettünk Matlab nyelven. A különböző mérések összehasonlításához, illetve a területi és időbeli trendek detektálásához a szűretlen és a korrigált adatokat szabályos földrajzi rácsra vetítettük. Bemutatjuk a mérési program főbb sajátosságait, az alkalmazott adatfeldolgozási módszertant, valamint – előzetes eredményként – a két vizsgált PM frakció átlagos arányát ($PM_{2.5}/PM_{10}$) 45 felhasznált mérési adat alapján.

Szakirodalmi áttekintés

A városi levegőszennyezés világszerte korunk egyik legnagyobb környezeti kihívása (Li et al., 2019). A megnövekedett szennyezőanyag-koncentrációkhoz kapcsolódó számos egészségkárosító hatást ismerünk, mint a légzőrendszeri megbetegedések (bronchitis, tüdőgyulladás, asztma, tüdőrák stb.) kockázatának növekedése (Kampa & Castanas, 2008), szív- és érrendszeri megbetegedések kialakulása, tartós szervkárosodások, fejlődési rendellenességek megjelenése (Lodovici & Bigagli, 2011; Afsar et al., 2019). A levegőszennyezés okozta többethalálozás globálisan 8,8 millió fő/év körül alakul, melyhez a kapcsolódó élettartam-csökkenés átlagosan 2,9 év (Lelieveld et al., 2020). A tartósan magas légszennyező-koncentrációk hatása különösen érvényesül a sűrűn lakott, városi környezetben, ahol a lokális emissziók, a transzmisszió, valamint a komplex, mikroskálájú áramlástanai képek együttesen határozzák meg a helyi levegőminőséget (Fisher et al., 2006). Egy átfogó amerikai tanulmány alapján $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{2.5}$ koncentráció csökkenés átlagosan 0,35 év várható élettartam-növekedést jelenthet (Correia et al., 2013). Ezen túl a légszennyező anyagok klímaváltozásban betöltött szerepe (Ramanathan & Feng, 2009) és környezetkárosító hatása is említésre méltó (Manisalidis et al., 2020). A nagy népsűrűséggel, ipari tevékenységgel és forgalmi torlódásokkal jellemezhető városi környezetben a magas szennyezőanyag-koncentráció hatásai fokozottan érvényesülnek (Bartholy & Pongrácz, 2018). Egyre lényegesebbé válik így a városi levegő minőségének pontos és részletes vizsgálata mind

döntéshozatali, mind várostervezési, mind pedig közegészségügyi szempontból (Pascal et al., 2013). A fenntartható, környezetbarát közlekedési módok részarányának további növelése érdekében fontos a közlekedők légszennyezettség-kitettségének vizsgálata is, annak minimalizálása érdekében (Hankey & Marshall, 2015; Johansson et al., 2017).

Az elmúlt években a hordozható levegőminőség-szenzorok robbanásszerű technológiai fejlődése lehetővé tette a K+F+I szektor számára a levegőminőség korábbinál finomabb tér- és időbeli felbontású vizsgálatát (Mead et al., 2013; Van den Bossche et al., 2015). A hagyományosan alkalmazott, telepített háttérszennyezettség mérő állomások – bár hatékonyan szolgáltatnak regionálisan reprezentatív mérési információkat – a légszennyező anyagok városon belüli, mikroskálájú változékonyságát nem képesek megragadni (Xie et al., 2017). E korlát leküzdésének egyik hatékony eszköze lehet mobil mérési platformok, illetve mozgó mérési kampányok alkalmazása (Snyder et al., 2013), például a kerékpár segítségével végzett mérések értékes adatokat szolgáltathatnak a levegőminőség változékonyságának finomfelbontású értékeléséhez (Elen et al., 2013; Liu et al., 2015; Mészáros et al., 2016). Egyre több alacsony költségű, ún. low-cost levegőminőség-szenzor is elérhetővé válik, melyek alkalmazhatók a városi légszennyezettség nagyfelbontású feltérképezésére (Kumar et al., 2015; Katsiri, 2021). Ugyanakkor figyelembe kell venni e szenzorok méréstechnikai korlátait is; számszerűen kell vizsgálni alkalmazhatóságukat (Lewis et al., 2016; Rai et al., 2017). Szintén kulcsfontosságú a kalibrálhatóság kérdése, hiszen a rendszeres kalibráció nélkülözhetetlen a konzisztens adatminőség fenntartásában (Maag et al., 2018; Munir et al., 2019; Zaidan et al., 2020). A nagy térbeli felbontású levegőminőségi vizsgálatokban egyre nagyobb szerepet kapnak az ún. crowdsourcing (Longo et al., 2020; Diviacco et al., 2022) és a gépi-tanulás alapú eljárások is (Lim et al., 2019; Zhao et al., 2021).

Jelen tanulmány Budapestre összpontosít. A cél egy olyan mérési módszer kidolgozása, tesztelése és implementálása, mely a korábbiaknál részletesebb, átfogó képet képes adni a városon belüli levegőminőségről, annak trendjeiről, a szennyezettségi „hotspot”-okról – különböző szennyező anyagokra és különböző nagytérű meteorológiai helyzetekben. E célból a mérési program első részében korszerű, ismert tulajdonságú, kalibrált mérőeszközöket helyeztünk kerékpárra. A kialakított mérőrendszer rögzítette a $PM_{2.5}$ és PM_{10} koncentrációkat (mg/m^3), a hőmérsékletet ($^{\circ}C$), a relatív páratartalmat (%), valamint a részletes GPS adatokat.

A városon belül két mérési útvonalat választottunk ki úgy, hogy i) a lehető legtöbb városi környezettípus reprezentált legyen (folyópart, part, belváros, külváros stb.), ii) a mérési útvonalakról kellő számú mérési adat gyűjtése legyen megoldható különböző évszakokban és különböző időjárási helyzetekben, valamint iii) a mérési program később bővíthető legyen további szenzorokkal és útvonalakkal.

A kutatási program első szakaszában fő célkitűzéseink i) a kerékpáros mérési és a kapcsolódó adatkezelési módszertan fejlesztése ii) az elérhető térbeli felbontás meghatározása, iii) az előforduló mérési hibák, pontatlanságok detektálása, számszerűsítése, iv) rácsponti adatbázis létrehozása az egyes mérések összehasonlíthatósága érdekében, v) referencia adatok gyűjtése a low-cost szenzorok implementációja előtt, valamint vi) esettanulmányok készítése speciális légszennyezettségi helyzetekben.

A következőkben bemutatjuk az alkalmazott eszközöket, módszertant, az adatelemzés lépéseit, valamint a rendelkezésre álló mérési adatokból számított átlagos rácsponti $PM_{2.5}/PM_{10}$ arány segítségével illusztráljuk méréseink alkalmazhatóságát.

A mérések műszerezettsége, útvonalai

A mérési kampány első szakaszában az ELTE Meteorológiai Tanszék ismert tulajdonságú, kalibrált mérőműszereit alkalmaztuk a mérési módszertan teszteléséhez. Az aeroszol részecskék (PM) frakciók méréséhez TSI DustTrak II (8532) típusú lézeres optikai részecskeszámlálót használtunk [1 – tsi.com], mind a 2,5 és a 10 µm-es frakciót fizikai impaktorokkal felszerelve külön műszer mérte. A légbeszívás sebességét gyárilag kalibrált 3 l/perc sebességre állítottuk be. A léghőmérséklet és relatív nedvesség adatokat Testo 635-2 típusú mérésadatgyűjtővel rögzítettük [2 – testo.com]. Valamennyi műszer előzetesen és a mérési program közben folyamatosan átesett a szükséges karbantartási- és tesztelési eljárásokon, melyeket metaadatként az adatbázisban rögzítettünk. A részletes GPS adatok rögzítését mobiltelefonos applikáció (DashWare Android Logger) végezte [3 – play.google.com]. Valamennyi műszer belső óráját atomórához szinkronizáltuk. A mért paramétereket és rögzítési időintervallumokat az 1. táblázat foglalja össze.

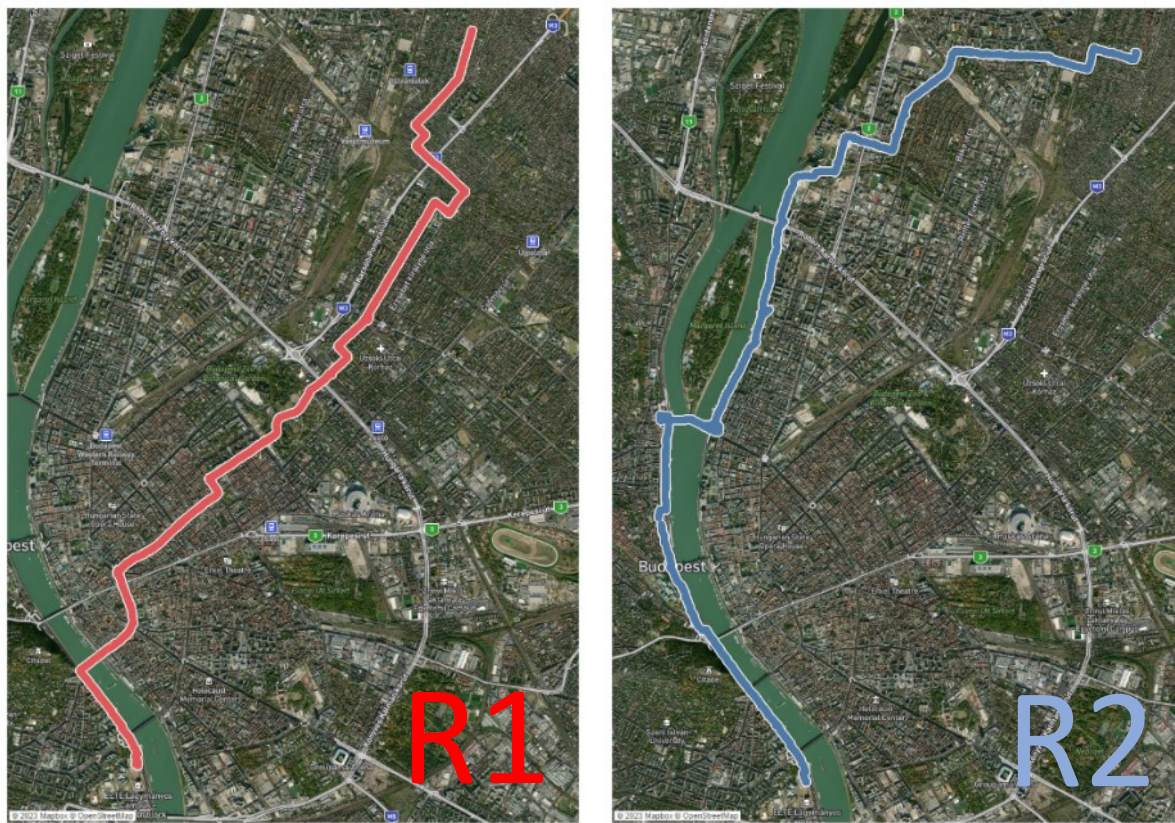
1. táblázat: A mért paraméterek, mértékegységeik, mintavételi és rögzítési gyakoriságuk.

Mért paraméter	Mértékegység	Mintavételi gyakoriság	Rögzítési gyakoriság	Műszer
PM _{2.5} koncentráció	mg/m ³	2 s	10 s	TSI DustTrak
PM ₁₀ koncentráció	mg/m ³	2 s	10 s	TSI DustTrak
Hőmérséklet	°C	1 s	10 s	Testo 635-2
Relatív páratartalom	%	1 s	10 s	Testo 635-2
Harmatpont	°C	1 s	10 s	Testo 635-2
Földrajzi szélesség	°	1 s	1 s	Mobiltelefon
Földrajzi hosszúság	°	1 s	1 s	Mobiltelefon
Magasság	m	1 s	1 s	Mobiltelefon
Sebesség	km/h	1 s	1 s	Mobiltelefon
Haladás iránya	°	1 s	1 s	Mobiltelefon
Összesített GPS pontosság	m	1 s	1 s	Mobiltelefon
x, y, z irányú pontosság (3)	m	1 s	1 s	Mobiltelefon

A mérőműszereket kerékpáros táskákban helyeztük el úgy, hogy a mintavétel közös ponton, kivezetett beszívócsöveknél történjen. A mérések kivitelezéséhez két fő útvonalat jelöltünk ki (1. ábra). Az R1 útvonal az ELTE Lágymányosi kampuszáról indulva a budai Felső Rakparton halad, majd a Szabadság hídon átkelve érinti a Kálvin teret. Innen a Wesselényi (illetve a Dob) utcában halad végig, áthalad a Városligeten, majd az M3 bevezető szakaszával párhuzamosan tart északkelet felé. Az útvonal az M3 bevezetőt keresztezve, annak nyugati oldalán, a XV. kerületben, Rákospalotán végződik. Az R2 útvonal a Lágymányosi kampuszról indulva a budai Felső Rakparton halad végig, majd a Margit hídon átkelve a pesti alsó rakparton folytatódik a Rákos patak torkolatáig. Keresztezi a Váci utat, majd a Tél utcán keletre tartva a XV. kerületben végződik. Megjegyezzük, hogy az útvonalakon mindkét irányban végeztünk méréseket.

Minden egyes út során 4 nyers, szöveges adatállomány keletkezett (csv), melyeket az egyszerű kezelhetőség végett Microsoft OneDrive felhő tárhelyben helyeztünk el. Szintén ide

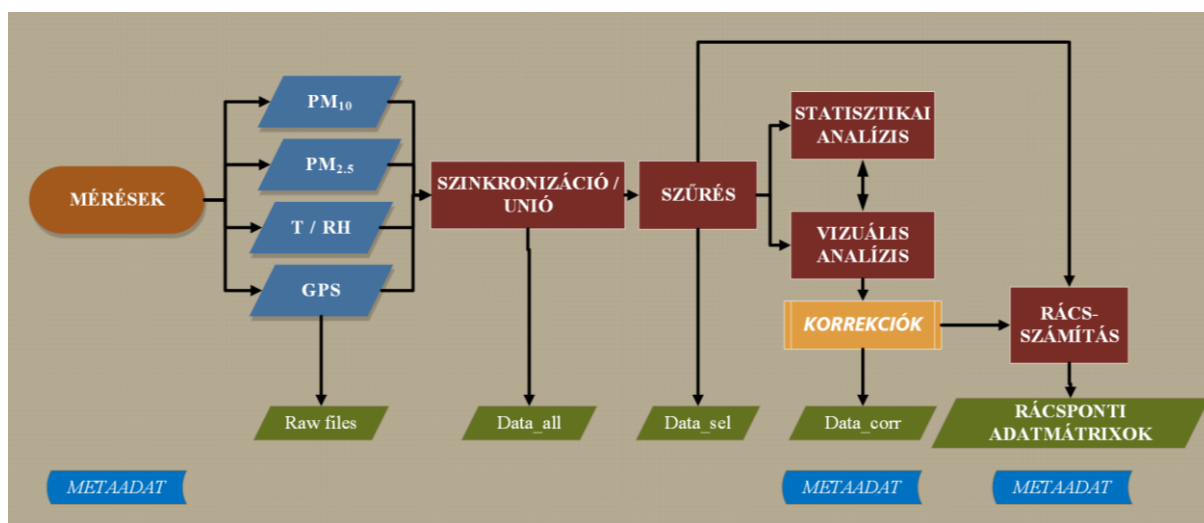
kerültek a különböző számítások, azok eredményei, a metaadatok, és a korrekción átesett, végleges adatállományok is.



1. ábra: A mérési program két fő útvonala, az R1 (balra) és az R2 (jobbra).

Az adatfeldolgozás módszertana

A várható nagymennyiségű adat, valamint a feldolgozási módszertan folyamatos fejlesztésének lehetősége indokolta, hogy az adatkezelés legtöbb lépése automatizáltan történjen. Ehhez egy komplex, teljesen függvényalapú, parametrizálható algoritmust fejlesztettünk Matlab 2022a [4 – matlab.com] nyelven. Az algoritmus működésének folyamatát a 2. ábra illusztrálja.

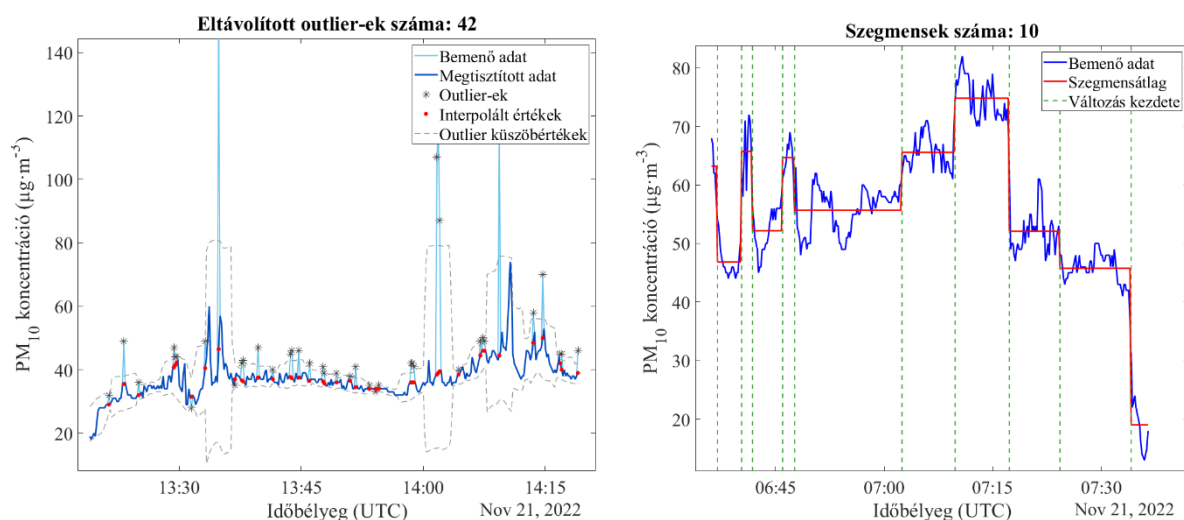


2. ábra: Az adatfeldolgozás folyamata.

A bemenő adatok (nyers adatfájlok) időalapú szinkronizáción esnek át, majd egy egységes, összesített adatállomány kerül kiírásra. Valamennyi további számítás e fájl használatával történik. A biztosan hibás, illetve üres adatpontok (*NaN*) szűrése a következő lépésben történik. A keletkező, szűrt állományon ezután automatizált statisztikai szűrések történnek, melyek célja i) a kiugró értékek (outlier-ek) azonosítása, ii) az adatsorok trendszerűségeinek detektálása, leírása, valamint iii) az adatok előkészítése vizuális elemzéshez (beleértve az automatikus ábrakészítést is). Minden egyes mérési út adatsorainak végső vizsgálata és korrekciója vizuális analitikai eszközök (Matlab *plot* és *geoplot*, Tableau) segítségével történik. Amennyiben szignifikáns korrekció történik – akár automatikusan, akár vizuálisan – azt külön metaadatként is rögzítjük. Végül az adatok rácsponthoz vetítése (gridding) történik előre beállított paraméterek segítségével.

Outlier-ek szűrésének kérdése, szegmentáció

Lényeges kérdés az adatfeldolgozás során a kiugró értékek kezelésének kérdése. Ezen értékek egy része visszavezethető a mérőműszerek, különösen az optikai részecskeszámláló mérési bizonytalanságára. Ugyanakkor az adatsorban található „tüskék” túlnyomó része olyan valós fizikai folyamatokat reprezentál, melyek vizuálisan is megerősíthetők (pl. nehézjárművek kipufogógáz-csóvjaja, fosszilis tüzeléshez kapcsolódó füstök, ipari kibocsátás terjedése, utcakanyonokban megragadó lebegő szennyezőanyagok stb.). Amennyiben ezeket a kiugró értékeket szűrjük, a lokális háttérszennyezéshez közelítő adatsort kapunk. Viszont értékes információt hordoz a kiugró értékek által reprezentált kibocsátás térbeli- és időbeli megjelenése, valamint annak változékonysága is (különösen, ha az emberi egészségre gyakorolt hatásokat kívánjuk számszerűsíteni), így mind a szűrt, mind a szűretlen adatsorokat felhasználjuk a későbbi számítások során. A kísérleti, automatizált outlier-szűrés a teljes adatsor mediánjának („kvázi-háttérszennyezés”), valamint szimmetrikus, 90 másodperces mozgóablakok mediánját veszi figyelembe (Hampel szűrő). Az algoritmus kimenetének vizuális reprezentációját a 3a ábra illusztrálja. Fontos megjegyezni, hogy e módszer – különösen gyorsan változó időjárási paraméterek esetén – hajlamos a szűrendő értékek túlbecslésére, így minden esetben szükség van vizuális megerősítésre, korrekcióra.

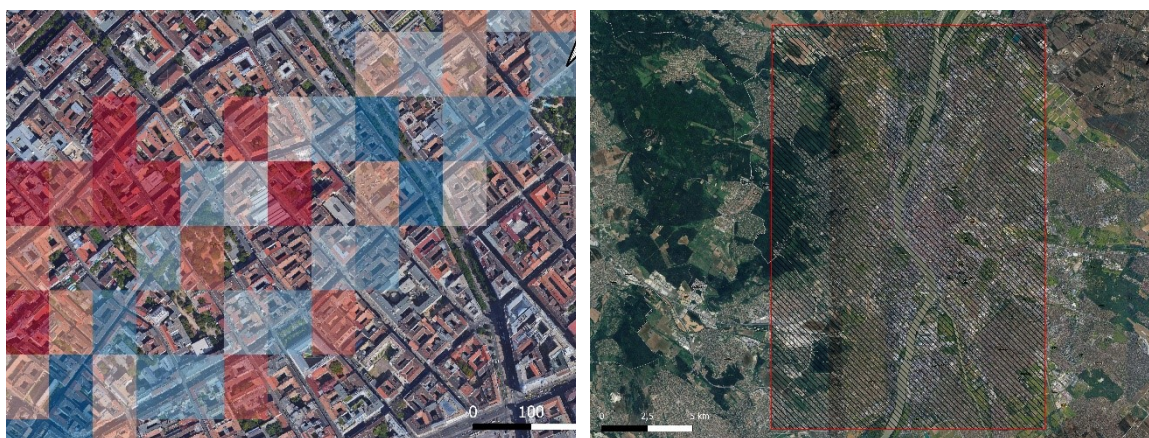


3. ábra: Az outlier-szűrő algoritmus vizuális kimenete (3a, balra), valamint az adat-szegmentáló algoritmus kimenete (3b, jobbra).

Szintén hasznos információt nyerhetünk az egyes útvonal-szakaszokra (szegmensekre) jellemző érték meghatározása által. A szegmentáció által lehetségessé válik egyes területek, illetve útszakaszok légszennyezettségi trendjeinek vizsgálata különböző időjárási helyzetekben, illetve egyes szegmensek emelkedett légszennyezőanyag koncentrációjának elkülönítése, elemzése. Szintén alkalmas a módszer a műszerek kültéri stabilizációs periódusainak (mérési útvonalak eleje és vége) automatizált vágására. Az alkalmazott eljárás a Matlab *ischange* függvényére épülve, az adatsor átlagát felhasználva különíti el az egyes szegmenseket a 3b ábrán illusztrált módon. Valamennyi szegmens esetén meghatároztuk a szegmensátlagot, valamint a szegmens kezdetét és végét jelző időbélyegeket, melyek további számítások céljából felhasználhatók.

Rácsponti adatbázis létrehozása

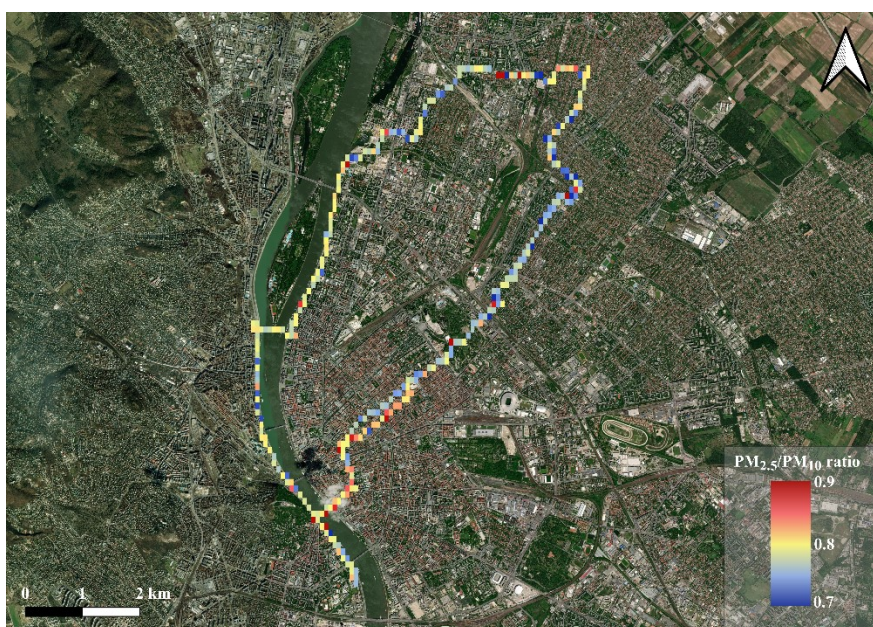
A különböző mérések adatainak összehasonlításához, trendek számszerű kimutatásához az adatpontok egységes, rácsponti vetítésére van szükség. Az adatfeldolgozás utolsó lépéseként a szűrt és szűretlen adatsorok rácsponti képének előállítását történik a Matlab nyelven fejlesztett *gridbin* eljárás segítségével [5 – github.com]. Az egyes adatpontok rácsponti átlagának számítása a rácsponthoz közeli adatpontok között történik interpoláció nélkül úgy, hogy a *NaN* értékek átlaga szintén üres rácsponthoz (*NaN*) ad vissza. Számításra kerülnek i) az átlagos $PM_{2.5}$ és PM_{10} koncentrációk, ii) a hőmérséklet, iii) a relatív páratartalom, valamint iv) az egyes rácsponti értékekhez felhasznált adatpontok száma. Utóbbira a felmerülő GPS-hibák, valamint esetleges forgalmi akadályok okozta kerülőútvonalak szűrése miatt van szükség. A feldolgozás jelenlegi szakaszában 45 különálló mérési útvonal adatait vetítettük a 4. ábrán látható, $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ összterületű, mindkét irányban 200 cellából álló szabályos rácstra (egy rácsponthoz $\sim 111 \text{ m} \times 111 \text{ m}$ területű). A terület határait a $47,4^\circ$ és a $47,6^\circ$ földrajzi szélességek, valamint a $18,95^\circ$ és a $19,15^\circ$ földrajzi hosszúságok képezik. A fejlesztett algoritmus lehetővé teszi tetszőleges terület és felbontás megválasztását, így a rendelkezésre álló mérések – és adatpontok – számának növekedésével nagyobb felbontású rácsponti adatbázis állítható elő. A rácsponti adatokat mind szöveges (csv), mind geoinformatikai (geotiff) formátumokban tároljuk, az összesített adatok kezelését és megjelenítését QGIS szoftverrel végeztük.



4. ábra: A létrejövő rácsponthoz mérete (balra), valamint a vizsgált terület (jobbra).

Előzetes eredmények

A felhasznált 45 mérési adat összesítésével átlagos rácsponti értékeket is előállítottunk, így számítottuk i) az átlagos rácsponti koncentrációkat, ii) az egyes rácsponti átlagok a teljes út átlagától vett százalékos eltérésének átlagát, valamint iii) az $PM_{2.5}$ és PM_{10} koncentrációk arányát. A $PM_{2.5}/PM_{10}$ arányán átlagos területi megoszlását (a kevés adatpontot tartalmazó rácspontok szűrésével) mutatja be az 5. ábra (szűretlen adatokból). A finom/durva részecskék aránya, valamint annak évszakos változékonysága közvetlenül értékelhető levegőminőségi mutató, mely a szennyezőanyag összetételén túl a domináns légköri folyamatokat is jellemzi (Fan et al., 2021). Összetétel-vizsgálatokkal együtt a légszennyező anyagok eredetére enged következtetni (Yan et al., 2019). Látható, hogy míg a belvárosban több ponton magasabb az arány átlagos értéke (0,9 körüli), a zöldövezetekben, illetve a Dunaparti szakaszokon rendre alacsonyabb értékek (0,7–0,8) detektálhatók. A további részletes elemzés, illetve a módszertan finomítása a közeljövő feladata.



5. ábra: Átlagos $PM_{2.5}/PM_{10}$ arány rácsponti eloszlása 45 felhasznált mérés alapján (szűretlen adatokból).

Összefoglalás, további tervek

A mérés technika fejlődésével lehetővé vált olyan hordozható levegőminőségi mérőeszközök alkalmazása városi környezetben, melyek képesek detektálni a szennyezőanyagok városi környezet mikro- és lokális skálájú változásait. Egyre több, alacsony költségű, ún. low-cost szenzor válik elérhetővé a tudományos kutatásokhoz is (Morawska et al., 2018), melyek képesek lehetnek nagy tér- és időbeli felbontású mérések kivitelezéséhez, azonban minőségbiztosítási paramétereik (pontosság, kalibrálhatóság, stabilitás, más paraméterekkel vett keresztérzékenység) csak korlátozottan ismertek. Szintén kérdés egyes mérőműszerek egymáshoz képest vett teljesítménye ugyanazon feladat során. Kerékpáros mérések során ismert tulajdonságú, kalibrált mérőeszközökkel végeztünk PM , hőmérséklet és relatív nedvesség méréseket Budapesten. Célunk volt mind a mérés technikai, mind az adatkezelési módszertan fejlesztése, megalapozása low-cost szenzorok implementációjához, melyek alkalmasak lehetnek Budapest légszennyezettségének finomfelbontású vizsgálatához. A nagymértékű adat kezelését elősegítendő komplex, testre szabható adatfeldolgozó szoftvert

fejlesztettünk, mely a feldolgozás legnagyobb részét automatizálva segíti a hibalehetőségek minimalizálását. A szűrt és szűretlen mérésekből rácspontri adatbázist állítottunk elő, így a különböző útvonalak összehasonlítása, illetve együttes kezelése is lehetővé vált.

E tanulmányok adatai mind mérés technikai szempontból (egyedi, célműszer fejlesztése), mind humánegészségügyi szempontból (útvonal-menti, illetve időalapú terhelési mutatók, indexek kialakítása, számítása), mind pedig várostervezési szempontból (kerékpárutak, útszakaszok átlagos és maximális légszennyező-terhelése, időszakos trendek) hasznosíthatók. A további terveink között említhető továbbá i) a meglévő adatok részletes elemzése, esettanulmányok készítése különös légszennyezettségű helyzetek esetén, ii) téli-nyári évszakok összehasonlító vizsgálata, iii) a referencia adatsorok alkalmassá tétele modellszimulációkhoz, iv) több, szakirodalmi forrással rendelkező low-cost szenzor implementációja, összehasonlító vizsgálatok végzése, v) a mérési útvonalak, illetve a mért paraméterek számának kiterjesztése, vi) humánegészségügyi mutatók fejlesztése és számítása a mérési adatok alapján, valamint vii) egyedi fejlesztésű szenzor prototípusának elkészítése.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt keretében valósult meg.

Hivatkozások

- Afsar, B., Elsurer Afsar, R., Kanbay, A., Covic, A., Ortiz, A., Kanbay, M., 2019: Air pollution and kidney disease: review of current evidence. *Clinical Kidney Journal*, 12(1): 19–32.
<https://doi.org/10.1093/CKJ/SFY111>
- Bartholy, J., Pongrácz, R., 2018: A brief review of health-related issues occurring in urban areas related to global warming of 1.5°C. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 30, 123–132. <https://doi.org/10.1016/J.COSUST.2018.05.014>
- Correia, A.W., Pope, C.A.I., Dockery, D.W., Wang, Y., Ezzati, M., Dominici, F., 2013: Effect of Air Pollution Control on Life Expectancy in the United States: An Analysis of 545 U.S. Counties for the Period from 2000 to 2007. *Epidemiology*, 24(1): 23–31.
<https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3182770237>
- Diviacco, P., Iurcev, M., Carbajales, R.J., Potleca, N., Viola, A., Burca, M., Busato, A., 2022: Monitoring Air Quality in Urban Areas Using a Vehicle Sensor Network (VSN) Crowdsensing Paradigm. *Remote Sensing*, 14(21): 5576.
<https://doi.org/10.3390/rs14215576>
- Elen, B., Peters, J., Poppel, M.V., Bleux, N., Theunis, J., Reggente, M., Standaert, A., 2013: The Aeroflex: A Bicycle for Mobile Air Quality Measurements. *Sensors*, 13(1), 221–240.
<https://doi.org/10.3390/s130100221>
- Fan, H., Zhao, C., Yang, Y., Yang, X., 2021: Spatio-Temporal Variations of the PM_{2.5}/PM₁₀ Ratios and Its Application to Air Pollution Type Classification in China. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 692440. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.692440>
- Fisher, B., Kukkonen, J., Piringer, M., Rotach, M.W., Schatzmann, M., 2006: Meteorology applied to urban air pollution problems: Concepts from COST 715. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(2): 555–564. <https://doi.org/10.5194/acp-6-555-2006>
- Hankey, S., Marshall, J.D., 2015: On-bicycle exposure to particulate air pollution: Particle number, black carbon, PM_{2.5}, and particle size. *Atmospheric Environment*, 122: 65–73.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.025>

- Johansson, C., Lövenheim, B., Schantz, P., Wahlgren, L., Almström, P., Markstedt, A., Strömberg, M., Forsberg, B., Sommar, J.N., 2017: Impacts on air pollution and health by changing commuting from car to bicycle. *Science of The Total Environment*, 584–585: 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.145>
- Kampa, M., Castanas, E., 2008: Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2): 362–367. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2007.06.012>
- Katsiri, E., 2021: Developing Reliable Air Quality Monitoring Devices with Low Cost Sensors: Method and Lessons Learned. *International Journal of Environmental Science*, 6: 425–444.
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., Britter, R., 2015: The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75: 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Lelieveld, J., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Haines, A., Münzel, T., 2020: Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: A worldwide perspective. *Cardiovascular Research*, 116(11): 1910–1917. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa025>
- Lewis, A.C., Lee, J.D., Edwards, P.M., Shaw, M.D., Evans, M.J., Moller, S.J., Smith, K.R., Buckley, J.W., Ellis, M., Gillot, S.R., White, A., 2016: Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday Discussions*, 189(0): 85–103. <https://doi.org/10.1039/C5FD000201J>
- Li, X., Jin, L., Kan, H., 2019: Air pollution: A global problem needs local fixes. *Nature*, 570(7762): 437–439. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01960-7>
- Lim, C.C., Kim, H., Vilcassim, M.J.R., Thurston, G.D., Gordon, T., Chen, L.-C., Lee, K., Heimbinder, M., Kim, S.-Y., 2019: Mapping urban air quality using mobile sampling with low-cost sensors and machine learning in Seoul, South Korea. *Environment International*, 131: 105022. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105022>
- Liu, X., Li, B., Jiang, A., Qi, S., Xiang, C., Xu, N., 2015: A bicycle-borne sensor for monitoring air pollution near roadways. *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan*, 166–167. <https://doi.org/10.1109/ICCE-TW.2015.7216835>
- Lodovici, M., Bigagli, E., 2011: Oxidative stress and air pollution exposure. *Journal of Toxicology*, 2011: 487074. <https://doi.org/10.1155/2011/487074>
- Longo, A., Zappatore, M., Bochicchio, M. A., 2020: Apollon: Towards a citizen science methodology for urban environmental monitoring. *Future Generation Computer Systems*, 112: 899–912. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.06.041>
- Maag, B., Zhou, Z., Thiele, L., 2018: A Survey on Sensor Calibration in Air Pollution Monitoring Deployments. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(6): 4857–4870. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2853660>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., Bezirtzoglou, E., 2020: Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers in Public Health*, 8: 505570. <https://doi.org/10.3389/FPUH.2020.00014/BIBTEX>
- Mead, M.I., Popoola, O.A. M., Stewart, G.B., Landshoff, P., Calleja, M., Hayes, M., Baldovi, J.J., McLeod, M.W., Hodgson, T.F., Dicks, J., Lewis, A., Cohen, J., Baron, R., Saffell, J.R., Jones, R.L., 2013: The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks. *Atmospheric Environment*, 70: 186–203. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2012.11.060>
- Mészáros, R., Leelőssy, Á., Csapó, P., Boda, B., Kovács, A., Lagzi, I., 2016: Monitoring of atmospheric trace gases in Budapest by mobile measurements. *EMS Annual Meeting Abstracts: 16th EMS / 11th ECAC*. Trieste, Olaszország. EMS2016-501. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2016/EMS2016-501.pdf>

- Morawska, L., Thai, P.K., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G.S.W., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A.K.H., Louie, P.K.K., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, Md.M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahl, D., Williams, R., 2018: Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116: 286–299.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>
- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Jubb, S.A., Osammor, O., 2019: Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—A case study in Sheffield. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(2): 94. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7231-8>
- Pascal, M., Corso, M., Chanel, O., Declercq, C., Badaloni, C., Cesaroni, G., Henschel, S., Meister, K., Haluza, D., Martin-Olmedo, P., Medina, S., 2013: Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom project. *Science of The Total Environment*, 449: 390–400.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.077>
- Rai, A.C., Kumar, P., Pilla, F., Skouloudis, A.N., Di Sabatino, S., Ratti, C., Yasar, A., Rickerby, D., 2017: End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of The Total Environment*, 607–608: 691–705.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.266>
- Ramanathan, V., Feng, Y., 2009: Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment*, 43(1): 37–50.
<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2008.09.063>
- Snyder, E.G., Watkins, T.H., Solomon, P.A., Thoma, E.D., Williams, R.W., Hagler, G.S.W., Shelow, D., Hindin, D.A., Kilaru, V.J., Preuss, P.W., 2013: The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. *Environmental Science & Technology*, 47(20): 11369–11377.
<https://doi.org/10.1021/es4022602>
- 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>
- Xie, X., Semanjski, I., Gautama, S., Tsiligianni, E., Deligiannis, N., Rajan, R., Pasveer, F., Philips, W., 2017: A Review of Urban Air Pollution Monitoring and Exposure Assessment Methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12): 389.
<https://doi.org/10.3390/ijgi6120389>
- Yan, Y., Li, Y., Sun, M., Wu, Z., 2019: Primary Pollutants and Air Quality Analysis for Urban Air in China: Evidence from Shanghai. *Sustainability*, 11(8): 8.
<https://doi.org/10.3390/su11082319>
- Zaidan, M.A., Hossein Motlagh, N., Fung, P.L., Lu, D., Timonen, H., Kuula, J., Niemi, J.V., Tarkoma, S., Petäjä, T., Kulmala, M., Hussein, T., 2020: Intelligent Calibration and Virtual Sensing for Integrated Low-Cost Air Quality Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 20(22): 13638–13652. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3010316>
- Zhao, B., Yu, L., Wang, C., Shuai, C., Zhu, J., Qu, S., Taiebat, M., Xu, M., 2021: Urban Air Pollution Mapping Using Fleet Vehicles as Mobile Monitors and Machine Learning. *Environmental Science & Technology*, 55(8): 5579–5588.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08034>

Internetes hivatkozások

- [1 – tsi.com] <https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/aerosol-and-dust-monitors/dusttrak%E2%84%A2-ii-aerosol-monitor-8532/>
[2 – testo.com] <https://www.testo.com/hu-HU/testo-635-2/p/0563-6352>
[3 – play.google.com] <https://play.google.com/store/apps/details?id=ca.techuniverse.dashwarelogger>
[4 – matlab.com] The MathWorks Inc., 2022: MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>
[5 – github.com] Chad Greene (2023). gridbin, GitHub. <https://github.com/chadagreene/gridbin>
-

ORCID

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