

KISMÉRETŰ AEROSZOL RÉSZECSKÉK KÜL- ÉS BELTÉRI KONCENTRÁCIÓJÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA EGY ZÖLDÖVEZETI LAKÓHÁZ ESETÉN

Tordai Ágoston Vilmos^(1, 2) , Mészáros Róbert^(1, 2) 

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽²⁾ Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium
e-mail: tordai@student.elte.hu; meszaros.robert@ttk.elte.hu

Bevezetés

A kültéri és beltéri levegőminőség egyaránt jelentősen befolyásolja környezetünket és egészségünket. A kültéri mérések mellett az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb érdeklődés mutatkozik a beltéri légszennyezés monitorozására is. A beltéri méréseket azonban általában csak egyszerűbb, egyben pontatlanabb műszerekkel tudjuk végezni, ezért fontos, hogy ismerjük ezen eszközök alkalmazhatóságát és korlátait. Tanulmányunkban egy világszerte széles körben használt, ún. low-cost levegőminőségi szenzor (AirVisual Pro) beltéri és kültéri egységeinek méréseit vetettük össze egy esztergomi, zöldövezeti lakóház esetén. Elemzéseinkhez egy közeli, referencia mérőállomás adatait is felhasználtuk. Bemutatjuk a mérési elrendezést, az alkalmazott adatfeldolgozási módszereket, kitérve az adatminőség jellemzésére is. A kialakított adatbázis alkalmazhatóságát esettanulmányokon keresztül illusztráljuk; foglalkozunk a kül- és beltéri $PM_{2.5}/PM_{10}$ arány változékonyságával, valamint a kül- és beltéri levegőben mért $PM_{2.5}$ koncentrációk arányával (IO arány), mely fontos információval szolgálhat a beltéri légszennyezők forraserősségéről. Végezetül – további terveinket is körvonalazva – kitekintünk a minőségbiztosítás, illetve a low-cost műszertechnika alkalmazhatóságának és korlátainak témaköreibe.

Szakirodalmi áttekintés

A kültéri levegőminőség mérését hazánkban az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat végzi, azonban e mérési adatok csak a nagyobb városokban, illetve jelentősebb ipari létesítmények környezetében [1 – met.hu] érhetők el. A méréseket a CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) kémiai transzport-modell szimulációi egészítik ki (Varga-Balogh et al., 2020). A HungaroMet Zrt. emellett a CHIMERE levegőkémiai modellt is futtatja Magyarország térségére (Ferenczi et al., 2021). A modellszimulációk segítségével a légszennyező anyagok térbeli eloszlásáról is képet kapunk, ugyanakkor ezen szimulációk az emissziós, valamint a meteorológiai mezők pontatlansága miatt sokszor hibával terheltek (Horváth et al., 2024).

A kültéri levegőminőség ismerete mellett a különböző beltérek levegőminőségéről sokkal kevesebb információval rendelkezünk, annak ellenére, hogy életünk nagy részét (akár 90%-át) beltérekben töltjük, ráadásul a rossz beltéri levegőminőség számos egészségügyi kockázatot rejt magában (Dominski et al., 2021). A beltéri levegő minőségét egyrészt a kültéri levegőminőség, másrészt a beltérek sajátos kibocsátásai befolyásolják. Mindezek miatt fontos, hogy minél több információt szerezzünk mind a kültéri, mind a beltéri levegőminőségről. Ehhez a rendelkezésre álló referenciamérések és modellszimulációk mellett nagy segítséget jelentenek az ún. low-cost (alacsony költségű) szenzorok. Az alacsony költségű levegőkémiai szenzorokat egyre elterjedtebben használják mind a beltéri (Bousiotis et al., 2023), mind a kültéri (Dimitriou et al., 2023) levegőminőség mérésekre.

A sokszor pontatlanabb, de jóval olcsóbb és laikusok által is könnyen kezelhető, a személyes környezetet monitorozó eszközöknél ugyanakkor fontos, hogy a felhasználó tisztában legyen ezen eszközök alkalmazhatóságával és korlátaival. E kérdéskör számos jelenleg aktív kutatási program tárgyát képezi, több publikáció született a low-cost levegőminőségi szenzorok és referencia mérőeszközök méréseinek összehasonlításából (l. pl.: Kang et al., 2022; Feng et al., 2024). Ezek a tanulmányok rámutatnak arra, hogy a low-cost szenzorok körültekintő használat és megfelelő kalibrálás esetén hatékonyan kiegészíthetik a levegőminőség-szabályozási és döntéshozói célú referencia műszerek térben jóval kevésbé lefedett hálózatait.

Jelen kutatásunkban – szakirodalmi ajánlások alapján – AirVisual [2 – iqair.com] szenzorokat alkalmazunk, melyek mérési tulajdonságait megelőző, 12 hónapos összehasonlító mérés során is elemezték (Zamora et al., 2020). Más kutatások a szenzorválasz referenciához képesti linearitását (He et al., 2021), a szenzor kutatási célú alkalmazhatóságát (Hofman et al., 2021), illetve beltéri levegőminőség-mérésre történő alkalmazhatóságát (Demanega et al., 2021) vizsgálták. E kutatások is megerősítették a szenzor linearitását, a referenciától vett eltérések 5%-os tartományban mozogtak (Zamora et al., 2020; Hofman et al., 2021).

A mérés helyszíne

A műszereket egy esztergomi zöldövezetben fekvő családi ház területén helyeztük el (1. ábra). A kültéri egységet a már meglévő mikroklíma-állomás oszlopán telepítettük, 2 m magasságban. A belső egységet az ablakhoz közel (attól 1,4 m távolságra, 1,2 m magasan) helyeztük el. A vizsgált szoba szellőztető berendezéssel nem rendelkezik.



1. ábra: A mérési helyszín, Esztergom város déli városrészében
(Képek © Airbus, CNES / Airbus, Landsat / Copernicus Maxar Technologies, 2024).

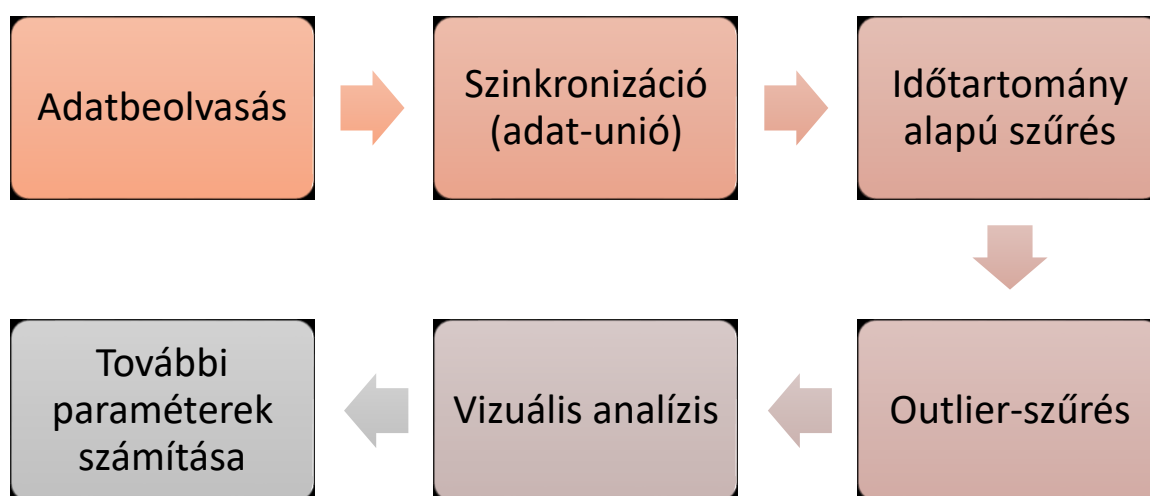
Adatletöltés

Az általunk használt Airvisual Pro (indoor monitor) készülékről a mért adatok helyi hálózaton, egy Samba kiszolgálóról tölthetők le. Az adatfájlok havi gyakorisággal kerülnek archiválásra. Megjegyezzük, hogy a mérési frekvencia (bár 3 perc a beállított), gyakran irreguláris. Ennek egyik oka, hogy a készülék bármely gombjának megnyomása esetén sűrűbb mérési programra vált (10 s), melyből fokozatosan áll vissza a beállított frekvenciára.

Az Airvisual Outdoor szenzor vezetékes vagy vezeték nélküli hálózati elérést használva a mért adatokat az IQAir rendszerébe [3 – iqair.com] tölti fel. Az adatletöltés a gyártó által biztosított webes felületen, illetve API segítségével lehetséges. Míg korábban az eszköz mérési frekvenciája 5 perc volt (gyári beállítás, nem módosítható), 2024-től már 1 perces időbeli felbontású mérést és adatgyűjtést is lehetővé tett a gyártó.

Az adatfeldolgozás

Az adatok feldolgozását MATLAB (R2023b) rendszerben végeztük [4 – MATLAB]. Összesen 8 hónap adatait (2023. december 10. – 2024. július 10.) használtuk. Az adatfeldolgozás főbb lépéseit a 2. ábra szemlélteti. Az adatok beolvasását követő első lépés a különböző frekvenciájú adatsorok szinkronizálása volt. A két adatsort az időbélyegek alapján kombináltuk (adatsorok uniója), majd órás átlagokat számítottunk. A telepítéshez, szereléshez kapcsolódó, illetve a hiányzó adatpontokat mellőztük. Az elemzés során csak azokat az adatpontokat használtuk fel, melyek esetében mindkét szenzorból rendelkezésünkre állnak adatok (egyik sem tartalmaz NaN értéket).



2. ábra: Az adatfeldolgozási folyamat menete.

Több változó esetében megfigyelhetők kiugró értékek, melyek egyrészt emberi tevékenységhez, másrészt a műszer mérési pontosságához, harmadrészt transziens eseményekhez kötődnek. Az outlier-szűréshez ezért mozgóablakos módszert választottunk (mozgómedián, 12 órás időablak), mivel ezek a módszerek jól reagálnak hirtelen, nagy változásokra, miközben a kisebb változékonyságot meghagyják. Mind a kül-, mind a beltéri szenzor adatait ilyen módon szűrtük, majd az egységes, statisztikai-alapú outlier-szűrő algoritmust vizuális analitikai módszerekkel (különösen többparaméteres, párhuzamos

elemzések) egészítettük ki. A nyilvánvalóan hibás adatokat (irreális értékek) az adatsorból eltávolítottuk.

Kültéri és beltéri PM_{2,5} arány (IO)

A beltéri levegő minőségét alapvetően két tényező határozza meg; i) a beltérben felszabaduló szennyezőanyagok koncentrációja (lokális forrás), és ii) a külső levegő által szállított szennyezőanyagok (transzmisszió). E két hatás különválasztásának egy egyszerű módszere a párhuzamos bel- és kültéri mérés, mely során paraméterenként vizsgálható a külső levegő szerepe a beltéri levegőminőség kialakításában.

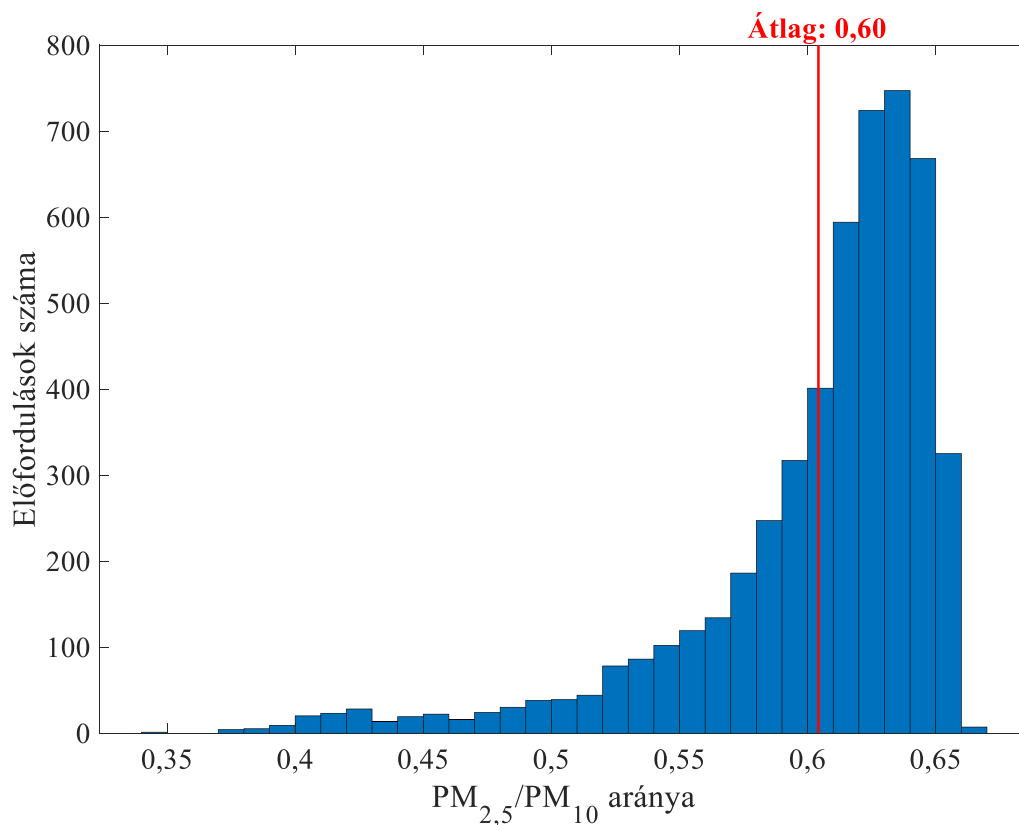
Aeroszolak esetén a beltéri levegő minősége jellemezhető az ún. IO aránnyal („indoor-outdoor ratio”), mely adott időpillanatban a belső- és külső légtérben mért aeroszol-keverési arányok hányadosát jelenti (Freijer & Bloemen, 2000). Ez az arány alkalmazható a külső levegő hatásának, bekeveredésének jellemzésére. Az arány nagyságát meghatározza i) a szennyezőanyagok koncentrációja a külső és a belső levegőben, ii) az adott szennyezőanyagok beltéri forráserőssége, illetve iii) az időegység alatt be- és kiáramló levegő mennyisége. Bár az egyszerű IO arány ez utóbbit explicit módon nem veszi figyelembe, a mért értékekben hatása megjelenik.

Megjegyezzük, hogy szakirodalmi forrásokban komplexebb modellek is megjelennek a beltéri levegőminőség jellemzésére, például a tömegegyensúlyon alapuló modellek (Freijer & Bloemen, 2000), melyek a beltér légtérfogatát, a beáramló levegőmennyiséget, a szűrési (filtrációs) hatékonyságot, a szennyezőanyag bomlási sebességét, illetve a források/nyelők erősségét is figyelembe veszik. Más modellek az infiltrációs, illetve penetrációs faktort alkalmazzák a kül- és beltér közötti szennyezőanyag-csere leírására (Chen & Zhao, 2011; Stamp et al., 2022).

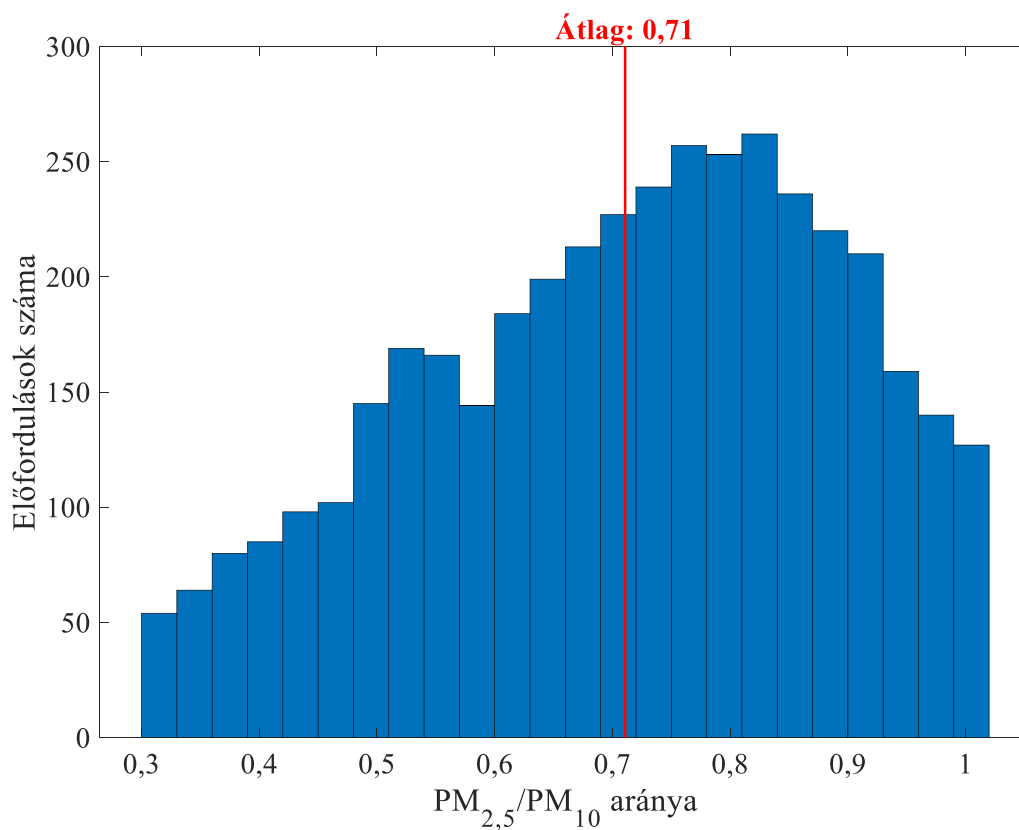
Eredmények, esettanulmányok

Először a PM_{2,5}/PM₁₀ koncentrációk arányát mutatjuk be. A finom és durva aeroszolfrakciók aránya alkalmazható a természetes és antropogén források arányának becslésére (Chu et al., 2015; Xu et al., 2017), a vizsgálat helyszínén karakterisztikus, de évszakonként változhat (Fan et al., 2021). A külső szenzor méréseiből számított PM arányok eloszlását a 3. ábra, a belső esetén pedig a 4. ábra szemlélteti.

A kültéri PM arány átlagosan 0,6 volt, az évszakok között nem észleltünk szignifikáns különbséget (az adatok 90%-a 0,55–0,65 közötti tartományban volt). A belső levegő tekintetében a finom aeroszolfrakció részaránya magasabb, átlagosan 0,71, az adatok 80%-a 0,54–0,87 tartományban helyezkedik el.

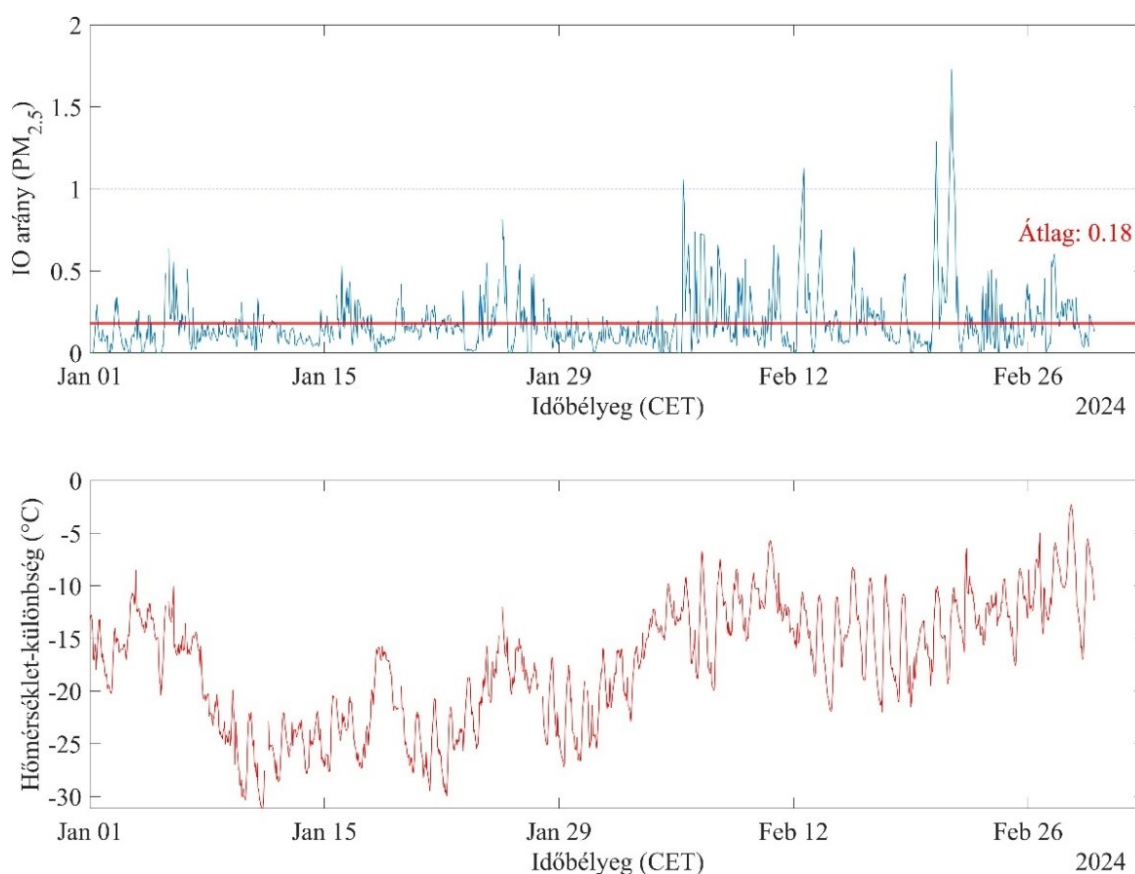


3. ábra: $PM_{2,5}/PM_{10}$ arány eloszlása a kültéri szenzor adatai alapján (átlag: 0,6).

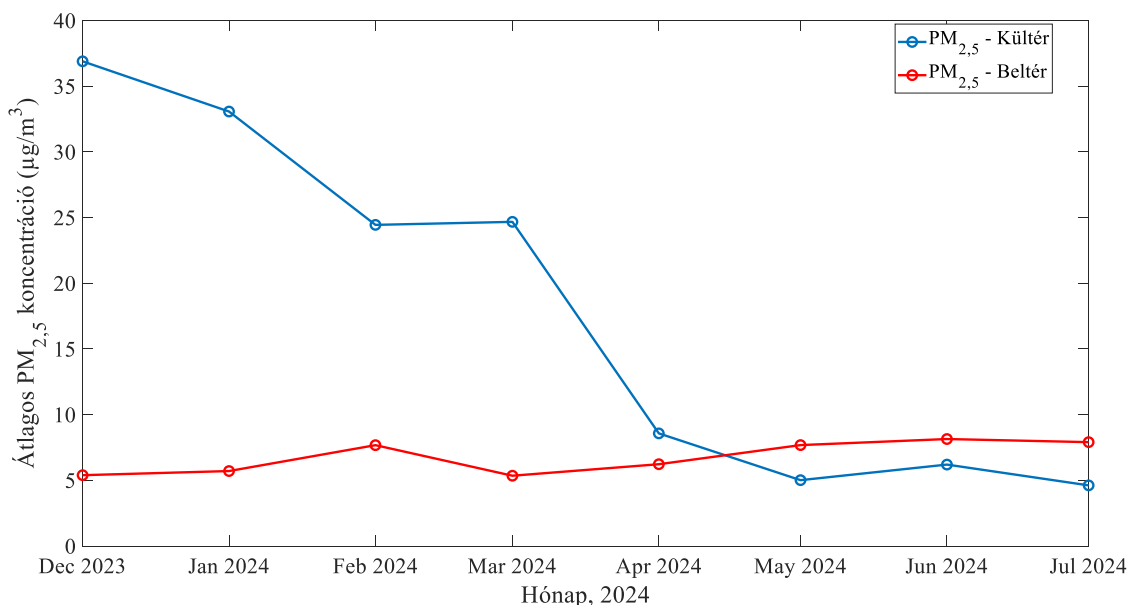


4. ábra: $PM_{2,5}/PM_{10}$ arány eloszlása a beltéri szenzor adatai alapján (átlag: 0,71).

Az IO arány viselkedését egy rövidebb téli időszak, 2024. január és február hónapok idősorával illusztráljuk. Az 5. ábrán felül az IO arány idősora ($PM_{2,5}$ -ből számítva), míg alul a kültéri és beltéri hőmérséklet különbsége látható. Az IO arány jellemzően 0 és 1 közötti tartományban mozog, azaz a beltéri $PM_{2,5}$ koncentráció jellemzően alacsonyabb. Jól megfigyelhető a szellőztetések hatása is – amelyet a hőmérséklet-különbség csökkenése is diagnosztizál –, ekkor a beltéri $PM_{2,5}$ a kültérihez közelít. Előfordul néhány eset, amikor 1 feletti értékek is megjelennek; itt a beltéri források, illetve emberi tevékenység hatására a belső levegőben mért koncentráció meghaladja a kültérit. Szintén megfigyelhető, hogy időben előre haladva – ahogy egyre magasabb a külső hőmérséklet – egyre hosszabbak a ventilációs periódusok is, így gyakrabban fordul elő magasabb, 0,5 feletti IO érték. Így – kiépített légszerelő rendszer hiányában – a természetes ventiláció hatékonysága és időtartama alapvetően meghatározza a vizsgált helyiség levegőminőségét. A 6. ábrán a $PM_{2,5}$ koncentrációk havi átlaga szerepel. Jól látszik a fűtési periódus a kültéri adatokban, illetve megfigyelhető, hogy a nyári időszakban gyakoribb a beltérben a finom-aeroszol – kültéri értékeket is meghaladó – dúsulása, mely a hosszabb, nyáron állandó természetes ventilációnak köszönhető.



5. ábra: A $PM_{2,5}$ koncentrációkból számított IO arány (fent),
valamint a kültéri és beltéri levegő hőmérsékletének különbsége (lent).



6. ábra: Havi átlagos PM_{2,5} koncentrációk a kültéri (kék) és a beltéri (piros) mérések alapján.

Összefoglalás, további tervek

Tanulmányunkban a külső és belső levegő minőségének kapcsolatát vizsgáltuk low-cost mérőeszközökkel. A használt AirVisual szenzorok alkalmazhatóságát bizonyítja a létrejött adatbázis, mely további, komplex elemzésre alkalmas.

A vizsgált helyiség levegőminőségét alapvetően meghatározza a kültéri levegő, a ventilációs periódusok hosszán keresztül. Míg a kültéri PM arány 0,6 körüli volt a teljes időszakban, a beltérben nagyobb változékonyságot mutatott, 0,71 átlaggal, mely rávilágít a napi tevékenységek hatására. Az IO arány vizsgálata alapján a téli időszakban a beltéri PM_{2,5} koncentrációk alacsonyabbak, viszont az arányt nagymértékben befolyásolja az emberi tevékenység és a ventiláció. A hosszabb szellőztetések (nagyobb külső hőmérséklet) gyakoribb 1 fölötti IO értékeket is eredményeznek, mely illusztrálja egy szűrővel ellátott szellőzőrendszer kiépítésének létjogosultságát. A fenti folyamaton keresztül tehát a belső levegő PM_{2,5} szennyezettségének havi, illetve évszakos menete figyelhető meg. A beltéri és kültéri levegőminőség együttes vizsgálata képet nyújt a helyi levegőminőség javításának lehetőségeiről. Megfelelő minőségbiztosítás mellett e vizsgálat hatékony eszközei lehetnek a low-cost levegőminőségi szenzorok.

További terveink között szerepel a minőségbiztosítási eljárás fejlesztése és egységesítése, több szenzortípus alkalmazása, további mért paraméterek bevezetése, illetve az aeroszolösszetétel meghatározása mintavétel segítségével.

Köszönetnyilvánítás

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

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap K-146315 és K-146322 pályázatai támogatták.

Hivatkozások

- Bousiotis, D., Alconcel, L.-N.S., Beddows, D.C.S., Harrison, R.M., Pope, F.D., 2023: Monitoring and apportioning sources of indoor air quality using low-cost particulate matter sensors. *Environment International*, 174: 107907.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107907>
- Chen, C., Zhao, B., 2011: Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45: 275–288.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- Chu, H.-J., Huang, B., Lin, C.-Y., 2015: Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM10-PM2.5 relationship. *Atmospheric Environment*, 102: 176–182.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.062>
- Demanega, I., Mujan, I., Singer, B.C., Anđelković, A.S., Babich, F., Licina, D., 2021: Performance assessment of low-cost environmental monitors and single sensors under variable indoor air quality and thermal conditions. *Building and Environment*, 187: 107415.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107415>
- Dimitriou, K., Stavroulas, I., Grivas, G., Chatzidiakos, C., Kosmopoulos, G., Kazantzidis, A., ... & Gerasopoulos, E., 2023: Intra- and inter-city variability of PM2.5 concentrations in Greece as determined with a low-cost sensor network. *Atmospheric Environment*, 301: 119713. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119713>
- Dominski F.H., Branco, J.H.L., Buonanno G., Stabile, L., da Silva, M.G., Andrade, A., 2021: Effects of air pollution on health: A mapping review of systematic reviews and meta-analyses. *Environmental Research*, 201: 111487.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111487>
- Fan, H., Zhao, C., Yang, Y., Yang, X., 2021: Spatio-Temporal Variations of the PM2.5/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>
- Feng, Z., Zheng, L., Ren, B., Liu, D., Huang, J., Xue, N., 2024: Feasibility of low-cost particulate matter sensors for long-term environmental monitoring: Field evaluation and calibration. *Science of the Total Environment*, 945: 174089.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174089>
- Ferenczi, Z., Homolya, E., Lázár, K., Tóth, A., 2021: Effect of the uncertainty in meteorology on air quality model predictions. *Időjárás*, 125(4): 625–646.
<https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.5>
- Freijer, J.I., Bloemen, H.J.Th., 2000: Modeling Relationships between Indoor and Outdoor Air Quality. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50: 292–300.
<https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464007>
- He, R., Han, T., Bachman, D., Carluccio, D.J., Jaeger, R., Zhang, J., ... & Mainelis, G., 2021: Evaluation of two low-cost PM monitors under different laboratory and indoor conditions. *Aerosol Science and Technology*, 55: 316–331.
<https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1851649>
- Hofman, J., Depestel, G., Samson, R., Manna, V.P.L., 2021: Field benchmarking study of different low-cost air quality sensors in view of innovative smart city applications.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29948.97927>
- Horváth, K.K., Ferenczi, Z., Varga-Balogh, A., Leelőssy, Á., Mészáros, R., 2024: One-year comparison of regional air quality models with measurements of atmospheric gases and aerosol particles in Hungary. *Proceedings of 22nd International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. In press.

- Kang, Y., Aye L., Ngo T.D., Zhou, J., 2022: Performance evaluation of low-cost air quality sensors: A review. *Science of the Total Environment*, 818: 151769. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151769>
- Stamp, S., Burman, E., Chatzidiakou, L., Cooper, E., Wang, Y., Mumovic, D., 2022: A critical evaluation of the dynamic nature of indoor-outdoor air quality ratios. *Atmospheric Environment*, 273: 118955. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118955>
- Varga-Balogh, A., Leelőssy, Á., Lagzi, I.L., Mészáros, R., 2020: Time-dependent downscaling of PM_{2.5} predictions from CAMS air quality models to urban 2 monitoring sites in Budapest. *Atmosphere*, 11(6): 669. <https://doi.org/10.3390/atmos11060669>
- Xu, G., Jiao, L., Zhang, B., Zhao, S., Yuan, M., Gu, Y., ... & Tang, X., 2017: Spatial and Temporal Variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ Ratio in Wuhan, Central China. *Aerosol and Air Quality Research*, 17: 741–751. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.09.0406>
- Zamora, M.L., Rice, J., Koehler, K., 2020: One year evaluation of three low-cost PM_{2.5} monitors. *Atmospheric Environment*, 235: 117615. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117615>

Internetes hivatkozások

- [1 – met.hu] <https://legszennyezettseg.met.hu/levegominoseg/meresi-adatok/automata-merohalozat>
- [2 – iqair.com] <https://www.iqair.com/air-quality-monitors>
- [3 – iqair.com] <https://www.iqair.com/hungary/>
- [4 – MATLAB] The MathWorks Inc. (2023). MATLAB version: 23.2.0.2365128 (R2023b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>
-

ORCID

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