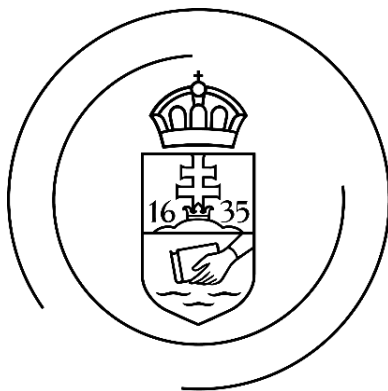


Levegőminőségi low-cost szenzorok alkalmazhatósága eltérő környezetekben



Készítette:

Németh Anikó

III. éves környezettan alapszakos hallgató

Témavezető:

dr. Mészáros Róbert

tszv. egyetemi docens,

ELTE TTK FFI Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Budapest

2024

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	2
Absztrakt	3
1. Bevezetés	5
2. Szakirodalmi áttekintés	8
2.1. A légszennyezettség mérés globális viszonyai	8
2.2. Low-cost szenzorokban rejlő lehetőségek	9
2.3. Beltéri levegőminőség	10
2.4. Tömegközlekedési eszközök levegőminősége	12
3. Módszerek	15
3.1. Alkalmazott low-cost szenzorok	15
3.2. Mérési környezetek	17
3.3. Adatfeldolgozás	19
4. Eredmények	20
4.1. Stressz-teszt	20
4.2. Több hetes beltéri mérés	24
4.3. Városi mobil mérések	31
4.4. Tömegközlekedési eszközök levegőminősége	34
5. Konklúzió	38
5.1. Összegzés	38
5.2. Szenzorokról alkotott felhasználói vélemény	39
5.3. Jövőbeli kilátások	41
Köszönetnyilvánítás	42
Irodalomjegyzék	43
Internetes források	45
Függelék: Saját eredmények	47

Absztrakt

Légszennyezőnek nevezünk minden olyan anyagot, melynek koncentrációja a természetes légköri összetételt meghaladja. A légszennyező anyagok légúti, szív- és érrendszeri, illetve idegrendszeri betegségek kialakulását és súlyosbodását okozhatják, így monitorozásuk elengedhetetlen feladat. A fontosabb légszennyező anyagok koncentrációjának alakulásáról globálisan több ezer állomás szolgáltat információt. Ezeken az állomásokon referenciaműszerek üzemelnek, melyek etalonokhoz kalibrált, nagyon pontos készülékek, fenntartásuk ugyanakkor igen költséges. E referencia eszközöknél pontatlanabb, de megfizethetőbb készülékek a low-cost szenzorok, melyeket elsősorban lakossági célú felhasználásra fejlesztenek, többnyire beltéri levegőminőség mérésére. Ezek előnye, hogy kis méretüknek köszönhetően hordozhatók, így olyan helyeken is lehet velük megfigyeléseket végezni, ahol referencia eszközökkel ez nem lehetséges.

A légszennyezettség mértéke függ a környezeti adottságoktól és a környező kibocsátási forrásoktól. Ebből adódóan a mérések eltérő méretű területre reprezentatívak. Egy parkban elhelyezett állomáson például eltérő légszennyezettséget mérhetünk, mint amit pár utcával arrébb egy forgalmas út mellett. Emellett rendkívül fontos, hogy információnk legyen a beltéri légszennyezettség viszonyairól is, hiszen napjaink jelentős részét töltjük épületen belül, vagy közlekedési eszközön. Ezen helyszíneken mérések végzéséhez nagy segítséget nyújtanak a low-cost szenzorok. Ezek eltérő árkategóriájú és pontosságú eszközök, melyek mért komponenseik szerint is különböznek. Az általuk mutatott adatokat körültekintően kell kezelni, a mért értékek a valódi koncentrációtól akár jelentős eltéréseket mutathatnak, arra azonban alkalmasak, hogy különböző légterek levegőminőségi viszonyait, kibocsátási források hatásait összehasonlítsunk. Ugyanakkor a mérések információt hordoznak magukról a műszerekről is.

Kutatásaink során 2024 nyarán és ősze folyamán méréseket végeztünk néhány low-cost levegőminőségi szenzorral, melyek segítségével többek között a kisméretű aeroszol részecskék ($PM_{2,5}$) és a szén-dioxid (CO_2) koncentrációit vizsgáltunk. A méréseket különféle környezetben, eltérő célokkal végeztük:

- **A műszereket eltérő kibocsátásoknak tettük ki**, figyelve a reakcióidőt és a mért koncentrációkat. A kísérletet azonos helyen és időben végeztük egy lakásban, a hétköznapi élet eszközeit használva szennyező forrásként. A szennyezők közé tartozott például a csillagszóró, a gyertya, a dezodor és a főzés.

- **Beltérben fix ponton** elhelyezett készülékkel **több hetes** mérést végezve tanulmányoztuk a légszennyezés napi menetét, a lakásban tartózkodók számának hatását a levegőminőségre.

- **Mobil mérésekkel** vizsgáltuk a különböző **közlekedési eszközöket**, az eltéréseket utcák, állomások és szerelvények között, adott **útvonalak** többszöri bejárásával.

Eredményeink szerint az alkalmazott szenzorok többsége dinamikusan reagál a légszennyezettség megváltozására. Többek között tapasztaltuk a beltéri szén-dioxid koncentráció összefüggését a helyszínen tartózkodók számával, beláttuk, hogy kültéren a meteorológiai paraméterek és az eltérő környezetek hatással vannak a légszennyezettségre, emellett a különböző tömegközlekedési eszközök, szerelvények, állomások között különbségeket fedeztünk fel.

Eredményeink hozzájárulnak környezetünk levegőminőségének pontosabb megismeréséhez és támogatják hétköznapijaink tervezését annak érdekében, hogy minél kevésbé legyünk kitéve a légszennyezettség káros hatásainak.

1. Bevezetés

A levegőminőség a levegőben lévő – az egészségre káros hatást gyakorló – légszennyező anyagok koncentrációinak értéke. Légszennyezőnek tekintünk minden olyan anyagot, amelynek koncentrációja a természetes légköri összetételt meghaladja, beleértve azon anyagokat is, melyek a természetes légkörnek nem alkotói (Tóth *et al.*, 2021a).

A légszennyező anyagok nagy hatással vannak az egészségre. Globálisan évente 7 millió (2021-ben 8.1 millió [1 - UNICEF]), az Európai Unióban közel 300 ezer [2 - EU tények és számadatok], Magyarországon 13 ezer ember (European Environmental Agency, 2019) idő előtti halálát okozza a rossz levegőminőség. Ebből adódóan a légszennyező anyagok megengedhető koncentráció értékeire egészségügyi határértékeket határoztak meg, melyeket követve különböző szabályozásokat is életbe léptetnek.

A kültéri levegőminőség esetében törvényekben határoznak meg célértékeket (EU tagországoknak: Ambient Air Quality Directives), illetve kibocsátáscsökkentési kötelezettségeket (EU: NEC Directives), valamint kibocsátási normákat (például Magyarországon: 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről).

Ezzel szemben a beltéri levegőminőséget sokkal kevésbé szabályozzák, pedig egyre több bizonyíték van a beltéri szennyezők káros hatásairól (Sharma and Sarkar, 2023; Salonen *et al.*, 2024; Shahri *et al.*, 2024; Ji *et al.* 2025). Jelenleg egyedül a kémiai kóroki tényezők hatásának kitett munkavállalókra vonatkozóan létezik jogszabály Magyarországon (5/2020. (II. 6.) ITM rendelet), emellett a Nemzeti Népegészségügyi Központ 2024-ben fogalmazott meg irányértékeket a beltéri levegőminőség értékeléséhez (Kakucs *et al.*, 2024).

A legfontosabb légszennyező anyagok a nitrogén-oxidok, az ammónia, a szén-monoxid, az ózon, a kén-dioxid, az illékony szerves vegyületek (VOC), valamint a PM_{2,5} és a PM₁₀ (2,5 és 10 µm-nél kisebb méretű aeroszol részecskék). Ezen anyagoknak jelentős forrása a fosszilis energiahordozók égetése (energiatermelés, lakossági fűtés, közlekedés), az ipari tevékenység, a mezőgazdaság, a hulladékkezelés (hulladékégetés lakossági és állami tevékenységből), de a szennyezők természetes eredetűek is lehetnek (Tóth *et al.*, 2021a).

A kültéri levegőminőség a kibocsátási forrásoktól, a légkör állapotától és a környezeti tényezőktől is nagymértékben függ. Emellett az utóbbi időben egyre nagyobb figyelem terelődik a beltérek levegőminőségére is. A beltéri levegőminőséget alapvetően meghatározza a kültéri levegő minősége, emellett a beltérben keletkező légszennyező anyagok, a beltér

tisztítására alkalmazott eljárások, a légtér cseréje, és a levegőkémiai reakciók is (*Kakucs et al.*, 2024).

Beltereinkben jelentős szennyezést képviselnek az illékony szerves vegyületek (VOC) és aldehidek, melyek elsősorban beltéri forrásokból származnak. Döntően külső forrásokból erednek a nitrogén-oxidok és a kisméretű aeroszol részecskék egy része. Emellett beltérben a szén-dioxid koncentráció értéke is fontos, amit ugyan nem tekintünk légszennyező anyagnak, de magas koncentráció mellett fejfájást, álmoságot, durvább esetekben hányingert, orr- és torokpanaszokat is okozhat (*Azuma et al.*, 2018; *Kumar et al.*, 2022). Ennek menete többnyire követi a többi beltéri légszennyező alakulását, és a légtérben tartózkodók számával arányos.

A légszennyezők rövid távon légúti, általános (fejfájás, fáradékonyság, émelygés) és idegrendszeri (feszültség, szorongás) tüneteket okozhatnak, egyéni érzékenységtől függően. Tartósan magas koncentrációjuk légúti, szív- és érrendszeri, illetve idegrendszeri betegségek kialakulásához és súlyosbodásához vezethet. Némely légszennyezők daganatos megbetegedések okozói lehetnek (*Kakucs et al.*, 2024).

A Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti Központ beltéri irányértékeket és ajánlásokat határozott meg nemzetközi szervezetek, pl. az Egészségügyi Világszervezet (WHO) által jóváhagyott referencia értékek alapján, felhasználva más forrásokat is. A közegészségügyi ajánlás többek között szén-dioxidra, illékony szerves vegyületekre és aeroszolokra határoz meg értékeket; ezek mellett a biológiai légszennyezőkre is, pl. penészgombára és baktériumokra. Az ajánlás a komfortparaméterekre (hőmérséklet, relatív páratartalom) is kitér, meghatározva azon értékeket, melyek minimálisra csökkentik az egészségügyi kockázatot (*Kakucs et al.*, 2024).

A légszennyezés mérése és korlátozása tehát fontos feladat. Hivatalos monitorozása referencia szenzorokkal zajlik, amelyek költséges, szakértelmet igénylő, nehezen mozgatható eszközök. Ezáltal sok környezetben, például beltérekben, közlekedési eszközökön körülményes a levegőminőség mérése. Erre a problémára nyújthatnak megoldást az ún. low-cost szenzorok (LCS), melyek általában kevésbé pontos, ugyanakkor hordozható, könnyen kezelhető, többnyire olcsóbb eszközök. Az ilyen szenzorok által mért értékek nem tekinthetők hivatalos eredményeknek, a döntéshozási folyamatokban sem használhatók. Azonban bizonyos környezetek légszennyezettségének megismerésére remekül alkalmazhatók, természetesen a mért értékek fenntartásokkal való kezelésével.

Jelen tanulmány során low-cost levegőminőségi szenzorokat alkalmazva főleg a kisméretű aeroszol részecskék ($PM_{2,5}$) és a szén-dioxid (CO_2) koncentrációit vizsgáltuk, esetenként

kitérve az illékony szerves vegyületek (VOC) értékeire is. Célunk mellett, hogy eltérő környezetek levegőminőségét felderítsük, az eszközök megismerésére és alkalmazhatóságára is irányult.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. A légszennyezettség mérés globális viszonyai

A légszennyezés monitorozása nagy jelentőségű, mert a levegőminőség hatással van az emberi egészségre, a természetre és a klímaváltozásra is. A légszennyezés ráadásul határokon átívelő jelenség, így fontos a nemzetközi összefogás a megismerésében és a kibocsátás mértékének csökkentésében. A globális monitorozást a Meteorológiai Világszervezet (WMO) programja, a Global Atmospheric Watch (GAW) koordinálja. Alapvetően referencia műszerek adatait használják, azonban elmondható, hogy globálisan aránytalan a referencia műszerrel rendelkező állomások aránya. Az Egészségügyi Világszervezet 2–3 évente publikál egy adatbázist (WHO Ambient Air Quality Database), ami összefoglalja a felszíni referencia állomások eredményeit és $PM_{2,5}$, PM_{10} , NO_2 koncentrációkra éves átlagokat közöl. A legfrissebb adatbázis (2024. januárjában frissítve) 7182 település állomásait foglalja magába, több, mint 120 országból (WHO, 2023). Azonban a mérőállomások főleg Kína, Európa, Észak-Amerika és India területére koncentráltak. Az állomásoknak csak 8%-a származik közepes és alacsony bevételű országokból (Shairsingh *et al.*, 2023).

A referencia mérőhálózatban lévő hiányosságok kiegészítésére alkalmaznak műholdas módszereket és modellezést is (Tóth *et al.*, 2021a).

A műholdak használatát korlátozza a műhold felbocsátásának költsége, a műhold pályája – az ebből adódó belátott terület (a kvázi-poláris műhold globálisan mindenhol mér, de adott terület felett naponta csak egyszer halad át, míg a geostacionárius műhold csak egy területet lát, de arról egész nap tud információt szolgáltatni), és az aktuális időjárás is (passzív méréshez tiszta időre van szükség). Továbbá a passzív mérési mód többnyire egy teljes légoszlop szennyezettségét tudja megállapítani, ami gyakran nem egyezik meg a felszínen tapasztalható koncentrációkkal, így ezen mérések alkalmazásához is szükség van felszíni (in-situ) mérésekre (WMO, 2024).

A levegőminőség modellezéséhez az aktuális légszennyezettségi mérési adatok és a szennyezések forrásainak minél pontosabb ismerete szükséges. Az emissziós adatokat évente frissülő leltárakban közlik, pl. EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) [3 - EDGAR], UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) [4 - UNFCCC]. Ezek többnyire éves adatokat tartalmaznak, a legújabb leltár mindig a két évvel ezelőtti év adatait. Ezáltal a modellezésben nehézséget jelent, hogy az éves adatsor alapján egy adott napra meghatározzuk a várható kibocsátást. A modellezés rácspontra történik, ezen pontokra kell az emissziós értékeket és az aktuális légszennyezést

meghatározni. Érthető módon ezt nehezíti, hogy a tényleges mérési helyszínek a rácsokhoz képest szabálytalanok és az állomások sűrűsége is nagyon változatos (Tóth *et al.*, 2021b).

2.2. Low-cost szenzorokban rejlő lehetőségek

Az utóbbi időszakban egyre nagyobb az érdeklődés a low-cost szenzorok alkalmazására. Bár a low-cost szenzorok többnyire szignifikánsan olcsóbbak a referencia műszereknél, a besorolásukra nincs árbeli felső korlát. A különbséget az definiálja, hogy a referencia műszerek tanúsítvánnyal rendelkeznek, ami az eszköz adatainak minőségét igazolja és lehetővé teszi a végrehajtó szervek számára a műszer adatainak alkalmazását. Ezzel szemben a low-cost szenzor nem rendelkezik ilyen tanúsítvánnyal, gyakorta azért, mert túl rövid ideje létezik, ezáltal még nincsen elegendő információ a megbízhatóságáról (WMO, 2024).

A low-cost szenzorok előnye az árkülönbségen kívül még abban rejlik, hogy ezek az eszközök többnyire kisméretű, könnyű eszközök, jól szállíthatók. Általában kis energiafogyasztásúak, gyakran rendelkeznek saját akkumulátorral, de előfordulnak olyan készülékek is, amelyek saját napelemmel rendelkeznek. Előnyük még, hogy használatuk a referencia műszerekkel ellentétben nem igényel akkora hozzáértést, többnyire könnyen kezelhetők és vizuálisan megjelenített adataik a megértést segítik (WMO, 2024).

Természetesen ezeknek az eszközöknek megvannak a hátrányaik is. Az adatok pontosságában, a műszerek érzékenységében gondok lehetnek. A szenzorok élettartama általában rövidebb, mint egy referencia eszközé, és idővel a készülék minősége, ezáltal a mért adatok megbízhatósága romolhat. Mindezek mellett a hőmérsékleti és relatív nedvességi viszonyok is erősen befolyásolhatják a szenzorok pontosságát (Molnár *et al.*, 2020).

Az aeroszol koncentrációt mérő low-cost szenzorok gyakran alkalmaznak fényszóródáson alapuló módszereket, amit a légköri nedvesség a részecskék törésmutatójának megváltoztatásával befolyásol. Az aeroszolokra kondenzálódott víz a részecske átmérőjét a száraz átmérőhöz képest akár háromszorosára is növelheti a relatív nedvesség függvényében (Pawar and Sinha, 2020). Több tanulmány, sokféle low-cost szenzor pontosságát tanulmányozta a relatív páratartalom függvényében. Pawar and Sinha (2020) Laser Egg nevű szenzort alkalmazva a PM_{10} és a $PM_{2,5}$ koncentrációk esetében megfigyelte, hogy 80%-ot meghaladó relatív páratartalom esetében a mért értékek a valóságnál nagyobbak voltak. Hasonló eredményre jutott a Plantower PMS1003 szenzort használva Jayaratne *et al.* (2018), ez a műszer 78%-os relatív tartalomig megközelítőleg visszaadta a valós koncentrációt, de felette lineárisan emelkedve egyre nagyobb értékeket adott. Liu *et al.* (2019) a Nova SDS011 low-cost szenzort hasonlította referencia műszerhez. Ezen eszközök is 80%-os páratartalom

felett emelkedést mutattak, közel 100%-os relatív páratartalom esetén 10–15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -es hibát produkáltak a $\text{PM}_{2,5}$ mérése során.

Ezáltal nem meglepő, hogy a referencia műszerek mind rendelkeznek egyfajta bemeneti fűtéssel, melynek célja a nedvességből adódó hibák kiküszöbölése, és megközelítőleg 40%-os relatív páratartalom mellett mérnek (*Pawar and Sinha, 2020*).

A low-cost szenzorokra, korlátaik miatt tehát úgy kell tekinteni, mint egy lehetséges kiegészítő módszerre. Alkalmazásuk lehetővé teszi a levegőminőség megismerését olyan helyeken, ahol referencia műszerek használatára nincs mód. Természetesen a low-cost szenzorok eredményei (még) nem alkalmasak arra, hogy hosszú távú következtetéseket vonjunk le, és értékeit a döntéshozatalban hasznosítsuk, azonban hozzávetőleges értékeket biztosítanak. Felhasználhatók akár elsődleges információforrásként, például egy esetleges ipari baleset esetén egy low-cost szenzorral végzett mérés fontos tájékoztató lehet, mielőtt a helyszínre referencia műszer érkezik. De kevésbé extrém esetekben is használhatóak, legyen az pl. egy olyan ország, ahol nem megfelelő az infrastruktúra referencia állomás telepítésére, vagy olyan helyszín, ahol referencia eszközöket méretük és korlátozott szállíthatóságuk következtében nem lehet alkalmazni. Ide tartoznak beltérünk és a tömegközlekedés is.

2.3. Beltéri levegőminőség

Beltérünkben a legjelentősebb szennyezők, az egészségre gyakorolt hatásuk és mennyiségük alapján a következők: nitrogén-oxidok (NO_x), szén-dioxid (CO_2), szén-monoxid (CO), ózon (O_3), illékony szerves vegyületek (VOC), kisméretű aeroszol részecskék ($\text{PM}_{2,5}$ és PM_{10}) és a levegőben terjedő mikroorganizmusok (*Verissimo, 2024*). Ezzel szemben az Egészségügyi Világszervezet globális levegőminőségi irányelvek című műve (*WHO, 2021*) hat légszennyezőt emel ki és ezekre vonatkozó egészségügyi határértékeket határoz meg. Ennek oka, hogy globális szinten ennek a hat komponensnek ($\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 és CO) a legnagyobb az egészségre gyakorolt negatív hatása (*WHO, 2021*).

A beltéri légszennyezők forrásait is tudjuk csoportosítani. Ezek egy része kültéri eredetű, más része pedig beltéri, ami részben emberi tevékenységhez kapcsolódó – például főzés, takarítás, dohányzás, részben állandó forrású – pl. építési anyagok és bútorok anyagának kipárolgása (*Saraga et al., 2024*).

A szennyezők forrásainak pontos meghatározása nehéz feladat. A beltérek nagyon változatosak, számít, hogy az adott helyiségnek mi a rendeltetése, milyen környezetben található – ide tartozik az ország, régió, ahol az épület található, a környék területhasználata, a

helyi emissziós források, éghajlati és időjárási paraméterek, a topográfia és a nyílt vízfelületek közelsége. Figyelembe kell venni az épület korát, az építőanyagokat, az alaprajzot, de még az üvegfelületek mennyisége is hatással lehet a levegőminőségre. A felújításokat is számításba kell venni, mivel a felújítást követő egy évben az illékony szerves vegyületek (VOC) megemelkedett koncentrációja figyelhető meg. Fontos tényező még a beltér szellőzése, az alkalmazott fűtési mód (ami a PM és a CO komponensekre van nagy hatással) és a főzés (gáztűzhelyek több ultrafinom (UFP) és kisméretű (PM) részecskék, és nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátásával járnak, mint az elektromos tűzhelyek) (Baeza_Romero et al., 2022).

A beltéri légszennyezők kémiai reakciók (pl. oxidáció, termikus bomlás) során tovább alakulhatnak. A kültéri és a beltéri hőmérsékletek különbözősége is képes változtatni a beltéri levegőminőséget. Például az ammónium-nitrát szobahőmérsékleten ammóniává és salétromsav gázzá alakul, míg alacsonyabb hőmérsékleten stabil. Ez a beltéri ammónium-nitrát koncentráció drasztikus csökkenését okozza, azonban bomlásával más reakciókat képes gerjeszteni (Lunden, 2003; Saraga et al., 2024).

Saraga et al. (2023) sok publikáció áttekintésével összegyűjtötte a különböző forrásokból származó szennyező anyagokat és összefoglalta a kisméretű aeroszol részecskék és az illékony szerves vegyületek eredetét hozzájárulásuk szempontjából. A PM_{2,5} legnagyobb forrása a dohányzás, majd a beltéri biomassza, fa, faszén égetése. További forrása a főzés és az újra-szuszpenzió (pl. bútorokból, építési anyagokból történő apró szilárd szemcsék felszabadulása a levegőbe). A VOC-ok legjelentősebb forrása gázok felszabadulása – új termékekből és az épület öregedése során. Hasonló a hozzájárulása a festékeknek, ragasztóknak, az illatosított fogyasztói termékeknek (dezodor, légfrissítők) és a fa bútoroknak. Kisebb mértékben származik VOC a padlóból, a dohányzásból, oldószerekből, takarító szerekből, továbbá fal és mennyezet burkolatokból.

A fentiekhez hasonlóan, különböző kutatásokat és a légszennyezők meghatározására alkalmazott módszereket foglalt össze Chojer et al. (2024). Mindkét tanulmány kitér arra, hogy a megvizsgált kutatások globális eloszlása egyenetlen. A legtöbb Ázsiában, ezen belül is Kínában született. Nagy számban szerepelnek még európai és észak-amerikai publikációk, azonban Afrikából csak egyetlenegy származik. A tanulmányok jelentős része városi vagy külvárosi környezetben vizsgálódott, vidékre vonatkozó csak Kínában született. A legnagyobb hangsúly lakóhelyek – nappalik, hálósobák és konyhák – vizsgálatán van, ezt követi az iskolák megfigyelése. Néhány tanulmány idősök otthonával, egészségügyi intézményekkel, irodákkal és egyetemekkel is foglalkozik.

A beltéri koncentrációk vizsgálatát többnyire egy rögzített pontban, adott magasságban végzik. Kevés kutatás foglalkozik a szennyezők vertikális eloszlásával, bár ezek eredményei azt mutatják, hogy léteznek szignifikáns különbségek. *Ainiwaer et al.* (2022) nyolc különböző magasságban, a konyhában és egy hálósobában vizsgálta a főzés hatását a $PM_{2,5}$ koncentráció értékeiben. Megállapította, hogy a konyhában a főzés időszakában a 170 cm felett elhelyezett szenzorokkal mért összkoncentráció háromszorosa volt a 110 cm alattiak által mért koncentrációnak. Ugyanakkor nem szennyezett időszakokban csak kicsi eltérések voltak tapasztalhatók a különböző magasságok értékei között.

2.4. Tömegközlekedési eszközök levegőminősége

Az emberiség nagy része ideje jelentős részét tölti beltérekben; otthon, munkahelyen, és tömegközlekedési eszközökön; így nem meglepő, hogy a közlekedési eszközökhöz kapcsolódó kutatás is komoly szegmense a levegőminőség megismerésének.

A földalatti metróállomások levegője az egyik legjobban vizsgált terület. Mind az aeroszol részecskék (PM), mind az illékony szerves vegyületek, és a baktériumok mennyisége is többszöröse lehet az állomásokon az egészségügyi határértékeknek. A szennyezők egy része: PM, CO_2 , VOC-ok és bio-aeroszolak az állomásokon keletkeznek, míg másik része: O_3 , SO_x , NO_x és CO a kültéri levegőből kerül a metró területére (*Passi et al.*, 2021).

Budapesten is történt referencia műszerekkel PM koncentráció és összetétel mérés, az M2 metró, Astoria nevű megállójában (*Salma et al.*, 2007). A vizsgálatokra 2006-ban került sor; ekkor éppen felújították ezt a vonalat, két közeli megállóban is folyt az építkezés. A kutatás során 24 órán keresztül gyűjtöttek adatokat, ezáltal megvizsgálták, hogy a metró szerelvények állomásokhoz viszonyított helye milyen összefüggést mutat a PM koncentrációkkal. Megállapították, hogy a legmagasabb értékek korrelálnak a szerelvények sűrűbb érkezésével. Ugyanezt az összefüggést mások is megállapították. *Johansson and Johansson* (2003) több Stockholm-i metróállomáson végzett PM_{10} méréseket. Ezen helyszíneken a platformok felszíntől való távolsága különböző volt, az ebből származó különbséget is sikerült dokumentálniuk. A felszínen lévő állomásokon a PM_{10} értékek szignifikánsan kisebbek voltak, az eltérő napokon tapasztalt koncentráció értékek pedig az időjárással álltak szoros összefüggésben.

Salma et al. (2007) emellett azt is megfigyelte, hogy a szerelvény érkezésekor megemelkedik a koncentráció, majd miközben a szerelvény a megállóban áll, az értékek lokális maximuma tapasztalható, majd a vonat távozásakor csökken az aktuális koncentráció.

Ennek okát a párhuzamosan folytatott szélirány és -sebesség mérések segítségével sikerült magyarázniuk. A szerelvény érkezésekor az emelkedett PM szint az alagútból kiszorított szennyezett levegő következménye. Miközben a vonat a megállóban tartózkodik, az alagút felőli légáramlás fennáll, ennek következménye az alacsonyabb értékeken található, lokális maximum. A szerelvény távozásával az alagútból származó szennyezett levegő mellett az előcsarnokból és folyosóról is szívódik be levegő, amely tisztább, ezáltal a koncentráció csökken. *Seaton et al.* (2005) megállapították, hogy az átlagos $PM_{2,5}$ koncentráció a szerelvényen fele az állomásokon mérhetőnek. Azonban a vonaton a legmagasabb értékek az alagutakban haladva voltak tapasztalhatók.

Salma et al. (2007) analitikus módszerekkel kiderítették az aeroszolok összetételét is. A $PM_{10-2,0}$ mérettartomány 40%-a vas, 3–3%-a szilícium és kalcium volt. A $PM_{2,0}$ két legfontosabb összetevője a vas (46%) és a kén (2,5%) voltak. A mért komponenseket a kültéri levegővel összehasonlítva azokat az anyagokat is elkülönítették, melyeknek beltéri mennyisége sokszorososa volt a kintiének, ezáltal valószínűsíthető, hogy ezen anyagok forrása a metróhoz kapcsolódik. Ezen komponensek a vas, a mangán, a nikkel, a réz és a króm. Forrásuk bizonyos alkatrészek közötti súrlódás, dörzsölődés. Ilyen alkatrészek a szerelvény áram-ellátását biztosító sínek és a rajtuk csúszó kollektorok; továbbá a kerekek és hétköznapi sínek. Az M2-es metró esetében az elektromos féknek köszönhetően a fékezés kevésbé valószínű forrása ezeknek a fém szennyezőknek.

A metró területén keletkező acélpór a legjelentősebb forrása a lakosság (kivéve a foglalkozási kitétséggel rendelkezők) vas, mangán, nikkel és króm bevitelének. Ezen anyagok légzőszervi, szív- és érrendszeri, neurodegeneratív és rákos megbetegedések okozói lehetnek (*Chillrud et al.*, 2003).

A metróállomásokon a PM szennyezés mellett a mikroorganizmusok és az illékony szerves vegyületek (VOC) is veszélyeztetik az egészséget. Utóbbi kettő szoros összefüggésben van egymással, ugyanis a VOC-ok jelentős része tisztító- és fertőtlenítőszerekből származik. *Hwang et al.* (2023) Szöul városában vizsgálta a VOC-ok koncentrációját a COVID-19 pandémiát megelőzően (2019) és követően (2021) 8 különböző metróvonalon, 253 állomáson. A vírus miatt Dél-Koreában bevezették, hogy az állomásokat hetente legalább kétszer, a mozgólépcső korlátait és a lift gombjait pedig naponta négyszer kell takarítani. Ez a VOC koncentrációban 2021-ben két-háromszoros értékeket eredményezett a 2019-eshez képest. Az állomások felszínhez viszonyított mélysége szerinti eloszlásban is tapasztaltak változást a két év között. 2019-ben a legmagasabb koncentrációk a 15–30 méteres mélységben lévő állomásokon voltak mérhetők, ezzel szemben 2021-ben a mélységgel növekvő átlagértékek

voltak tapasztalhatók; így a 30 méternél mélyebben fekvő állomásokon volt a legnagyobb a koncentráció, ami a két évvel korábbi érték négyszeresének felel meg. Ezen eredmények felhívják a figyelmet arra, hogy a légszennyezők koncentrációja nagyban függ attól, hogy milyen az állomás szellőzése.

3. Módszerek

3.1. Alkalmazott low-cost szenzorok

A levegőminőséget hivatalos mérőállomásokon mérik, az innen származó adatok egy része kerül nemzetközi adatcserére, itt vizsgálják a levegőterheltségi szintet, és figyelik a légszennyezési határértékek betartását. Magyarországon ez az Országos Légszennyezettségi Hálózat (OLM) feladata. Automata mérőállomásokat és manuális mérőpontokat üzemeltetnek. Automata állomásokon NO, NO₂, NO_x, SO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2,5}, VOC, BTEX (benzol, toluol, etil-benzol, xilol) koncentrációkat mérnek. Az automata állomásokat fix helyeken telepítették, percenként mérik, s az adatokat óránként teszik közzé. Ezzel szemben a manuális állomások áthelyezhetők, céljuk a mintavételt követő laboratóriumi analízis. Így ezek hosszabb mérési időtartammal és hosszú adatfeldolgozási periódussal rendelkeznek, negyedévente nyerhetünk belőlük adatokat. A manuális mérőpontokon mért komponensek: NO₂, SO₂, ülepedő por, PM_{2,5}, PM₁₀ és ebből nehézfémek (As, Cd, Ni, Pb), PaH (policiklusos aromás szénhidrogén) vegyületek, valamint kiülepedési vizsgálatokat is végeznek [5 - legszennyezettség.met.hu - GYIK].

A hivatalos mérőállomások az EU szabványoknak megfelelően üzemelnek, az eszközök nemzetközi etalonokhoz kalibráltak. Egy-egy ilyen állomás telepítése és üzemeltetése igen költséges. Rendelet szabályozza, hogy adott népességű légszennyezési zónában hány mérőállomásnak kell üzemelnie, ezt az OLM teljesíti [5 - legszennyezettség.met.hu - GYIK]. Ennek következménye, hogy városokban sűrűbben helyezkednek el állomások, míg gyéren lakott területeken az állomások nagyobb távolságra találhatók egymástól. A lefedettségben lévő eltérések kiegészítésére más mérési adatokat és modellezést használnak.

Ez a helyzet felveti a kérdést, hogy léteznek-e olyan mérési eszközök, amelyek költsége és kezelhetősége lehetővé teszi egy térben sűrűbb mintavételezésű mérési adatsor létrehozását. Ebben lehet szerepük a low-cost szenzoroknak, melyeket lakossági célra, leginkább a beltéri levegőminőség mérésére használnak. Ebben a tanulmányban ilyen szenzorokat vizsgáltunk, figyelve a megbízhatóságukat, beleértve a reakcióidőt, a mért értékek elfogadhatóságát, illetve az eszközök felhasználóbarát jellegét.

A munka során használt műszerek:

- IQAir AirVisual Pro [6 - AirVisual - termék]
- AtmoTube Pro [7 - AtmoTube - termék]
- Smartmi PM2.5 Air Monitor (Xiaomi) [8 - Xiaomi]
- VINDSTYRKA (IKEA) [9 - IKEA - termék]

- 6 in 1 Air Quality Monitor (AliExpress) [10 - AliExpress]

A szenzorok által mért komponenseket és a műszerek közelítőleges árát az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat - Szenzorok ára, általuk mért komponensek

	AirVisual	AtmoTube	Xiaomi	IKEA	AliExpress
Ár (Ft)	120 000	70 000	30 000	15 000	5-15 000
PM_{2,5}	X	X	X	X	X
PM₁₀		X			X
PM₁		X			
CO₂	X				X
CO					X
VOC		X		X	X
HCHO					X
Nyomás		X			
Páratartalom	X	X		X	
Hőmérséklet	X	X		X	

Az AirVisual Pro készülék optikai módon méri a PM_{2,5} koncentrációt, mérési tartománya 1–1000 µg/m³, 10%-os pontossággal. CO₂ koncentrációt NDIR (non-dispersive infrared) technológiával mér, 400–10 000 ppm tartományban, 3%-os hibával [11 - AirVisual - Technical specification]. A készülék ismeretlen időközönként és módszerrel kalibrálja magát a mért értékek alapján, a 400 ppm szint áthelyezésével. Beállítható, hogy a mérés milyen időközönként történjen; folyamatos funkcióban 10 mp-enként, egyébként pedig 3 percenként, vagy annál ritkábban tárol adatokat. Az eszköz a mért értékek alapján AQI (Air Quality

Index) indexben jelzi, hogy a levegőminőség milyen hatással van az egészségre. AQI indexből választható az amerikai vagy a kínai index, az amerikai index szigorúbb, kisebb koncentrációknál figyelmeztet. Az eszköz egy évnnyi adatot képes tárolni, amely WiFi hozzáféréssel kinyerhető. A készülék négy gomb segítségével működik, így a jelszó megadása kellemetlen folyamat. A szenzorral kapcsolatban felmerülő problémák megoldásához hasznos segítség az IQAir hivatalos oldala, itt lehet tájékozódni az adatok kinyeréséről, s az esetleges hibakódokról, pl. a szenzor takarításáról [6 - AirVisual].

A munka során két AirVisual készüléket használtunk, amelyeket ebben a tanulmányban 1-es és 2-es számúként jelölök. A többi szenzorból egy-egy darab állt rendelkezésre.

Az AtmoTube készülék kültéren is használható, GPS koordináták tárolására is képes [7 - AtmoTube - termék]. Ehhez azonban az applikáció segítségével folyamatos Bluetooth kapcsolatban kell állnia egy telefonnal, amely készülék helyadatait fogja eltárolni. Az applikációban visszakövethetjük a közelmúlt mérési adatait; grafikonok és térképes megjelenítés segítségével. Az adatok könnyedén letölthetők, a készülék hivatalosan 10 napnyi adatot tárol. A PM értékeket optikai módon méri [12 - AtmoTube - Product conformity certificate].

A másik három készülék nem tárol adatokat, csak a kijelzőn megjelenő értékek alapján tájékozódhatunk. Az IKEA készüléken kívül mindegyik rendelkezik akkumulátorral.

A Xiaomi szenzor optikai módon méri a $PM_{2,5}$ koncentrációt, az érték egészségre gyakorolt hatása alapján három szintet különböztet meg, melyeket három színnel (zöld, narancssárga, piros) jelöl [8 - Xiaomi].

Az IKEA készülék szintén zöld-sárga-piros jelzéssel folytonos skálán jelzi a levegőminőség szintjét. A készülék mutat $PM_{2,5}$ értéket, és a VOC változását egy nyíl segítségével; a koncentráció nő, nem változik, vagy csökken [13 - IKEA - leírás].

Az AliExpress készülék termék tájékoztatója szerint infrared, lézeres és elektrokémiai szenzorral is rendelkezik, négy különböző színnel jelzi a levegőminőség szintjét [10 - AliExpress]. Azonban azt tapasztaltuk, hogy a készülék $PM_{2,5}$ értéke csak 20–30 $\mu g/m^3$ közötti értékeket mutat, a CO_2 érték idővel beáll 400 ppm-re, vagy esetenként kiakad, s 5000 ppm-et mutatva riaszt.

3.2. Mérési környezetek

Fixponti méréseket végeztünk két beltéri helyszínen, és mobil mérésekkel vizsgáltunk tömegközlekedési eszközöket, s többször bejárt területeket.

Az 1-es számú helyszín Budapest XII. kerületében található 66 m²-es, első emeleti lakás. (Két hálószoba, egy légtérben konyha, étkező, nappali; külön WC és fürdőszoba.) A belmagasság 265 cm (azaz a teljes légtér 175 m³), míg a szoba, melyben az AirVisual készüléket helyeztük el a hosszabb mérési sor során, 14 m²-es. Az 1-es számú helyszínen végeztük a műszerek összemérését is (stressz-teszt), ekkor a szenzorokat a konyhában, az étkezőasztalon helyeztük el. A társasház a budai hegyvidék oldalában fekszik, és tartozik hozzá udvar. A lakást két nemdohányzó felnőtt lakja.

A 2-es számú helyszín Budapest XVII. kerületében található kétszintes kertés ház. (Öt hálószoba, két fürdőszoba, három WC, és egy dolgozószoba leválasztható, a többi helyiség (konyha, étkező, nappali, lépcsőház, emeleti folyosó) egymásba nyitott.) A két szint közös légterű, teljes méretben 540 m³. Az AirVisual szenzort az étkező asztalon helyeztük el, zárva tartott ajtók mellett 220 m³-es légtérben. A ház a kerület szélén helyezkedik el, közelében természetvédelmi terület (Cinkotai kiserdő, Naplás-tó) és sok másik zöldterület is megtalálható. Azonban a környéken előfordul, hogy a háztartási fűtéshez szemetet, (lakkozott) fát égetnek. A mérési időszak alatt 4–8 nemdohányzó 14 éven felüli és 0–2 3 év alatti személy tartózkodott az épületben.

Ennek a helyszínnek a közelében, Rákosligen rendszeres mobil méréseket is végeztem, táskára erősített AtmoTube készülékkel. Egyfelől hétköznapi reggelente, ugyanabban az órában, megegyező útvonalon. Ez az útvonal kertés házak között vezet, kétszer keresztez forgalmasabb utat. A séta végpontja az alacsonyabb tengerszint feletti magassággal rendelkező vasútállomás. A vasút környékén (a séta útvonalával ellenkező oldalon) gyakoribbak a régebbi, rosszabb állapotú épületek, némely ház kéményéből fűtési szezonban rendszeresen látható sötét, szürke színű füst. Másfelől a környéket délutánonként tömegközlekedési eszközökkel és részben gyalog is bejártam, és előfordultak esti órákban is mérések.

A tömegközlekedési eszközökön végzett mérések két csoportra bonthatók. Egyfelől a 2-es helyszín és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi kampusza között történt ingázás. Itt több héten keresztül, október és november során végeztem rendszeres méréseket, hasonló időpontokban, AtmoTube készülék segítségével. Másrészt egy augusztusi napon Budapest belvárosában, a különböző tömegközlekedési eszközöket próbáltuk összehasonlítani. Ebben segítségünkre volt egy AirVisual készülék (az 1-es számúként jelölt szenzor), az AtmoTube szenzor és jelen volt még az adatokat nem tároló Xiaomi készülék is. Ennek eseményekhez kötődő csúcserőit dokumentáltuk.

3.3. Adatfeldolgozás

Az IKEA, a Xiaomi és az AliExpress szenzorok nem tárolnak adatokat, ezeknek értékeit percenkénti, a képernyőkről készült fényképek alapján dolgoztuk fel. Az AirVisual és az AtmoTube készülékek adatai letölthetők. Az AtmoTube eszköz percenkénti értékeket tárol el, ezeket ebben a formájukban használtuk a munkánk során. Az AirVisual készülék 10 másodperces vagy 3 perces adataiból perces vagy órás átlagokat készítettünk. Ezt táblázatszerkesztő (LibreOffice Calc) segítségével oldottam meg. Az ábrákat R programnyelvben készítettem. Némelyik ábrán képszerkesztő programok (Inkscape, Gimp) segítségével történtek módosítások.

Térképrajzoláshoz a QGIS térképszerkesztő programot használtam, az alkalmazott alaptérkép az OpenStreetMap volt.

4. Eredmények

4.1. Stressz-teszt

2024. július 31-én az 1-es számú helyszínen az összes szenzorral végeztünk párhuzamos méréseket, összehasonlítva az általuk mutatott eredményeket. A készülékeket háztartásokban előforduló szennyezéseknek tettük ki (2. táblázat).

2. táblázat - A low-cost szenzorokat a stressz-teszt során ért események és időpontjaik

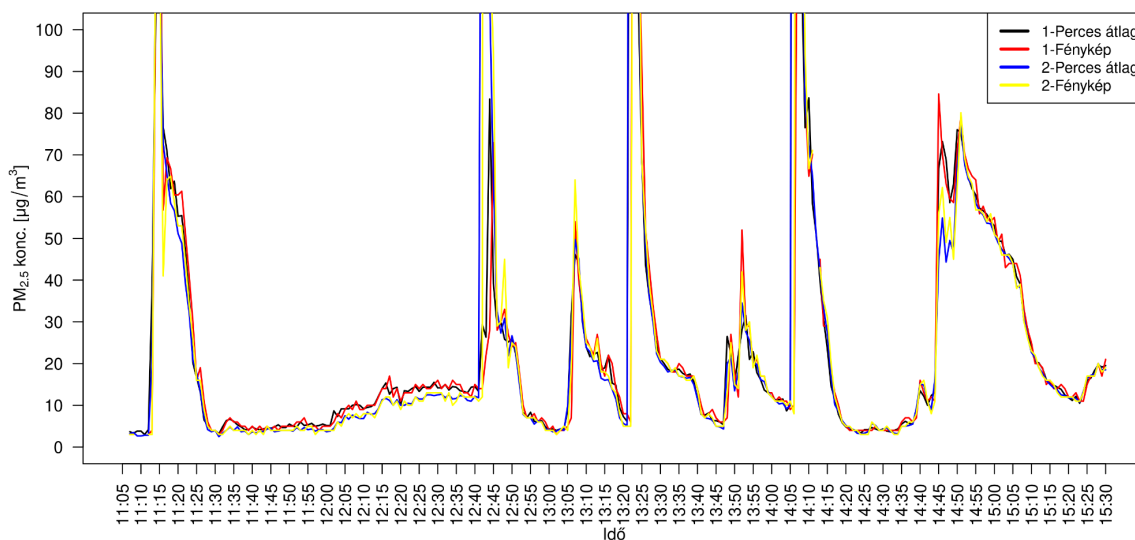
Időpont	Esemény	Időpont	Esemény
T ₀	Szellőztetett állapot	T ₁₃	6 db teamécses elfűjása
T ₁	3 db csillagszóró meggyújtása	T ₁₄	Ablak nyitása
T ₂	Ablak nyitása	T ₁₅	Ablak bezárása
T ₃	Ablak bezárása	T ₁₆	Plüss és ágytakaró porolása
T ₄	Első illatgyertya gyújtása	T ₁₇	HEPA szűrős porszívó beindítása
T ₅	Második illatgyertya gyújtása	T ₁₈	Dezodor fűjás
T ₆	Egyik illatgyertya kialszik	T ₁₉	Ablak nyitása
T ₇	Második illatgyertya elfűjása	T ₂₀	Ablak bezárása
T ₈	Ablak nyitása	T ₂₁	Palacsintasütés kezdete
T ₉	Ablak bezárása	T ₂₂	Palacsintasütés vége, kenyérmorzsa elégetése
T ₁₀	6 db teamécses meggyújtása	T ₂₃	Légkondicionáló bekapcsolása
T ₁₁	Ablak nyitása	T ₂₄	Légszűrő beindítása - turbo üzemmód
T ₁₂	Ablak bezárása	T ₂₅	Légszűrő automata üzemmód

Mivel nem minden szenzor tárol el adatokat és eltérő időközönként jelenítenek meg új értékeket, így percenkénti fényképek segítségével vettük fel az adatokat. Azonban ez magában hordozta annak lehetőségét, hogy olyan értékeket veszünk figyelembe, melyek nem reprezentatívak. Egy ilyen lehetséges eset, hogy a készülék a szennyezésre reagálva hirtelen kiugró értéket mutat, azonban hamarosan visszaáll egy átlagosabb értékre. Ennek ellenőrzésére az AirVisual készülékek által tárolt 10 másodperces adatsorból készült perces átlagokat (ebben az esetben pl. a 12:07-hez tartozó érték a 12:07 – 12:08 közötti értékek

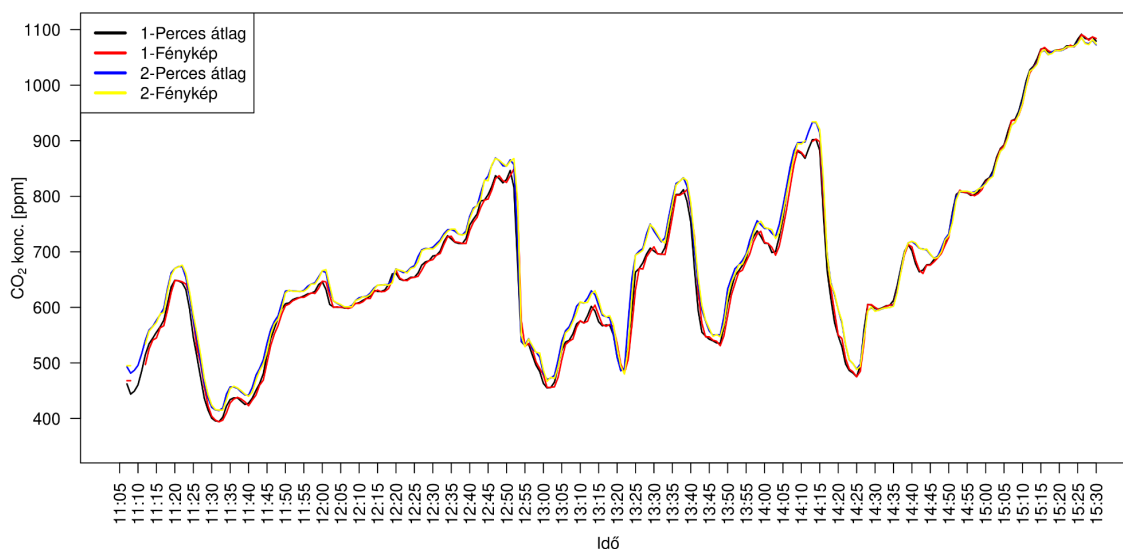
átlaga, hogy a képeken lévő értékek ebbe a tartományba essenek) összehasonlítottuk a fényképekről kinyert információkkal.

A $PM_{2,5}$ esetében a perces átlagok és a képek között jelentős eltérést csak a kiugróan magas értékeknél láthatunk, kisebb értékeknél 1–2 $\mu g/m^3$ eltérések fordulnak elő. A kiugró értékek esetén többnyire a fényképekről nyert adatok a magasabbak, azonban mindkét készüléknél előfordul olyan is, hogy a perces átlag a magasabb adat (1. ábra). A CO_2 koncentráció esetében a perces átlagok és a fényképek között alig tapasztalható eltérés. Azonban az elmondható, hogy a képekről nyert adatok az értékek trendjét elfogadhatóan leírják (2. ábra).

(Az ábrákon a számok (pl. 1-Perces átlag) az alkalmazott AirVisual készüléknek felelnek meg.)



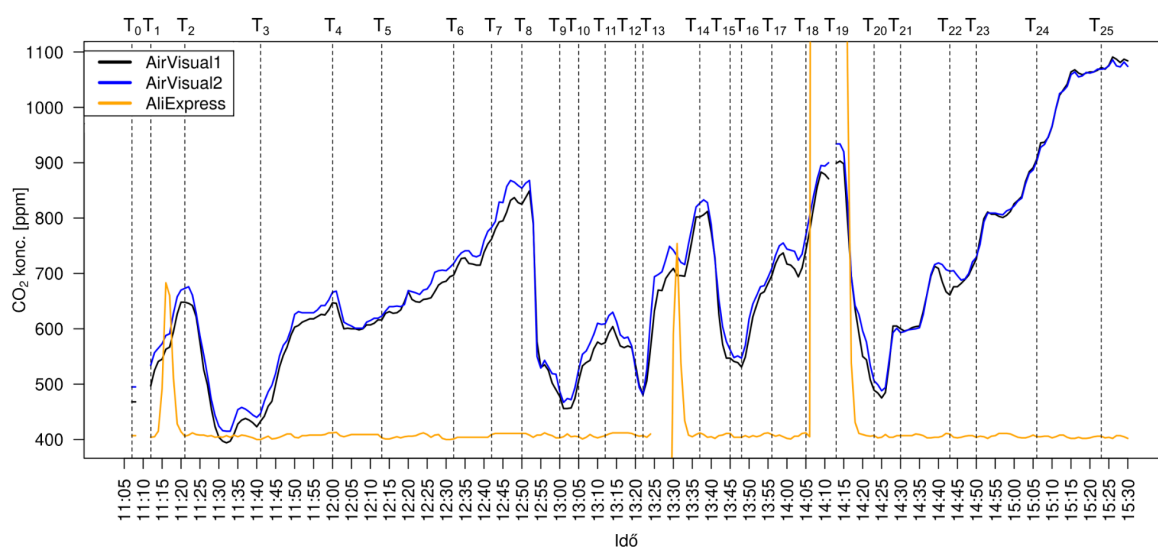
1. ábra - Perces átlagok és fényképi értékek összehasonlítása $PM_{2,5}$ koncentrációk esetén



2. ábra - Perces átlagok és fényképi értékek összehasonlítása CO_2 koncentrációk esetén

A szén-dioxid menetében a 3. ábrán láthatjuk, hogy szellőztetéskor az értékek visszaesnek, megközelítik a légköri szén-dioxid koncentráció értékét (kb. 420 ppm). Csukott ablakok mellett, a szobában tartózkodó személyek légzésének következtében történő emelkedést láthatjuk. A két AirVisual készülék jól követi egymást, bár látható, hogy a 2-es számú konzisztensen magasabb értékeket mutat. A közöttük lévő eltérés átlagosan 15 ppm, a legnagyobb eltérés pedig perces átlagból 55 ppm, a képek alapján 65 ppm.

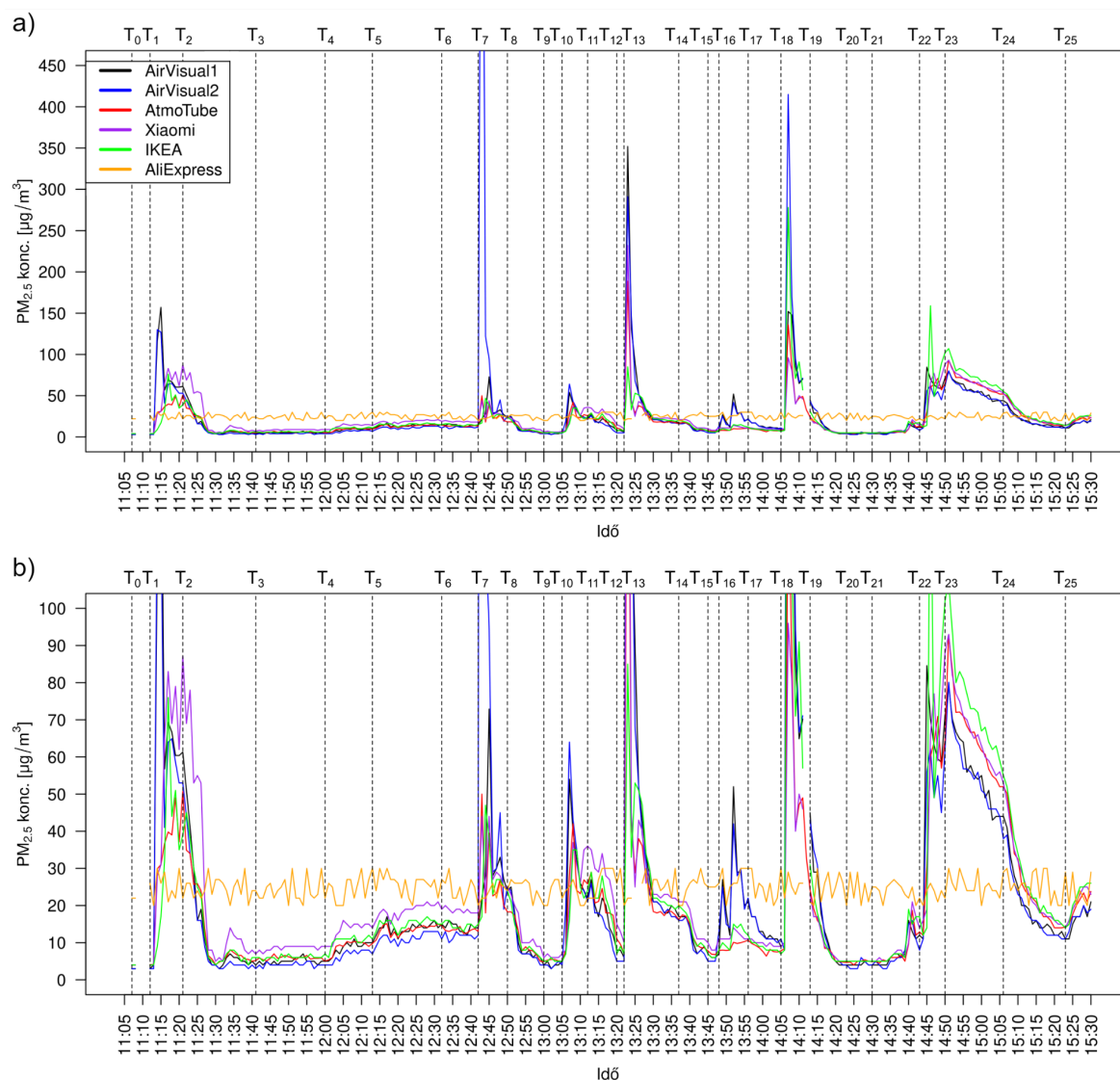
Az AliExpress-ről származó készülék semmilyen menetet nem mutat. A három kiugró értékből kettő valószínűleg a bekapcsoláshoz köthető (a szenzor a mérősor közepén kikapcsolt, újra kellett indítani), ilyenkor a készülék először magas értékeket mutat, majd lassan visszaáll a 400 ppm környékére. A harmadik csúcs esetén az eszköz 5000 ppm értéket mutatott, és elkezdett riasztani. Ehhez az eredményhez a kapcsolódó esemény (T_{18}) dezodor fűjás volt. A szenzor mutat formaldehid (HCHO) és illékony szerves vegyület (VOC) koncentrációt is. Megfigyeltük, hogy ezek az értékek a dezodor fűjást megelőzően 0,01 körül mozogtak, míg az eseményt követően a készülék 1,999-et mutatott. A szén-dioxid koncentráció értékben történő ugrás ezen értékek megemelkedésével párhuzamosan történt. Így arra a következtetésre jutottunk, hogy az eszközben létezik valamiféle illékony szerves anyag koncentrációt mérő szenzor, aminek értékeire reagálva változtatja a készülék a szén-dioxid értékeit.



3. ábra - A stressz-teszt során mért CO₂ koncentrációk (a kijelzőkről percenként készített fényképek alapján)

A PM_{2,5} változásában (4. ábra) már nyomon követhetők a szennyező tevékenységek következményei. Általánosságban elmondható, hogy az AliExpress-es készüléket leszámítva egyszerre (pár perces csúszásokkal) mozogtak a koncentrációk, a jelentős eltérések a

csúcsokhoz köthetők. Egyértelműen az AirVisual készülékek mutatnak nagyon magas, a többihez képest két-háromszoros értékeket, a két készülék közül a 2-es számú produkálta a legmagasabb kiugró értéket (T_7 esemény - második illatgyertya elfűjása, $1060 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Az AliExpress-es eszköz a teljes mérési időtartam alatt 20 és $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ határok között mozog, így ezen készülék adatait a továbbiakban figyelmen kívül hagyjuk.



4. ábra - A stressz-teszt során mért PM_{2.5} koncentrációk (a kijelzőkről percenként készített fényképek alapján).

a) Koncentrációk $0-450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ értékek között. b) Az a) ábrának kinagyított változata, $0-100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentrációk között

A mérések alapján elmondható, hogy a legnagyobb koncentrációkat a füsttel járó események: csillagszórók égése, gyufa gyújtása, gyertyák elfűjása okozta (T_1 , T_7 , T_{10} , T_{13} , T_{22}). Azonban az érdekes tapasztalat volt, hogy a gyertyák égése közben a koncentráció csak kicsit emelkedett meg a szellőztetett állapothoz képest, és az illatgyertya kialvása (T_6) nem

okozott megfigyelhető változást. Emellett magas $PM_{2,5}$ értékeket láthatunk a dezodor fűzésakor is (T_{18}).

A palacsintasütés (T_{21}) nem adta a várt eredményt. Ezen alkalommal villanytűzhelyt alkalmaztunk, és kevés, (10 darab), világosra sült palacsinta készült. Ezen eredménnyel teljesen ellentétes értékeket tapasztaltam egy másik mérés során. November 1-én a 2-es helyszínen gáztűzhely használatával, körülbelül 2 órán keresztül történt palacsintasütés, egyszerre három égőt alkalmazva. Ezen alkalommal csak az AtmoTube készülék volt elérhető, ennek adatait használtam.

A sütés kezdete után kb. fél órával a $PM_{2,5}$ koncentrációja $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$ érték körül mozgott. Miközben a palacsintasütés folytatódott, kb. 20 perces szellőztetést tartottunk. Nyitott ablakok mellett $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -es értékre csökkent le a koncentráció. Majd a szellőztetés befejezése után még egy óráig készültek a palacsinták, amikor a maximális $PM_{2,5}$ érték $236 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -et ért el.

Így látható, hogy az egyes hatásoknál mennyit számít a kibocsátás időtartama, és a főzés esetén az alkalmazott tűzhely is.

A magas koncentrációk csökkentésére a legjobb megoldás a szellőztetés volt, mellette a légtisztító és a HEPA szűrős porszívó is hatékonyan tisztította a levegőt. (HEPA (*High Efficiency Particulate Arrestance*) avagy magas hatékonyságú részecske szűrés, a $0,3 \mu\text{m}$ -nél nagyobb szemcsék 99,97%-át (amerikai szabvány), vagy több mint 85%-át (EU szabvány - hatékonysághoz kapcsolódóan különböző osztályok) távolítja el. [14 - HEPA szabvány])

Összességében elmondható, hogy a legnagyobb kiugrásokon kívül, mely csúcsokat az AirVisual készülékek produkáltak, a legmagasabb általános koncentrációt a Xiaomi eszköz adta. Az AirVisual szenzorok a csúcsokon kívüli időszakokban a többi low-cost szenzor alatti értékeket mutattak.

4.2. Több hetes beltéri mérés

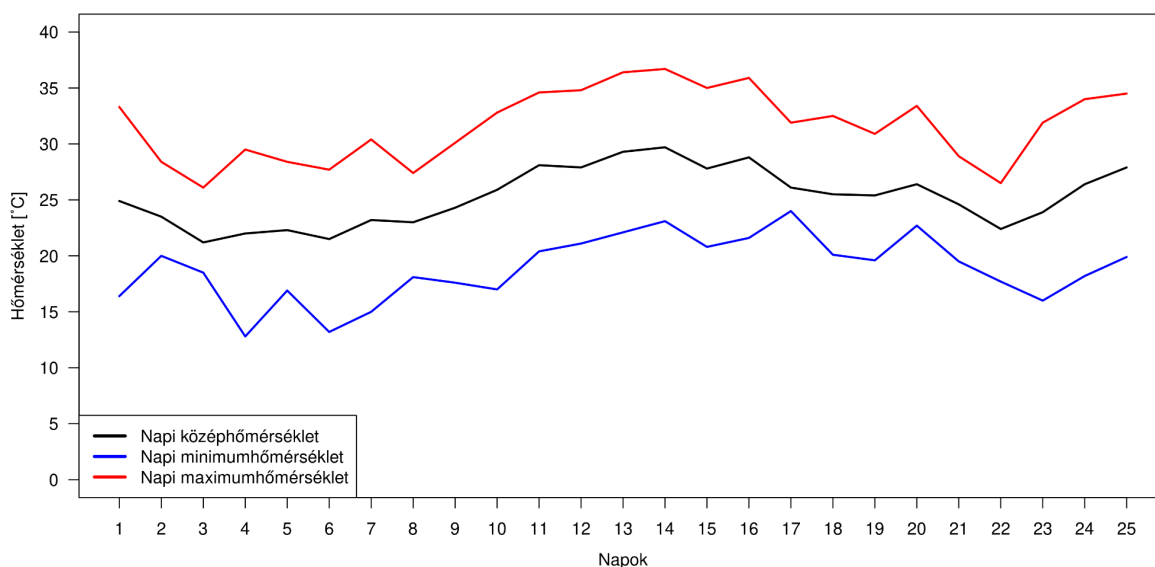
Augusztus hónap alatt a két beltéri helyszínen folyamatos méréseket próbáltunk végezni az AirVisual készülékekkel. Az 1-es helyszínen az 1-esnek nevezett szenzorral, míg a 2-es helyszínen a 2-es eszközzel.

Az időtartam alatt előfordultak adatahiánnyal rendelkező napok. Az 1-es helyszínen összesen 12 napon teljes az adatsor, míg a 2-es számú helyen 17 ilyen nap van. (A méréseket az 1-es helyen augusztus 1–17, a 2-es helyen augusztus 1–25 között végeztük.)

Az időszak alatt az 1-es helyszínen a hőmérséklet 23–27 °C, a relatív páratartalom 42 és 72% között mozgott. A 2-es helyszínen a hőmérséklet 18–26 °C között, a relatív páratartalom 53–85% között változott.

A mért eredményeket órás átlagokként dolgoztuk fel. (Oly módon, hogy például a 14 órához tartozó érték a délután egy és kettő között mért adatokat foglalja magába.) Az AirVisual eszközöket alapvetően 3 perces mérésre állítottuk be (ez a lehető legkisebb intervallum, ha nem *Continuous* (-folyamatos) mérésre van állítva a műszer, mert akkor 10 másodpercenként tárol adatokat). Azonban mikor a szenzor képernyője bekapcsolt állapotba kerül, a készülék a lassabb mintavételezési beállítás esetén is sűrűbben kezd el mérni, és ilyenkor 10 másodpercenként tárol adatokat. Ebből következik, hogy az ilyenkor mért értékek nagyobb súllyal fognak megjelenni, hiszen míg általában egy adat tartozik 3 perchez, ebben az esetben sokkal több. Ez azonban vélhetően csak akkor okozna nagy eltérést, ha a sűrűbb mintavételezés során, nagyon kiugró értékek fordulnának elő.

A méréseket augusztusban, nyári hőségben végeztük. Budapesten a napi középhőmérsékletek 20 és 30 °C között mozogtak. A napi maximum hőmérséklet többnyire 30°C feletti volt. (Az időszak alatti hőmérsékleti viszonyokat a Budapest, Pestszentlőrinc állomás adatai alapján ismertetjük (Forrás: HungaroMet Nonprofit Zrt.) (5. ábra).



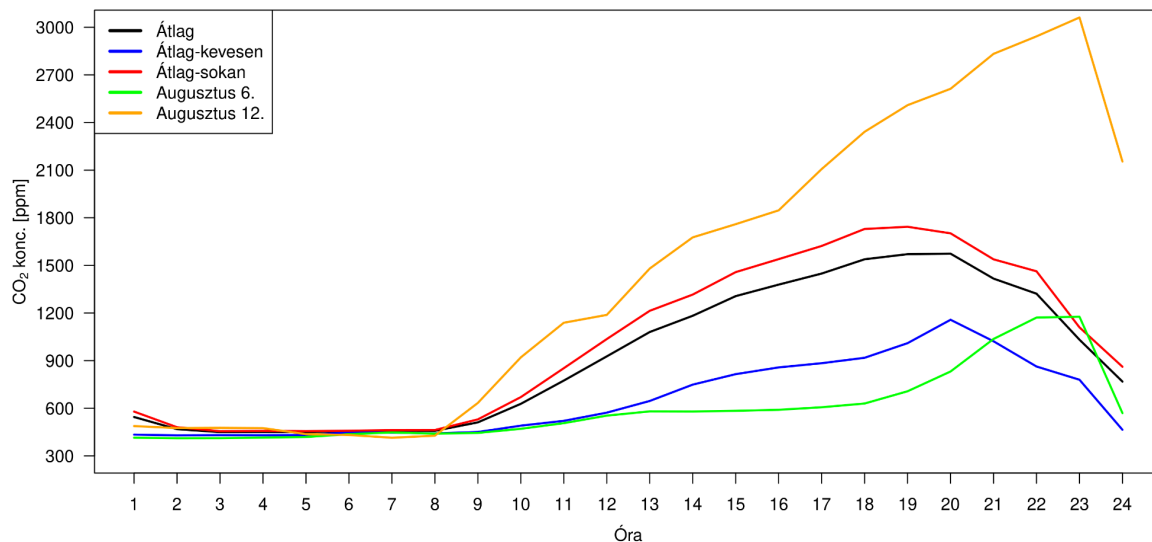
4. ábra - 2024. augusztus 1. és 25. között a hőmérséklet alakulása Budapest - Pestszentlőrinc állomáson (Adatok forrása: HungaroMet Nonprofit Zrt.)

A hőségből adódóan a lakások szellőztetése viszonylag limitáltan volt kivitelezhető. A 2-es számú helyszínen nappal egyáltalán nem zajlott szellőztetés, helyette viszont egész éjszaka (amikor a kinti hőmérséklet alacsonyabb volt, mint a benti) nyitva volt az ablak. Az 1-es

helyszínen éjjel-nappal bukóra nyitva volt egy ablak, mellette a késő esti órákban volt pár perces szellőztetés abban a bezárt ajtajú szobában, melyben egy ember aludt és ahol a készülék is volt. Ezen a helyszínen is előfordult olyan, hogy az ablak egész éjszakára nyitva volt, akkor, ha elegendően alacsony volt a kinti hőmérséklet.

Ezáltal az eltérő helyszínek mérési körülményeiben három különbséget találhatunk. Az egyik az előbb említett szellőztetési módszer, a másik a helyszínek különbözősége; az 1-es kisebb légterű, mint a 2-es. A harmadik eltérés a lakásban tartózkodók számából adódik. Az 1-es helyszínen legfeljebb ketten tartózkodtak, míg a 2-es számú helyen előfordult, hogy tíz fő is jelen volt, az általános legkisebb létszám négy fő volt. A mérés első szakaszában kevesebben, maximum öten tartózkodtak ebben a lakásban, míg a második szakaszban többen, éjszakánként legalább heten.

Ezen különbözőségek legjobban a szén-dioxid szint alakulását befolyásolják. Ennek vizsgálatára napi meneteket alkalmazunk. Az ábrákon (6. és 7. ábra) látható az átlagos napi menet, az adathiány mentes napok órás átlagaiból számítva. Szerepel még a legkisebb és a legnagyobb napi maximummal rendelkező napok napi menete (ezek természetesen az adathiányos napok kizárásával készültek). A 2-es helyszín esetében még két görbét láthatunk. Ezek olyan átlagok, melyek a lakásban tartózkodók száma alapján kerültek kiválasztásra. Az egyik mutatja azt az időszakot, melyben a maximális létszám 5 fő volt (ez augusztus 3 és 6 között valósult meg), míg a másikon láthatjuk azt, ahol akár 10-en is jelen voltak a helyszínen (augusztus 12 és 24 között). Nyilvánvalóan az átlagos napi menet inkább a második időszakhoz tartozó értékhez húzódik közelebb, hiszen több napon fordult elő a nagyobb létszám.



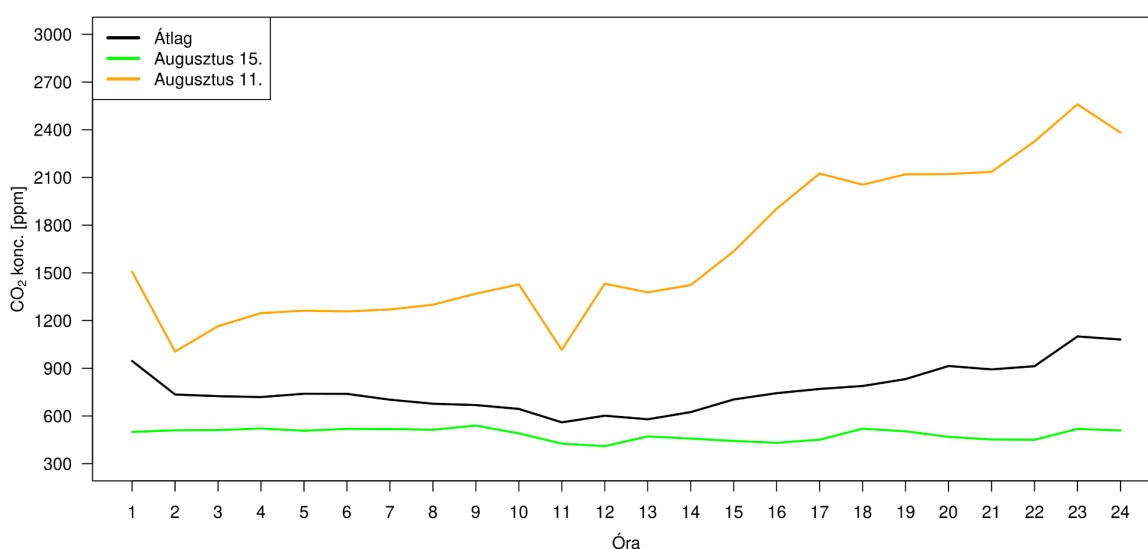
5. ábra - Beltéri CO₂ koncentráció napi meneteinek alakulása a 2-es helyszínen

A 2-es helyszín szén-dioxid koncentráció viszonyai (6. ábra) követik a szellőztetés alakulását. Látható, hogy többnyire este nyolc és éjfél között vette kezdetét a szellőztetés, míg reggel hét és nyolc között lettek becsukva az ablakok. A két időpont között az éjszakai szakaszban látható, hogy a mért értékek visszaestek a légköri szén-dioxid koncentráció értékére, az órás átlagok 400–500 ppm között alakultak. Nappal pedig a koncentráció emelkedése figyelhető meg. Az átlagos napi maximum érték 1573 ppm, ami este nyolc órához tartozik. A legnagyobb koncentrációt augusztus 12-én mértük, ennek órás átlaga 3061 ppm 22-23 óra között. Augusztus 12-e egy olyan nap, melyen sokan tartózkodtak a lakásban. A nagyobb létszámhoz tartozó átlag maximum értéke 1743 ppm, mely 19 órához tartozik. A legkisebb napi maximumot, 1176 ppm-et augusztus 3-án mértük, 22 és 23 óra közötti átlagként. Augusztus 6-án kevesen voltak a lakásban, a kis létszámhoz tartozó átlagos napi menet maximuma 1157 ppm, ami este 8 órához tartozik.

Érdekes tapasztalat, hogy a legnagyobb és a legkisebb napi maximum érték is este 10 és 11 közötti időponthoz tartozik, bár az átlagok maximuma este hat és nyolc közé esik. Ez azzal az előnnyel jár, hogy augusztus 6-át és 12-ét össze lehet hasonlítani csak a helyszínen tartózkodók száma alapján, hiszen a szellőztetés nagyjából ugyanakkor kezdődött ezeken a napokon. Hatodikán napközben három személy volt a lakásban, majd hat és hét óra között újabb ember érkezett. Ezt nyomon követhetjük a koncentráció alakulásában is, napközben az emelkedés mértéke kicsi (a skálának köszönhetően szinte egyenesnek látszik), míg koraeste megnő az emelkedés mértéke. Tizenkettedikén napközben nyolc, estére kilenc személy volt a lakásban, a koncentráció emelkedése szinte lineáris.

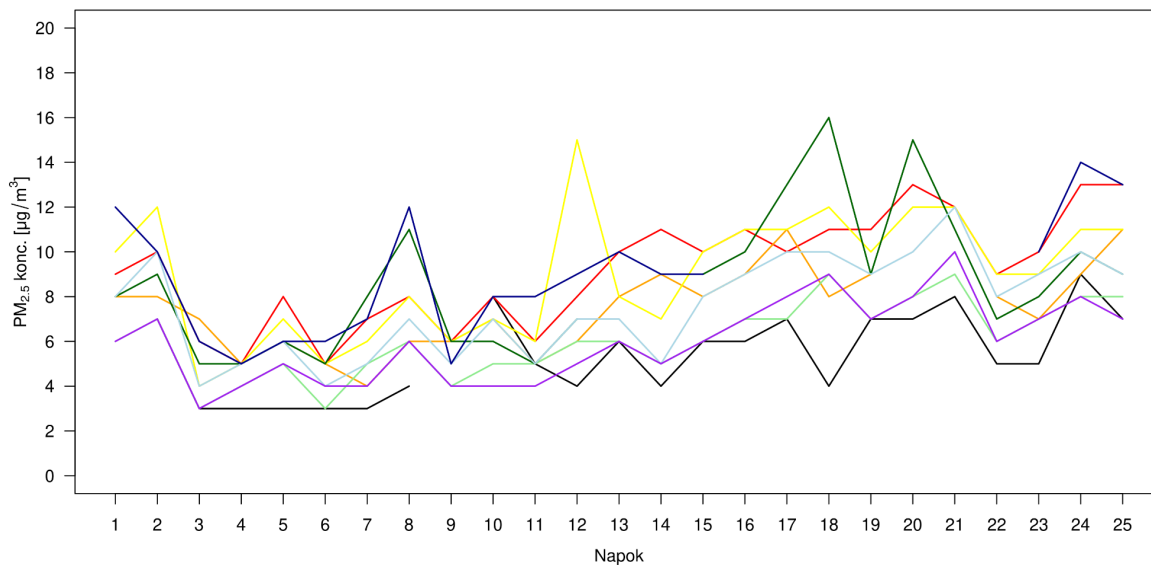
Az 1-es helyszínen kevesebb tendencia figyelhető meg (7. ábra). Estére a szén-dioxid koncentráció kismértékű növekedése látható, és észrevehető egy csökkenés a délelőtti órákban is. Az időponthoz nem kötődik szellőztetési esemény, valószínű, hogy az ébredés eredménye; az elzárt szoba levegője az ajtó nyitásával keveredni kezdett a lakás levegőjével.

Az óras átlagokból származtatott napi menet maximuma 1100 ppm, 22 és 23 között. A legmagasabb napi maximumot augusztus 11-én mértük, értéke 2560 ppm, ugyanazon időpontban, este 10 és 11 között. Ezen a napon a minimum érték 1005 ppm volt, éjjel 1 és 2 között. A legkisebb napi maximum augusztus 15-én volt, ez a koncentráció 539 ppm, reggel 8 és 9 között. Ezen a napon nem látunk jelentős változást, a napi minimum 410 ppm volt.



6. ábra - Beltéri CO₂ koncentráció napi meneteinek alakulása az 1-es helyszínen

A PM_{2,5} koncentráció alakulásában (9. és 10. ábra) jóval kisebb időbeli változásokat kaptunk. Ennek egyik oka az augusztusi időjárásban keresendő. A Budapesti mérőállomásokat figyelembe véve (Budatétény, Erzsébet tér, Gergely utca, Gilice tér, Honvéd, Kőrakás park, Pesthidegkút, Széna tér, Teleki tér) (a Kosztolányi Dezső téren nincs PM_{2,5} mérés) a napi átlagok 3 és 16 µg/m³ közöttiek voltak (8. ábra). Óras átlagok tekintetében is csak három olyan állomás volt, amelynek mérése meghaladta a 30 µg/m³ értéket. Ezek a következők; Gilice tér - időszakra vonatkozó maximum 61 µg/m³, azonban ezt az értéket adathiány követte, ami után még két érték (36 és 35) haladta meg ezt a 30-as határt. Kőrakás park - 140 µg/m³, amit a következő órában még egy magas érték (68 µg/m³) követett, utána újra 30 alatti. A harmadik az Erzsébet tér 98 µg/m³ értékkel. Ez az adat is eléggé kilóg az adatsorból, sem előtte, sem utána nincs magas érték (Forrás: HungaroMet Nonprofit Zrt.).



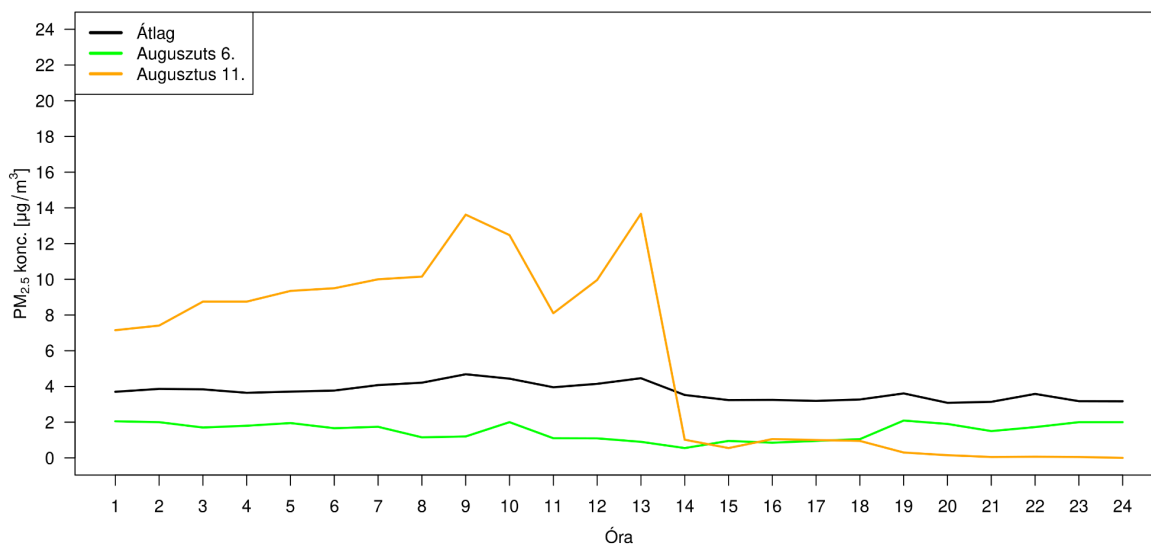
7. ábra - Budapesti állomásokon a $PM_{2.5}$ értékek alakulása augusztus 1. és 25. között
 lila-Budatétény, sötétzöld-Erzsébet tér, világoskék-Gergely utca, fekete-Gilice tér, világoszöld-Honvéd,
 sárga-Körakás park, narancssárga-Pesthidegkút, piros-Széna tér, sötétkék-Teleki tér

A beltéri $PM_{2.5}$ koncentrációt nagyban befolyásolja a kültéri érték. Mint láhattuk, ez augusztus folyamán egész Budapest területén nem volt magas. A beltéri koncentrációt még növelhetik egyéb tényezők (ezek egy részét láthatjuk a stressz-teszt részben). A helyszíneken nem gyakran fordult elő égéssel járó tevékenység, egyetlen kivétel a főzés. Azonban az augusztusi hőség során a főzéssel járó hőtermelést is igyekeztünk elkerülni. A 2-es helyszínen, ahol gáztűzhely található, csak nyitott ablakok mellett volt főzés. Az 1-es helyszínen villanytűzhelyt használtak.

Megnehezíti még az adatok kiértékelését az a tény, hogy mindkét AirVisual készülék esetén előfordult hiba az időszak alatt (az 1-es készülék egy napon, míg a 2-es készülék három különböző napon is). Ekkor az adatsorban egy hibakód (1798.8) jelenik meg. Valószínűleg a készülék ilyenkor nagyobb porszemcsét szív be, ami a szenzor eldugulásával jár. Abban sajnos van különbség, hogy a hibakód előtt és után milyen értékek jelennek meg. Előfordul, hogy csak egy-egy ilyen számsor van, létezik olyan, hogy hosszabb ideig, folyamatosan egymás után ez az érték van az adatsorban, ezt követheti hasznos adat, de teljes adathiány is. (Ilyenkor a műszer képernyőjén a *Sensor cleaning needed* - *Szenzor takarítás szükséges* felirat jelenik meg.) Az 1798.8 érték előtt többnyire hihető adatok jelennek meg, azonban az AirVisual1 készülék hibájakor az előtte lévő 9 percben egyre nagyobb értékek jelentek meg. (Ez igazolja azt a teóriát, hogy ilyenkor nagyobb szemcse kerül a szenzorba.) Az adatok feldolgozása során ezen értékek és a hibasort követő újabb hat perc adatait

kiszűrtük a feldolgozás során. Ha a hibakód előtt a korábbiakhoz hasonló értékek szerepeltek, akkor azokat benne hagytuk az adatsorban.

A szén-dioxid koncentrációhoz hasonlóan az adatokból itt is órás átlagokat készítettünk, ez ugyanazt a hibalehetőséget hordozza magában a nem egyenletes időközönként rögzített adatok miatt. Ezt követően azokat a napokat dolgoztuk fel, ahol minden órára volt értékünk. Ez azt jelentette, hogy az 1-es helyszínen a CO₂ szempontjából feldolgozott napok megegyeztek az itt is alkalmazottakkal. A 2-es helyszínen ez majdnem elmondható, csak augusztus 12-e lóg ki valamennyire a sorból. Ezen a napon már hajnali fél ötkor is volt egy hiba, de ez rövid ideig tartott, az órás átlagot nem befolyásolta. Ellenben a 11:20 és 13:40 közötti hiba azt okozta, hogy 12 órához egyáltalán nem tartozik órás érték, míg a 11 és a 13 órás átlag valójában csak 20 perc adatából származik. Ennek említése fontos, mivel ezen a napon ezen hibák kihagyásával is magasabb értékeket mértünk, mint az időszak többi napján.

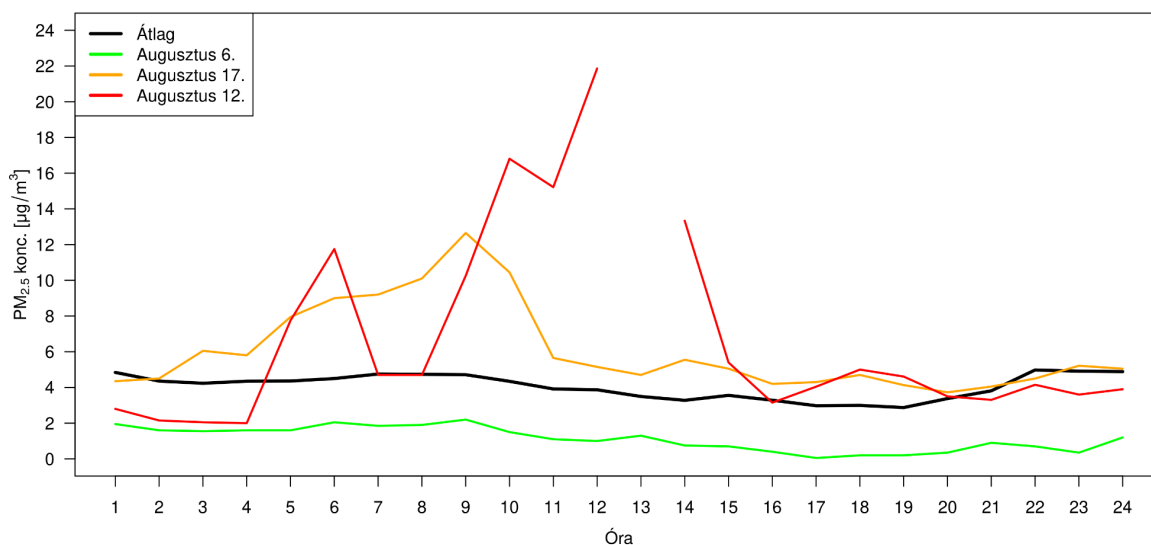


8. ábra - Beltéri PM_{2,5} koncentráció napi meneteinek alakulása az 1-es helyszínen

Az 1-es helyszínen (9. ábra) a napi átlag 4 µg/m³ körül stagnál. A legnagyobb maximummal rendelkező nap augusztus 11-e, a maximum érték 14 µg/m³. A legkisebb maximumot augusztus 6-án mértük, értéke 2 µg/m³.

A 2-es helyszínen (10. ábra) a napi átlag hasonlóan 4–5 µg/m³ között mozog. A legnagyobb maximum értékhez tartozóan két napot is kiemelnék, a korábban említett augusztus 12-i hiba miatt. Ez a nap lett volna az abszolút maximum, még így a kivett adatokkal is ehhez tartozik a legmagasabb érték: 22 µg/m³. Amennyiben ezt a napot nem vesszük figyelembe, a következő legmagasabb koncentrációt augusztus 17-én tapasztaltuk:

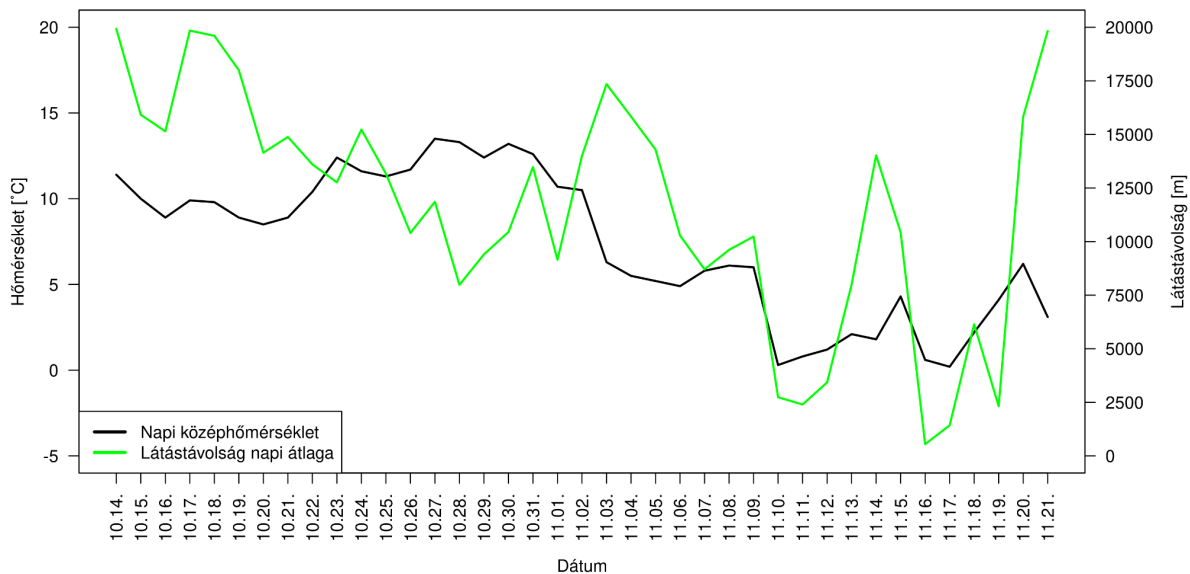
12,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A legalacsonyabb napi maximumot augusztus 6-án értük el, ennek értéke 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



9. ábra - Beltéri $\text{PM}_{2.5}$ koncentráció napi meneteinek alakulása a 2-es helyszínen

4.3. Városi mobil mérések

2024. október 14. és november 21. között AtmoTube készülékkel gyalogos mobil méréseket végeztem Budapest, XVII. kerületében, Rákosliget városrészben. Az időszakot nagyjából elfelezve két részre osztottam, ami egészen jól elkülöníti az eltérő időjárási viszonyokat is. Az első szakaszban (okt. 14. – nov. 3.) melegebb volt az időjárás, míg a második szakasz hidegebb, és gyakran ködös volt. Az időszakhoz tartozó, Budapest, Pestszentlőrinc állomáson mért napi középhőmérsékletet és a látástávolság napi átlagait a HungaroMet Nonprofit Zrt. adatai alapján a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra - Budapest, Pestszentlőrinc állomáson mért napi középhőmérsékletek és a látástávolság napi átlagai október 14. és november 21. között

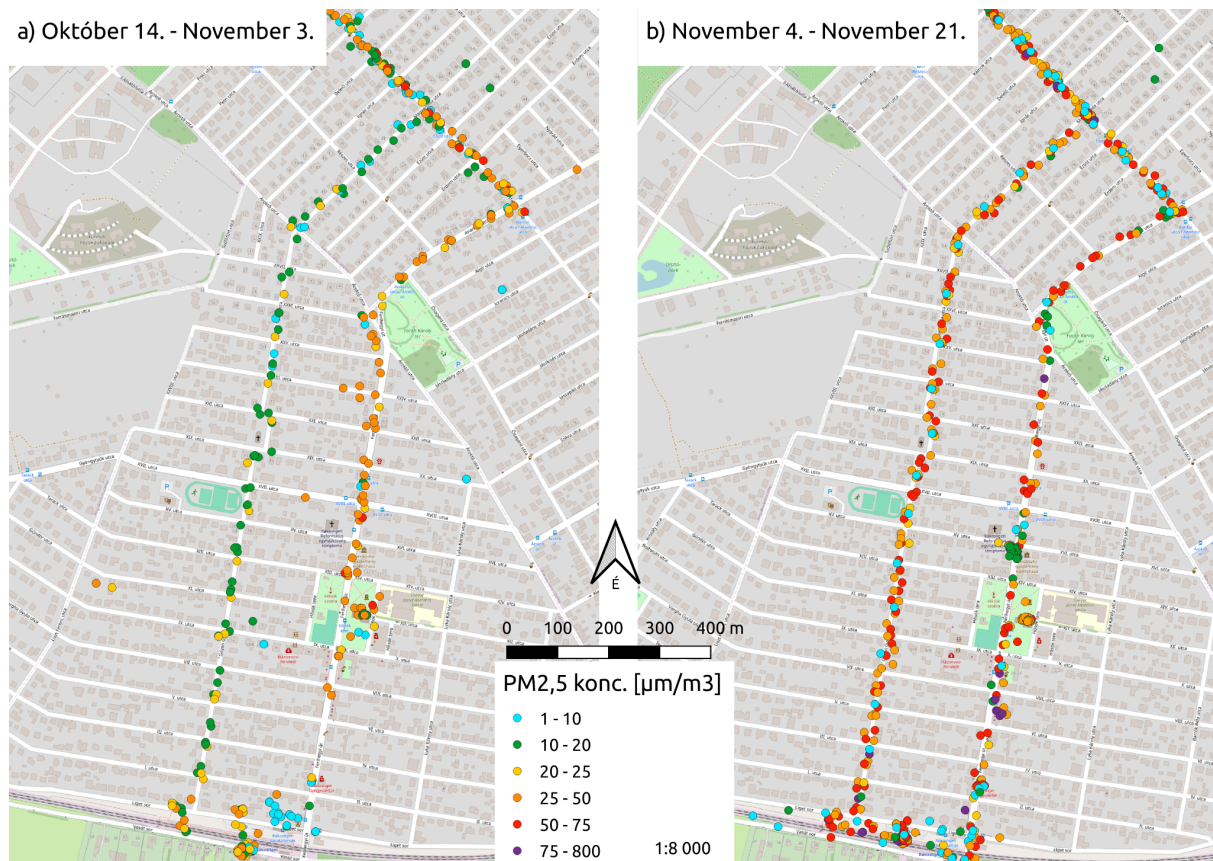
A 12. ábrán térképen megjelenítve láthatjuk a $PM_{2,5}$ koncentráció értékeit a két időszakban. A térkép bal oldalán látható útvonal mentén hétköznapi reggelente sétáltam, míg a jobb oldali útvonalon délután vagy este közlekedtem. A bal oldali útvonal kertes házak mellett vezet, míg a jobb oldali főút mentén. Az ábrák alján a vasútállomás látható, ahol reggel és délután is készültek mérések. Időszakonként minden útvonal mentén több, mint tízszer készültek mérések.

A térképen a pontok a HungaroMet Nonprofit Zrt. által alkalmazott, magyar levegőminőségi indexnek megfelelő színezést követik. (Bár az index órás átlagokra vonatkozik, itt pedig perces értékekre alkalmazom.) Ezt a skálát az egészségügyi hatások alapján határozták meg. $25 \mu g/m^3$ alatt a szennyezettség megfelelő, csak az érzékeny csoportoknak javasolt az intenzív szabadtéri tevékenységek csökkentése tünetek esetén. Ezt követően az értékek eltérő erősségű szennyezett kategóriákba tartoznak, ezek esetén már az általános népességnek is ajánlott mellőzni az intenzív szabadtéri tevékenységeket [15 - legszennyezettseg.met.hu - levegőminőségi index].

A teljes időszakban mért $PM_{2,5}$ koncentráció $1-176 \mu g/m^3$ értékek között mozgott. A legrosszabb értéket a környéken található pékségben mértem. A következő legmagasabb koncentrációt a vasútállomáson tapasztaltam november 19-én, ennek értéke $150,1 \mu g/m^3$.

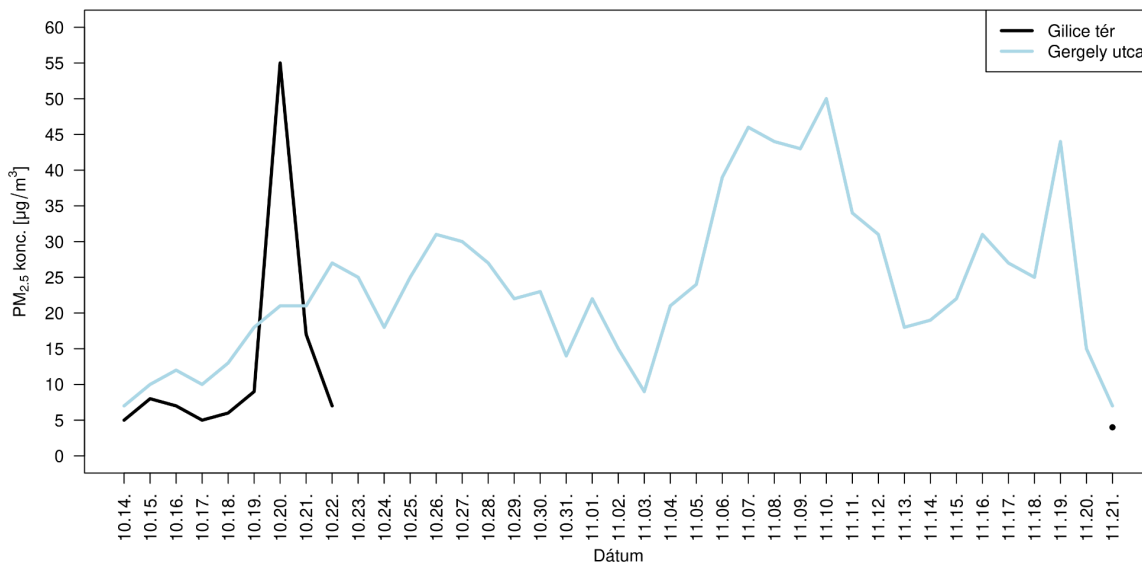
A 12.-es ábra a) részén jól látható a reggeli útvonal mentén, hogy amíg a kertes házak között haladtam, a mért koncentrációk viszonylag alacsonyak voltak, a vasútállomást megközelítve azonban egyre magasabb értékeket tapasztaltam. (Az ábrán a vasútállomás

közelében látható sok kék színű pont egy délutáni mérés eredménye, miközben a buszmegállóban várakoztam. Ekkor kellemes napsütéses idő volt.) Néhány adatpont az útvonaltól eltérő pontokban jelenik meg, ami a GPS pontatlanságából adódik.



12. ábra - a) Október 14. és november 3. között mért PM_{2,5} koncentrációk (Budapest, XVII. kerület, Rákosliget) b) November 4. és november 21. között mért PM_{2,5} koncentrációk (Budapest, XVII. kerület, Rákosliget)

A 12-es ábra b) részén megfigyelhetjük a ködös, anticiklonális időjárás hatását a légszennyezettségre. Látható, hogy az értékek többsége magasabb. Ez összevág a hivatalos állomásokon mért értékekkel. A helyszínhez a legközelebbi állomások a Gilice téri és a Gergely utcai állomás, ezen állomásokon a mért PM_{2,5} koncentrációk napi átlagait a 13. ábra szemlélteti. (Október 23. és november 20. között Gilice tér állomáson a PM_{2,5} esetében adathiány volt.)



13. ábra - Gilice tér és Gergely utca állomásokon mért $PM_{2,5}$ koncentrációk napi átlaga október 14. és november 21. között

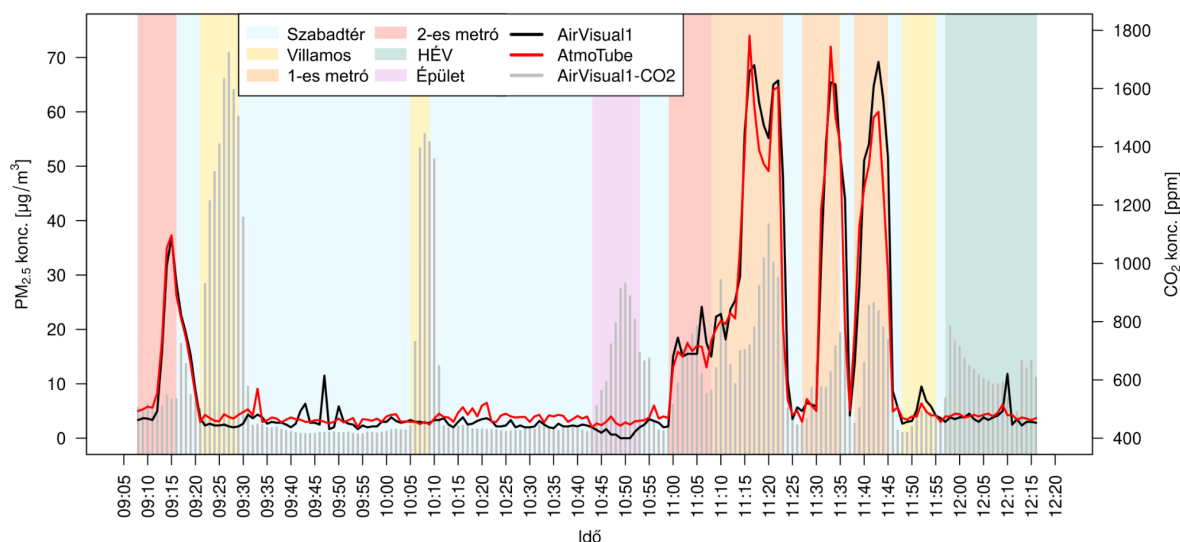
4.4. Tömegközlekedési eszközök levegőminősége

2024. augusztus 7-én Budapesten mozgó mérést végeztünk az AirVisual1 és az AtmoTube készülékekkel. A Xiaomi készüléket is magunkkal vittük, azonban ez a készülék nem rögzít adatokat, ezért ennek csak az adott eseményekhez kötődő maximum értékeit jegyeztük fel. (Az AirVisual és a Xiaomi készülékeket is beltérre tervezték, így igyekeztünk figyelni rá, hogy a készülékeket megóvjuk az erős napsugárzástól.) A mérés során több tömegközlekedési eszközön (1-es metró, 2-es metró, villamos (4-es 6-os és 23-as), HÉV), épületben (Mammut bevásárlóközpont) és szabadtéren (Margit-híd, Margit-sziget, Széna-tér) végeztünk vizsgálatokat $PM_{2,5}$, CO_2 és VOC komponensekre.

A $PM_{2,5}$ változásában nagyobb értékeket a metrók használatakor tapasztaltunk. A 2-es metró esetében az állomásokon voltak a nagyobb koncentrációk, míg az 1-es metrónál egy kicsivel inkább az alagútban voltak magasabbak az értékek, mint az állomásokon. Ez a különbség abból adódik, hogy amíg a 2-es metró szerelvényei zártak és a metró mélyen a földfelszín alatt közlekedik, addig az 1-es metró kocsijain az ablakok folyamatosan nyitva vannak, az állomások pedig közel vannak a felszínhez. Az 1-es metróon utazva a fékezést, illetve kanyarokban a sínek-kerekek éles hanggal kísért kopását követően, a $PM_{2,5}$ koncentráció megemelkedése kimutatható volt. A Xiaomi készülék is ezen járművön utazva adta az általa mért legmagasabb, $47 \mu g/m^3$ -es értéket.

A villamosok esetében az eltérő szerelvények között különbségeket fedeztünk fel. A 14. ábrán láthatjuk, hogy az első két alkalommal, melyeket a 4-es 6-os villamoson (Siemens

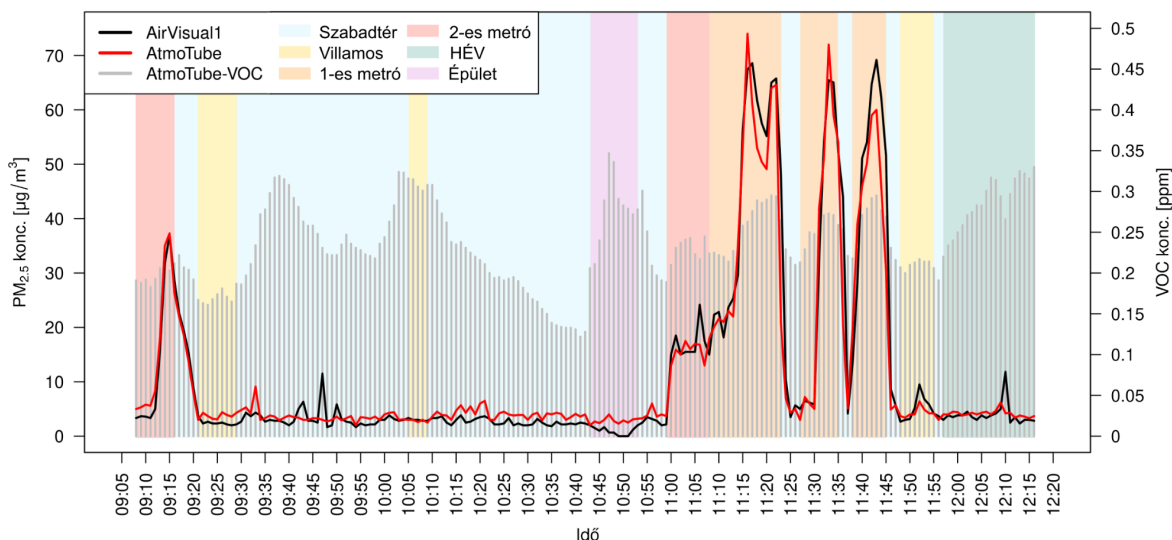
Combino szerelvények [16 - BKV - Siemens Combino]) mértünk, a $PM_{2,5}$ értékek alacsonyok, még a szabadtéren tapasztalt koncentrációnál is kisebbek, viszont a CO_2 jelentős emelkedése figyelhető meg. Ezzel szemben a 23-as vonal (a harmadik villamosként jelölt időszak), régebbi típusú kocsijain (KCSV-7 [17 - BKV - KCSV-7]) mind a $PM_{2,5}$ mind a CO_2 esetében kicsi emelkedést tapasztaltunk.



14. ábra - $PM_{2,5}$ és CO_2 koncentrációk a 2024. augusztus 7-i városi mérés során

A Margit-hídon 9:33-kor gyalogosan elhaladtunk egy felújítás mellett, ahol éppen egy sarokcsiszolóval dolgoztak. Ennek hatását az AtmoTube – $9,1 \mu g/m^3$ és a Xiaomi készülék – $20 \mu g/m^3$ értékkel jelezte. Az AirVisual szenzor ekkor nem mért nagy koncentrációkat, azonban egy negyedórával később igen. Ekkor a Margit-szigeten tartózkodtunk, a készülékeket egy padon helyeztük el. Az értéket nehezen magyarázzuk, talán a sétányról felvert pornak köszönhető.

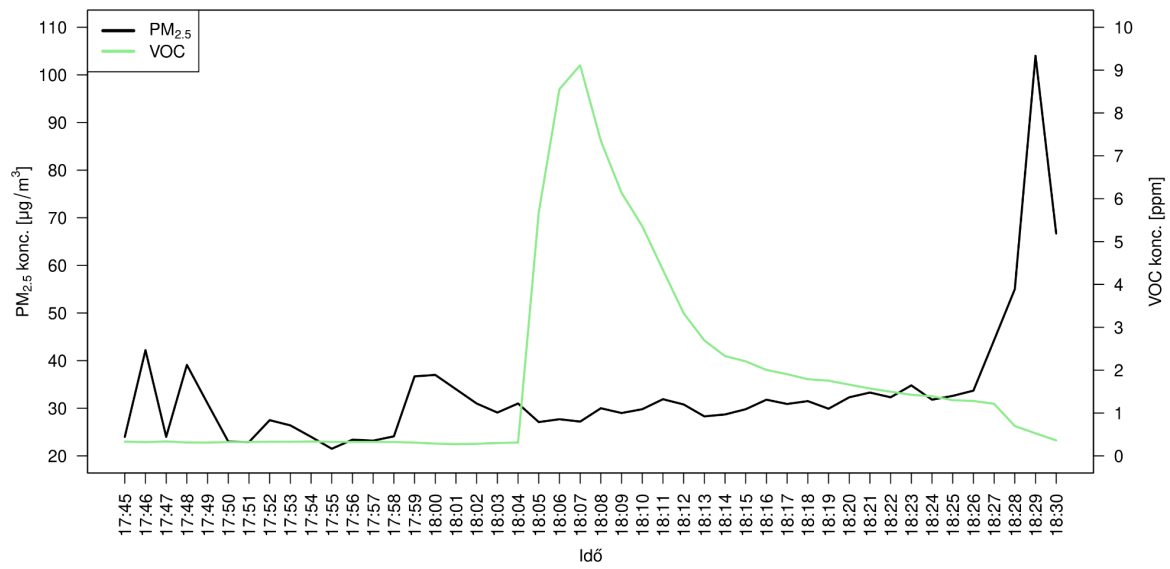
A VOC koncentrációk változását a 15. ábrán szemléltetjük. Ennek menetében kisebb változásokat láthatunk, melyek nem minden esetben követik a környezet megváltozását. Megfigyelhetők különbségek az 1-es metró és a felszín között, emellett szabadtéren alacsonyabb értékek láthatók. Emelkedés észlelhető még az épületben és a HÉV-en tartózkodva is. A szabadtéri koncentrációk esetében nagy eltéréseket láthatunk. A 9:30–10:00 közötti időszakban a változás magyarázható az eltérő környezetekkel, a Margit-szigeten alacsonyabbak az értékek, mint a Margit-hídon. Ellenben 10:10–10:44 között végig a Széna-téren tartózkodtunk, tehát az itt látható csökkenést nem lehet a helyszín megváltozásával magyarázni.



15. ábra - PM_{2,5} és VOC koncentrációk a 2024. augusztus 7-ei városi mérés során

Ezen augusztusi mérés során tehát nem tapasztaltunk nagy változásokat az illékony szerves vegyületek terén. Ellenben a tömegközlekedési eszközök tisztításához kötődő magas VOC koncentrációkra sikerült bizonyítékot találnom november 6-án, köszönhetően egy vagon takarításának. Ezen alkalommal AtmoTube eszközzel mobil méréseket végeztem, és a Keleti pályaudvaron a vonatra felszállva sikerült a tisztítószeres közvetlen hatásait kimérnem. A 16. ábrán láthatjuk a különbségeket az eltérő környezetek között: 17:45–18:00 4-es metró (ebből szerelvényen töltött idő: 17:49–17:59), 18:04–18:26 vonat, 18:26 után szabadtér.

Az ábrán megfigyelhető, hogy a metrón tartózkodva a VOC értékek alacsonyok, 1 ppm alattiak voltak. Itt a PM_{2,5} menetében ugyanúgy magasabb koncentrációkat láthatunk az állomásokon, mint a szerelvényeken, hasonlóan az előzőekben leírtakhoz. Majd a vonatra felszállva látható, hogy az éppen takarítás alatt lévő kocsiban a VOC koncentrációk magasak voltak. Idővel, részben az ajtók nyitásának köszönhetően az érték csökkenni kezdett, de még így is látható különbség a szerelvény és a kültéri levegő között. A leszállás időpontját könnyen megállapíthatjuk a PM_{2,5} értékek alapján, mely koncentrációkban jelentős emelkedés figyelhető meg.



16. ábra - PM_{2.5} és VOC koncentrációk november 6-án

5. Konklúzió

5.1. Összegzés

Kutatásaim során levegőminőségi low-cost szenzorokkal végeztünk méréseket eltérő környezetekben; fixponton beltérekben, továbbá mobil méréseket Budapest utcáin és tömegközlekedési eszközökön.

A stressz-teszt során az alkalmazott összes szenzort tettük ki háztartásokban gyakran előforduló szennyezéseknek (pl. csillagszóró, gyertya, dezodor, főzés). Azt tapasztaltuk, hogy a készülékek többsége (kiv. AliExpress) hasonló értékeket mutat, csak lokális maximumaik esetén fordulnak elő jelentős eltérések. A magasabb $PM_{2,5}$ koncentráció értékek többnyire égéshez kötődő tevékenységekből származtak. Alacsonyabb értékek elérésére a legjobb módszer a szellőztetés volt, ezt követte a légtisztító készülék.

Beltérben végeztünk több héten keresztül is méréseket, két különböző lakásban. Ezen időszak alatt a nyári hőségnek köszönhetően ritkán lehetett szellőztetni, így a helyszíneken a CO_2 alakulása a lakásban tartózkodók számával mutatott összefüggéseket, több személy esetén magasabb szén-dioxid szinttel.

Mobil mérésekkel adott útvonalakat többszörösen bejárva vizsgáltunk. Ennek segítségével sikerült az időjárási körülmények légszennyezésre gyakorolt hatását tanulmányozni, és különbségeket megállapítani városi környezetek között. Azt tapasztaltuk, hogy anticiklonális, ködös helyzetben magasabb a szennyező anyagok koncentrációja. Ilyenkor az eltérő közegekben kisebbek a különbségek, míg máskor, jobb levegőminőség mellett a főutak és a vasútállomás közelségében magasabbak a koncentrációk, mint a kertek házak között.

Több alkalommal tömegközlekedési eszközökön is végeztünk $PM_{2,5}$, CO_2 , VOC méréseket. Eredményeink szerint a metróban, különösen az 1-es metróban magas $PM_{2,5}$ értékek fordulnak elő. Különbségek figyelhetők meg szerelvények, azok típusai és az egyes állomások között is. A metró esetében az állomásokon magasabbak a $PM_{2,5}$ és a VOC koncentrációk, mint a metrókocsikban. A 4-es 6-os villamoson a $PM_{2,5}$ értékek kifejezetten alacsonyak, azonban a CO_2 koncentrációk magasak. Ugyanez nem mondható el a régebbi típusú villamos szerelvények esetén. A VOC koncentráció tömegközlekedéseken szorosan összefügg a tisztító- és fertőtlenítőszer alkalmazásával, ez a kutatás alatt bizonyításra került.

Az alkalmazott low-cost szenzorok között előfordulnak olyanok, amelyek rendelkeznek potenciállal, hogy szélesebb körben kerülhessenek alkalmazásra. Természetesen az ezek által mért értékek kalibrációra szorulnak, ebben segítséget nyújtanak a kutatásaink során nyert eredmények.

5.2. Szenzorokról alkotott felhasználói vélemény

A munka során öt különböző típusú levegőminőségi low-cost szenzort alkalmaztunk. Az eszközöket saját élmények alapján sorba (a legrosszabbal kezdve) rendeztem, olyan szemlélettel, hogy mely készülékekben rejlik a legnagyobb potenciál, hogy hivatalos munkákban is alkalmazható legyen.

Az AliExpress-ről származó készülékről az egyes komponenseket egyetlen érzékelő alapján számítja, a PM_{2,5} esetében megfigyeltük, hogy itt véletlenszerűen jelennek meg az értékek. Így ezen eszköz nem alkalmas a levegőminőség meghatározására.

Az IKEA és a Xiaomi készülékek adatok tárolására nem alkalmasak, így ezek inkább csak lakossági felhasználásként alkalmazhatók. Az IKEA eszköz nem rendelkezik akkumulátorral, így nehezen mozgatható, míg a Xiaomi eszköz hátránya, hogy csak egyetlen komponenst mér. Az IKEA eszköz ellenben több mindent mér (hőmérséklet, páratartalom, PM_{2,5} és tVOC). Bár a VOC koncentrációt méri, az értékeket nem jeleníti meg, helyette az értékekre vonatkozó tendenciát jelöli nyilak segítségével. Itt felmerül a kérdés, hogy mennyi információtartalma van annak, hogy csökkennek az értékek, ha közben nem ismerem, hogy veszélyesen magas a koncentráció.

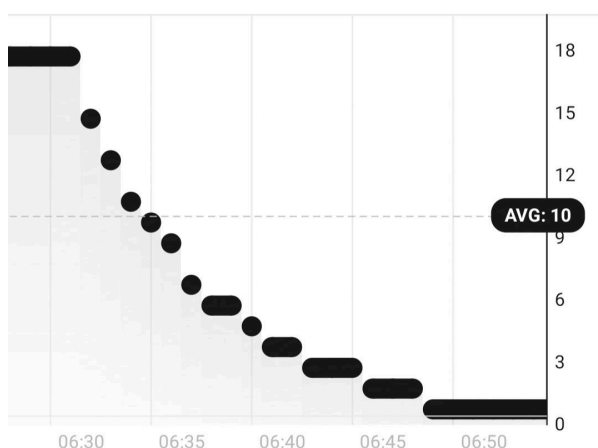
Az AirVisual és az AtmoTube eszközök tárolnak adatot, sokféle komponenst mérnek, bár mindkettőnek vannak kisebb-nagyobb gondjai.

Az AirVisual szenzor esetében pozitívum, hogy az alkalmazott összes készülék közül egyedül ez mér hihető szén-dioxid koncentrációkat (elméletileg még az AliExpress mér). Ellenben a PM_{2,5} mérése során több gondot is tapasztaltam ezekkel a készülékekkel. Az egyik, hogy magasabb koncentrációk esetén drasztikusan nagy értékeket produkál (pl. előfordul, hogy a többi készülékhez képest egy nagyságrenddel nagyobb), ilyenkor a képernyőn lévő figura már gázmaszkot húz. Emellett viszonylag gyakran produkált hibát a PM_{2,5} mérő szenzor, melynek takarítása elég körülményes. (Bár szerencsére a honlapon erről is részletes leírást találunk [18 - AirVisual - Sensor cleaning].) Hátránya még, hogy (hivatalosan) csak beltérben használható, emellett az adatok feldolgozásában nehézséget jelent, hogy a képernyő bekapcsolásakor a készülék automatikusan sűrűbben ment adatokat.

Az AtmoTube egy szimpatikus low-cost szenzor, rengeteg levegőminőség komponenst mér (három eltérő mérettartományú aeroszolt (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀), illékony szerves vegyületet (VOC), légnyomást, hőmérsékletet, páratartalmat), koordináták elraktározására is képes. Könnyen szállítható, táskára erősítve remekül működik, bár ügyelni kell rá, hogy a szükséges oldalai kapjanak levegőt (a négyből három oldalon van bemeneti nyílás, az azonban

valószínű, hogy az eltérő nyílások különböző szenzoroknak szolgáltatnak levegőt). Ellenben ennek az eszköznek is vannak problémái.

Az egyik egy viszonylag nagy műszerhiba: a hőmérsékletmérő kifejezetten lassan reagál a nagy hőmérséklet változásokra. A 17. ábrán egy kiragadott nap (november 21.) reggeli óráiban végzett mérésben láthatjuk, hogy 6 óra 31-kor a házat elhagyva kiléptem a közel 0 °C-os kinti levegőre. Azonban a készüléknek közel 20 percre volt szüksége ahhoz, hogy ezt az értéket elérje. (Emellett az eszköz hőmérője 0,5–1 °C-ot téved, de ez az applikációban kalibrálható.)



17. ábra - Az AtmoTube szenzor használata során tapasztalt hőmérsékleti hiba (a kép az AtmoTube mobil applikációban megjelenő grafikont mutatja)

Másik hibája a telefonnal való összeköttetéssel kapcsolatos. A készülék folyamatos Bluetooth kapcsolatot igényel a telefonnal ahhoz, hogy koordinátákat rögzítsen (ezek a telefon helyadatai), mellette Bluetooth és WiFi kapcsolatra is szüksége van ahhoz, hogy bekapcsoláskor a két eszköz szinkronizálódjon. Az applikáció grafikus nézetén az adatok (többnyire) akkor jelennek meg, ha van WiFi kapcsolat, az állapotsorban az aktuális mért adatok nélkül is, csak Bluetooth jelenlétében láthatók.

Harmadik, kisebb gond az általa alkalmazott levegőminőségi indexszel van. Az ilyen indexek többsége a levegőminőség romlásával egyre nagyobb értékeket vesz fel. Ezzel szemben az AtmoTube által alkalmazott változat egy 100-as skálát használ, ahol 100 a tökéletes levegőt jelöli, és a levegőminőség romlásával tart a 0-hoz.

Emellett az általam alkalmazott készüléknek még a kikapcsolással is vannak gondjai, csak az applikációból lehet kikapcsolni, manuálisan, a készüléken található egyetlen gomb megnyomásával ez nem működik, pedig elméletileg erre az eszköz képes. Ez a probléma valószínűleg a műszer korából ered (régebbi a készülék).

5.3. Jövőbeli kilátások

A low-cost szenzorok megismeréséhez minél több használatra van szükség. Ez egyfelől segíti a műszer pontosságának meghatározását, kalibrálását. Másfelől ezek többnyire nagyon friss találmányok, így az eszközök élettartamáról és idővel történő romlásáról is hasznos információkat szerezhetünk.

Jelen tanulmányban ismertetett munkák folytatásaként érdemes lenne a műszerek összemérése valamilyen referenciának tekinthető műszerrel. Például a stressz-teszt megismétlésével egyrészt a low-cost szenzorok pontosságáról nyernénk információt, másrészt azt is lehetne vele vizsgálni, hogy a low-cost készülékek hasonlóan reagálnak-e a második alkalommal, mint az első esetben.

A méréseket érdemes lenne több eltérő időszakban is folytatni. A beltéri és több tömegközlekedési eszközön a méréseket nyáron végeztük, miközben a kültéri légszennyezők koncentrációi nem voltak magasak. Izgalmas lehetne ezeket összehasonlítani téli mérésekkel, amikor a lakossági fűtésnek, és az időjárási helyzetnek köszönhetően magasak a koncentrációk.

Emellett hasznos lenne egy adott típusú low-cost szenzorból többet összehasonlítani, hogy elkülöníthetők legyenek olyan hibák, amik csak adott készülékekben fordulnak elő és az olyanok, melyek az összesben gondot okoznak. Rendszerszintű hibákra lehet kalibrációkat meghatározni, melyek jó visszajelzést jelentenek gyártóknak, és további felhasználóknak.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, dr. Mészáros Róbertnek, a sok hasznos tanácsért; Toldi Leventének a mérésekben való közreműködéséért; és nővéremnek az ábrákon végzett grafikai munkáért.

Irodalomjegyzék

- 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről, *Magyar Közlöny*
- 5/2020. (II. 6.) ITM rendelet a kémiai kóroki tényezők hatásának kitett munkavállalók egészségének és biztonságának védelméről, *Magyar Közlöny*
- Ainiwaer, S., Chen, Y., Shen, G., Shen, H., Ma, J., Cheng, H., Tao, S., 2022: Characterization of the vertical variation in indoor PM_{2.5} in an urban apartment in China. *Environmental Pollution*, 308, 119652. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119652>
- Ambient Air Quality Directives*
- Az Európai Tanács és a Tanács 2004/107/EK irányelve (2004. december 15.) a környezeti levegőben található arzénről, kadmiumról, higanyról, nikkelről és policiklusos aromás szénhidrogénekéről. *Európai Unió hivatalos lapja*, 26.1.2005, L 23/3
- Az Európai Tanács és a Tanács 2008/50/EK irányelve (2008. május 21.) a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról. *Európai Unió hivatalos lapja*, 11.6.2008, L 152/1
- Javaslat Az Európai Parlament és a Tanács irányelve a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról (átdolgozás). *Brüsszel, 2022.10.26., COM(2022) 542 final/2, 2022/0347(COD)*
- Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., Osawa, H., 2018: Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment International Volume 121, Part 1, Pages 51-56*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.059>
- Baeza Romero, M.T., Dudzinska, M.R., Amouei Torkmahalleh, M., Barros, N., Coggins, A.M., Ruzgar, D.G., Kildsgaard, I., Naseri, M., Rong, L., Saffell, J., et al., 2022: A review of critical residential buildings parameters and activities when investigating indoor air quality and pollutants. *Indoor Air* 2022;32:e13144. <https://doi.org/10.1111/ina.13144>
- Chillrud, S.N., Epstein, D., Ross, J.M., Sax, S.N., Pederson, D., Spengler, J.D., Kinney, P.L., 2003: Elevated Airborne Exposures of Teenagers to Manganese, Chromium, and Iron from Steel Dust and New York City's Subway System. *Environmental Science & Technology* 2004, 38, 3, 732–737. <https://doi.org/10.1021/es034734y>
- Chojer, H., Branco, P.T.B.S., Martins, F.G., Alvim-Ferraz, MCM., Sousa, S.I.V., 2024: Source identification and mitigation of indoor air pollution using monitoring data – Current trends. *Environmental Technology & Innovation Volume 33, 103534*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103534>
- European Environment Agency, 2019: Air quality in Europe — 2019 report. *EEA Report, No 10/2019*. doi:10.2800/822355
- Hwang, S.H., Won, J.U. & Park, W.M., 2023: Changes in total volatile organic compound concentration in Seoul subway stations before (2019) and after (2021) the COVID-19 outbreak. *Sci Rep* 13, 20328 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46519-9>
- Jayaratne, R., Liu, X., Thai, P., Dunbabin, M., Morawska, L., 2018: The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 4883–4890. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4883-2018>
- Ji, W., Zeng, J., Zhao, K., Liu, J., 2025: Source apportionment and health-risk assessment of PM_{2.5}-bound elements in indoor/outdoor residential buildings in Chinese megacities. *Building and Environment Volume 267, Part A, 112250*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112250>
- Johansson, C., Johansson, P.-Å., 2003: Particulate matter in the underground of Stockholm. *Atmospheric Environment Volume 37, Issue 1, January 2003, Pages 3-9*. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00833-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00833-6)
- Kakucs, R., Magyar, D., Páldy, A., Szabados, M., Szigeti T., 2024: Beltéri légszennyezőkre vonatkozó irányértékek. Nemzeti Népegészségügyi és Gyógyszerészeti Központ
- Kumar, P., Hama, S., Abbass, R.A., Nogueira, T., Brand, V.S., Wu H.-W., ... & Nagendra, S.M.S., 2022: CO₂ exposure, ventilation, thermal comfort and health risks in low-income home kitchens of twelve global cities. *Journal of Building Engineering Volume 61, 105254*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105254>

- Liu, H.-Y., Schneider, P., Haugen, R., Vogt, M., 2019: Performance assessment of a low-cost PM_{2.5} sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. *Atmosphere* 41. doi:10.3390/atmos10020041
- Lunden, M.M., Revzan, K.L., Fischer, M.L., Thatcher, T.L., Littlejohn, D., Hering, S. V., Brown, N.J., 2003: The transformation of outdoor ammonium nitrate aerosols in the indoor environment. *Atmospheric Environment Volume 37, Issues 39–40, 2003, Pages 5633–5644*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.035>
- Molnár, Á., Imre, K., Ferenczi, Z., Kiss, Gy., Gelencsér, A., 2020: Aerosol hygroscopicity: Hygroscopic growth proxy based on visibility for low-cost PM monitoring. *Atmospheric Research Volume 236, 104815*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104815>
- NEC Directives
- Az Európai Tanács és a Tanács (EU) 2016/2284 irányelve (2016. december 14.) egyes légköri szennyező anyagok nemzeti kibocsátásainak csökkentéséről, a 2003/35/EK irányelv módosításáról, valamint a 2001/81/EK irányelv hatályaon kívül helyezésétől (EGT-vonatkozású szöveg). *Európai Unió hivatalos lapja*, 17.12.2016, L 344/I
- Passi, A., Shiva Nagendra, S.M., Maiya, M.P., 2021: Characteristics of indoor air quality in underground metro stations: A critical review. *Building and Environment 198, 107907*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107907>
- Pawar, H., Sinha, B., 2020: Humidity, density, and inlet aspiration efficiency correction improve accuracy of a low-cost sensor during field calibration at a suburban site in the North-Western Indo-Gangetic plain (NW-IGP). *Aerosol Science and Technology 54, 685–703*. <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1719971>
- Salma, I., Weidinger, T., Maenhaut, W., 2007: Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station. *Atmospheric Environment 41, 8391–8405*. doi:10.1016/j.atmosenv.2007.06.017
- Salonen, H., Salthammer, T., Castagnoli, E., Täubel, M., Morawska, L., 2024: Cleaning products: Their chemistry, effects on indoor air quality, and implications for human health. *Environment International Volume 190, 108836*. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108836>
- Saraga, D.E., Querol, X., Duarte, R.M.B.O., Aquilina, N.J., Canha, N., Gómez Alvarez, E., Jovasevic-Stojanovic, M., Bekő G., Byčenkienė, S., Kovacevic, R., Plauškaitė, K., Carslaw, N., 2023: Source apportionment for indoor air pollution: Current challenges and future directions. *Science of The Total Environment Volume 900, 165744*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165744>
- Saraga, D., Duarte, R.M.B.O., Manousakas, M.-I., Maggos, T., Tobler, A., Querol, X., 2024: From outdoor to indoor air pollution source apportionment: Answers to ten challenging questions. *TrAC Trends in Analytical Chemistry 178, 117813*. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117821>
- Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J.F., Tran, C.L., 2005: The London Underground: dust and hazards to health. *Occupational and Environmental Medicine 62(6):355–62*. doi: 10.1136/oem.2004.014332
- Shahri, M.J., Sarkhosh, M., Alidadi, H., Najafpoor, A.A., Ghavami, H., Baridkazemi, S., 2024: Assessing the risks associated with indoor and outdoor air quality in relation to the geographic placement of nursing home. *Heliyon, Volume 10, Issue 13, e32601*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32601>
- Shairsingh, K., Ruggeri, G., Krzyzanowski, M., Mudu, P., Malkawi, M., Castillo, J., Soares Da Silva, A., Saluja, M., Cervantes-Martínez, K., Mothe, J., Gumy, S., 2023: WHO air quality database: relevance, history and future developments. *Bull World Health Org 101, 800–807*. <https://doi.org/10.2471/BLT.23.290188>
- Sharma, B. and Sarkar, S., 2023: Disease burden and health risk to rural communities of northeastern India from indoor cooking-related exposure to parent, oxygenated and alkylated PAHs. *Science of The Total Environment Volume 905, 167163*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167163>
- Tóth, A., Lázár, K., Ferenczi, Z., 2021a: Levegőminőség modellezés. *Országos Meteorológiai Szolgálat*
- Tóth, A., Lázár, K., Ferenczi, Z., 2021b: Az Országos Levegőterhelés-csökkentési Programban meghatározott intézkedések hatásának vizsgálata. *Országos Meteorológiai Szolgálat*

- Veríssimo, M.I.S., 2024: A critical review of the analytical performance of the most recent MOS-based gas sensors for indoor air quality monitoring of WHO priority pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 178, 117813. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117813>
- WHO, 2021: WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- WHO, 2023: WHO Ambient Air Quality Database (Update Jan 2024). WHO Air Quality, Energy and Health Team
- WMO, 2024: Integrating Low-cost Sensor Systems and Networks to Enhance Air Quality Applications, GAW Report No. 293, World Meteorological Organization

Internetes források

- [1 - UNICEF]
<https://www.unicef.org/press-releases/air-pollution-accounted-81-million-deaths-globally-2021-becoming-second-leading-risk> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [2 - EU tények és számadatok]
<https://www.consilium.europa.eu/hu/infographics/air-pollution-in-the-eu/#0> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [3 - EDGAR]
<https://edgar.jrc.ec.europa.eu/> (utoljára megnyitva: 2024. november 23.)
- [4 - UNFCCC]
<https://unfccc.int/topics/mitigation/resources/registry-and-data/ghg-data-from-unfccc> (utoljára megnyitva: 2024. november 23.)
- [5 - legszennyezettség.met.hu - GYIK]
<https://legszenyezetseg.met.hu/levegominoseg/informacio/GYIK> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [6 - AirVisual - termék]
<https://www.iqair.com/products/air-quality-monitors/airvisual-pro-indoor-monitor> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [7 - AtmoTube - termék]
<https://atmotube.com/atmotube-pro> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [8 - Xiaomi]
[https://www.shopmask.com/purifier-smartmi-pm25.html#\[object%20HTMLSpanElement\]](https://www.shopmask.com/purifier-smartmi-pm25.html#[object%20HTMLSpanElement]) (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [9 - IKEA - termék]
<https://www.ikea.com/hu/hu/p/vindstyrka-legminoseg-erzekelo-okos-eszkoez-40498234/> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [10 - AliExpress]
https://www.aliexpress.com/item/1005006904529882.html?spm=a2g0o.productlist.main.17.6d0axOkt_xOktbb&algo_pvid=fa32a259-c643-4940-a02b-c1430592e54f&algo_exp_id=fa32a259-c643-4940-a02b-c1430592e54f-8&pdp_npi=4%40dis%21HUF%2115666.70%214896.00%21%21%21294.41%2192.01%21%40211b876e17294332918903754e3e25%2112000038671253162%21sea%21HU%210%21ABX&curPageLogUid=GyfMTkLA6AHN&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [11- AirVisual - Technical specification]
https://cdn.shopify.com/s/files/1/0677/4059/8571/files/AVPro-Technical_Specs_intl_v01.03a_2023_ed_a4870e-96eb-465c-8bf3-7d26aa4b30ef.pdf?v=1722962451 (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [12 - AtmoTube - Product conformity certificate]
https://sensirion.com/media/documents/3A3BF572/616540E1/Sensirion_PM_Sensors_Datasheet_SPS_30_MCERTS-Certificate_2020.pdf (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)
- [13 - IKEA - leírás]

<https://www.ikea.com/global/en/newsroom/innovation/ikea-launches-vindstyrka-a-smart-sensor-to-measure-indoor-air-quality-230214/> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)

[14 - HEPA szabvány]

<https://www.emw.de/en/filter-campus/iso29463.html> (utoljára megnyitva: 2024. november 19.)

[15 - legszennyezettség.met.hu - levegőminőségi index]

<https://legszenyezettség.met.hu/levegominoseg/informacio/aq-index-tajekoztato> (utoljára megnyitva: 2024. november 22.)

[16 - BKV - Siemens Combino]

<https://www.bkv.hu/hu/jarmuveink/villamos/siemens-combino> (utoljára megnyitva: 2024. november 22.)

[17 - BKV - KCSV7]

<https://www.bkv.hu/hu/jarmuveink/villamos/kcsv7> (utoljára megnyitva: 2024. november 22.)

[18- AirVisual - Sensor cleaning]

<https://www.iqair.com/us/support/knowledge-base/KA-04827-US> (utoljára megnyitva: 2024. november 22.)

Függelék: Saját eredmények

Megoldott tudományos kérdések

- Levegőminőségi low-cost szenzorok összehasonlítása és minőségének vizsgálata.
- Kisméretű aeroszol részecskék ($PM_{2,5}$), szén-dioxid (CO_2) és illékony szerves vegyületek (VOC) koncentrációjának mérése eltérő környezetekben és a mérések feldolgozása.

Alkalmazott módszerek

- A munka során felhasznált összes low-cost szenzort egy beltéri mérés során különböző, háztartásban gyakori kibocsátásnak (pl. főzés, dezodor, gyertya, csillagszóró) tettem ki, figyelve a műszerek reakció idejét és az általuk mért koncentráció értékeket.
- Több héten keresztül, azonos típusú műszerrel, két helyszínen került sor a beltéri CO_2 és $PM_{2,5}$ koncentráció vizsgálatára.
- Mobil méréseket végeztem adott útvonalak többszöri bejárásával.
- Budapesti tömegközlekedési eszközökön végeztem CO_2 , $PM_{2,5}$ és VOC méréseket.

Saját eredmények

- Megállapítottam, hogy egy kivételével, az alkalmazott készülékek dinamikusan reagálnak a légszennyezettség megváltozására.
- Reakcióidejükben kisebb, lokális maximum értékeikben nagyobb eltéréseket figyeltem meg.
- A nyári hőségnek köszönhetően ritkán lehetett szellőztetni, így a szén-dioxid koncentráció a lakásban tartózkodók számával mutatott összefüggéseket.
- Az időjárás és a légszennyezettség kapcsolatát tapasztaltam; anticiklonális, ködös helyzetben magasabb koncentráció értékeket mértem.
- Nagyobb légszennyezettség mellett az eltérő városi környezetek között kisebb különbségeket tapasztaltam. Míg jobb levegőminőség mellett a főutak és a vasútállomás közelségében magasabbak a koncentrációk, mint a kertek házak között.
- A metrókon, különösen az 1-es metróon magas $PM_{2,5}$ értékek fordulnak elő.
- Különbségek figyelhetők meg szerelvények, azok típusai és az egyes állomások között is.
 - A metróállomásokon magasabbak a $PM_{2,5}$ és a VOC koncentrációk, mint a kocsikban.
 - Combino típusú villamoson a $PM_{2,5}$ értékek kifejezetten alacsonyak, azonban a CO_2 koncentrációk magasak. Ugyanez nem mondható el a régebbi típusú villamos szerelvények esetén.
- A VOC koncentráció tömegközlekedéseken szorosan összefügg a tisztító- és fertőtlenítőszer alkalmazásával, amit szintén sikerült mérésekkel alátámasztani.