

**Miskolci Egyetem**

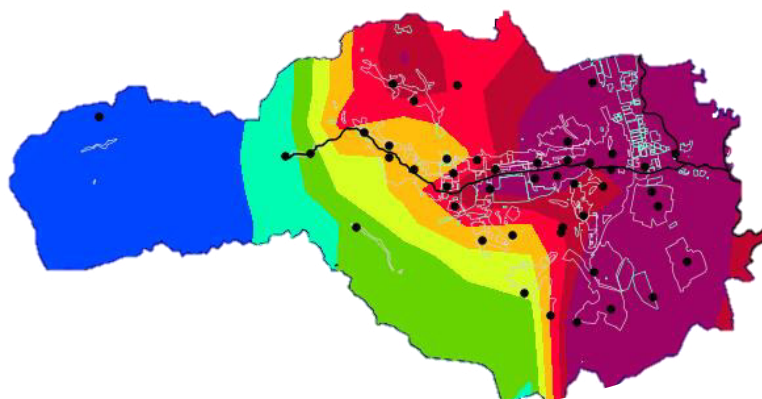
**Anyag- és Vegyészmérnöki Kar**

**Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola**



**Szálló por mérőhálózat fejlesztése Miskolcon**

PhD értekezés tézisei



Készítette:

**BÁTHORY CSONGOR**

MSc. Kohómérnök

Tudományos vezető:

Prof. Dr. Palotás Árpád Bence

Miskolc

2023.

## 1. Bevezetés, célkitűzés

Miskolc és a Sajó völgyének levegőterheltségi szintje, azon belül a szálló por koncentráció az országos és az európai átlaghoz képest is kiemelkedően magas volt a korábbi években a téli, fűtési időszakokban. A saját környezetem megismerése céljából tanulmányaim során a hivatalos levegőminőség mérőállomások adatai alapján vizsgáltam a szmog kialakulásának folyamatát a Sajó völgyében [1]. A hivatalos mérőállomások területi lefedettsége egy-egy régió megismerésére alkalmas. A nagy beszerzési és üzemeltetési költség miatt az üzemeltetőnek nincs lehetősége, a jogszabályi követelmények miatt pedig nincs kötelezettsége sem további mérőállomások felállítására, hogy ezáltal városi szinten is megismerjük a szennyezés kialakulását, terjedési folyamatait [2, 3].

Az elektronika fejlődésével megjelentek olyan megoldások a piacon (pl. szenzorok alkalmazásával), melyek kis bekerülési költségükhöz képest megbízható adatokat ígérnek [4]. PhD tanulmányaim alatt a Miskolci Egyetem és Miskolc Város Önkormányzatának együttműködésével részt vehettem egy szenzor alapú mérőhálózat előkészítésében, fejlesztésében és kiépítésében Miskolc területén. Tanulmányoztam a világban már létező szenzoros szálló por mérőhálózatokat [5], valamint a Miskolcra jellemző szálló por trendeket. A már meglévő mérőhálózatokról kevés tudományos mélységű publikáció volt elérhető [6], így célként tűztem ki, hogy a miskolci hálózat fejlesztési folyamata és eredményeinek feldolgozása a kutatás követelményeinek megfelelően jól dokumentált és kellő mélységű legyen.

Értekezésemben bemutattam a piacon kapható szálló por mérésére alkalmas szenzorok jellemzőit az irodalom [7-9] és saját mérések segítségével. Egy kiválasztott szenzortípust beépítve terveztem meg a mikroszámítógép alapú, lamellás védőburokkal ellátott szálló por mérésére alkalmas mérőegységeket, melyeket kihelyezve jött létre a mérőhálózat.

Célul tűztek ki a megfelelő adatminőség elérését. Az előzetes mérések és az irodalom alapján tudtam, hogy a szenzorok érzékenyek a környezeti tényezők változására [10], így egy olyan korrekciós modellt terveztem megvalósítani a mérőegységek adatminőségének javítására, ami figyelembe veszi a szenzorok gyártásából adódó különbségeket (egyedi kalibráció) és a működési elvükből adódó érzékenységüket (környezeti kompenzáció), valamint átültethető más területeken üzemeltetett hálózatokra.

A korigált eredmények alapján Miskolc szálló por koncentrációjának változását, trendjének alakulását szerettem volna megfigyelni és leírni.

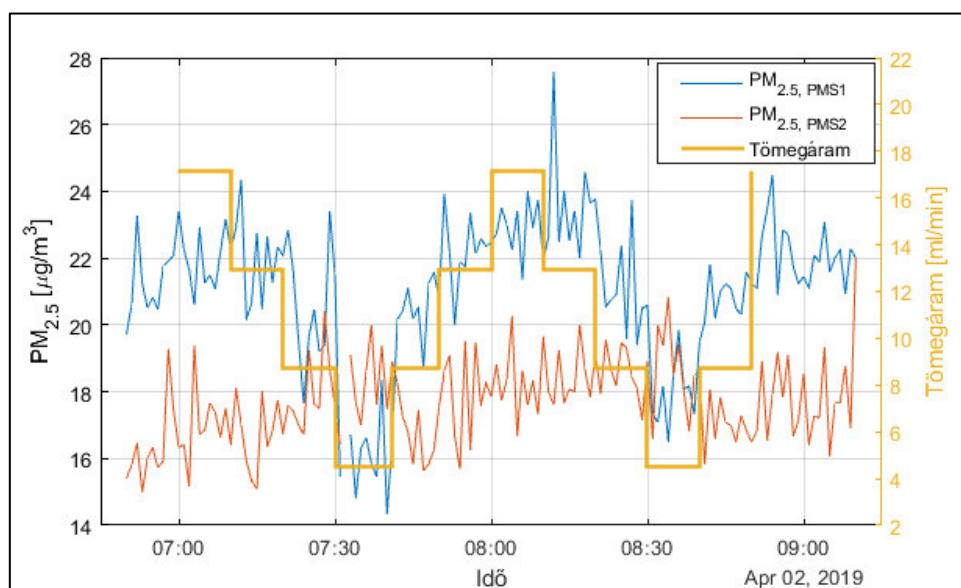
A szenzoros mérőhálózatok előnye, hogy alacsony költségek mellett többlet információt nyújtanak. A mérőhálózat üzemeltetési és fenntartási költségeinek csökkentése érdekében módszert kívántam kidolgozni arra, hogy meghatározható legyen, hogy az egyes mérési helyszínek elhagyása milyen mértékű információ veszteséssel jár.

## 2. Vizsgálati módszerek és eredmények

### 2.1. Mérési módszer szállópor koncentráció mérésére

Vizsgáltam a kis költségű (szenzor ár <30 USD) szenzorok szállópor koncentráció mérésével kapcsolatos megbízhatóságát, beépíthetőségét.

A Plantower PMS7003 típusú szenzor ventilátorának feszültségváltozása és az ezzel együtt változó tömegáram hatását a mért porkoncentrációra párhuzamos mérés keretében vizsgáltam. Két azonos típusú Plantower PMS7003 típusú szenzort üzemeltettem (PMS1 és PMS2) oly módon, hogy a PMS1 jelzésű szenzor tömegáramát a ventilátor feszültségének szabályozásával 10 percenként változtattam. A két szenzor  $PM_{2,5}$  koncentráció értékeit hasonlítottam össze. A 1. ábra segítségével igazoltam, hogy a tömegáram csökkenésével, csökken a mért porkoncentráció, majd ahogy nő a tömegáram, vele együtt nő a kimutatott koncentráció is. A referenciaként üzemeltetett PMS2 szenzor koncentráció értékei ez idő alatt az ingadozásoktól eltekintve nem változtak. A fentiek alapján megállapítottam, hogy a ventilátor feszültség, - és fordulatszám-változása, vagyis az átáramló levegő mennyiségének változása hatással van a mért koncentráció értékekre, ezért minél stabilabb áramellátás biztosítása szükséges az üzemeltetésükkor.

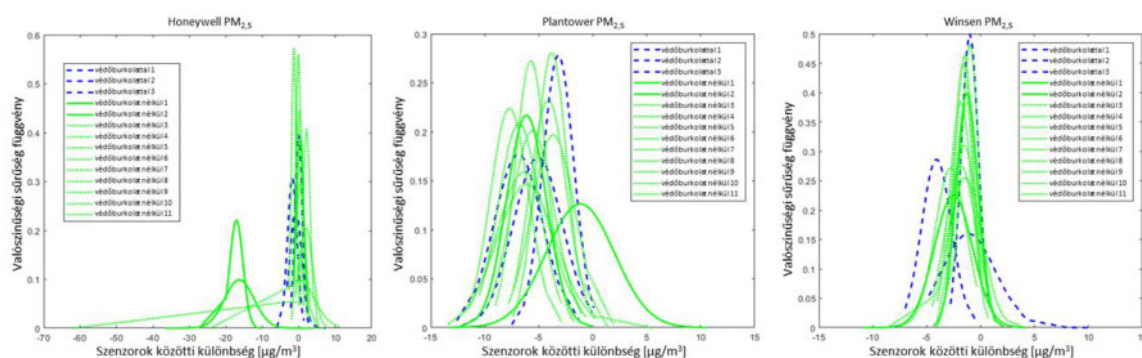


1. ábra Tömegáram változásának hatása a mért koncentráció értékekre és a mérés szemléltetése

A térfogatáram változását a tápfeszültség ingadozásán kívül a szél is előidézhetheti. Ugyanis a szél a ventilátor ellen is dolgozhat, ha a szenzor levegő beszívásra/kiáramlásra kialakított nyílása körül megváltozik a nyomás. A szél hatásának csökkentése lamellás védőburkolat segítségével történt.

A meteorológiai állomások mintájára egy lamellás védő burkolatot készítettem a páratartalom, nedvesség, napsugárzás és szél kedvezőtlen hatásainak minimalizálására. Mérési sorozatot végeztem három szenzor

típussal 2018.10.17. és 2018.10.19. között, mely során a hőmérséklet 11,3 – 25,7 °C között, a relatív páratartalom pedig 28,5 – 63,3% között változott. A vizsgálat során egy-egy órás időtartamú mérés adatait rögzítettem, oly módon, hogy először egy szenzor sem volt a védőburkolat alatt, majd egyenként, felváltva egy-egy típust védőburkolat alá helyeztem. Ezt a módszert háromszor ismételt meg egy napon ugyanazon szenzorokkal. A Plantower PMS7003 típusú szenzorok eltérési tartománya  $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a Winsen ZH03 típusú szenzoroké  $18,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a Honeywell HPM115S0 típusú szenzoroké pedig  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  volt. A mérések lefutása azt mutatja, hogy a védőburkolat nem befolyásolta a szenzorok érzékenységét, ugyanúgy követte a védőburkolatban és a védőburkolat nélkül kihelyezett szenzor a szálló por koncentrációjának változását. További vizsgálatokat végeztem a fenti megállapítás alátámasztására az eltérések normális eloszlás valószínűségi sűrűségfüggvényeinek meghatározásával (2. ábra).



2. ábra A Honeywell, Plantower és Winsen szenzorokhoz tartozó eltérések normális eloszlás valószínűségi sűrűségfüggvényei (kék: védőburkolattal, zöld: védőburkolat nélkül)

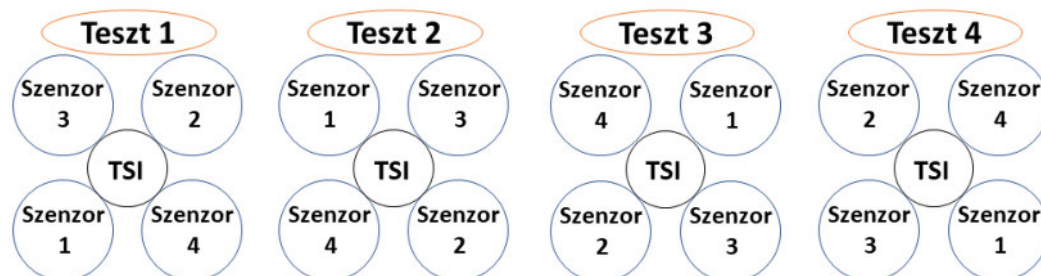
A mérési sorozat alatt rögzített azonos típusú szenzorok értékeiből számolt eltérések időbeli változásának vizsgálata és normális eloszlás valószínűségi függvényei alapján igazoltam, hogy az általam tervezett védőburkolat nem befolyásolja az abban elhelyezett szenzor által mért értékeket a védőburkolat nélkül mérő szenzorhoz képest, ugyanakkor csökkenti a direkt sugárzás okozta melegedést és a szél zavaró hatását.

## 2.2 Mérőegységek korrekciós modellje

A Plantower PMS7003-as szenzorral szerelt mérőegységek adatai klímakamrás kalibráció segítségével a rájuk jellemző kalibrációs egyenlettel átszámítottam, majd ezt az értéket a kompenzációs módszerrel meghatározott egyenlettel tovább korrigáltam. A nyers adatból így két lépcsőn keresztül jutottam el a mérőhálózatban vizsgált és értékelt kompenzált adatokhoz.

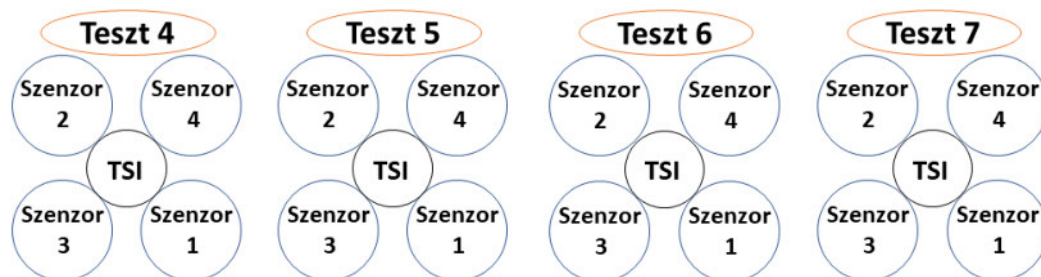
Kidolgoztam a mérőegységek kalibrációjának módszerét, mely szerint klímakamrában a referencia eszköz körül elhelyezett mérőegységek, a ventilátor segítségével bejuttatott izobutén gáz égéstermékéből keletkező

korom mennyiségét állandó környezeti körülmények között mérik. A kalibrációs módszer vizsgálata során a mérőegységek helyét változtattam, hogy kiderüljön, van-e számottevő különbség az egyes pozíciók között. Négy mérőegységet forgattam mérésről mérésre a TSI -i gyártmányú referencia műszer körül, ahogy azt a 3. ábra szemlélteti (Teszt 1 -Teszt 4).



3. ábra Szenzoros mérőegységek eltérő elhelyezése a TSI referencia körül a pozíciót vizsgáló tesztek során

A módszer megismételhetőségét a Teszt 4 során alkalmazott pozícióban történő mérés 3-szor való megisméltésével vizsgáltam, melyeket Teszt 4 - Teszt 7 azonosítóval láttam el, ahogy a 4. ábra mutatja.



4. ábra Szenzoros mérőegységek azonos elhelyezése a TSI referencia körül a megismételhetőségi tesztek során

A vizsgálatok során a klímakamrában mért hőmérséklet 26 – 29 °C, a relatív páratartalom 33 – 63%, a nyomás pedig 99,2 – 100,8 kPa között változott. Igazoltam, hogy a fenti peremfeltételek mellett a szenzorok pozíciója és a kalibráció megisméltéséből adódó hibák azonosak, vagyis a kalibráció eredményét tekintve nincs jelentős különbség a tekintetben, hogy a kamrán belül hol helyezük el a mérőegységet, vagy hogy hányszor ismétljük meg a mérést. Megállapítottam, hogy a mérőegységeket egységesen 40-50%-os relatív páratartalom és 25 °C-os hőmérséklet mellett 0-150 µg/m<sup>3</sup> PM<sub>2,5</sub> porkoncentráció között kell kalibrálni.

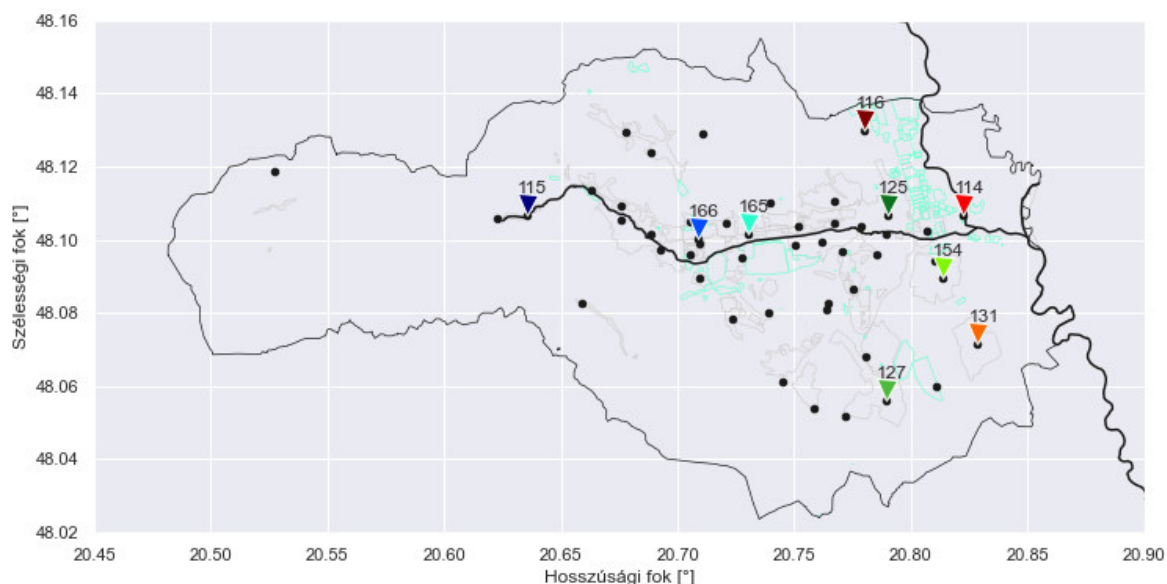
A környezeti paraméterek mérőegységek mérésére gyakorolt hosszú távú hatásának megismerése céljából 2019.07.06. és 2020.09.30. között összemérést végeztem az OLM M5-ös, vagyis Alföldi utcai állomása és egy kalibrált mérőegység segítségével. Az állomáson a GRIMM EDM 180

referencia eszköz, a mérőegységben a Plantower PMS7003-es szenzor üzemelt a vizsgálat teljes ideje alatt.

Az éves összemérés adatait felhasználva lineáris regresszió segítségével vizsgáltam a környezeti paraméterek hatásának erősségét. A mérőegység által mért, majd a rá jellemző egyedi görbével kalibrált PM értékek és a referencia PM között meglévő kapcsolatot az egyes környezeti paraméterek kis mértékben erősítik. Tehát amennyiben a PM értékeket kiegészítjük egy-egy környezeti paraméterrel nő az  $R^2$  értéke, erősödik a kapcsolat.  $PM_{10}$  esetében a relatív páratartalom (RH),  $PM_{2,5}$  esetében pedig a harmatpont (D) ad hozzá a legtöbbet a kapcsolathoz.

### 2.3 Miskolc szálló por koncentrációjának napi lefutásainak területi eltérése

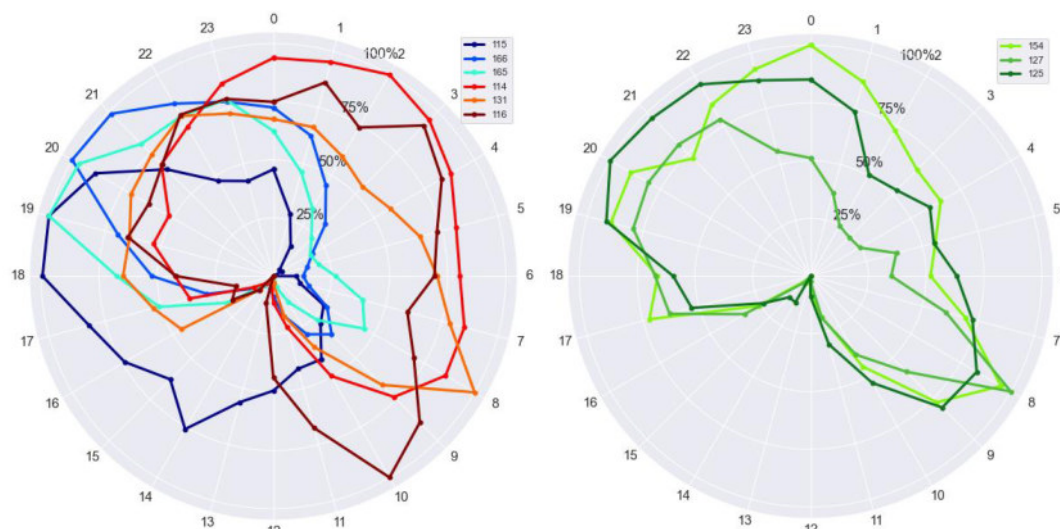
A telepített mérőhálózat segítségével igazoltam, hogy a város eddig nem vizsgált területein más időintervallumokba esnek a tiszta és szennyezett időszakok, mint a hivatalos mérőállomás által reprezentált területeken. A telepített mérőhálózat mérőegységeinek átlagos órás  $PM_{2,5}$  értékeiket vizsgáltam a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban a város két fő tengelye mentén, az észak-déli és kelet-nyugati irányú tengelyen kiválasztva 3-3 mérőpontot, valamint az OLM állomásokon kialakított mérőpontokat. A vizsgált mérőpontok elhelyezkedését a 5. ábra mutatja színes jelölőkkel, a 6. ábra pedig ezen pontokon, valamint az OLM állomásokon kialakított mérőpontokon mért órás átlagos  $PM_{2,5}$  szennyezettségi szinteket szemlélteti. A kördiagram segítségével jobban megérthető a trendek folyamatossága, a szennyező időbeli változása a különböző helyszíneken.



5. ábra Városi tengelyek vizsgálatához használt mérőpontok elhelyezkedése

A két tengely szerint csoportosított pontok eltérő mintázatot mutatnak. Az OLM helyszíneken lévő mérőpontok az észak-déli és kelet-nyugati tengelyű

mérőpontok keveréke, mind az esti (20-22 óra), mind a reggeli (8-9 óra) csúcsidezőszakok domináns. A legtisztább időszakok (szennyezettségi szint <25%) 11 és 17 óra közé esik. Ez megegyezik az észak-déli tengelyen lévő mérőpontok tiszta időszakával. A város nyugati oldalán fekvő mérőpont ezzel szemben 2-8 óra közötti a város középső területén fekvő mérőpontok pedig 10-16 óra közötti tiszta időszakkal rendelkeznek.

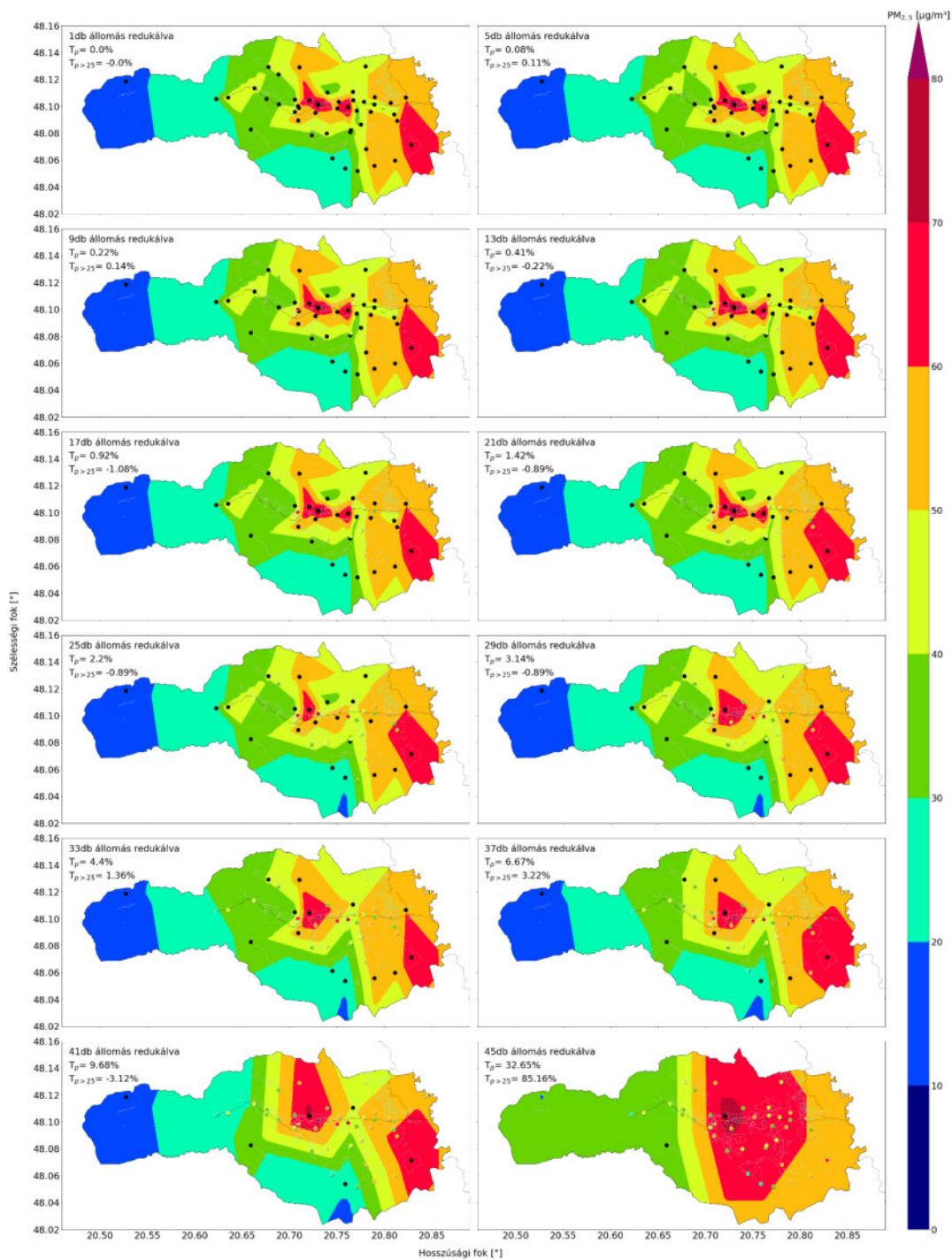


6. ábra Vizsgált tengelyek mentén elhelyezkedő és az OLM állomásokon kialakított mérőpontok óras átlagos  $PM_{2,5}$  szennyezettségi szintjei kördiagramon

#### 2.4 Mérési helyszínek számának redukálási módszere

Az egyes mérési helyszínek redukálásának, vagyis elhagyásának hatását, az adatpontokból lineáris interpolációval számított raszter alapú eloszlás térkép adatpontjainak változásán keresztül vizsgáltam. Létrehoztam különbség térképeket, melyek a teljes adatállományból és az egy-egy mérési helyszín kihagyásával készített adatokból generált eloszlás térképek különbségét mutatja. A különbséget százalékos értékben ( $T_p$  [%]) meghatároztam, mely alapján sorrendbe állítottam a mérési helyszíneket, így kifejezve redukálásuk hatáserősségét az eredeti eloszlás térképre. A legkisebb hatású mérési helyszínt elhagytam, majd újból vizsgáltam a megmaradt helyszínek hatáserősségét, melyek közül újra elhagytam a legkisebbet. Ezt folytattam az utolsó pontig, mely folyamat lépéseit a 7. ábra szemléltet. A vizsgálatot a teljes adattartományra elvégeztem. A különböző időszakok kissé eltérő eredményt adnak a redukálendő helyszínek, azok sorrendje és a hozzájuk tartozó  $T_p$  értékek tekintetében. Az, hogy milyen mértékben, vagyis hány mérési helyszínnel csökkenthető ténylegesen a mérőhálózat, függ az üzemeltető szándékától. Például az alábbiak.

- a) Mérőhálózat célja lehet a folyamatok mélyebb megértése, ekkor minden lehetséges adat felhasználása javasolt.
- b) Amennyiben a szennyezett időszakokról való tájékoztatás a cél, a kiválogatott szennyezett időszakokra meghatározott helyszínek közül érdemes redukálni, így csökkentve a hálózat üzemeltetési és adatfeldolgozási igényét.



7. ábra Mérési helyszínek redukálásának lépései négyesével lépkedve eloszlás térképen



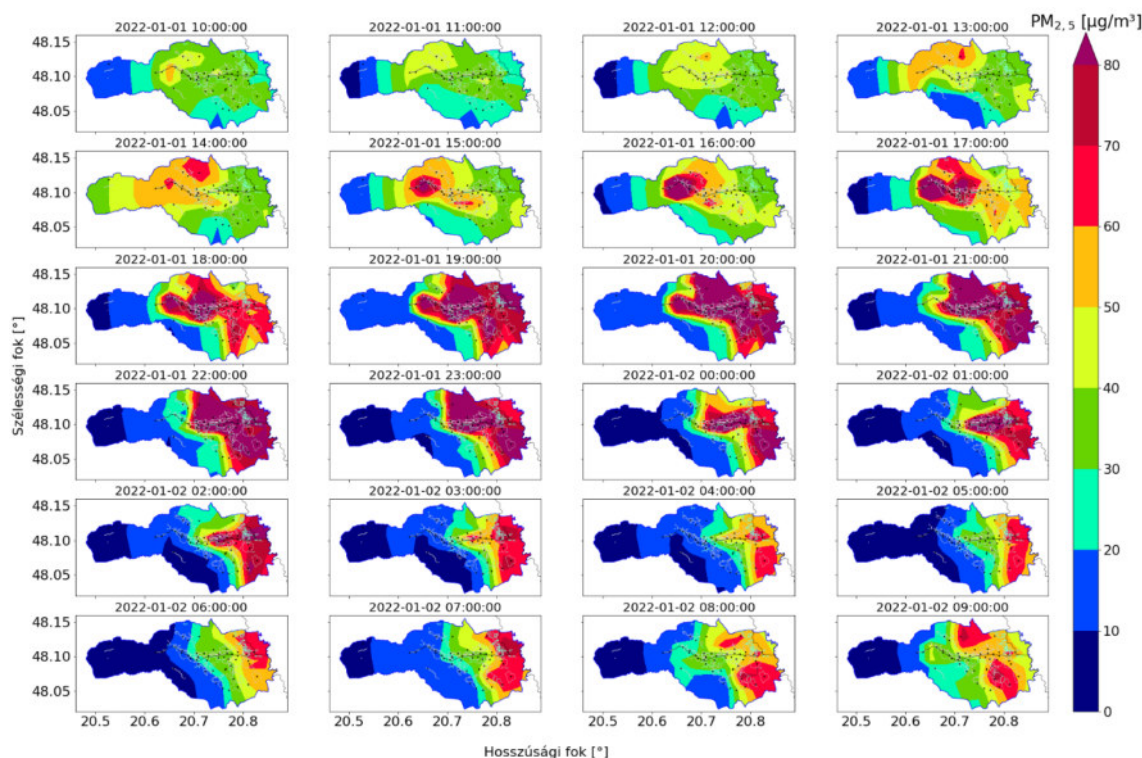
Azon időszakokban, mikor mérési helyszínek adataiból generált  $PM_{2,5}$  eloszlás térkép Miskolc közigazgatási területén belüli rasztereinek átlaga meghaladta a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, a redukálási sorban meghatározott első 20 mérési helyszínt és a hozzájuk tartozó  $T_p$  értékeket a 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat Mérési helyszínek redukálási sorenje és  $T_p$  [%] értékei

Redukálási sorrend	Mérési helyszín azonosítója	$T_p$ [%]	Redukálási sorrend	Mérési helyszín azonosítója	$T_p$ [%]
1	170	0,00	11	142	0,32
2	162	0,02	12	147	0,36
3	151	0,04	13	135	0,41
4	123	0,06	14	153	0,51
5	129	0,08	15	152	0,57
6	166	0,12	16	121	0,72
7	112	0,14	17	169	0,92
8	164	0,18	18	158	1,09
9	160	0,22	19	125	1,10
10	141	0,27	20	154	1,19

### ***2.5 Szálló por terjedés leírása eloszlás térképek alapján***

A 8. ábra egy 24 órás időtartamot mutat be az óras átlagok alapján megrajzolt 24 db eloszlás térképen keresztül. Az ábrásor 2022.01.01. 10 órától indul, ekkor a város lakott részein  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fölötti a  $PM_{2,5}$  koncentráció és a nyugati oldalon egy kisebb területen  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fölé is emelkedik. 12 órakor az északi részen található mérőállomáson emelkedik a mért koncentráció, 13 órára már  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fölé emelkedik, 14 órakor pedig tovább nő és a nyugati oldalon is folytatódik az emelkedés. 17 órára begyűrűzik a város középső területeire is, majd tovább terjed és 20 órára a lakott területek nagy részén  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fölötti értékeket láthatunk. Jellemzően ez a csúcs időszak, innen kezd kitisztulni a város nyugati oldala K felé tartva. 2022.01.02. 02:00 órakor még a város középső és keleti területein akár  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fölötti értékeket is láthatunk, a keleti oldal lakott részein pedig egy sávban már  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alattiakat. A tisztulás tovább folytatódik 6 óráig, majd 7 órakor előbb az északkeleti, 8 órakor a délkeleti végül 9 órakor a délkeleti és északi részen láthatunk koncentráció emelkedést.



8. ábra PM<sub>2,5</sub> eloszlás térképek 2022.01.01 10:00 és 2022.01.02. 09:00 között

## Hivatkozások

- [1] C. Báthory, A. Béres, and Á. B. Palotás, "Smog issues of the Sajó valley, height of the air inversion layer," in *2. EnergyWaterFoodNexus (EWFN) International Summit*, Orlando, Florida, USA, 2017.
- [2] "306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről," ed. Magyar Közlöny.
- [3] P. UNION, "Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe," *Official Journal of the European Union*, 2008.
- [4] M. Wróblewski, J. Suchomska, and K. Tamborska, "Citizens or Consumers? Air Quality Sensor Users and Their Involvement in Sensor. Community. Results from Qualitative Case Study," *Sustainability*, vol. 13, p. 11406, 2021.
- [5] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen, and M. Vogt, "Performance Assessment of a Low-Cost PM<sub>2.5</sub> Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway," *Atmosphere*, vol. 10, p. 41, 2019.
- [6] M. Blon, "Untersuchungen zur Messung von Feinstaub-Das Citizen Science Projekt luftdaten. info," ed: Nürtingen, Reutlingen, Stuttgart: Hochschulen Esslingen, 2017
- [7] F. Concas, J. Mineraud, E. Lagerspetz, S. Varjonen, X. Liu, K. Puolamäki, *et al.*, "Low-cost outdoor air quality monitoring and sensor calibration: A survey and critical analysis," *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol. 17, pp. 1-44, 2021.
- [8] F. Roberts, K. Van Valkinburgh, A. Green, C. J. Post, E. A. Mikhailova, S. Commodore, *et al.*, "Evaluation of a new low-cost particle sensor as an internet-of-things device for outdoor air quality monitoring," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 72, pp. 1219-1230, 2022.
- [9] Ron Evans, Karoline Johnson Barkjohn, Andrea Clements, Amara Holder, and S. Larkin, "AirNow fire and smoke map: extension of the US-wide correction for Purple

PM2.5 sensors," presented at the EPA Tools and Resources Webinar, webbased, 2021.

- [10] Y. Zou, J. D. Clark, and A. A. May, "A systematic investigation on the effects of temperature and relative humidity on the performance of eight low-cost particle sensors and devices," *Journal of Aerosol Science*, vol. 152, p. 105715, 2021.

### 3. Új tudományos eredmények

#### 1. Mérési módszer szálló por koncentráció mérésére

Vizsgálati módszereket dolgoztam ki és alkalmaztam a kis költségű (szenzor ár <30 USD) szenzorokkal történő szálló por koncentráció mérések alkalmazhatósága céljából. Igazoltam, hogy a kis költségű szenzorokon átáramló levegő mennyisége hatással van a mért koncentráció értékekre, ezért a stabil levegő térfogatáram érdekében a beépített ventilátor tápellátását stabilizálni szükséges. A térfogatáramot befolyásoló másik tényező a szél, amely hatás minimalizálás céljából lamellás védőburkolatot terveztem. Mérési sorozattal igazoltam, hogy a 3D nyomatási technológiával elkészített lamellás védő burkolat szélmentes időben nem befolyásolja az abban elhelyezett szenzor által mért értékeket a védőburok nélkül mérő szenzorhoz képest.

#### 2. Mérőegységek korrekciós modellje

A kiválasztott szenzorral (Plantower PMS7003) szerelt mérőegységeket klímakamrában kalibráltam. A szenzor által szolgáltatott nyers adatokat az adott szenzorra jellemző kalibrációs egyenlettel átszámítottam, majd ezeket az értékeket az ugyancsak általam meghatározott kompenzációs egyenlettel tovább korrigáltam. A nyers adatból így két lépcsőn keresztül jutottam el a mérőhálózatban vizsgált és értékelt kompenzált adatokhoz.



T.1. ábra Kompenzációs modell folyamatábrája

#### 2.1. Mérőegység kalibrációja

Kidolgoztam a mérőegységek kalibrációjának módszerét, mely szerint klímakamrában a referencia eszköz körül elhelyezett mérőegységekkel, a ventilátorral bejuttatott izobutén gáz égése során keletkező korom mennyisége állandó környezeti körülmények között mérendő.

A szenzorok helyfüggésére és a kalibráció reprodukálhatóságára vonatkozó vizsgálatok során a klímakamrában mért hőmérséklet 26 – 29 °C, a relatív páratartalom 33 – 63%, a nyomás pedig 99,2 – 100,8 kPa között változott.

Igazoltam, hogy a fenti peremfeltételek mellett a szenzorok pozíciójából és a kalibráció megismétléséből adódó eltérések nem jelentősek, vagyis a kalibráció eredményét nem befolyásolja érdemben sem a kamrán belüli elhelyezkedés, sem a mérések megismétlése, ezáltal a mérések reprodukálhatónak bizonyultak. Megállapítottam, hogy a mérőegységeket egységesen 40-50%-os relatív páratartalom és 25 °C-os hőmérséklet mellett 0-150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{PM}_{2,5}$  porkoncentráció között kell kalibrálni.

## 2.2. Mérőegység kompenzációja

Az M5-ös OLM állomás adataival történt éves összemérést felhasználva lineáris regresszió segítségével meghatároztam a környezeti paraméterek hatásának erősségét. A kalibrált értékek referenciához való jobb közelítésére  $\text{PM}_{10}$  esetében a relatív páratartalom (RH),  $\text{PM}_{2,5}$  esetében pedig a harmatpont (D) paraméterrel ellátott kompenzációs egyenletet határoztam meg, a következő táblázat szerint.

T.1. táblázat Az egyes PM frakcióhoz tartozó kompenzációs egyenletek

PM frakció	Kompenzációs egyenlet
$\text{PM}_{10}$	$PM_{10_{comp}} = 7,75 + PM_{10_{cal}} (1,4 - 0,01 * RH) - 0,01 * RH$
$\text{PM}_{2,5}$	$PM_{2,5_{comp}} = 3,53 + PM_{2,5_{cal}} (0,9 - 0,02 * D) + 0,09 * D$

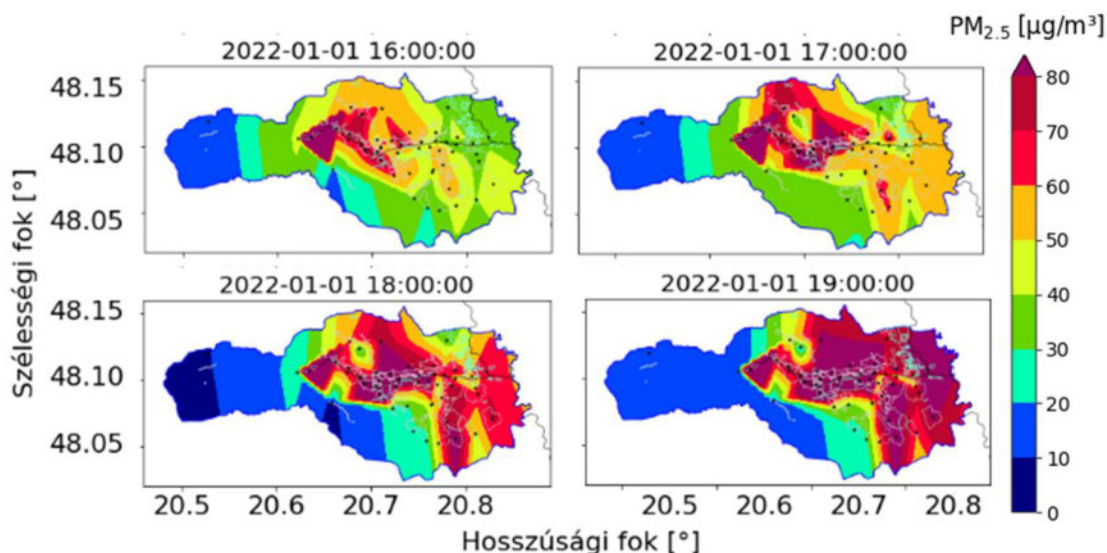
## 3. Miskolc szálló por koncentrációjának vizsgálata mérőhálózatban

A telepített mérőhálózat mérőegységeinek átlagos órás  $\text{PM}_{2,5}$  értékeiket vizsgáltam a város két fő tengelye mentén, az észak-déli és kelet-nyugati irányú tengelyen az adatrendelkezésre állás és elhelyezkedés alapján kiválasztva 3-3 mérőpontot, valamint az OLM állomásokon kialakított mérőpontokat.

Az értekezésben bemutatott mérőhálózat segítségével igazoltam, hogy a város eddig nem vizsgált területein más időintervallumokba esnek a tiszta és szennyezett időszakok, mint a hivatalos mérőállomás által reprezentált területeken, tehát a mérőhálózat a város szálló por szennyezettségi szintjéről térben és időben többlet információval szolgál az OLM állomások által nyújtott adatokhoz képest.

## 4. Szálló por terjedésének leírása eloszlás térképek alapján

A mérőhálózat adatai alapján megalkottam a vizsgált terület raszter alapú lineáris interpolációval számított eloszlás térképeit, majd igazoltam, hogy a szálló por frakciók eloszlásának térképen történő megjelenítésével leírható a városi léptékű légszennyezés terjedésének órás felbontású változása.



T.2. ábra Raszter alapú PM<sub>2.5</sub> eloszlás térképek négy egymást követő órában Miskolc közigazgatási területén megjelenítve

## 5. Mérési helyszínek számának redukálási módszere

Kidolgoztam az egyes mérési helyszínek elhagyásának (redukálásának) hatását vizsgáló módszert, az adatpontokból lineáris interpolációval számított raszter alapú eloszlás térkép adatpontjainak változásán keresztül. Különbségtérképeket hoztam létre úgy, hogy az adott mérési helyszín elhagyása előtt és utáni térképek matematikai különbség térképét képeztem. E különbség térképek felhasználásával meghatároztam egy-egy mérési helyszínre jellemző numerikus értéket ( $T_p$  [%]), amely az adott helyszín hatását számszerűsíti. A legkisebb hatású mérési helyszínt rekurzív módon elhagytam, majd újból kiválasztottam a megmaradt helyszínek közül a legkisebb hatásút. A rekurzív folyamat mindaddig folytatható, míg legalább két helyszín rendelkezésre áll. A tényleges helyszínszám meghatározása, azaz a redukció mértéke az üzemeltető mindenkori szándékának (anyagi lehetőségek, adatmennyiségre, területi lefedettségre vonatkozó igény stb.) függvénye.

## 4. Tudományos eredmények hasznosíthatósága

A miskolci szmoghelyzetek kialakulásának főbb környezeti és emberi tényezői az inverzió és elsősorban a háztartási tüzelőberendezések emissziója. Ezek előfordulását és mértékét csak becsülni tudjuk, nem áll rendelkezésre elegendő mért adat a levegőtisztaság-védelemmel foglalkozó szakemberek számára. Miként a szmoghelyzetek okozóiról, úgy a szálló por koncentráció eloszlásáról is kevés mért adatot rögzít a jogszabályoknak megfelelően telepített 3 db hivatalos (OLM) mérőállomás a város nyugati és déli oldalán.

A kiválasztási módszer eredményei alapján, a Plantower PMS7003 típusú kis költségű szenzor jó megoldást jelenthet a városi léptékű szálló por

eloszlás vizsgálatára. Egy lamellás védőburkolattal és adatfeldolgozó mikroszámítógéppel ellátott mérőegységet terveztem a szálló por, valamint a hőmérséklet, páratartalom és nyomás mérő szenzorok védelme és üzemeltetése érdekében. A mérőegységekre elvégzett ekvivalencia vizsgálattal kimutattam, hogy megfelelő ekvivalenciával rendelkeznek ahhoz, hogy egy nagy felbontású szálló por mérőhálózatban alkalmazhatóak legyenek. A kalibráció és kompenzáció lépéseiből megalkotott korrekciós modell kiküszöböli a szenzorok gyártásból adódó egyedi különbségeit és a működési elvükből adódó általános érzékenységeket.

Miskolc több pontján elhelyeztük ezeket a mérőegységeket. A város eddig nem vizsgált területein más időintervallumokba esnek a tiszta és szennyezett időszakok, mint az eddig ismert, hivatalos mérőállomás által reprezentált területeken. A mérőhálózat adataiból nagy felbontású légszennyezettségi, eloszlás térképeket készítettem, melyek alapján a szálló por terjedési és akkumulációs folyamatai megfigyelhetők. A szmogot okozó forrásokat egy emissziós kataszter, valamint a meteorológiai körülményeket is megjelenítő szennyezettségi térkép segítségével már jó eséllyel be tudnánk azonosítani. Ha tudjuk mikor, hol és miért alakulnak ki szmoghelyzetek, az hozzájárul a döntéshozók eszköztárához a probléma megértésében, megoldásában és megelőzésében. A mérőhálózat üzemeltetési költségeinek és az adatfeldolgozás erőforrásának csökkentése érdekében kidolgoztam és bemutattam a már meglévő mérési helyszínek redukálásának módszerét. A módszer alkalmas arra, hogy egy meghatározott időszakra vonatkozóan a redukálhatóság szerint sorrendbe állítsa a mérési helyeket és hozzá rendeljen egy százalékos értéket a redukálás okozta változás mértékéeként. Az, hogy milyen mértékben, vagyis hány mérési helyszínnel csökkenthető ténylegesen a mérőhálózat, függ az üzemeltető szándékától.

A kutatás során megvalósult mérőhálózat hosszútávú megfigyelésekre is alkalmas, tehát az itt bemutatott módszerek és vizsgálatok folytathatók a mérőhálózat megfelelőségének, valamint a levegőminőség változásának éveken át tartó monitorozására.

## 5. Summary

The main environmental and human factors in the development of smog situations in Miskolc are the temperature inversion and mainly emissions from household combustion equipment. We can only estimate their occurrence and extent, there is not enough available measured data for air quality specialists. The 3 official (OLM) measuring stations installed in accordance with the law on the west and south sides of the city measure small amount of data about the causes of winter smog locations and the distribution of particulate matter concentrations.

Based on the selection method's result, the Plantower PMS7003 type low-cost sensor can be a good solution for investigating the distribution of particulate matter on an urban scale. I designed a measuring unit with a lamellar protective cover and a data processing microcomputer to protect and operate the particulate matter and temperature, humidity and pressure measuring sensors. With the equivalence test carried out on the measuring units, I showed that they have sufficient equivalence to be used in a high-resolution particulate matter measurement network. From the steps of calibration and compensation, I created a correction model of the data, which eliminates the unique differences of the sensors due to their production and their general sensitivity due to their operating principle.

These measuring units were placed at several points in Miskolc. In areas of the city that have not been examined so far, the clean and polluted periods fall in different time intervals than in the areas represented by the official measuring station known so far. I created high-resolution air pollution and distribution maps from the data of the measurement network. Based on these maps, I observed and described the spreading and accumulation processes of particulate matter. With the help of an emission cadastre, or a pollution map that also displays meteorological conditions, we could probably identify the sources that cause smog. If we know when, where and why smog situations develop, it contributes to the toolbox of decision-makers in understanding, solving, and preventing the problem. In order to reduce the operational costs of the measurement network and the resources of data processing, I developed and presented the method of reducing the already existing measurement locations. The method is suitable for ordering the measurement locations according to reducibility for a specific period and assigning a percentage value as a measure of the change caused by the reduction. The extent to which the measurement network can actually be reduced, i.e. by how many measurement locations, depends on the operator's intention.

The measurement network realized during the research is also suitable for long-term observations, so the methods and tests presented here can be continued to monitor the adequacy of the measurement network and changes in air quality for years.

## **6. A disszertáció témájához kapcsolódó, megjelent publikációk**

### Folyóiratcikkek

1. Csongor Báthory, Zsolt Dobó, Attila Garami, Árpád Bence Palotás, Tóth Pál: Low-cost monitoring of atmospheric PM—development and testing, *Journal of Environmental Management*, Vol. 304., [2021], p. 114158, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114158>, Quartile<sub>(2021)</sub>: Q1
2. Báthory Csongor: A légköri inverziós réteg és mérési módszere, *Diáktudomány: A Miskolci Egyetem Tudományos Diákköri munkáiból*, Miskolc MEK, 2014., ISSN 2062-0721; VII. p. 40-45.

3. Báthory Csongor, Woperáné dr. Serédi Ágnes, Palotás Árpád Bence: Légszennyezők terjedését befolyásoló keveredési rétegvastagság közvetett vizsgálata, *Energiagazdálkodás* 59. évfolyam, 1-2. szám [2018], Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület, Budapest, ISSN 0021-0757, p. 22 -25
4. Csongor Báthory, Arpad Bence Palotas: Hotspot identification with portable low-cost particulate matter sensor, *International Journal of Energy Water Food Nexus*, Vol 1. Issue 1., [2019], p. 13-17.
5. Csongor Báthory, Péter Pecsmány, Lajos Szalontai, Árpád Bence Palotás: Stationary and mobile particulate matter concentration measurement in Miskolc, *International Journal of Engineering and Management Science*, Vol. 4. No. 4. [2019], Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, ISSN 2498-700X, p. 338-344, DOI: 10.21791/IJEMS.2019.4.38.
6. Csongor Báthory, Uramné Katalin Lantai Dezső Nagy, Zsolt Dobó, Árpád Bence Palotás: Feinstaub Sensor-Messnetz für die Stadt Miskolc, *Immissionsschutz*, Issue 1 [2021], Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, ISSN 1868-7776, p. 86-90, DOI: 10.37307/j.1868-7776.2021.02.06

#### Konferenciakiadványban publikált cikkek

1. Báthory Csongor, Palotás Árpád Bence: GPS alapú indikatív szállópor mérés - *SzámOkt 2018, XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, 28th International Conference on Computers and Education*, 2018.10.11-14., ISSN 1842-4546, p. 137-142.
2. L. Kiss Márton, Báthory Csongor, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Szállópor koncentráció mérő szenzorok összehasonlító elemzése - *SzámOkt 2018, XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, 28th International Conference on Computers and Education*, 2018.10.11-14., ISSN 1842-4546, p. 250-255.
3. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Zsolt Dobó, Palotás Árpád Bence: Preliminary Research For Low-Cost Particulate Matter Sensor Network – *EKO-DOK 2019 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering*, 2019.04.8-10., DOI:10.1051/e3sconf/201910000004
4. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Zsolt Dobó, Palotás Árpád Bence: Reliability of particulate matter sensor operation during uncomfortable weather conditions, *ECM 2019, 9th European Combustion Meeting*, Lisszabon, Portugália, 2019.04.14-17. ISSN 22671242
5. Báthory Csongor, Zsolt Dobó: Industrial air pollution indicator system with light signal, *10th European Combustion Meeting Proceedings Volume (2021)*, Nápoly, Olaszország, 2021.04.14-15.
6. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Alacsony költségű porszenzorok PM10 számítási módszerei, *Villamosmérnöki Tudományok Határok Nélkül*, Miskolci Egyetem, 2018.11.09., ISSN 2560-2713, p. 6-15.
7. Kiss L. Márton, Báthory Csongor, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Szállópor koncentráció mérő műszer páratartalom kalibrációja, *Villamosmérnöki Tudományok Határok Nélkül*, Miskolci Egyetem, 2018.11.09., ISSN 2560-2713, p. 138-145.
8. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Honeywell pormérő szenzor kültéri alkalmazhatóságának előzetes vizsgálata, *4. MÉB Égéstudományi Konferencia*, Miskolci Egyetem, 2018.11.10., ISBN 978-615-00-4216-9 (CD-ROM), Magyar Égéstudományi Bizottság