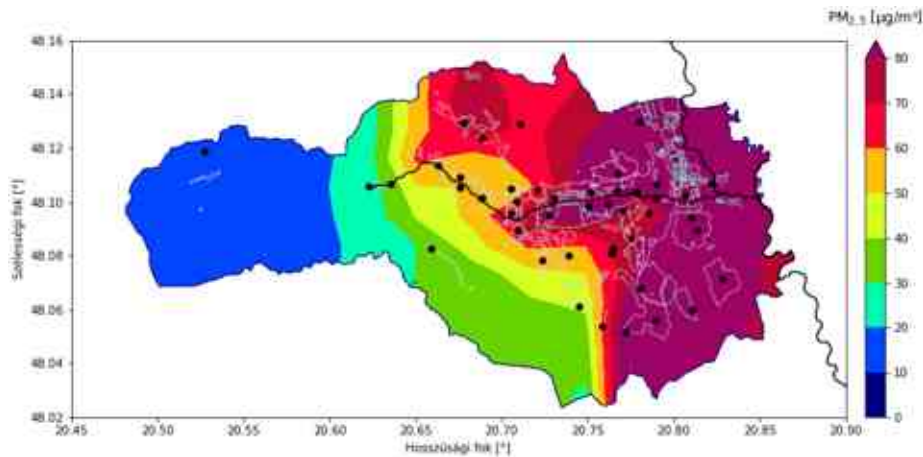


MISKOLCI EGYETEM
ANYAG- ÉS VEGYÉSZMÉRNÖKI KAR
KERPELY ANTAL ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA
TÜZELÉSTANI ÉS HŐENERGIA INTÉZETI TANSZÉK



PhD értekezés

Szálló por mérőhálózat fejlesztése Miskolcon



Készítette: Báthory Csongor
Témavezető: Prof. Dr. Palotás Árpád Bence
Doktori Iskola vezetője: Prof. Dr. Mertinger Valéria

Miskolc
2023.

Tartalom

1	Bevezetés és célkitűzés	5
2	Szakirodalmi áttekintés	6
2.1	Szálló por (PM)	6
2.1.1	Jogszabályi követelmények.....	7
2.1.2	Szálló por mérési módszerei.....	9
2.2	Low-cost szálló por mérő szenzorok.....	10
2.3	Mérőhálózatok.....	11
2.3.1	Országos Levegőminőség Mérőhálózat.....	12
2.3.2	Purple Air	13
2.3.3	Sensor.Community	16
2.3.4	Airly.....	17
2.3.5	Szenzoros PM mérés Magyarországon.....	18
2.3.6	LIFE HungAIRy	20
3	Szálló por helyzet Miskolcon	21
3.1	Szálló por trendek Miskolcon.....	22
3.2	Szmoghelyzetek Miskolcon	24
3.3	A mérések bővítésének indokoltsága	25
4	Felhasznált eszközök	27
4.1	Szenzorok	27
4.2	Mérőegység.....	30
4.3	Klímakamra	31
4.4	Referencia eszközök.....	32
4.4.1	TSI DustTrak	32
4.4.2	OLM állomások eszközei.....	32
4.5	Mérőhálózat.....	33
5	Mérési módszerek és a mért eredmények.....	37
5.1	A szenzor kiválasztása	37
5.2	Mérőegység vizsgálata	39
5.2.1	Védőburkolat-hatása	39
5.2.2	Ekvivalencia vizsgálat.....	43

5.3	Mérőegység kalibrációja	45
5.4	Mérőegységek kompenzációja	52
5.5	Mérőegységek korrekciós modellje	56
6	Mérőhálózat vizsgálata.....	59
6.1	Idő alapú vizsgálat.....	59
6.2	Tér alapú vizsgálat.....	64
6.3	Eloszlás térképek.....	65
6.4	Mérési helyszínek redukálása	67
6.5	Időben és térben való vizsgálat.....	73
7	Összefoglalás	76
8	Summary.....	77
9	Új tudományos eredmények	78
10	Felhasznált irodalom	81
11	Disszertáció témájában született saját publikációk és előadások	91
12	Köszönetnyilvánítás.....	95
13	Mellékletek.....	96
13.1	Az adatok statisztikai mutatószámai.....	96
13.2	Kalibrációs jegyzőkönyv	99
13.3	Éves összemérés órás álagainak kapcsolata a környezeti paraméterekkel.....	104
13.4	Mérési helyszín redukálásának lépései.....	106

Témavezetői ajánlás

Báthory Csongor 1988-ban született Miskolcon. Szakmai kapcsolatunk egyetemi tanulmányai során kezdődtek, ekkor Intézetünkben készítette TDK dolgozatát és gyakran konzultáltunk. Hőenergiagazdálkodás – képlékenyalakítás szakirányon végzett anyagmérnöki alapszakon 2012-ben, majd kohómérnöki mester szakon 2014-ben.

Végzés után Budapestre költözött, ahol levegőtisztaság-védelmi területen helyezkedett el. Másfél évig dolgozott a Környezetvédelmi Főfelügyelőségénél, mint levegőminőségi szakértő, majd levegőszennyezés modellezésével foglalkozott a Vibrocomp Kft-nél. A vállalatnál eltöltött két és fél éves időszak alatt porszennyezések mérésére szakosodott, mely munka során, pl. a cég által üzemeltetett műszereket tesztelt Budapesten és Dubaiban. Ennek keretében részt vett beltéri és kültéri légszennyezettség és zaj mérések végzésében az Egyesült Arab Emírség területén (Expo2020 építkezés, hulladéklerakók és szennyvíztelepek monitoringja, toxikus szennyezők mérése városszerte).

Doktori témaválasztása a korábbi tapasztalataira épül. 2017-ben a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán működő Kerpely Antal Anyagtudományok és -technológiák Doktori Iskolában kezdte meg nappali munkarendű állami finanszírozású doktori képzését. 2019. júniusában sikeres komplex vizsgával a doktori képzés második szakaszába folytatta kutatását.

Eddigi publikációs tevékenységének eredményei: 1 (Q1) első szerzős nemzetközi rangos folyóirat cikk, 5 további folyóirat cikk, 5 nemzetközi konferencia kiadványban és 3 hazai konferencia kiadványban megjelent közlemény, 5 nemzetközi konferencia előadás és 5 poszter előadás, 7 hazai konferencia előadás és 8 poszter előadás. 2018-ban a Jedlik Ányos Szakmai Napokon 3. helyet ért el, majd elnyerte a 2018-as *Start-Me Up!* versenyen a Bay Zoltán Kft. különdíját és a 2019-es HackYEAH verseny különdíját is. 2018-ban és 2020-ban ÚNKP ösztöndíjat, 2019-ben pedig Nemzeti Tehetség Program hallgatói ösztöndíját kapta meg.

2017 és 2018 során közös szakmai előkészítés után sikeresen pályáztunk a közvetlen brüsszeli finanszírozású LIFE IP programban. A „HUNGAIRY” projektet a Herman Ottó Intézet vezeti, a konzorciumi tagok száma 21, köztük Miskolc és Kaposvár város, ahol újszerű megoldásként, nagy felbontású levegőminőség monitorrendszer tervezünk kiépíteni. E feladatok szakmai megvalósítását az ugyancsak konzorciumi tag Miskolci Egyetem végzi. Az egyetemi projekt operatív vezetői feladatait három éven keresztül ellátta. Az értekezésben bemutatott kutatásai is e projekt szakmai feladataihoz kapcsolódnak. Szakmai munkáját részben Dr. Dobó Zsolt tudományos munkatárs, részben témavezetőként én segítettem.

Új tudományos eredményei közvetlenül hasznosíthatók és hozzájárulnak nemcsak a levegő minőségének javulásához, de a szálló por terjedési mechanizmusának jobb megismeréséhez is.

Miskolc, 2023. június 10.

Dr. Palotás Árpád Bence
egyetemi tanár

Rövidítések jegyzéke

AQD	Air Quality Directive, A környezeti levegő minőségéről szóló direktíva
AQI	Air Quality Index, Levegőminőségi index
CEN	Comité Européen de Normalisation, Európai Szabványügyi Bizottság
CPD	Calibrated Portable Devices, Kalibrált asztali ill. kézi műszerek
CV	Coefficient of Variation, Szóródási együttható
ECF	European Climate Foundation, Európai Éghajlatvédelmi Alapítvány
EEA	European Environment Agency, Európai Környezetvédelmi Ügynökség
EU	European Union, Európai Unió
EU-DEM	European Digital Elevation Model, Európai Digitális Domborzati Modell
FEM	Federal-Equivalent Method, Amerikai szövetségi ekvivalens módszerek
FRM	Federal Reference Method, Amerikai szövetségi referencia módszerek
GPRS	General Packet Radio Services, Csomag-alapú vezeték nélküli szolgáltatás
IDW	Inverse Distance Weighting, Inverz távolság szerinti súlyozás
IRED	Infrared, Infravörös
KvVM	Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium
LCS	Low Cost Sensors, Kis bekerülési költségű szenzorok
LoRaWAN	Long Range Wide Area Networks Explained
LRK	Levegőtisztaság-védelmi Referencia Központ
MAE	Mean Absolute Error, Átlagos abszolút hiba
MAPE	Mean Absolute Percentage Error, Átlagos relatív hiba százalék
MBE	Mean Bias Error, Átlagos hiba
MLH	Mixing Layer Heights, Keveredési réteg vastagság
MRE	Mean Relative Error, Átlagos relatív hiba
MSE	Mean Squared Error, Átlagos négyzetes hiba
NB-IoT	Narrowband Internet of things
OLM	Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat
OMSZ	Országos Meteorológiai Szolgálat
PM	Particulate Matter, Szálló por
PM ₁	Az 1 µm és annál kisebb átmérőjű részecskék
PM ₁₀	A 10 µm és annál kisebb átmérőjű részecskék
PM _{2,5}	A 2,5 µm és annál kisebb átmérőjű részecskék
REU	Relative Expanded Uncertainty, Relatív kiterjesztett mérési bizonytalanság
RH	Relative Humidity, Relatív páratartalom
RMSE	Root Mean Squared Error, Átlagos négyzetes hiba gyöke
RSS	Residual Sum of Square, Eltérések négyzetösszege
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance, Kúpos elemű oszcilláló mikromérlegelés
TSI	TSI DustTrak 8543-M
US EPA	United States Environmental Protection Agency, Egyesült Államok Környezetvédelmi Hatósága
VM	Vidékfejlesztési Minisztérium
WHO	World Health Organization, Egészségügyi Világszervezet

1 Bevezetés és 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]. Arra a következtetésre jutottam, hogy a kedvezőtlen időjárási körülmények mellett, mint a szélcsend és az inverzió, a helyi szennyezők felhalmozódása okozza a légszennyezők koncentrációjának emelkedését. 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.

Az elektronika fejlődésével megjelentek olyan szenzoros megoldások a piacon, melyek kis bekerülési költségükhöz képest megbízható adatokat ígérnek. 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, valamint a Miskolcra jellemző szálló por trendeket. Értekezésemben először ezeket foglalom össze a szakirodalmi áttekintésben. A már meglévő mérőhálózatokról kevés tudományos mélységű publikáció volt elérhető, így célként tűztem ki, hogy a miskolci hálózat fejlesztési folyamata és eredményeinek feldolgozása a kutatás követelményeinek megfelelően jól dokumentált és kellő mélységű legyen.

Értekezésemben bemutatom a piacon kapható szálló por mérésére alkalmas szenzorok jellemzőit az irodalom 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. Az előzetes mérések és az irodalom alapján tudtam, hogy a szenzorok érzékenyek a környezeti tényezők változására, így egy olyan korrekciós modellt akartam megvalósítani a mérőegységek adataira, ami figyelembe veszi a szenzorok gyártásából adódó különbségeket (egyedi kalibráció) és a működési elvükből adódó érzékenységeket (környezeti kompenzáció), valamint átültethető más területeken üzemeltetett hálózatokra. Részletesen bemutatom a kidolgozott korrekciós modellt és statisztikai mutatók alapján megfelelőségét a referencia eszközökhöz képest. A modell segítségével korrigált adatok lehetőséget adnak arra, hogy időben és térben is vizsgáljam, valamint eloszlás térképen ábrázoljam a szálló por koncentrációt.

A korrigált eredmények alapján a 2021.09.01 – 2022.03.30. közötti időszakra vonatkozóan megállapításokat teszek Miskolc szálló por koncentrációjának változására, trendjének alakulására. Bemutatom azt a módszert, mellyel a már meglévő mérési helyszínek száma redukálható, így csökkentve az üzemeltetési költségeket, anélkül, hogy jelentős információt vesztenénk a mérőhálózat adatbázisából. Az eredményeim alapján végezetül kitérek a kutatás új tudományos eredményeinek bemutatására.

2 Szakirodalmi áttekintés

2.1 Szálló por (PM)

A PM (az angol, „particulate matter” rövidítéséből) a levegőben lebegő szilárd és folyékony (aeroszol) részecskék gyűjtőneve. Magyarországon a „szálló por” elnevezés terjedt el az ülepedő portól való megkülönböztetés érdekében. A PM₁₀ részecskék átmérője 10 µm vagy annál kisebb. Ezek a részecskék elég kicsik ahhoz, hogy belélegzéskor átjussanak az orron és elérjenek a tüdőig. A PM₁₀ részecskék lehetséges forrásai lehetnek különböző aprító és törő műveletek, valamint a járművek által felkavart por. A pollen, a penészgomba, a növényi és állati eredetű részecskék szintén PM₁₀-hez tartoznak (1. ábra). A közösségi jogból átültetett definíció szerint a PM₁₀ a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a PM₁₀ mintavételének és mérésének referenciamódszerére az MSZ EN 12341:2001 szabványban meghatározott 10µm aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn. A PM_{2,5} részecskék 2,5 µm átmérőjű vagy attól kisebb finomrészecskék, a jogszabályi környezetben a PM₁₀-hez hasonlóan definiálják. [2]



1. ábra PM₁₀ és PM_{2,5} frakciók méretének viszonya az emberi hajhoz és finom homokhoz [3]

A szálló por az égetés minden fajtája során keletkezik, ideértve a gépjárműveket, az erőműveket, a lakossági tüzelést, a hulladékok eltüzelését, az erdőtüzeket, a mezőgazdasági égetést és néhány ipari folyamatot. A tüzelési folyamatokon túl a közúti közlekedés, poros utak és ipari technológiák, mint bányászat, cementgyártás, kohászat és a természetes források, mint talajerózió, vulkáni tevékenység járulnak hozzá a szálló por koncentrációjához a levegőben. Amíg a PM₁₀ részecskék a tüdőben maradnak, a PM_{2,5} részecskék ennél veszélyesebbek, ugyanis a tüdőből bekerülhetnek a véráramba. A PM₁ részecskék 1 µm és annál kisebb átmérőjűek. Ezek az ún. ultrafinom részecskék a test bármely részébe (például az agyba is) eljuthatnak és okozhatnak kóros elváltozásokat [4]. A PM₁ részecskék a lakossági fűtésből és égetésből, a közlekedésből, építési tevékenységekből és néhány gyár kibocsátásából származnak [5]. A továbbiakban a szálló port, mint gyűjtőfogalom használom a PM₁₀, PM_{2,5} és PM₁ frakciókra.

A szálló por koncentráció a levegőminőség egyik legfontosabb mutatójának tekinthető az emberi egészségre [6] , a láthatóságra [7] és az éghajlatra gyakorolt hatása [8-10] miatt. Egészségügyi szempontból a megemelkedett PM koncentráció negatív egészségügyi hatásai többek között az aritmia, szívbetegségek, szívritmuszavar, tüdőrák és mortalitás [11-14]. Elsősorban e súlyos következmények miatt szabályozza a PM₁₀ valamint a PM_{2,5} környezeti koncentrációját pl. az Egyesült Államok Környezetvédelmi Hatósága (United States Environmental Protection Agency, US EPA [15]), az Európai Unió által kibocsátott irányelvek és a magyar jogszabályok, de ad erre ajánlásokat az Egészségügyi Világszervezet (World Health Organization, WHO [16]) is.

2.1.1 Jogszabályi követelmények

Magyarországra az alábbi EU-s irányelvek vonatkoznak a levegő minőségével kapcsolatban:

- AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2008/50/EK IRÁNYELVE (Air Quality Directive 2008/50/EC, AQD [17])
(2008. május 21.)
a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról
- AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2004/107/EK IRÁNYELV [18]
(2004. december 15.)
a környezeti levegőben található arzénről, kadmiumról, higanyról, nikkelről és policiklusos aromás szénhidrogénekről
- A BIZOTTSÁG (EU) 2015/1480 IRÁNYELVE [19]
(2015. augusztus 28.)
a környezeti levegő minőségének vizsgálata keretében alkalmazott referencia-módszereket, adathitelesítést és mintavételi pontok elhelyezkedését meghatározó szabályok tekintetében a 2004/107/EK és a 2008/50/EK irányelv egyes mellékleteinek módosításáról (EGT-vonatkozású szöveg)
- A BIZOTTSÁG VÉGREHAJTÁSI HATÁROZATA [20]
(2011. december 12.)
a 2004/107/EK és a 2008/50/EK európai parlamenti és tanácsi irányelvre vonatkozó szabályoknak a környezeti levegő minőségére vonatkozó kölcsönös információcsere és jelentéstétel tekintetében történő megállapításáról

A levegőszennyezettség vizsgálatával kapcsolatos hatályos jogszabályok és irányelvek idehaza:

- 4/2002. (X. 7.) KvVM rendelet a légszennyezettségi agglomerációk és zónák kijelöléséről [21]
- 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről [2]
- 4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről [22]
- 6/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint és a helyhez kötött légszennyező források kibocsátásának vizsgálatával, ellenőrzésével, értékelésével kapcsolatos szabályokról [23]

Az egyes szálló por frakciókra vonatkozó egészségügyi határértékeket a 1. táblázat a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet alapján ismerteti. Láthatjuk, hogy a PM_{2,5}-re nincs napi határérték előírva, a PM₁-re pedig jelenleg még előírás sincs.

1. táblázat Szálló por frakciók egészségügyi határértékei

Szálló por frakció	Éves egészségügyi határérték	24 órás egészségügyi határérték
PM ₁₀	40 µg/m ³	50 µg/m ³ (a naptári év alatt 35-nél többször nem léphető túl)
PM _{2,5}	25 µg/m ³	-
PM ₁	-	-

A 6/2011. (I. 14.) VM rendelet ismerteti az indikatív és a helyhez kötött mérés fogalmát.

2. § (1) c) indikatív mérés: olyan mérés, amely a helyhez kötött méréshez képest kevésbé szigorú adatminőségi célkitűzésnek felel meg.

9. § (3) b) a helyhez kötött méréseket modellezési technikákkal, illetve indikatív mérésekkel ki lehet egészíteni annak érdekében, hogy ezek megfelelő információt nyújtsanak a levegő minőségének térbeli eloszlásáról;

Szálló por adatminőségi célkitűzéseket a 6/2011. (I. 14.) VM rendelet 8. melléklete ismerteti az indikatív mérésekre is (2. táblázat). Ez esetben a mérés bizonytalanságát 50%-ban határozza meg.

2. táblázat A szálló por adatminőségi célkitűzései

Szálló por (PM ₁₀ /PM _{2,5})	
Helyhez kötött mérések	
Bizonytalanság	25%
Minimális adat rendelkezésre állás	90%
Minimális mérési időszak:	
– városi háttér és közlekedés	-
– ipari helyszínek	-
Indikatív mérések	
Bizonytalanság	50%
Minimális adat rendelkezésre állás	90%
Minimális mérési időszak	14% (Az év folyamán egyenletesen elosztott heti egy véletlenszerű mérés vagy az év folyamán egyenletesen elosztott nyolc hét)
Modellezési bizonytalanság	
Napi átlagértékek	még nem határozták meg
Éves átlagértékek	50%
Objektív becslés	
Bizonytalanság	100%

Az egészségügyi határértékekkel kapcsolatos adatok összesítése és a statisztikai paraméterek kiszámítása során az érvényesség ellenőrzéséhez szükséges követelményeket is a 6/2011. (I. 14.) VM rendelet 8. mellékletében találjuk. Az 1 órás értékekhez 75%-os (45 perc) érvényes adathányad, a 24 órás értékekhez az 1 órás értékek 75%-a (azaz legalább 18 darab 1 órás érték), az éves középértékhez pedig az egész évben mért 1 órás értékek vagy (ha ez nem áll rendelkezésre) 24 órás értékek 90%-a szükséges (az éves középérték kiszámítására vonatkozó követelmények nem foglalja magában a kalibrálás vagy az eszközök szokásos karbantartása miatt bekövetkezett adatvesztést).

2.1.2 Szálló por mérési módszerei

Az előírásoknak való megfelelést az amerikai szövetségi referencia módszerek (Federal Reference Method, FRM [24]) vagy a környezeti levegő minőségéről szóló direktíva (Air Quality Directive, AQD [17]) alapján ellenőrzik a környezetvédelmi hatóságok. A 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet szerint a PM₁₀ a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a PM₁₀ mintavételének és mérésének referenciamódszerére az MSZ EN 12341:2001 szabványban meghatározott 10 µm aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn; a PM_{2,5} a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a PM_{2,5} mintavételének és mérésének referenciamódszerére az MSZ EN 14907:2006 szabványban meghatározott 2,5 µm aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn. A szabványoknak megfelelően a gravimetriás módszer a legmegbízhatóbb, melynél előleválasztó és szűrő segítségével gyűjtik a megfelelő átmérőjű szálló port, és gravimetriás módszerrel mérik a PM tömegét és számolják az átáramoltatott levegő mennyiségéből a szálló por koncentráció órás, napi, valamint éves értékét [25]. E mellett léteznek a US EPA által jóváhagyott un. szövetségi-ekvivalens módszerek (Federal-Equivalent Method, FEM [24]) a PM koncentráció mérésére órás adatokat is tudnak szolgáltatni [26]. A FEM-re jellemző módszerek az FRM-től és az EN 12341:2001 ill. EN 14907:2006 szabvány gravimetriás módszerétől eltérő mérési elv szerint működnek, úgymint optikai detektálás [27], béta-sugár abszorpció [28] vagy kúpos elemű oszcilláló mikromérlegelés (Tapered Element Oscillating Microbalance, TEOM [29]) stb., szigorú követelményeknek megfelelően. A műszerek beszerzési árakat tekintve közel azonosak az FRM eszközökéhez, azonban könnyebben kezelhetők és praktikusabbak, amennyiben célunk a folyamatos monitorozás. A piacon léteznek laboratóriumban kalibrált asztali ill. kézi műszerek (Calibrated Portable Devices, CPD), melyek alkalmasak szálló por detektálására, áruk pedig egy nagyságrenddel kisebb az előzőkénél, a mért eredmények azonban nem elfogadottak hatósági eljárásoknál. Még egy nagyságrenddel olcsóbb áron (20-30 USD) beszerezhető porszenzorok (Low Cost Sensors, LCS), melyek egy része kalibrált, azonban kalibrációjuk nem dokumentált és nem megbízható (2. ábra). Az AQD, és a magyar jogszabályok lehetőséget adnak kiegészítő technikák, úgymint levegőminőségi modellek és indikatív mérések használatához. Ilyen indikatív mérésre alkalmasak lehetnek az alacsony költségű porszenzorok is. Ennek jogszabályi, eljárástani háttere jelenleg kidolgozás alatt áll az EU megbízott munkacsoportjainál (CEN/TC 264/WG 42 [30]). A jogszabályi háttér rendezetlensége miatt nincs egységes, szabványba foglalt, elvárt módszer az olcsó szenzorok megfelelőségének vizsgálatára



2. ábra Szálló por mérő berendezések és nagyságrendi áruk

2.2 Low-cost szálló por mérő szenzorok

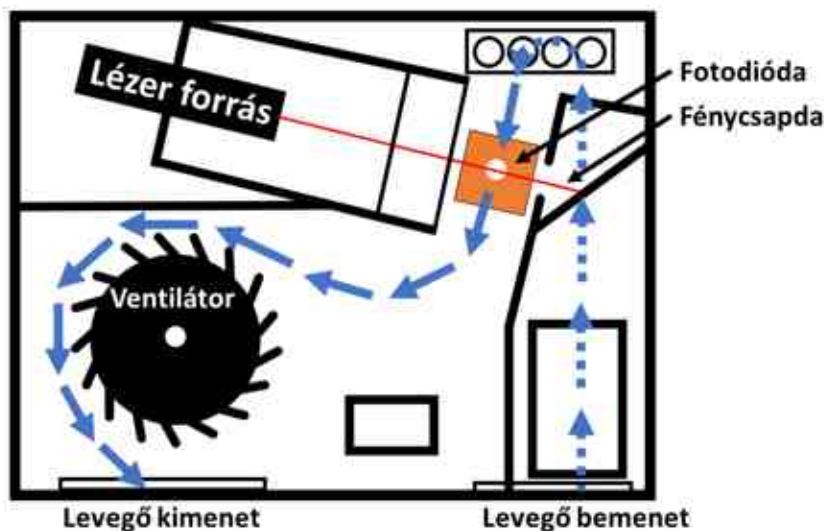
A low-cost, vagyis kis bekerülési költségű szenzorok a chip és az elektronikai gyártás technológia fejlődésével egyre olcsóbbá, könnyebben és gyorsabban előállíthatóvá váltak. A 2.3 fejezetben bemutatott mérőhálózatok is ilyen low-cost szenzorokat használnak a PM érzékelésre. Az ezekhez hasonló szenzorokat eredetileg légtechnikai érzékelésre, az épületszellőztetés minőségének, szükségességének meghatározására használták, alapvetően a légcsatornáknak. A folyamatos mérés kivitelezése érdekében a levegőben lévő részecskéket egy fényforrás segítségével megvilágítják és a részecskékről visszavert, szóródó sugarakat fotodióda segítségével detektálják. A levegőt ventilátor, vagy fűtő ellenállás segítségével áramoltatják, a fényforrás pedig lehet például infravörös fényforrás vagy lézer. Az 3. ábra a ventilátorral és lézer fényforrással szerelt típus működési elvét sematikus módon mutatja be. Az egyes típusok számos laboratóriumi és környezeti vizsgálaton estek át az elmúlt néhány év során szerte a világban, különböző berendezésekben és körülmények között [31-40].

Alfano és társai által 2020-ban összegyűjtött vizsgálatok [41, 42] alapján az alábbi fő megállapításokat lehet tenni a low-cost PM szenzorokkal kapcsolatban:

- A relatív páratartalom kulcsfontosságú környezeti paraméter, 85%-os páratartalom felett a szenzorok pontossága gyorsan romlik.
- A gyors mintavételi idők használata és az adatok átlagolása növeli a PM mérések pontosságát, különösen alacsony PM koncentrációknál ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $\text{PM}_{2,5}$ esetében), ahol a szenzorok pontossága a legrosszabb.
- Az összes szenzor a $\text{PM}_{2,5}$ -re mutatja a legjobb teljesítményt.
- A szenzorok gyári kalibrációja egy általános ajánlás, és csak korlátozott feltételek mellett biztosít jó pontosságot.

- Ugyanazon szenzor márkán és modellen belül a minőségi paraméterek eltérőek lehetnek. Ezért minden egyes érzékelő minőségi paramétereinek ellenőrzésére laboratóriumi vizsgálatot, kalibrációt kell végezni.

Speciális szezonális kompenzálásra van szükség a terepen a legjobb teljesítmény eléréséhez a PM tipológiájában és a páratartalom-interferenciában bekövetkező eltérések miatt.



3. ábra Ventilátorral és lézeres fényforrással szerelt low-cost PM szenzor sematikus ábrája

2.3 Mérőhálózatok

Hazánkban a levegőminőség mérését, értékelését az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) végzi. A hálózat alapvetően két részből áll:

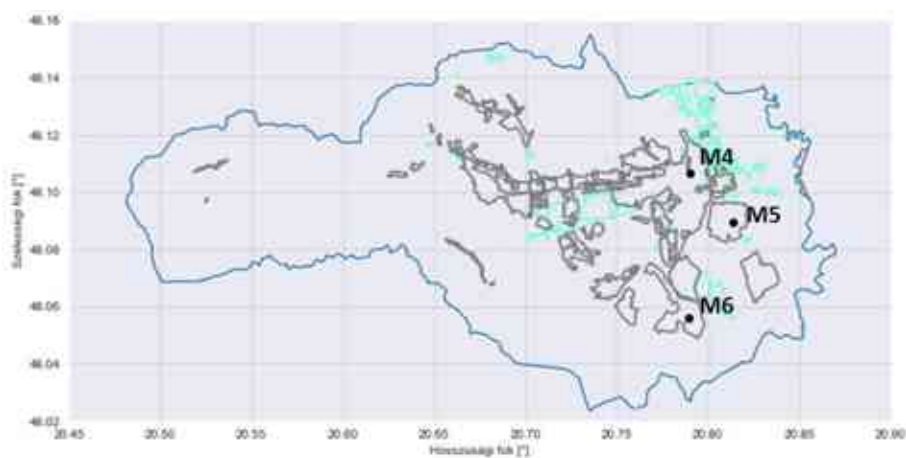
- automata állomások folyamatos mérést végeznek, melyek a légszennyező komponensek széles körét ölelik fel,
- a manuális hálózat (RIV) pontjain gyűjtött minták elemzése laboratóriumban történik, és nitrogén-dioxid, kivételes helyeken ülepedő por összetevőkre korlátozódik.

A hivatalos és kötelező mérések mellett egyre jobban előtérbe kerülnek a nem hivatalos, magán, közösségi és profitorientált mérések is, melyek alacsony költségű levegőérzékelőket (szenzorok) használnak. Világszerte és Európában is több nagyvárosban (Barcelona, Belgrád, Nowy Sącz, Skopje, Edinburgh, Haifa, Ljubljana, Oslo, Ostrava, Bécs, Kalifornia, Hong Kong) van példa ilyen szenzor alapú légszennyezettségi mérésekre [43-52]. A low-cost szenzorok kis méretüknek köszönhetően könnyen felszerelhetők, mobilizálhatók, így akár a lakosság számára is elérhetővé vált a napi bejárt útvonal levegőminőségének megismerésére, expozíció vizsgálatra, valamint akár vertikális, ballonos mérések kivitelezéséhez is [53-56]. Jelenleg egy paradigmaváltást tapasztalunk abban, hogy hogyan, mivel és ki figyeli a levegő minőségét [57-59]. A szenzorok adatai módot nyújthatnak a légszennyezés jobb megértésére és az emberi egészség védelmére. Számos laboratóriumi és környezeti mérés, kutatás foglalkozik a szenzorok alkalmazhatóságával. [60-66].

2.3.1 Országos Levegőminőség Mérőhálózat

Az OLM hálózat szakmai irányítása korábban az Agrárminisztériumhoz, jelenleg az Energiaügyi Minisztérium tartozik, a rendszer szakmai irányításának operatív, valamint a minőségirányítás feladatait az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) alá tartozó Levegőtisztaság-védelmi Referencia Központ (LRK) látja el. A mérőállomások és pontok üzemeltetése a vármegyei kormányhivatalok (korábban: Környezetvédelmi és Természetvédelmi Felügyelőségek) feladata, a hálózat egyes háttérállomásainak üzemeltetése (K-pusztá, Farkasfa, Hortobágy) az OMSZ-hoz tartozik. A vonatkozó jogszabály (306/2010. (XII.23.) Korm. rendelet) értelmében „Magyarország területén az országos légszennyezettség értékelése érdekében a levegőterheltségi szintet és a légszennyezettségi határértékek betartását az OLM vizsgálja”. Ennek megfelelően kizárólag az OLM rendelkezik folyamatos levegőminőségi adatokkal.

Miskolcon három helyen működtet automata mérőállomást az OLM, melyek közül mindhárom méri az óras PM_{10} koncentrációt, az M4 és M5 jelölésű pedig az óras $PM_{2,5}$ koncentrációt is a jellemző gáz halmazállapotú légszennyezők mellett. Az állomások helyét a 4. ábra fekete pontokkal jelöli. A mérőhálózat óras, valamint napi adatai alapján történik a nyilvánosság tájékoztatása és az önkormányzatok környezetvédelmi tervezése. Az adatok a mérőhálózat elhelyezkedéséből adódóan alacsony felbontásúak, nem reprezentálják pontosan a légszennyezők eloszlását a városon belül [67, 68]. Így a levegőterhelés forrásait és azok mennyiségi eloszlását sem ismerhetjük meg részletesen a néhány pont mérése alapján, csak közvetve figyelhetjük a közlekedéssel [69] és fűtéssel [70] összefüggő légszennyezés mértékét.



4. ábra Miskolci automata OLM mérőállomások elhelyezkedése

3. táblázat Miskolci automata OLM mérőállomások

Borsod-Abaúj-Zemplén Vármegyei Kormányhivatal			Szennyezők									
Város	Cím	Állomás típusa	NO	NO ₂	NO _x	SO ₂	CO	O ₃	PM ₁₀	PM _{2,5}	VOC	BTEX
Miskolc	Búza tér (M4)	városi közlekedési	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x
Miskolc-Görömböly	Lavotta utca (M6)	külvárosi háttér	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-
Miskolc-Martinkertváros	Alföldi utca (M5)	külvárosi háttér	x	x	x	x	x	-	x	x	-	-
Mobil 1	változó helyszín	változó	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x

Ahogy a 4. ábra mutatja, a három mérőállomás Miskolcon a belvárosi, észak-déli tengely mentén mér, azonban a város kelet-nyugati tengely területein nem. A rendelkezésre álló mobil mérőkocsi lehetőséget ad arra, hogy egy-egy fel nem mért területet, vagy panaszt vizsgáljanak az illetékességi terület. A PM koncentrációk ilyen kis térbeli és időbeli felbontása gátat szab az egyéni PM-expozíció becslésnek [69, 71], a PM egészségügyi hatásait kimutató epidemiológiai vizsgálatoknak [72], a kibocsátási, emissziós leltár, a légszennyezettségi modellek verifikálásának és a kibocsátás-csökkentő intézkedések hatékonyságának, megértésének egyaránt.

2.3.2 Purple Air

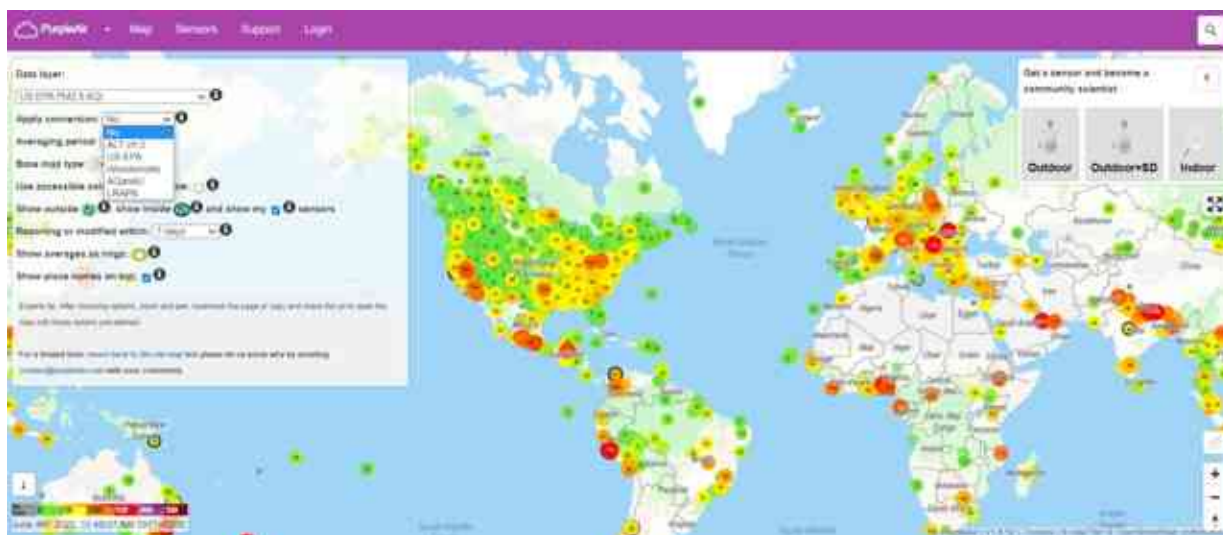
Az egyik legelterjedtebb és legrégebb low-cost PM szenzoros mérőhálózat az amerikai PurpleAir. A 2015-től működő rendszer jelenleg több mint 10.000 mérőegységet (5. ábra) integrál a világ minden tájáról. A legújabb PurpleAir szenzorok két lézeres részecskeszámláló alapú PM szenzorral (Plantower PMS5003), egy nyomás, hőmérséklet és páratartalom szenzorral (Bosch BME280) és egy WiFi képes vezérlővel vannak felszerelve. Utóbbi biztosítja az adatok feltöltését a felhőbe és a valós idejű működést. A kültéri PurpleAir szenzorok alacsony árukkal (~270 USD) lehetővé tették, hogy először USA, majd világszerte több ezer eszköz nyilvános adatokat biztosítson a levegő minőségéről. A nagy területi lefedettségnek köszönhetően az USA több területén vizsgálták a szenzorokat kültéri mérési körülmények között, többek között Coloradoban [73, 74], Utahban [73, 75, 76], Pennsylvániában [39], Észak-Karolinában [77] és Kaliforniában [73, 78-82], ahol a legtöbb eszköz és a vizsgálati munka történt.



5. ábra PurpleAir mérőegysége [83]

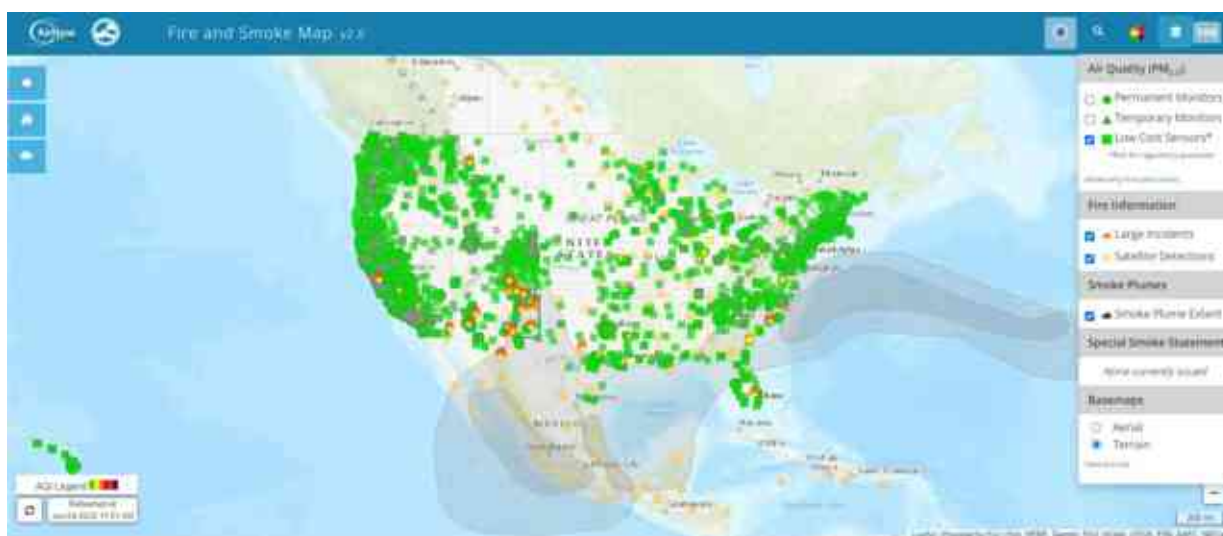
Ezen túl a világ számos pontján vizsgálták viselkedésüket, például Koreában [84], Görögországban [85], Ugandában [86] és Ausztráliában [87]. További vizsgálatok folytak erdőtüzek közelében [31, 78, 88], beltéri [89] és laboratóriumi körülmények [74, 75, 80, 84, 90, 91] között. A PurpleAir által használt Plantower PMS5003-as típusú szenzor teljesítményét más kereskedelmi eszközben és egyedi épített eszközben is vizsgálták [35, 37, 74, 91-94]. A fenti vizsgálatok alapján a PurpleAir és a bennük lévő Plantower szenzorok precíz mérésekre képesek [32, 38, 39], ugyanakkor gyakran hiányosságokat mutatnak a mérés pontosságában, ami korrekció szükségességét eredményezi. Számos korábbi korrekciót dolgoztak ki; azonban jellemzően azok adott régióra, évszakra vagy állapotra vonatkoznak, és kevés

kutatás irányult annak megértésére, hogy milyen széles körben alkalmazhatók [31, 73, 74, 77, 87, 88]. Barkjohn és társai [95] egy USA-szerte érvényes korrekciót dolgozott ki a PurpleAir PM_{2,5} értékekre, amely növeli a pontosságot több régióban, így elég megbízhatóvá válik a az US EPA által kialakított Air Quality Index (US EPA AQI [96]), vagyis levegőminőségi index kommunikálásának támogatásához. A széles földrajzi lefedettségre vonatkozó adatok alapján kidolgozott modell az olyan területeken lévő szenzorok értékeire is jól alkalmazható, amelyek távol vannak más levegőminőség vagy meteorológiai mérési helyszíntől.



6. ábra PurpleAir térképes megjelenítése [97]

A kutatás a US EPA és a PurpleAir, tehát egy közintézmény és egy piaci szereplő közötti együttműködés eredménye, ahol a PurpleAir biztosítja a nyilvánosan is hozzáférhető szenzor adatokat, az US EPA a hivatalos, ugyancsak nyilvánosan hozzáférhető referencia adatokat, illetve a tudományos igényű szaktudást. A modell elérhető a Purple Air honlapján (6. ábra), mint kiválasztható átváltási lehetőség, de beépült a US EPA honlapba is, ahol a nyilvánosság tájékoztatásában nyújt segítséget a futó- és erdőtüzek detektálása területén (7. ábra).



7. ábra US EPA tűz és füst térképe a low-cost PurpleAir szenzorokkal [98]

Barkjohn és társai [95] az USA egész területét lefedve összesen 53 PurpleAir szenzort 39 helyszínen vetettek analízis alá a 2017. szeptember és 2020. január közötti időszakból származó adatok alapján. Mind a szenzoros, mind a hivatalos, vagyis Federal Reference Method (FRM) és Federal Equivalent Method (FEM) mérési adatokat szűrték és tisztították, hogy a megfelelő adatminőséget elérjék. A szenzoros mérések esetében ez sokszor a legnehezebb feladat, hiszen számos interferencia, zavaró tényező befolyásolhatja a mérési értékeket, míg az FRM és FEM eszközök bevizsgált, kalibrált és karbantartott mivoltuk miatt kevésbé érzékenyek a külső tényezőkre és a belső meghibásodásokra. Az kiválasztott 53 szenzorból az előzetes vizsgálat alapján 3 szenzor adatai nem segítettek a modell építést a gyenge teljesítményük és adathiány miatt. A vizsgált szenzorok kb. 40%-kal a referencia $PM_{2,5}$ értékek fölé mértek. Barkjohnsék megállapították, hogy egy egyszerű lineáris regresszió csökkenti ennek a torzításnak a nagy részét az Egyesült Államok legtöbb régiójában, egy relatív páratartalom tag hozzáadása pedig tovább csökkenti a torzítást és javítja a különböző régiók közötti torzítások konzisztenciáját. Az összetettebb multiplikatív modellek független adatkészleten tesztelve nem javították lényegesen az eredményeket. Az analízisek alapján tehát a hétféle kiinduló modellből a multilineáris, páratartalommal kiegészített egyenletet választották ki, mely a visszaellenőrzés szerint a legjobb eredményt mutatta a széles területi eloszlásban elhelyezkedő szenzorok adatain. A modell alapján korrigált és az US EPA AQI [96] alapján indexált értékek az összes vizsgált régióban az esetek 91%-ban a helyes kategóriába sorolódtak, 3%-ban alá, 6%-ban pedig fölé kerültek.

A 2019-ben megalkotott korrekciós egyenlet a PurpleAir szenzorokra [99]

$$PM_{2,5_{corrected}} = 0,534 * PM_{2,5_{raw}} - 0,0844 * RH + 5,604 \quad (1)$$

ahol,

$PM_{2,5_{corrected}}$: korrigált $PM_{2,5}$ értékek [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

$PM_{2,5_{raw}}$: nyers $PM_{2,5}$ értékek [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

RH: relatív páratartalom [%]

2020 folyamán további vizsgálatokat végeztek, és 2021-ben már koncentrációs tartományokhoz kötött korrekciót határoztak meg a 4. táblázatban látható módon [100].

4. táblázat Koncentrációs tartományok szerinti korrekciós egyenletek [100]

Koncentrációs tartomány	Egyenlet
Alacsony $PM_{2,5_{raw}} < 343 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$PM_{2,5_{corrected}} = 0,52 * PM_{2,5_{raw}} - 0,086 * RH + 5,75$
Magas $PM_{2,5_{raw}} > 343 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$PM_{2,5_{corrected}} = 0,46 * PM_{2,5_{raw}} + 3,93 * 10^{-4} * PM_{2,5_{raw}}^2 + 2,97$

A korrekció tartományokra bontása fontos, mert a szenzor kialakításából adódóan nagyobb koncentrációk esetében eltérő jellegű görbével írható le az érzékelt és a valós értékek közötti kapcsolat. Láthatjuk, hogy az RH csak az alacsonyabb tartományban jelenik meg, mint paraméter, a magas tartományban már nem játszik akkora szerepet, hogy belekerüljön az egyenletbe.

2.3.3 Sensor.Community

A szenzoros mérések alacsony árúknak köszönhetően könnyen elérhetők azon lakosok, közösség számára, akik saját környezetük levegőminőségére, környezeti tényezőire, zajszintjére kíváncsiak. A 2017-ben alakult, Stuttgartból induló az OK Lab Stuttgart civil szervezet által kezdeményezett Sensor.Community (korábban Luftdaten) mint közösségi rendszer egy minimális költségű (~60 EUR), a felhasználó által összeszerelhető mérőegységet (8. ábra) kínál, melynek az adattárolását a PurpleAir-hez hasonlóan cloud felületen biztosítja, valamint honlapján is megjeleníti. A több mint 13.000 eszköz 73 országból gyűjti az adatokat [101]. A szenzor készlet egy lézeres részecskeszámláló alapú PM szenzorból (Nova SDS011) és egy nyomás, hőmérséklet és páratartalom szenzorból (Bosch BME280) áll, melyet egy mikroprocesszorhoz kell csatlakoztatni, majd egy csatornacsőben elhelyezni az időjárási hatások elleni védelem érdekében. Ingyenes tanfolyamok és részletes leírás segíti a felhasználót a szerelésben és üzembe helyezésben.

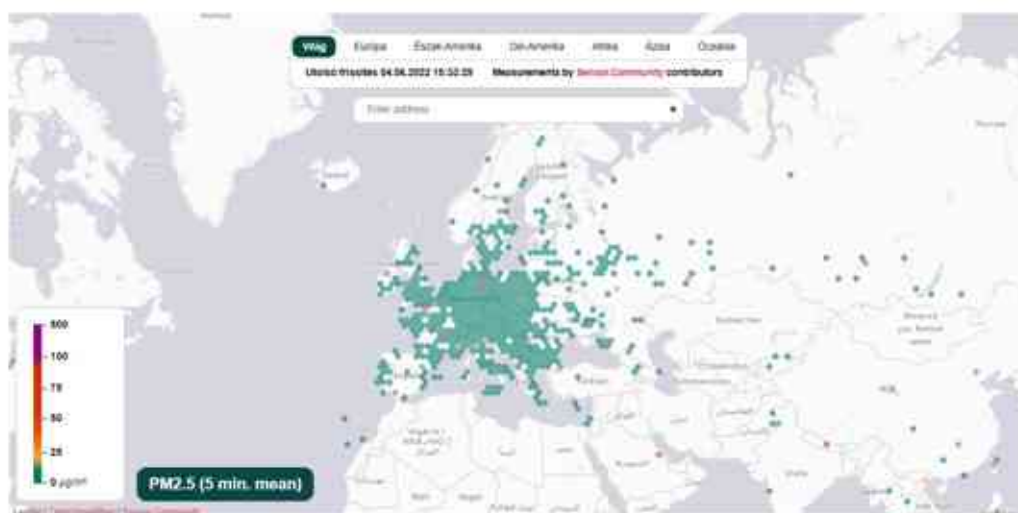


8. ábra A Sensor.Community rendelhető szenzor csomagja [102]

A Sensor.Community kommunikációja szerint a lakossági, civil, közösségi értékek szerint biztosítja a méréshez szükséges eszközöket és felületet. Wróblewski és társai [103] vizsgálták azt a kérdést, hogy a Sensor.Community lengyel felhasználói civilként vagy fogyasztóként használják az eszközöket. A vizsgálat során megállapították, hogy a felhasználók indítékai túlnyomórészt a szeretteik egészségéért és biztonságáért való aggodalomból, valamint közvetlen környezetük (otthon és környéken) levegőminősége (és végső soron az életminőségük) szabályozásának szükségességéből fakadnak. A felhasználók nem tanúsítanak olyan civil magatartást, mint például a helyi közösségért folyó munka. Ez három tényezőtől adódik. Először is, az egészséggel és biztonsággal kapcsolatos félelmek felülírják a helyi szintű környezeti problémák megoldásának szándékát, mely hozzájárulhat az individualista attitűdök megszilárdulásához. Másodsor, a Sensor.Community felépítése nem segíti a felhasználók kezdeményezéseinek széleskörű megosztását, sőt, a felhasználók megtartását sem, mivel a tanfolyamokat és a szenzorok felhelyezését követően a hálózat szervezőinek szerepe véget ér. A hálózat túlnyomórészt a működés műszaki szempontjaira összpontosít. Harmadszor, a felhasználók a kutatók véleménye szerint továbbra sincsenek tisztában az általuk gyűjtött adatok értékével. Tekintettel ezekre a tényezőkre és a kutatásban részt vett

válaszadók által képviselt individualista attitűdökre, az együttműködés és a kollektív adathasználat hiányában, a Sensor.Community-ben érintett lakosok fellépése alacsony potenciállal rendelkezik mind az un. citizen science (lakossági tudomány) fejlődésében, mind magának a szmogproblémának a megoldásában, még ha csak helyi szinten is.

A felhasználók hozzáállása mellett az eszköz egyszerűbb felépítése és a benne lévő Nova SDS011 szenzor mérési bizonytalanságai miatt nem volt olyan ernyőszervezet, mint a PurpleAir esetében, ami beemelte volna, felhasználta volna a mért adatokat a nyilvánosság további tájékoztatására. Néhány kutatás foglalkozott az eszköz teljesítményével [104], referencia vizsgálatokkal [105], de az európai környezetben nem tudott a felhasználás egységes megközelítése kialakulni, az adatok helyi hasznosítása sem jellemző. Németországi indulást követően 2017-ben Bulgáriában [106] már több mint 250 szenzorral indult mérési program. Mára Szófiában a hat hivatalos mérőállomás mellett 105 Sensor.Community eszköz is mér [107]. A világ számos táján vannak eszközök, de alapvetően európai rendszerről beszélhetünk, ahogy az a honlapon elérhető térképes megjelenítés alapján látható (9. ábra).



9. ábra A Sensor.Community PM_{2,5} adatainak térképes megjelenítése [108]

2.3.4 Airly

A levegőminőségi elvárásokkal küzdő Lengyelországban 2018-ban mint start-up vállalat indult el az Airly.org, mely mára számos országban van jelen, és Lengyelország mellett az USA-ban is rendelkezik székhellyel. Az egyre növekvő igényeket jól felmérve építette fel üzleti modelljét, mely a hardveres megoldások (moduláris mérőegységek) mellett nagy hangsúlyt fektet a szoftveres megoldásokra, vagyis az adatok megjelenítésére és előrejelzések készítésére. Az eszközöket (10. ábra) nem civil, lakossági felhasználóknak ajánlják, hanem városoknak, cégeknek, akikkel egyeztetve alakítják ki az adott területet lefedő mérőhálózatot, így az ára is magasabb az eddig ismertetett hálózatok eszközeinél (400 EUR). Miechów levegőminőségét 2018-ban ilyen eszközök segítségével becsülték [109], Romániában 2019-ben egy program keretében 170 eszközt telepítettek 40 városba, 2020-ra már 15 európai országban több mint 3000 PM mérőegységgel rendelkeztek [110], csak Varsóban 2021-ben 165 helyszínen helyeztek ki eszközöket a városvezetéssel együttműködve.



10. ábra Az Airly PM szenzorral szerelt mérőegysége [111]

A cég eszközei kalibráltak és minősítettek (Airparif – Franciaország, AQMD – USA, Krakow Smog Alert Association - Lengyelország, Institute Fundamentals of Environmental Engineering – Lengyelország). A beépített PM szenzor Plantower PMS5003 típusú, mellette hőmérséklet, páratartalom értékeket is figyel az eszköz. A mért adatokat elsősorban a cég dolgozza föl az ügyfelei számára. A minősítések és a céges háttér miatt kevés összehasonlító elemzés érhető el az eszköz teljesítményéről [112, 113]. Az erős szoftveres kapacitás és adatelérhetőség azonban segítheti a neurális hálón alapuló korrekciót és big data megoldások fejlesztését [114]. A honlap térképes megjelenítéséhez a hivatalos állomások adatait és egyéb adatbázisokat is egyesítenek, így sűrűbb adatpontokkal rendelkező térképeket vizsgálhatunk (11. ábra).



11. ábra Az Airly PM adatainak térképes megjelenítése [111]

Az Airlyn kívül még számos mérőhálózatba illeszthető kereskedelmi forgalomban kapható eszköz van, például AirSenseEUR [115], Ensense [116], Gaia A12 [117].

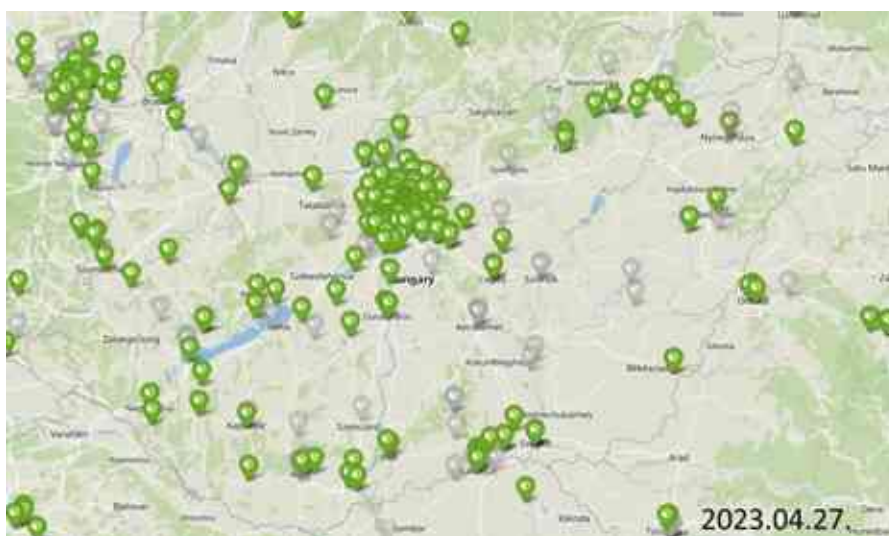
2.3.5 Szenzoros PM mérés Magyarországon

Magyarországon a legelterjedtebb hálózatba kapcsolt szenzoros mérőeszközök a Sensor.Community által biztosított mérőegységek, köszönhetően kedvező árúknak és a levegőminőséggel foglalkozó aktív civil közösség erőfeszítésének. A kb. 280 eszközből 180 Budapesten és közelében összpontosul (12. ábra). A hazai civil levegőtisztaság-védelem megkerülhetetlen szereplője a Levegő Munkacsoport [118], mely a

Sensor.Community eszközök magyarországi telepítését is segíti workshopok, tanfolyamok szervezésével és a MetNet.hu-val közösen publikálja a mért adatokat térképes formában.

5. táblázat PM mérőhálózatok adatai és magyarországi elterjedése

Név	Alapítás	PM szenzor	Ár	Magyarországi eszközök száma
PurpleAir	2015	PMS5003	270 USD	3 db
Sensor.Community	2017	SDS011	60 EUR	~280 db
Airly	2018	PMS5003	400 EUR	0 db



12. ábra A Sensor.Community eszközök területi eloszlása Magyarországon [119]

A MetNet a Sensor.Community eszközére alapuló saját fejlesztésű szenzorját is forgalmazza és integrálja a honlapra, ahol nézhetők és letölthetők az adatok. A kezdeményezés az elmúlt két évben kapott lendületet és támogatást (Európai Éghajlatvédelmi Alapítvány (ECF)), aminek hatására a 2019-es 25 db-os állomány mára már 280 db fölé emelkedett. A fentiek alapján mind központilag, mind civil oldalról egyre növekvő érdeklődés övezi Magyarországon is az olcsó szenzoros szálló por mérést. Miskolcon, azon belül is Szirmán egy, a Sensor.Community térképe alapján aktív, közösségi eszköz üzemel jelenleg. A környéken még három eszköz tűnik föl a térképen, Bükkzentkereszt, Sajószentpéter és Arnót területén.



13. ábra Sensor.Community eszközök elhelyezkedése Miskolcon és környékén [108]

2.3.6 LIFE HungAIRy

A Levegőminőség javítása 8 régióban a levegőminőségi tervek végrehajtásának elősegítésével című 8 éven keresztül futó projekt az egyik legjelentősebb környezetvédelmi probléma megoldását, a levegőminőség javítását célozza 8 régiót lefedve 10 magyar településen. Ezt többek között emissziós adatbázisok fejlesztésével, átfogó szemléletformáló, tájékoztató tevékenységgel és egy országos szakértői, tanácsadói hálózat felállításával valósítja meg. A magyarországi levegőminőség mérését és kiértékelését az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat végzi. A projekt részeként két partner településen - Békéscsabán és Kaposváron -, ahol eddig nem volt a hálózathoz tartozó mérőállomás, 1-1 új automata, hivatalos mérőállomást telepítenek. A közlekedés által okozott légszennyezés csökkentése érdekében a projekt részeként különböző szemléletformáló akciók és helyi pilot akciók indulnak többek között közösségi kerékpár-rendszer kiépítésére, valamint intelligens városi közlekedési rendszerek fejlesztésére. A projekt részeként egy térinformatikai adatbázis és egy nagy felbontású levegőminőség-modellező eszközt fejlesztenek, amely a települések levegőminőségi terveinek két évente vállalt felülvizsgálatát támogatja. A döntéstámogató rendszerrel lehetőség lesz a különböző intézkedések hatásának a becslésére, illetve azoknak a kulcsfontosságú területeknek azonosítására, ahol hatékony intézkedéseket kell tenni. A projektben résztvevő önkormányzatok szemléletformáló kampányokat indítanak, amelyeknek célja a települések levegőminőségének javítását célzó intézkedések elterjesztése. Ezeknek kulcsfontosságú elemei a helyes szilárd tüzelési technikák, környezetbarát tüzelési módok bemutatása, valamint a környezetbarát közlekedési módszerek népszerűsítése.

Az EU támogatással megvalósuló projekt egyik célja, hogy Miskolcon és Kaposváron egy tudományos kutatáson alapuló nagy felbontású olcsó szenzorokból álló szálló por mérőhálózatot alakítson ki. A 2019-ben indult projekt már a pályázatírási időszakban felismerte, hogy az olcsó szenzorok népszerűségét és terjedését támogatni kell, így a projekt keretében vizsgálja azok megbízhatóságát és mérőhálózatban való működésüket. Az kialakított mérőhálózat az értékes adatok mellett, mint döntéstámogató rendszer és szemléletformáló eszköz is hozzá tud járulni a projekt céljaihoz. [120]

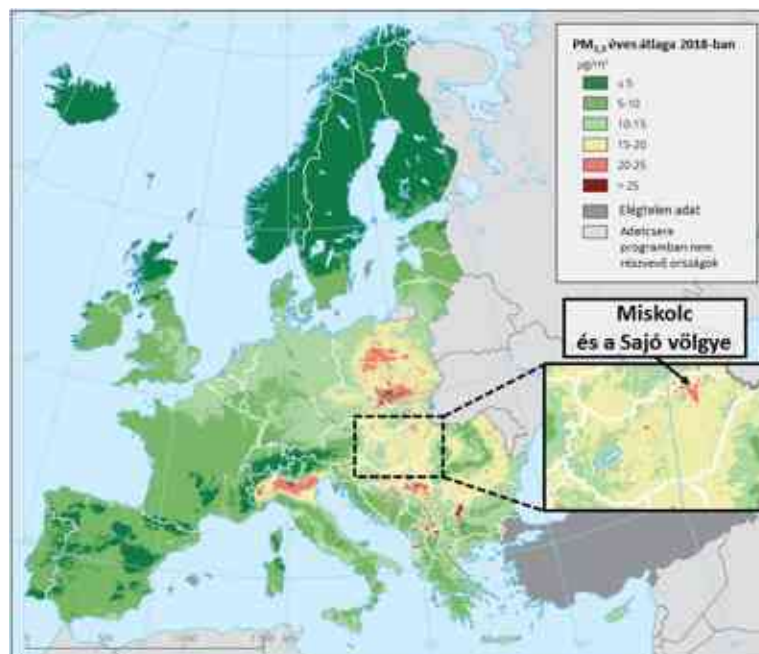
3 Szálló por helyzet Miskolcon

Az Európai Unió Bírósága 2021.02.03-án kihirdetett ítélete szerint Magyarország megsértette a szálló porra (PM₁₀) előírt uniós – a hazai szabályozásba is átültetett – határértékeket. A légszennyezettséggel összefüggő jogsértés Budapest és környéke, valamint a Sajó-völgye légszennyezettségi zónára vonatkozóan 2005-től, Pécs esetén 2011-től fennáll, az ítélet szerint így tartós és rendszeres lett. Az uniós jogszabályok alapján egy évben legfeljebb 35 napon lehet magasabb a PM₁₀-koncentráció az egészségügyi határértéknél, hazánkban azonban ez akár 70-90 alkalommal is megtörtént.

Az ítélet hangsúlyozza, hogy nem kizárólag a PM₁₀ határértékek túllépése vezetett az elmarasztaláshoz, hanem az is, hogy a magyar kormány nem tette meg a szükséges intézkedéseket annak érdekében, hogy ezek a túllépések a lehető legrövidebb ideig tartsanak, illetve megszűnjenek [121].

A PM₁₀ koncentráció értékek határérték túllépései a napi átlagokra vonatkoznak, míg az egészségügyi szempontból veszélyesebb PM_{2,5} koncentráció értékekre csak éves határérték vonatkozik. Az IQAir adatai alapján Miskolc is felkerült a legszennyezettebb 100 európai város közé a 71. helyen, a 2017-2021-es PM_{2,5} koncentrációs értékek szerint, mellyel jobb helyen állt, mint Krakkó vagy Zágráb, de rosszabb helyen, mint Milánó vagy Marosvásárhely [122].

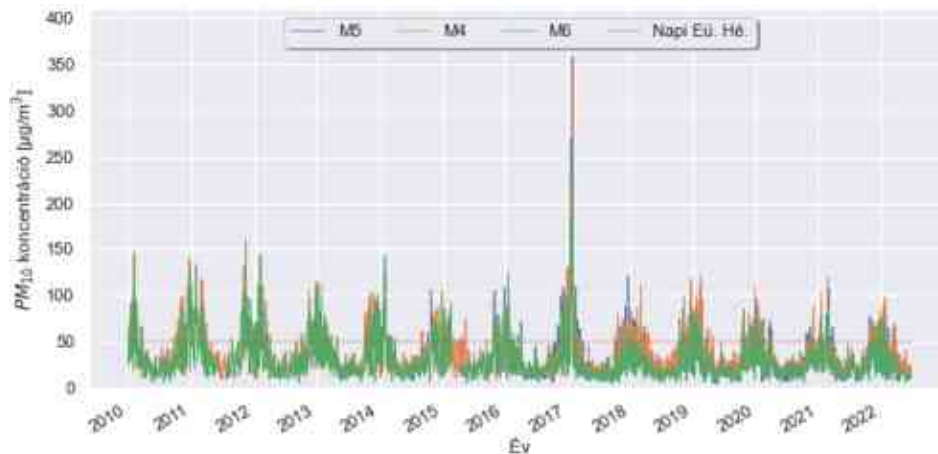
Az Európai Környezetvédelmi Ügynökséghez (European Environment Agency (EEA)) érkezett adatok alapján készített PM_{2,5} eloszlás térkép (14. ábra) alapján láthatjuk Európa szálló por szempontból szennyezett területeit. Ide tartozik Lengyelország nagy része és a Balkán kisebb területei, valamint Olaszországban a Pó völgye és végül Magyarországon a Sajó völgye. A területekre jellemző a szilárd tüzelés, ami megnöveli a szálló por kibocsátást, a domborzati viszonyok pedig segítik az inverziós réteg kialakulását és a szennyezők feldúsulását alatta.



14. ábra PM_{2,5} éves átlag eloszlása Európában 2018-ban (EEA [122] alapján)

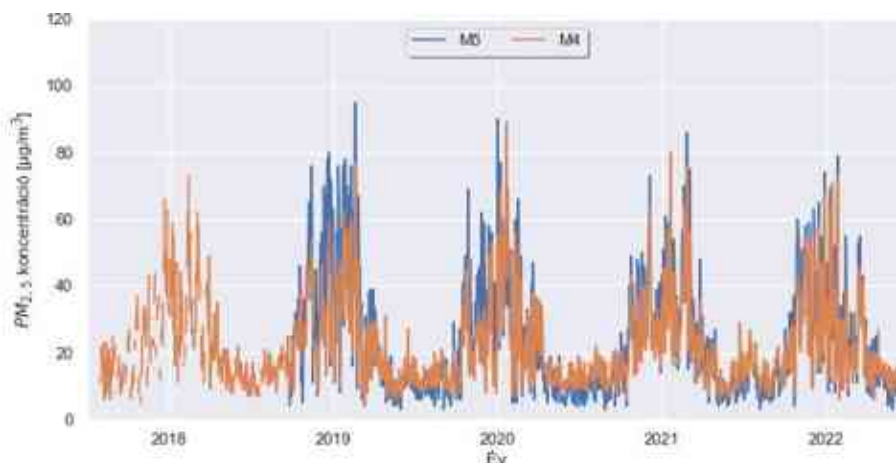
3.1 Szálló por trendek Miskolcon

A disszertáció alapjául az a kutatómunka szolgál, melyben többek között a hivatalos OLM adatok alapján vizsgáltam a szálló por koncentrációs trendeket továbbá a szezonalitást 2010.01.01 és 2022.06.30. között. A jelenleg működő három mérőállomás közül 2010-ben a Búza téren (M4) és a Lavotta utcán (M6) üzemelt PM₁₀ mérésre alkalmas eszköz, melyhez 2014-ben csatlakozott az Alföldi utcai állomás (M5). PM_{2,5} mérés 2017-ben indult a Búza téren, majd kiegészült 2018 szeptemberében az Alföldi utcai állomással, a Lavotta utcán nem áll rendelkezésre elérhető PM_{2,5} adat az OLM hivatalos adatlekérő felületén [123]. A 15. ábra és 16. ábra a PM₁₀ és PM_{2,5} napi átlagos értékeit mutatja a vizsgált időszakban.



15. ábra PM₁₀ napi átlagai a miskolci OLM állomásokon [123]

A 15. ábra a PM₁₀-re vonatkozó napi egészségügyi határértéket is feltünteti. Szezonális trendet mutat a koncentrációk lefutása, megfigyelhetjük az év végén, majd a következő év elején megnövekedett koncentrációs időszakot, mely a hidegebb, fűtési időszakra esik. Ebben az időszakban jellemzőek a határérték túllépések. A PM₁₀ értékek napi maximuma 100-150 µg/m³ között változott, egyedül 2017-2018 telén volt egy nagy kiugrás, ahol a 350 µg/m³ koncentrációt is elérték a napi átlag értékek.



16. ábra PM_{2,5} napi átlagai a miskolci OLM állomásokon

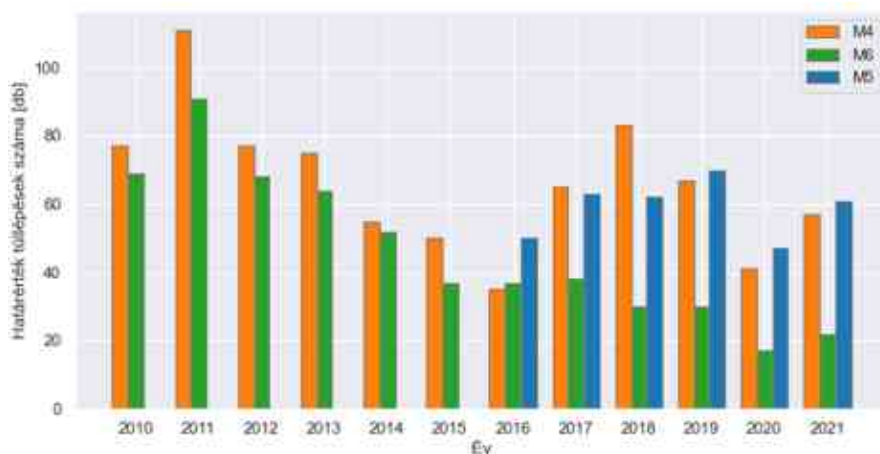
A 6. táblázat foglalja össze az egyes évekre vonatkozóan a rendelkezésre álló napi átlagkoncentrációk darabszámát (Összes adat), az egészségügyi határérték túllépések darabszámát (Határérték túllépés) és a kettő százalékos arányát (Százalék). A határérték túllépések száma jó közelítése annak, hogyan változik a

levegő minősége szálló por szempontból. 2011-től csökkenő, azaz javuló tendenciát mutat a szennyezettség mértéke a Búza téren (M4) és a Lavotta utcán (M6) is 2016-re 35-37 db túllépést számolhatunk. Ezt növekvő trend követi az M4 és M5 esetében, az M6 pedig tovább csökken, így 2020-ra már csak 17 db határérték túllépés mutatható ki. Az EU felé történő adatszolgáltatásban részvevő M4 még 2018-ban 83 db, 2020-ra azonban már csak 41 db határérték túllépést detektált. A 2021-es év újra emelkedést produkált mindhárom állomás esetében. Mindezt a 17. ábra foglalja össze.

6. táblázat Rendelkezésre álló PM₁₀ adatok száma és az egészségügyi határérték túllépések száma a 2010 és 2021 között

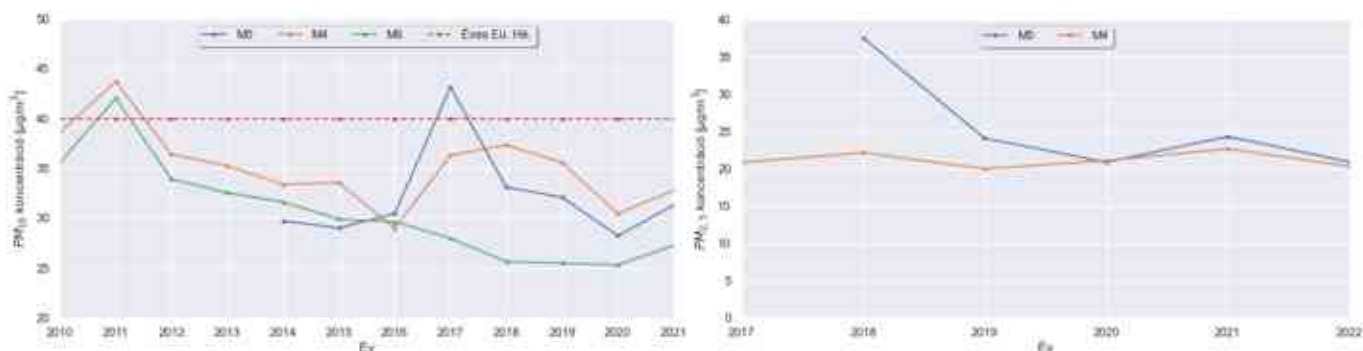
Állomás	Év	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
M4 Búza tér	Összes adat	359	362	361	360	340	353	358	353	358	359	359	361
	Határérték túllépés	77	111	77	75	55	50	35	65	83	67	41	57
	Százalék	21%	31%	21%	21%	16%	14%	10%	18%	23%	19%	11%	16%
M5 Alföldi utca	Összes adat	0	0	0	0	102	157	354	283	342	360	364	355
	Határérték túllépés	0	0	0	0	9	21	50	63	62	70	47	61
	Százalék	0%	0%	0%	0%	9%	13%	14%	22%	18%	19%	13%	17%
M6 Lavotta utca	Összes adat	358	316	361	363	358	307	355	361	354	361	356	356
	Határérték túllépés	69	91	68	64	52	37	37	38	30	30	17	22
	Százalék	19%	29%	19%	18%	15%	12%	10%	11%	8%	8%	5%	6%

A 2017-2018-as kiugró koncentrációs értékek és ezzel együtt megnövekedett határérték túllépések a kedvezőtlen időjárási körülményből kialakult szmoghelyezeteknek köszönhetőek [124]. A 2020-as javulás az enyhe téli időjárással, és ezáltal a kevesebb fűtésből származó kibocsátással magyarázható a Varga-Balogh és társai [125] elemzése alapján.



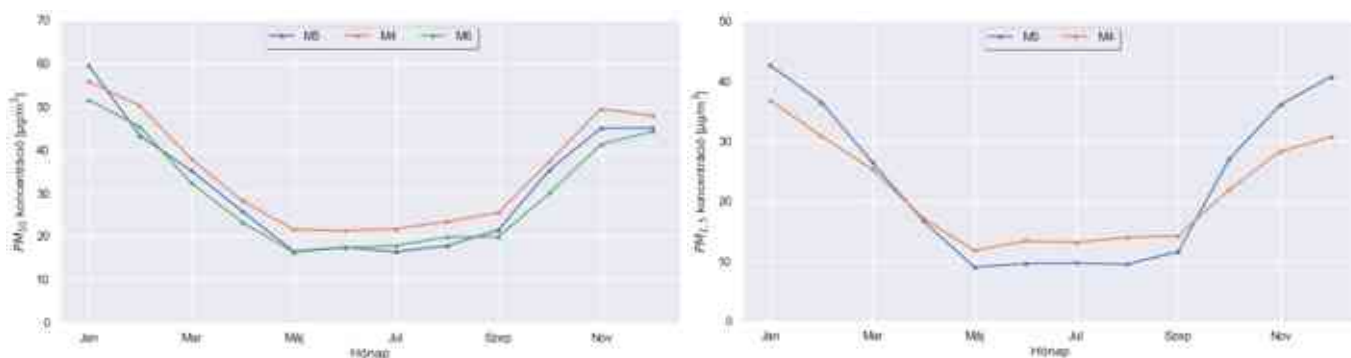
17. ábra Napi egészségügyi határérték túllépések száma évente

A Covid járványhoz kapcsolódó intézkedések, megváltozott szokások inkább növelték a PM₁₀ koncentrációt a korábbi évek azonos időszakához képest. Az éves átlag értékek jól követik a határérték túllépések trendjét, a 18. ábra megmutatja, hogy a PM₁₀ éves egészségügyi határértéket 2011-ben az M4 és M6, 2017-ben az M5 lépte át. A PM_{2,5} éves átlag értékeit a 18. ábra mutatja, mely a PM₁₀-hez hasonlóan alakul.



18. ábra PM₁₀ és PM_{2,5} koncentráció éves átlagai a miskolci OLM állomásokon

A vizsgált időszak egyes hónapjainak átlagos értékeit a 19. ábra mutatja be. A PM₁₀ és a PM_{2,5} esetében is megfigyelhető az az éves trend, amit az idővonalas megjelenítésnél is láthattunk. A májustól augusztusig tartó intervallum az alacsonyabb koncentrációs hónapok időszaka, majd szeptembertől emelkedik a havi átlagkoncentráció és januárban éri el a maximum értékeket, onnan pedig csökkenő tendenciát mutat a több éves átlagok alapján.



19. ábra PM₁₀ és PM_{2,5} átlagos koncentráció értékei a 2010-2021 közötti évek hónapjaiban a miskolci OLM állomásokon

3.2 Szmoghelyzetek Miskolcon

Miskolc a Bükk és az Alföld találkozásánál a Hejő, a Szinva és a Sajó völgyében terül el. Észak-Magyarország legnagyobb városa, mintegy 160 ezer fős lakosságával jelenleg az ország negyedik legnépesebb városa. A város közigazgatási területe mintegy 236 km² (23 600 ha), amelynek közel negyede belterület. Külterületének jelentős része erdő, illetve mezőgazdasági terület. A város (különösen az egykori iparterületek és az azokban dolgozók lakóépületei, a csekély zöldterülettel bíró, sűrűn beépített belváros) és a várost észak felől körbefogó Bükk hegység az épített és a természeti környezet kontrasztjának jellegzetes példája. Számos levegőminőségi probléma összefüggésben áll a település szerkezettel: a belváros (túlzott beépítés) és a gátolt légmozgás következtében a Szinva-völgyben kibocsátott szennyező anyagok feldúsulnak, tartózkodási idejük megnő; a lakóterületek körbenőtték az üzemeket, egymás közvetlen szomszédságában helyezkednek el (nincs megfelelő védőtávolság), ami egykor (míg működtek ezek az üzemek) jelentős egészségügyi és biztonsági kockázatot jelentett az itt élők számára [126]. A szálló por (illetve korábban a nitrogén-oxidok) tekintetében elmondható, hogy a határérték-túllépéssel érintett

napok száma általában meghaladja a megengedett éves mértéket. Ezzel összefüggésben (fűtési időszakban, jellemzően októbertől márciusig) komoly környezeti probléma Miskolcon a szmog [127].

Miskolcon a Magas-hegy, Varga-hegy vonulatairól időnként szabad szemmel is látható a fűtőmű füstjének inverziós réteg alatt rekedése a korábbi Vasgyár területén. Az időjárási jelenségek megfigyelése és a kéménymagasság ismeretében egy közeli becslést adhatunk az inverzió magasságára. A 20. ábra alapján például a 2011. 11. 10-ei talaj menti inverzió 100 méter fölötti magassáig terjedt ki.



20. ábra Inverziós réteg Miskolcon, 2011.11.10-én reggel 6:10-kor a Miskolci Fűtőmű Kft. felett [128]

Érdeemes megfigyelni, hogy a 20 méter magas kémények füstje teljesen az inverziós réteg alatt marad, a 75 méteresek füstje is hasonlóan viselkedik, a 150 méteres kémény füstje pedig szabadon távozik a magasabb légrétegekbe. A keveredési réteg ebben az esetben az a kb. 110 m-es légréteg, melyben a szennyezőanyagok terjedése lehatárolt, így a korábbi, általános definíciót érdemes kiegészíteni. A keveredési rétegnek azt a talajmenti réteget nevezzük, ahol az oda emittált, vagy belépő bármely szennyező anyag átkeveredése vertikális irányban egy óra időtartamon belül lezajlik [129]. Levegőtisztaság védelmi szempontból a keveredési réteg vastagság (Mixing Layer Heights, MLH) annak a légrétegnek a vastagsága, ahol a szennyezőanyagok terjedése ideális esetben néhány óra alatt lezajlik [130, 131]. Ennek magassága a légszennyezők terjedésének modellezésénél kulcsfontosságú paraméter, hiszen ez adja meg azt a teret, ahol a keveredés lezajlik. A keveredési réteg mérése nem egy, a szokásos meteorológiai mérési gyakorlatok közül, sőt, gyakran meglehetősen bizonytalan paraméter, amelynek meghatározása és becslése nem egyértelmű. [124]

3.3 A mérések bővítésének indokoltsága

Miskolcon három helyen működtet automata mérőállomást az OLM, melyek közül mindhárom méri az órás PM_{10} koncentrációt, kettő pedig az órás $PM_{2,5}$ koncentrációt is a jellemző gáz halmazállapotú légszennyezők mellett. Az állomások helyét a 21. ábra fehér X-el jelöli. A mérőhálózat adatai alapján

történik a nyilvánosság tájékoztatása, az önkormányzatok környezetvédelmi tervezése és a légszennyezettségi tájékoztatások. Az adatok a mérőhálózat elhelyezkedéséből adódóan kis felbontásúak, nem reprezentálják pontosan a légszennyezők eloszlását a városon belül [67, 68]. A levegőterhelés forrásait és azok mennyiségi eloszlását közvetlenül nem ismerhetjük meg részletesen a három pont mérése alapján, de következtetéseket vonhatunk le a közlekedéssel [69] és fűtéssel [70] összefüggő légszennyezés mértékével kapcsolatban. A 21. ábra alapján elmondható, hogy a három mérőállomás Miskolcon a belvárosi, síkvidéki övezetek és a dombvidék határát méri, azonban a város keleti és nyugati területeit nem vagy részben. A PM koncentrációk ilyen kis térbeli és időbeli felbontása gátat szab az egyéni PM-expozíció becslésnek [69, 71], a PM egészségügyi hatásait kimutató epidemiológiai vizsgálatoknak [72], a kibocsátási, emissziós leltár, a légszennyezettségi modellek verifikálásának és a kibocsátás-csökkentő intézkedések hatékonyság mérésének, valamint megértésének egyaránt.



21. ábra Miskolc klímaövezetei és jellemző légmozgásai [132]

A légszennyezők városi szintű vizsgálatának egyik fontos eszköze a légszennyezettségi térkép, mely megmutatja hol, mikor és miért alakulnak határérték feletti levegőterheltségi szintek. A térkép felrajzolható terjedési modell segítségével, melyhez szükséges a megfelelő szoftver és az elégséges bemenő adat (emissziós és meteorológiai adatbázis). A másik módszer a mért adatok térképre vitele. Kis költségű porszennyezésérőltérképek kerültek elhelyezésre Miskolc számos pontján, hogy részletesebb képet kapjunk a szálló por szennyezettségéről és valós idejű légszennyezettségi térképekkel segítsük a döntéshozókat a folyamatok megértésében és nem utolsó sorban tájékoztassuk a lakosságot és megváltoztassuk szemléletüket a szmogkérdésben.

4 Felhasznált eszközök

A mérőhálózat eszközeinek összeállításához a piacon rendelkezésre álló szenzorokat vizsgáltam, majd a kiválasztott szenzor köré mérőegységet terveztem és építettem. A mérőegységek vizsgálatához használtam klímakamrát és referencia eszközöket. A mérőegységek végül kihelyezésre kerültek Miskolc szerte.

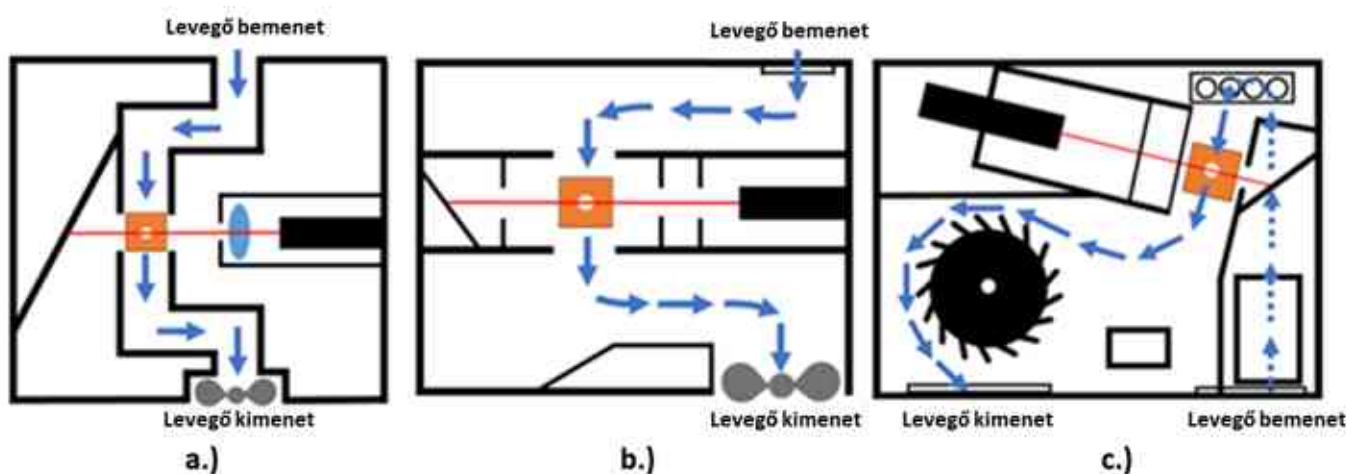
4.1 Szenzorok

A Miskolci Egyetem AirMonitoring 2.0 kutatócsoport tagjaként a 7. táblázatban felsorolt hét különböző szenzor típust mérési teszt sorozat segítségével vizsgáltam [133, 134].

7. táblázat Szenzortípusok alapvető jellemzői

Márka	Plantower	Winsen	Honeywell	Shinyei	Samyoung	Amphenol
Típus	PMS7003	ZH03	HPMA115S0	PPD42NS	DSM501	SM-PWM-01C
PM ₁	x	x	-	-	-	-
PM _{2,5}	x	x	x	-	-	x
PM ₁₀	x	x	x	x	x	x
Fényforrás	lézer	lézer	lézer	LED (IRED)	LED (IRED)	LED (IRED)
Áramlás biztosítása	ventilátor	ventilátor	ventilátor	fűtőellenállás	fűtőellenállás	fűtőellenállás
Minimum PM Ø	0,3 µm	0,3 µm	-	1 µm	1 µm	1 µm
Mért érték	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	db/283 cm ³	db/283 cm ³	db/283 cm ³

Az első vizsgálatok és szakirodalom alapján az áramlást fűtőellenállással biztosító szenzorokat kizártuk a további vizsgálatokból, mert kültéri mérések esetén a szellőkések és a hőmérséklet ingadozások nagyban befolyásolták a működésüket, valamint a mért darabszámok (db/283 cm³) átszámítása koncentrációvá (µg/m³) nehezíti az összehasonlíthatóságot. A három ventilátorral áramlást biztosító szenzor belső felépítésének sematikus rajzát a 22. ábra mutatja be. A 5.1 fejezetben a három ventilátoros szenzor összehasonlításának részleteit ismertetem.



22. ábra A Honeywell (a), Winsen (b) és Plantower (c) szenzorok szerkezeti felépítése

Az összehasonlítás eredményeként a Plantower 7003 típusú szenzort (23. ábra) választottam a mérőegység és így a mérőhálózat alap egységének.



23. ábra Plantower PMS7003 fényképe és méretrajza

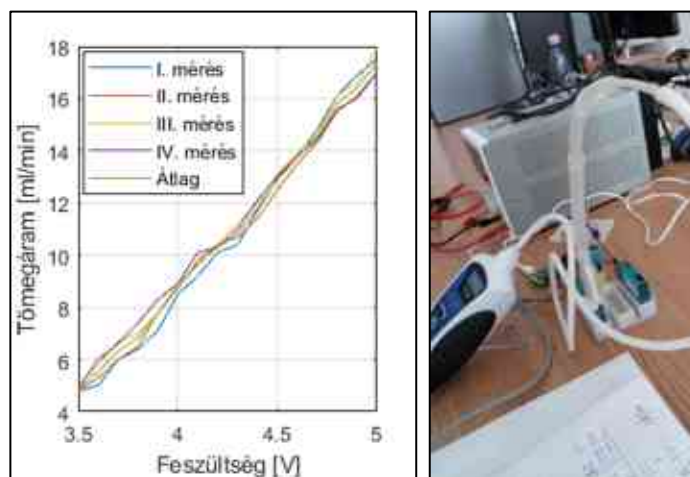
A kiválasztás főbb indokai:

- Ventilátorral ellátott szenzor, mely folyamatos áramlást biztosít
- Mért $PM_{2,5}$ és PM_{10} koncentráció [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], mely mértékegység könnyebben összehasonlítható a referencia értékekkel
- Referenciához képest legkisebb hibával legjobban korrelál az irodalom és a vizsgálatok alapján
- Kevésbé függ a páratartalomtól, mint a többi (irodalom alapján)
- Tudományos szempontból egyre népszerűbb:
 - 2018: 8 db szakcikkben említik vagy használják
 - 2019: 8 db szakcikkben említik vagy használják
 - 2020: 20 db szakcikkben említik vagy használják
 - 2021: 26 db szakcikkben említik vagy használják

8. táblázat Plantower 7003 adatlapja

Paraméter	Érték
Mérési tartomány	0,3 μm -1,0 μm ; 1,0 μm -2,5 μm ; 2,5 μm -10 μm
Számlálási hatékonyság	50 % @ 0,3 μm ; 98 % @ $\geq 0,5 \mu\text{m}$
Ideális mérési tartomány	0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Maximális mérési tartomány	$\geq 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Felbontás	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Hiba	$\pm 10\%$ @100~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ @0~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Válaszidő	<1 sec
Tápfeszültség	Tipikus: 5 V, min: 4,5 V, max: 5,5 V
Áramerősség	$\leq 100 \text{ mA}$
Működési tartomány	-10~+60 °C 0-99 RH%
Élettartam	$\geq 3 \text{ év}$

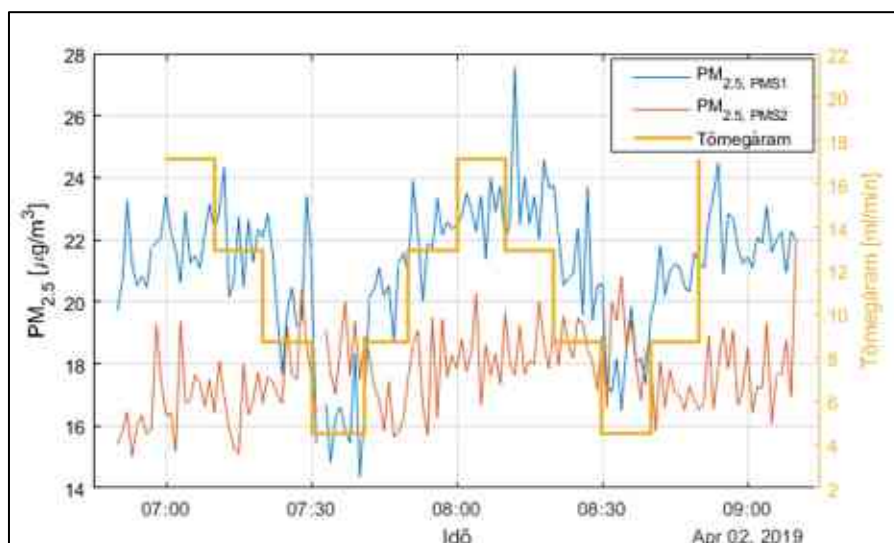
Az adatlapon szereplő információkat kiegészítendő, vizsgálatokat végeztem a szenzor működésével kapcsolatosan. Egy saját tervezésű adapter és a Restek Proflow 6000 áramlásmérő segítségével mértem a ventilátor által átáramoltatott levegő mennyiségét (24. ábra). Az esetleges üzemzavar vizsgálata céljából a ventilátor feszültségét külső táp segítségével szabályoztam 3,5 V (még forgó ventilátor) és 5 V (üzemi feszültsége) között. Üzemi állapotban (5 V) a tömegáram 17 és 18 ml/perc között változott, 3,5 V-on pedig lecsökkent 5 ml/perces értékre (24. ábra). Az összefüggés lineáris módon felírható a (2) -ös egyenlet szerint.



24. ábra Tömegáram változása a feszültség függvényében és a mérés szemléltetése

$$Tömegáram = 8,4092 * Feszültség - 24,903 \quad (2)$$

A ventilátor feszültségváltozása és az ezzel együtt változó tömegáram hatását a mért porkoncentrációra párhuzamos mérés keretében valósítottam meg. Két azonos típusú Plantower szenzort üzemeltettem (PMS1 és PMS2) oly módon, hogy a PMS1 jelzésű szenzor tömegáramát a ventilátor feszültségének szabályozásával 10 percnként változtattam. A két szenzor $PM_{2,5}$ koncentráció értékeit hasonlítottam össze. A 25. ábra alapján látható, ahogy a tömegáram csökken, úgy csökken a mért porkoncentráció, majd ahogy nő a tömegáram, vele együtt nő a kimutatott koncentráció is.



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

A referenciaként üzemeltetett PMS2 szenzor koncentráció értékei ez idő alatt az ingadozásoktól eltekintve nem változtak. A fentiek alapján tehát a ventilátor feszültség, - és fordulatszám-változása hatással van a mért koncentráció értékekre, ezért minél stabilabb áramellátás biztosítása szükséges az üzemeltetésükkor. A térfogatáram változását a tápfeszültség ingadozásán kívül a szél is előidézhetheti. Ez abból adódik, hogy a szél a ventilátor ellen is dolgozhat, ha a szenzor levegő beszívásra/kiáramlásra kialakított nyílása körül megváltozik a nyomás.

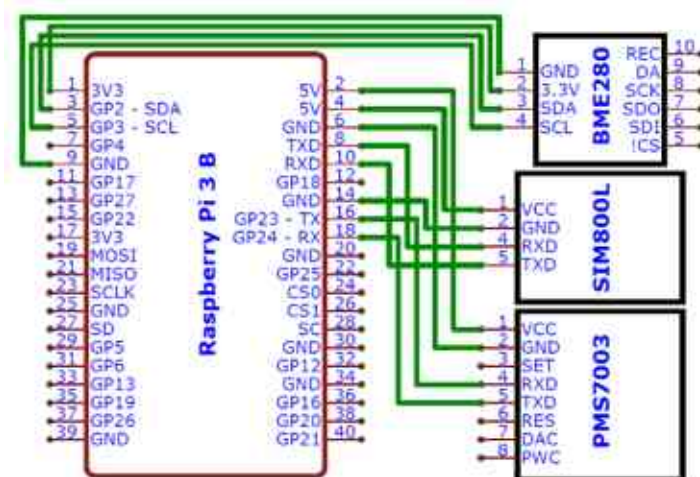
4.2 Mérőegység

A mérőegységek alapja egy Raspberry Pi mikroszámítógép, mely a szenzorokat üzemelteti, adatait pedig tárolja. A mikroszámítógéphez kapcsolódnak a por (Plantower 7003) és a hőmérséklet, relatív páratartalom és nyomás érzékelők (BME680) valamint a kommunikációért felelős SIM800L típusú modul. Az 9. táblázat összefoglalja a BME680 szenzor tulajdonságait.

9. táblázat A mérőegységben használt környezeti szenzor tulajdonságai

BME680 Mikroelektromechanikai rendszerű (MEMS) környezeti szenzor	Pontosság	Hőmérséklet	±1 °C
		Páratartalom	±3 %RH
		Nyomás	±1 hPa
	Kommunikáció	I2C	
Tápfeszültség	1,71 V - 3,6 V		

A hőmérséklet, nyomás és páratartalom mérő BME680 I2C-n, a pormérő Plantower PMS7003 (PMS) szenzor pedig UART-on keresztül kommunikál a mikroszámítógéppel (26. ábra).



26. ábra Mérőegység kapcsolási rajza

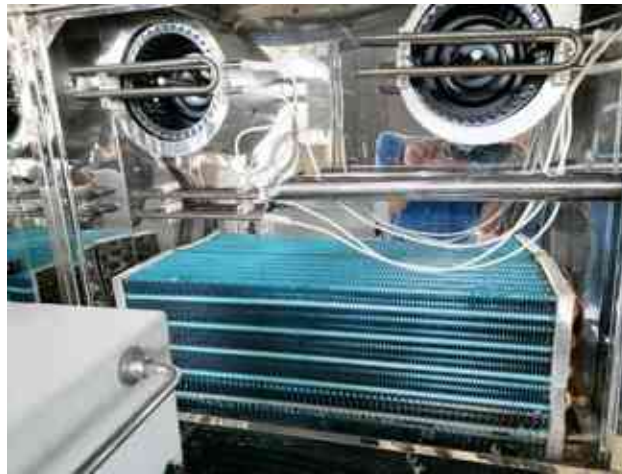
A mikroszámítógép és a szenzorok egy saját tervezésű lamellákkal ellátott védő egységbe kerültek. Az elektromos áramellátás az egység alján került bevezetésre a zárt doboz részbe, ahol a mikroszámítógép került elhelyezésre, így védve a közvetlen nedvességtől, páratartalom változástól. A zárt doboz tetejére, a lamellák közé kerültek rögzítésre a szenzorok (27. ábra).



27. ábra Mérőegység háza, össze-, és felszerelése

4.3 Klímakamra

A mérőegységek kalibrációja az FRM-600-S jelű klímakamrában történt, modellszáma GTH-600 (28. ábra). A belső kamra mérete 850*850*850 mm, mely a teret -40 °C és $+150\text{ °C}$ hőmérséklet, valamint 20% és 98% relatív páratartalom között képes tartani. Két ventilátor segítségével - melyek előtt 1-1 fűtőszál helyezkedik el - keringeti a levegőt, valamint egy kiterjedt hűtőbordával és a hozzá vezetett csepegtetővel szabályozza hőmérsékletet és a páratartalmat.



28. ábra Klímakamra hűtő és fűtő egységei

A belső tér megismerése céljából 16 ponton, a sarkokat, a határoló síkok közepét és a tér közepét a TESTO 400 típusú hőmérséklet, relatív páratartalom, valamint áramlási sebesség mérővel bemértük. A klímakamra beállított értékei és a TESTO műszer által mért értékek alapján a klímakamra belső terében a relatív páratartalom $\pm 5\%$ -on, a hőmérséklet pedig $\pm 1\text{ °C}$ -on belül változik. A relatív páratartalom a felső tartományokban nagyobb, a hőmérséklet pedig az alsó sarkokban, de szinte homogénnek tekinthető. A beállított értékek és a TESTO mért értékei között a relatív páratartalom $-7,5\%$ -kal, a hőmérséklet pedig átlagosan $+1,2\text{ °C}$ -kal tér el. A kalibráció menete során a klímakamra beállításánál ezt az eltérést figyelembe vettük. A klímakamra közepén viszonylag nagy áramlási sebességet mértünk ($>2\text{ m/s}$), mely a szélek, oldalfalak felé csökken, átlagosan pedig 1 m/s -os értékkel számolhatunk.

4.4 Referencia eszközök

4.4.1 TSI DustTrak

Az összehasonlító tesztek során a TSI DustTrak 8543-M (TSI) pormérő eszközt referenciaként használtam. A TSI eszköz az angliai és walesi környezetvédelmi ügynökség monitoring tanúsítási rendszerében kiállított tanúsítvánnyal rendelkezik (MCERTS). A mért szálló por koncentrációja részecseszámláláson alapul, 90°-os fény szóródást vizsgál (light scattering), nagy mérési pontossággal ($\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vagy $\pm 1\%$) és igazolt gyári kalibrációval rendelkezik.



29. ábra TSI DustTrak 8543-M mérőeszköz

4.4.2 OLM állomások eszközei

A jelenleg működő három mérőállomás közül 2010-ben a Búza téren (M4) és a Lavotta utcán (M6) üzemelt PM_{10} mérésre alkalmas eszköz, melyhez 2014-ben csatlakozott az Alföldi utcai állomás (M5). $\text{PM}_{2,5}$ mérés 2017-ben indult a Búza téren, majd kiegészült 2018 szeptemberében az Alföldi utcai állomással, a Lavotta utcán nem áll rendelkezésre elérhető $\text{PM}_{2,5}$ adat az OLM hivatalos adatlekérő felületén [123].

A 10. táblázatban felsorolt referencia eszközök mind ekvivalensek a szabványban meghatározott gravimetriás mérési módszerrel.

10. táblázat Az OLM állomások referencia eszközei

Mérőállomás	Állomás típusa	Referencia eszköz	Mérési elv	Mért szálló por tartomány
M4 – Búza tér	városi közlekedési	MP101M	Béta sugárzás mérés	PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$
M5 – Alföldi u.	külvárosi háttér	GRIMM EDM180	Lézeres fényszóródás	PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$
M6 – Lavotta u.	külvárosi háttér	FH62 C14	Béta sugárzás mérés	PM_{10}

A GRIMM az olcsó szenzorokhoz hasonlóan a szemcséről visszaverődő lézer intenzitása alapján, az MP101M és FH62 C14 pedig egy szalag - melyre a beszívott levegőben lévő por folyamatosan rakódik -

béta sugárzást áteresztő képességének mérése alapján számítja a szálló por koncentrációt. Az OLM hálózat adatai nyilvánosan órás és napi átlag értékekben érhetők el.

4.5 Mérőhálózat

A mérőhálózat kialakítása a LIFE IP HUNGAIKY (LIFE17 IPE/HU/000017) - Levegőminőség javítása 8 régióban a levegőminőségi tervek végrehajtásának elősegítésével című projekt keretén belül került kialakításra szoros együttműködésben az Miskolci Önkormányzattal, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálattal.

Az 4.2 fejezetben bemutatott mérőegységek telepítését az alábbi feltételek szerint végeztük:

- lehetőség szerint egyenletes eloszlásban reprezentálja a város teljes területét
- alkalmas legyen az eltérő szennyezettségű területek és szennyezőforrások azonosítására (közlekedés/lakossági fűtés/egyéb)
- alkalmas legyen a város levegőminőségét kívülről befolyásoló tényezők kimutatására (alapszennyezettség és szennyezettségi háttér)
- alkalmas legyen a szennyezettséget befolyásoló tényezők (pl. inverzió, domborzat, beépítettség stb.) hatásának kimutatására
- olyan hálózat valósuljon meg, amely alkalmas a szennyezettség térképi bemutatására, lehetőség szerint eloszlási térkép formájában
- telepítési magasság 3-4 méter között legyen

Minden esetben vizsgáltuk azt, hogy nincs-e olyan kizáró ok, ami miatt az eszköz az adott helyszínre nem telepíthető, vagy fals eredményeket szolgáltatna. (Pl. nagyon közeli füstgáz kivezetés, teljesen gátolt légáramlás, nem biztosítható áramellátás vagy a térerő hiánya).

A 11. táblázat foglalja össze a mérőpontok projekt keretében megalkotott telepítési terv szerinti négy csoportját.

11. táblázat Mérőpontok csoportosítása

	Mérőpont Csoport	db
1.	Referencia	3
2.	Alaphálózat	19
3.	Városrész	15
4.	Periféria	10

Az alábbiakban bemutatom az egyes csoportokat.

1. Referencia mérőhelyek

A mérőeszközök a hivatalos automata mérőállomásokra (OLM) lettek telepítve, azokat referencia mérőeszközként használva, együttműködve a BAZ Vármegyei Kormányhivatallal, mint üzemeltetővel. Állapotfigyelésben, a mérőhálózathoz kapcsolódó kalibrálási, validálási feladatok háttérének biztosításában játszanak szerepet.

2. Alaphálózat

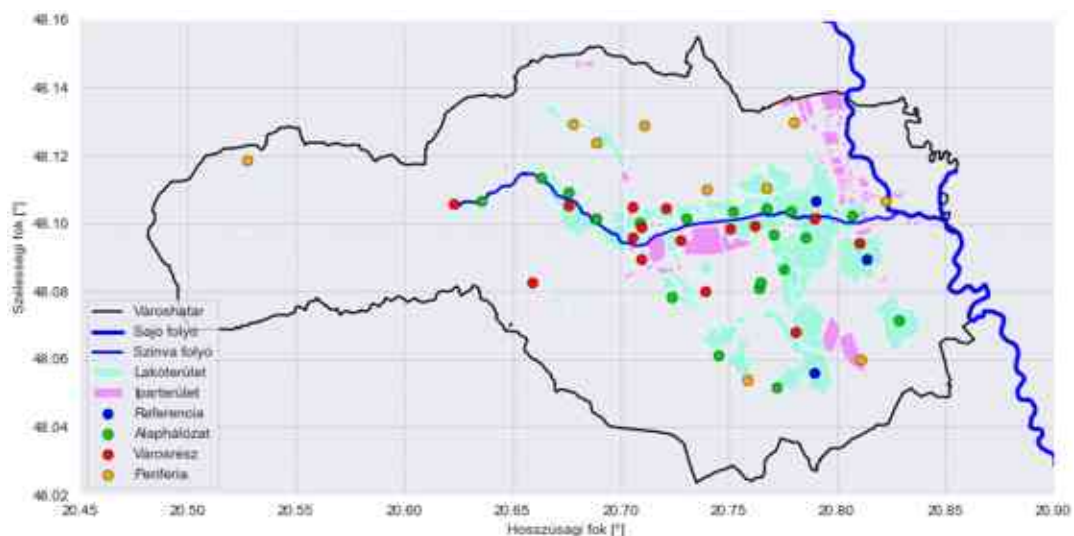
Az alaphálózat a város belterületét a fő tengelyek mentén átfogóan, többé-kevésbé egyenletes eloszlásban reprezentálja. Ezek állandó mérőpontok, változtatásuk, áthelyezésük nincs tervezve, csak igen indokolt esetben kerülhet erre sor. A helyszínek kijelölésénél figyelembe kellett venni az automata mérőállomások (referencia mérőhelyek) elhelyezkedését is. Az alaphálózat főként a közlekedési hálózat vonalát és a nyilvános területeket fedi le; a szabványos terminológia szerint ezek nagyrészt közlekedési besorolású, városi környezetű mérőpontok.

3. Városrészek

A mérőeszközök a nagyobb városrészekbe és a külső településrészekbe kerültek kihelyezésre (ahol az emberek élnek), az alaphálózati rendszer pontjainak figyelembevételével. Ezek olyan városrészeket mérnek, amelyek az alaphálózatban nem, vagy kevésbé reprezentáltak. Mivel az alaphálózat inkább a nagyobb közlekedés intenzitású tengelyekhez kapcsolódik, a városrészi helyszínek a lakókörnyezetben kerültek kijelölésre. A kiválasztásnál fő szempont volt, hogy mind a kertvárosias (egyedi fűtésű), mind a több emeletes bérházas (távfűtésű) övezetben legyen elhelyezve mérőegység. A helyszíneket az első kétéves mérési periódus után tervezzük felül vizsgálni és szükség esetén módosítani fogjuk. A szabványos terminológia szerint ezek főként háttér besorolású, városi környezetű mérőpontok.

4. Periféria (határterületek)

Ezek a mérőeszközök a város peremterületeire lettek telepítve. A mérések célja a közvetlen kibocsátással nem érintett területek szennyezettségének, jellemző folyamatainak megismerése. Ezek adnak információt a város háttérszennyezettségéről, a terjedési folyamatokról, külső szennyezőforrásokról stb. A helyszíneket az első kétéves mérési periódus után tervezzük felül vizsgálni és szükség esetén módosítani fogjuk. A szabványos terminológia szerint ezek háttér besorolású, városi, külvárosi, valamint vidéki környezetű mérőpontok.

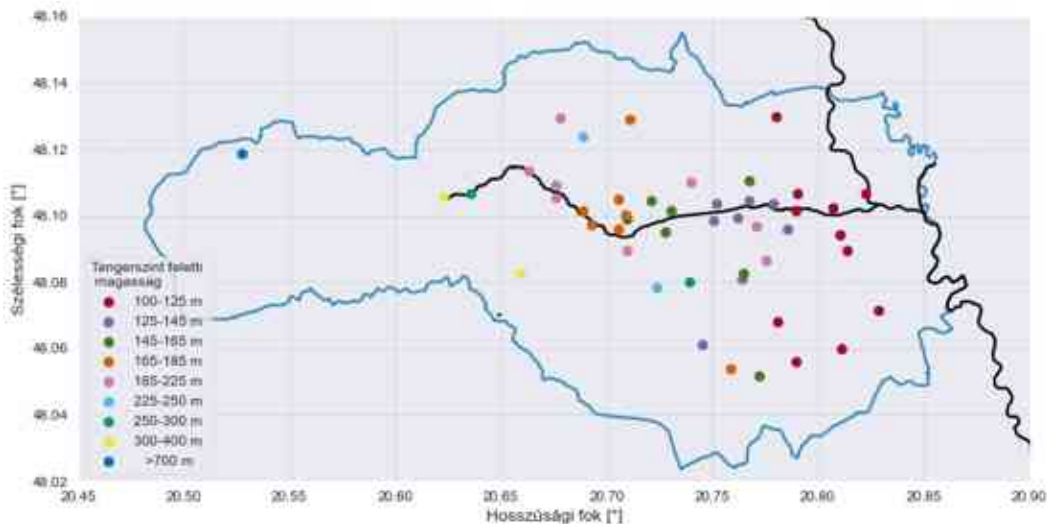


30. ábra A tervezett monitoring hálózat mérőpontjai

A 30. ábra bemutatja az egyes mérőpontok elhelyezkedését csoportonként Miskolc területén, a lakó,- és iparterületek eloszlását, valamint a Sajó és Szinva folyását.

Az értekezésben 47 db kihelyezett mérőegység adatait vizsgáltam, melyek lefedik Miskolcot, a kelet-nyugati irányban húzódó Szinva völgyét, valamint az észak-déli irányban húzódó Sajó völgy egy részét is.

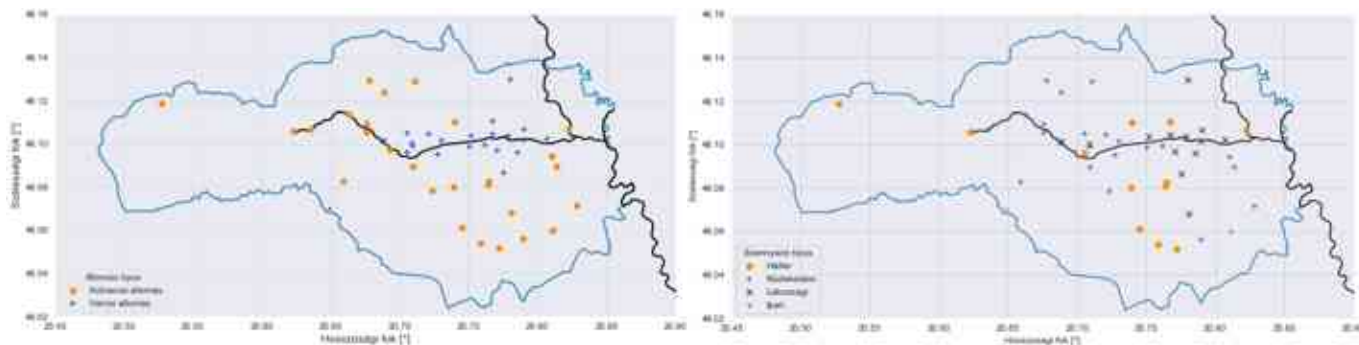
A domborzati adatokat a European Digital Elevation Model (EU-DEM) [135], version 1.1 alapján MATLAB programban a TopoToolbox programcsomag [136] segítségével dolgoztam fel, majd alakítottam megfelelő formátumra az ábrázolásokhoz. A város nyugati oldalán a Bükk hegység vonulatait láthatjuk, keleti oldalon pedig a Sajó-völgye határolja.



31. ábra Mérőegységek elhelyezkedése és tengerszint feletti magasságai

A 31. ábra alapján láthatjuk, hogy egy magasan fekvő pont (>700 m) került kijelölésre, két pont 300-400 m közötti szintmagasságon helyezkedik el, a többi mérési pont pedig jellemzően 100-300 méter tengerszint feletti magasságon található. A tengerszint feletti magasság nyugatról keleti irányba haladva csökken, Miskolc területe a dombvidékből síkságba vált, így a Sajó völgyében már 125 méter alatti mérési helyszíneket láthatunk.

A városon nyugat-keleti irányban húzódó Szinva völgye egy szűkebb sávban gyűjti a lakó és ipari területeket, majd ahogy ez a völgy szétnyílik és beletorkollik a Sajó völgyébe, itt terülnek szét a lakó és ipari területek is (30. ábra). A város adottságainak ismeretében a mérőhálózat helyszíneit, vagyis mérőpontokat a környezet beépítettsége alapján városi és külvárosi típusra, a környező, jellemző szennyező források alapján pedig lakossági, közlekedési, háttér és ipari típusokra osztottam. E két besorolás szerinti megjelenítést mutatja a 32. ábra.



32. ábra Állomások terület típusa és szennyező forrás típusa szerinti eloszlása

A mérőpontok fenti besorolását a helyszíni bejárásokon rögzített információk, a helyismeret és a pontok körüli műholdas felvételek alapján állapítottam meg. Az egyes típusokba eső állomások számát a 12. táblázat foglalja össze.

12. táblázat Állomások besorolása

Besorolás	Típus	Mennyiség [db]
Terület	Városi	21
	Külvárosi	26
Szennyező forrás	Lakossági	21
	Közlekedési	13
	Háttér	12
	Ipar	1

A 47 db helyszínből három a hivatalos OLM állomáson került elhelyezésre.

Három telepítési módot alkalmaztunk a különböző helyszíneken (33. ábra). Épületek homlokzatára saját gyártású tartóval történt a rögzítés, oszlopokra és erkélyekre METZ rögzítési technikát alkalmaztuk, az MVK Zrt. megállóira pedig egy sajátos, a kijelző fölé szerelhető rögzítési móddal kerültek elhelyezésre a mérőegységek.



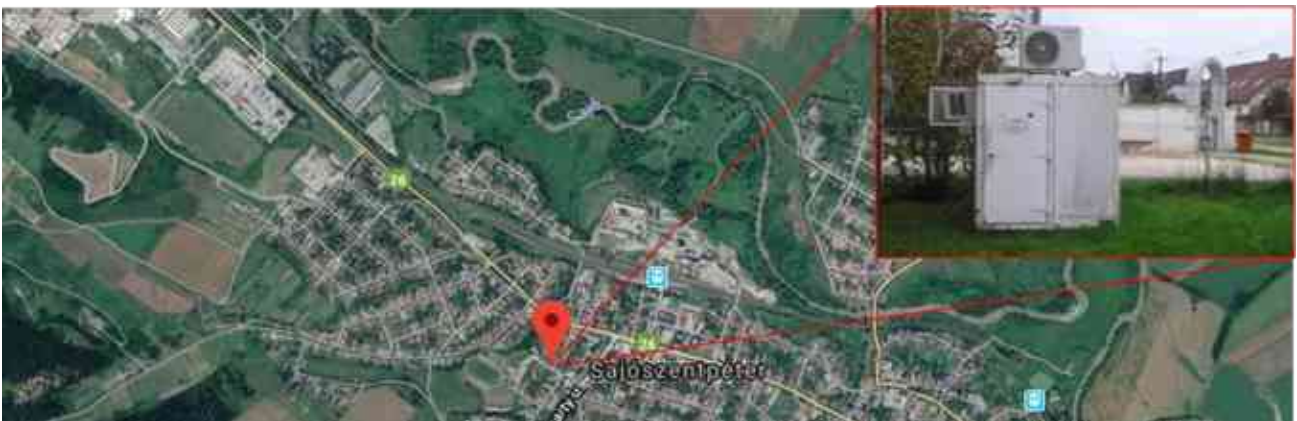
33. ábra Homlokzatok, oszlopok és megállók rögzítési módjai

A GPRS, NB-IoT és LoRaWAN vezeték nélküli adattovábbítási lehetőséget vizsgáltam, melyek közül az legideálisabbnak a GPRS kapcsolat bizonyult. Ezt a modult szereltük a mérőegységekbe. A perces adatsorok küldése egy hónap alatt egy egység esetében kb. 40 MB adatot jelent, így a szolgáltatóval való szerződéskötés során ezt vettük figyelembe. Minden mérőegységbe egyedi SIM kártya került. A mérőegységben elhelyezett GPRS modul az adatokat a Miskolci Egyetemen üzemeltetett szerverre továbbítja. A szerver oldalon történik az adatok adatbázisba való rendezése és előzetes szűrése. Az nyilvános adatelérés a <https://pmmonitoring.hu> oldalon lehetséges, mely a szerver adatait dolgozza föl, jeleníti meg és teszi elérhetővé az érdeklődők számára.

5 Mérési módszerek és a mért eredmények

5.1 A szenzor kiválasztása

2018. 05. 09-én, 2018. 06. 05-én és 2018. 06. 07-én a Sajószentpéteri OLM mérőállomás (34. ábra, N: 48.218538, E: 20.702893) közvetlen környezetében összehasonlító méréseket végeztem három olcsó szenzor típussal (Honeywell, Winsen és Plantower). A területre jellemző főbb légszennyező források a közlekedés és fűtési időszakban a lakossági tüzelőberendezések. Az állomás PM_{2,5} és PM₁₀ mérésére alkalmas GRIMM EDM180 mérőeszközzel van ellátva. A teszt céljából egy STM32 mikrovezérlő alapú mérőrendszert alakítottak ki. Ez mindhárom szenzorral aszinkron soros kommunikáción (UART) keresztül kommunikált és az adatokat közvetlenül laptopra kerültek mentésre 1 Hz-es gyakorisággal, azaz másodpercenként.



34. ábra OLM mérőállomás – Sajószentpéter, Sport utca

Az OLM állomás üzemeltetője rendelkezésre bocsátotta az állomáson mért PM₁₀ és PM_{2,5} koncentráció értékeket, valamint a hőmérséklet és a relatív páratartalom 1 perces intervallumú adatait. A mérőrendszer része volt egy AM2302 típusú digitális hőmérséklet és páratartalom mérő szenzor is. Az OLM adatok alapján a vizsgálat időtartamokra jellemző környezeti tényezők értékét a 13. táblázat foglalja össze. A három különböző időpontban végzett vizsgálat eredményeit egyesítettem, így összesen 292 percnyi érték állt rendelkezésemre, mint adatbázis. A PM₁₀ 9,2-126,9 µg/m³ közötti, a PM_{2,5} pedig 5,5-41 µg/m³ közötti tartományban változott. A 14. táblázat alapján látható, hogy a referencia állomás és a szenzorok között a PM_{2,5} koncentrációk korrelációs együttható négyzetei, vagyis a determinációs együtthatói (R²) 0,9 feletti, míg a PM₁₀ esetében nem érik el a 0,75-öt. Az átlagos hibák (Mean Bias Error, MBE) 4 és 18,5 µg/m³ között változnak a szenzorok között.

13. táblázat Környezeti tényezők maximum és minimum értékei a mérések alatt

Paraméter	Max/min érték
Hőmérséklet [°C]	24,5/16,5
Páratartalom [%]	86,5/52,7
PM ₁₀ [µg/m ³]	45,6/6,7
PM _{2,5} [µg/m ³]	40,2/5,1

14. táblázat PM_{2,5} és PM₁₀ koncentrációk R² és a MBE értékei az OLM állomás és szenzorok között egy perces időintervallumokra nézve

Paraméter	R ²		MBE [µg/m ³]	
	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁₀
Plantower	0,95	0,73	14,0	11,0
Winsen	0,91	0,72	8,2	18,5
Honeywell	0,91	0,72	4,0	6,9

Az összehasonlító mérések alapján mindhárom szenzor típus jól teljesít, a Plantower esetében erős PM_{2,5} korrelációt, a Honeywell esetében kis relatív eltérést emelhetjük ki.

15. táblázat PM_{2,5} koncentrációk R² értékei szakirodalom alapján

Szenzor	R ²
Plantower [137]	0,96
Plantower [138]	0,73
Plantower [139]	0,9
Plantower [140]	0,77
Winsen [139]	0,81
Winsen [141]	0,98
Honeywell [138]	0,77
Honeywell [141]	0,99

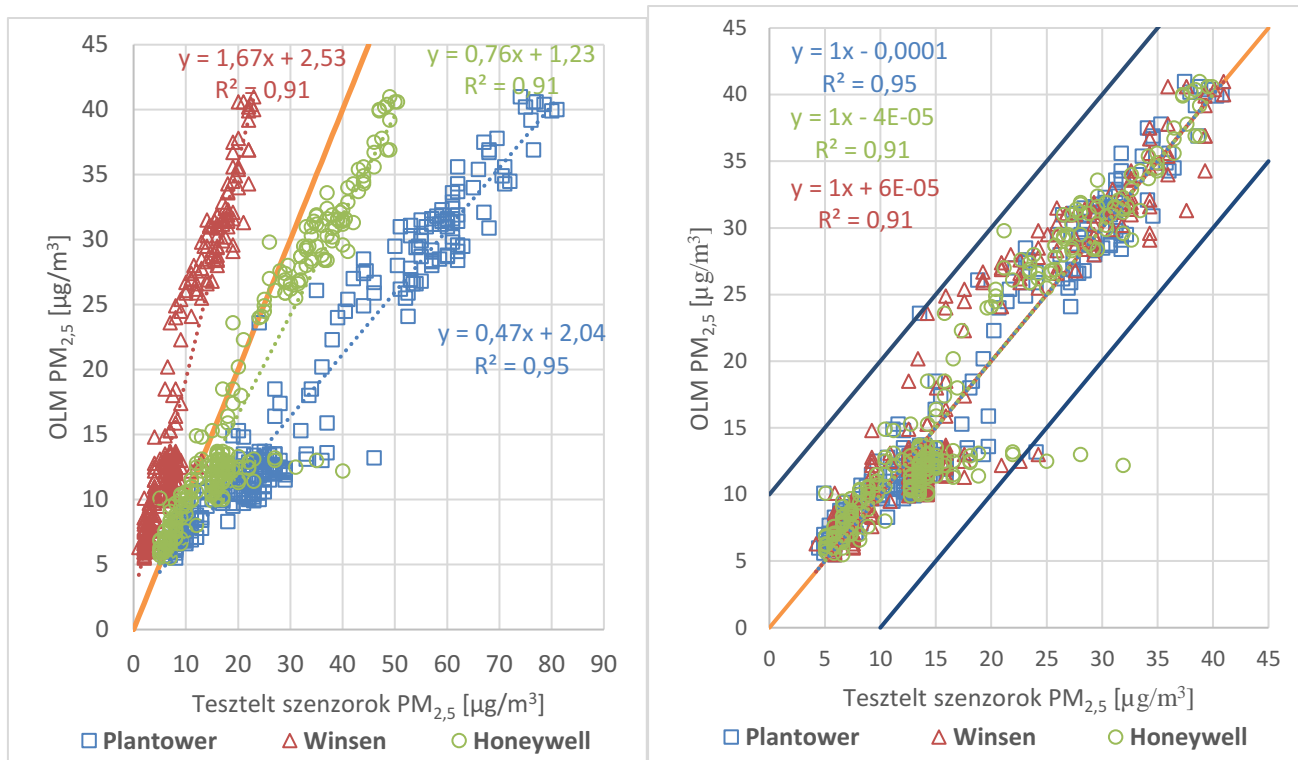
Az 15. táblázatban öt szakkikkből ([137-141]) gyűjtöttem ki a három szenzor típushoz tartozó PM_{2,5} koncentrációk R² értékei, mely alapján látható, hogy jelentős eltérések lehetnek, ha csak a statisztikai mutatók alapján kívánjuk megítélni az egyes szenzor típusokat. A mérési körülmények (a szennyezők összetétele, időjárási körülmények), üzemeltetési megoldások, mintavételezés gyakorisága, az adatok értékelése között jelentős különbség lehet, mivel nincs egységes módszer és mérőszám a pontosság, megfelelés megállapítására, így az egyes kutatócsoportok más-más irányból közelítik meg a kérdést.

A lineáris kalibráció a legkézenfekvőbb megoldás a mérési adatok javítására. Ekkor az R² értékek nem változnak, a mérőszám, amit használhatunk, az átlagos négyzetes hiba (Root Mean Square Error, RMSE). E tekintetben jelentős javulás látható mindhárom szenzor esetében (16. táblázat), a legkisebb értéket a Plantower érte el.

16. táblázat Szenzorok RMSE értéke az OLM állomás PM_{2,5} értékeihez képest

RMSE [µg/m ³]	Plantower	Winsen	Honeywell
Eredeti PM_{2,5}	17,7	9,5	5,4
Kalibrált PM_{2,5}	2,2	3,0	2,9

A 35. ábra szemlélteti az adatok kalibrálás előtti és utáni képét az OLM állomás adataihoz képest. A kalibrált értékeket mutató ábrán feltüntettem a +/- 10 µg/m³-es sávot is, mely a szenzorok adatlap szerinti pontossága. Egy-egy érték mindegyik szenzor esetében a határon mozog, a Honeywell esetében pedig 3 kiugró értéket láthatunk a 292 perces adatból, vagyis 1%-nyit.



35. ábra Eredeti és kalibrált PM_{2,5} értékek és a hozzájuk tartozó ideális trendvonal szenzoronként

5.2 Mérőegység vizsgálata

Az összeállított mérőegység hatását a beépített szenzor működésére és az egyes mérőegységek egymáshoz képesti méréseinek összehasonlítására vizsgáltam a védőburkolat hatását és ekvivalencia vizsgálatot végeztem.

5.2.1 Védőburkolat-hatása

A szenzorok kihelyezésekor ügyelnünk kell arra, hogy a páratartalom, nedvesség, napsugárzás és szél kedvezőtlen hatásait minimalizáljuk. A meteorológiai állomások mintájára egy lamellás védő burkolatot készítettem, melybe átszerelhető módon rögzíthetők az egyes szenzor típusok (36. ábra).



36. ábra Védőburkolat alja és a szenzorok rögzítési módja

Az összehasonlíthatóság érdekében mindhárom típusú szenzorból kettőt üzemeltettem be, melyeket két STM32 mikrovezérlő kezel. Az innen származó adatokat egy Raspberry PI 3 B+ mikroszámítógép rögzítette 6 másodpercenként. A méréseket a Miskolc, Táncsics tér lakóépület 1. emeleti erkélyén végeztem a főúttól kb. 50 méterre. A mérési rendszert és a mérési környezetet a 37. ábra szemlélteti.



37. ábra Mérési rendszer és mérési helyszín

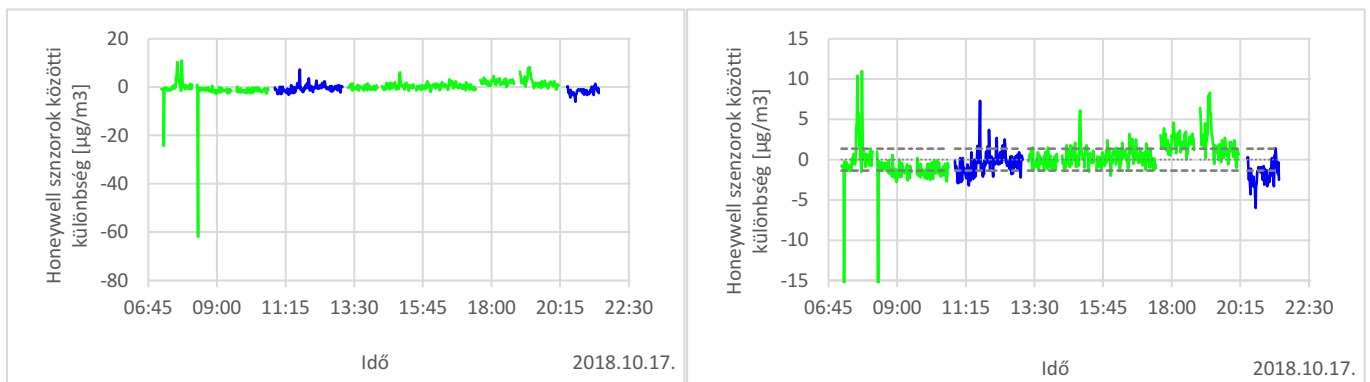
Ezen a területen a légszennyezők jellemzően a főút közlekedéséből, valamint a környező háztartási tüzelésből származnak, melyek közül az utóbbi jelentősebb. Mérési sorozatot végeztem, mely során egy-egy órás időtartamú mérések adatait rögzítettem, oly módon, hogy először egy szenzor sem volt a védőburkolat alatt, majd egyenként, felváltva egy-egy típust védőburkolat alá helyeztem. Ezt a módszert háromszor ismételt meg egy napon ugyanazon szenzorokkal. Az összehasonlító méréseket referencia mérő nélkül végeztem, ezért a védőburkolat nélküli mérés szolgál referenciaként. Ebből a jellegű mérésekből egy hosszabb, 19 órás időtartamút is végeztem (17. táblázat). A 12. számú mérésnél a hőmérséklet, páratartalom szenzor hibája lépett fel, így nem került rögzítésre ilyen adat. A rögzített hőmérséklet mérések azt igazolták, hogy ugyanaz a hőmérséklet a védőburkolat alatt és azon kívül, tehát nincs túlmelegedés. A védőburkolat hatásának meghatározásához vizsgáltam az azonos típusú szenzorok közötti $PM_{2,5}$ koncentráció eltéréseket és a PM_{10} - $PM_{2,5}$ arányok változását az egyenként egy órás, összesen 12 db mérés során.

17. táblázat Védőburkolat vizsgálat mérési sorozatának főbb adatai

No.	Mérés jellege	Mérés hossza	Kezdő időpont	Hőmérséklet [°C]	Relatív páratartalom [%]
1	Burkolat nélkül minden szenzor	1:01:00	2018.10.17 07:11	11,3	63,3
2	Plantower a mérőegységben	1:08:00	2018.10.17 08:21	20,9	40,7
3	Winsen a mérőegységben	1:02:00	2018.10.17 09:39	25,7	28,8
4	Honeywell a mérőegységben	1:10:00	2018.10.17 10:54	23,6	31,0
5	Honeywell a mérőegységben	1:02:00	2018.10.17 12:05	21,3	33,2

No.	Mérés jellege	Mérés hossza	Kezdő időpont	Hőmérséklet [°C]	Relatív páratartalom [%]
6	Winsen a mérőegységben	0:58:00	2018.10.17 13:18	22,7	29,7
7	Plantower a mérőegységben	1:02:00	2018.10.17 14:25	23,5	28,5
8	Burkolat nélkül minden szenzor	0:58:00	2018.10.17 15:32	24,3	31,9
9	Burkolat nélkül minden szenzor	0:58:00	2018.10.17 16:31	21,0	39,7
10	Plantower a mérőegységben	1:06:00	2018.10.17 17:38	17,6	47,9
11	Winsen a mérőegységben	1:06:00	2018.10.17 18:56	15,6	53,1
12	Honeywell a mérőegységben	1:02:00	2018.10.17 20:29	na.	na.
13	Burkolat nélkül minden szenzor	19:02:00	2018.10.19 11:33	17,4	62,7

A 38. ábra bal oldali diagramja a két Honeywell szenzor közötti különbséget mutatja a teljes tartományban, így látható, hogy megjelennek kiugró értékek ($-24,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-61,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A kiugró értékeket a védőburkolat nélkül végzett mérések alatt rögzítettem, adatszűréssel az ilyen kiugrások kiszűrhetők.

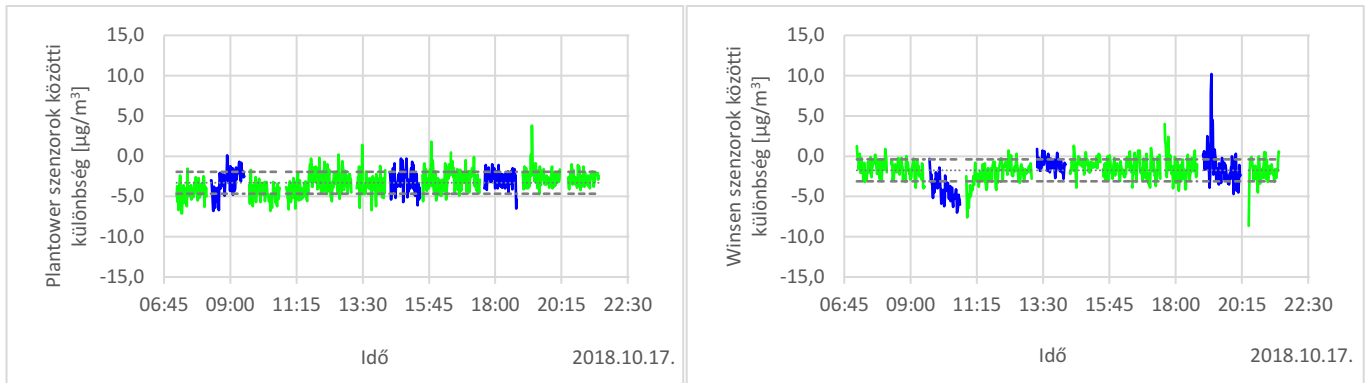


38. ábra Honeywell szenzorok $\text{PM}_{2,5}$ adatainak különbsége a hozzájuk tartozó szórás határokkal a védőburok vizsgálat során (kék: védőburkolattal, zöld: védőburkolat nélkül)

A 38. ábra jobb oldali diagramja a kiugró értékeket már nem mutatja, a 39. ábra skáláját alkalmaztam, így jobban összehasonlíthatók az átlagosnak tekinthető eltérések, melyek $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ és $-6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ között változnak, vagyis egy $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -es tartományon belül. A kiugró értékeket is figyelembe véve ez már $72,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -es tartomány. A 39. ábra bal oldalán a Plantower, jobb oldalán a Winsen szenzorok eltérései láthatók, melyek $3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-7,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ és $10,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-8,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ között változnak. A Plantower szenzorok eltérési tartománya így $10,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a Winsen szenzoroké pedig $18,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A 18. táblázat foglalja össze a fenti értékeket.

18. táblázat Szenzorok közötti eltérések maximum, minimum és tartomány értékei

Eltérések [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Honeywell teljes	Honeywell szűkített	Plantower	Winsen
Maximum	11	11	3,8	10,2
Minimum	-61,9	-6	-7,1	-8,6
Tartomány	72,9	17	10,9	18,8



39. ábra Plantower és Winsen szenzorok PM_{2,5} adatainak különbsége a hozzájuk tartozó szórás határokkal a védőburok vizsgálat során (kék: védőburkolattal, zöld: védőburkolat nélkül)

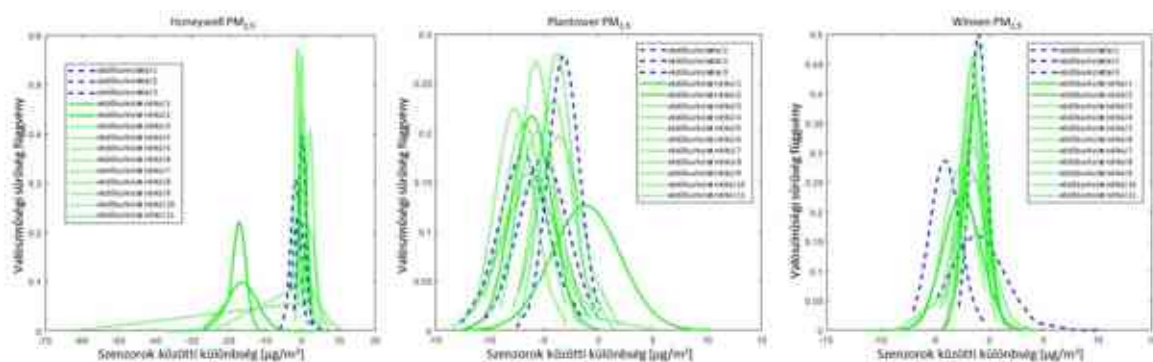
A Honeywell kiugró értékei a Plantower-nél és Winsen-nél nem jelennek meg. Az utóbbi két szenzor eltérései azonban jól követik egymást. 19:13-kor a Winsen majd a Plantower is nagyobb eltérést adott.

Az eltérés a szenzorok elhelyezkedéséből adódott. A védőburokban elhelyezkedő egyik Winsen szenzor (W2) és Plantower (P2) szenzor a mérőplatform azonos oldalán volt, míg a W1 és P1 a másik oldalán, ahogyan azt a 40. ábra mutatja. Ez a jelenség az mutatja, hogy a védőburok nem befolyásolta a szenzor érzékenységét, ugyanúgy követte a védőburokban és a védőburok nélkül kihelyezett szenzor a szálló por koncentrációjának változását.



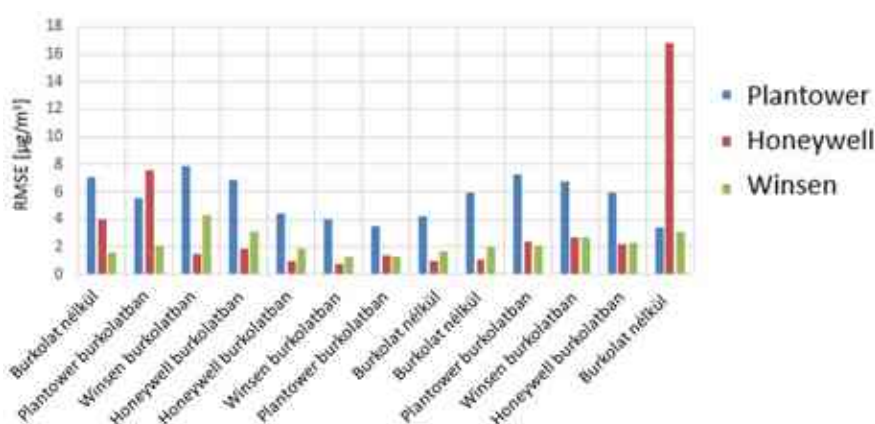
40. ábra Plantower és Winsen szenzorok helyzete a 11. számú mérés alatt 18:56 és 20:12 között

További vizsgálatokat végeztem a fenti megállapítás alátámasztására az eltérések normális eloszlás valószínűségi sűrűségfüggvényeinek meghatározásával (41. ábra).



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

A védőburokkal végzett mérésekhez (3 db) képest a védőburkolat nélküli mérések (11 db) függvényei egyedül a Honeywell esetében térnek el jelentősen, ezt pedig a nagy kiugró értékek okozzák. Kék vonal jelzi a védőburkolattal végzett méréseket, zöld pedig burkolat nélkülieket. Amennyiben eltekintünk a kiugrásoktól, ill. a másik két szenzortípust is vizsgáljuk, látható, hogy nincs számottevő eltérés. A 42. ábra szemlélteti az eltérések RMSE értékeit, melyeken a Honeywell szenzor kiugrásait is láthatjuk. Kültéri mérési sorozat esetében lehetséges, hogy valóban nagyobb koncentrációjú légtömeget mérünk, azonban a többi szenzor adatai alapján a Honeywell szenzor mért hibásan, nem egyéb külső körülmény okozta a nagy kiugrást. A mérési sorozat alatt rögzített azonos típusú szenzorok értékeiből számolt eltérések időbeli változásának vizsgálata és normális eloszlás valószínűségi függvényei alapján tehát a védőburkolat nem befolyásolja az abban elhelyezett szenzor mért értékeit a védőburok nélkül mérő szenzorhoz képest.

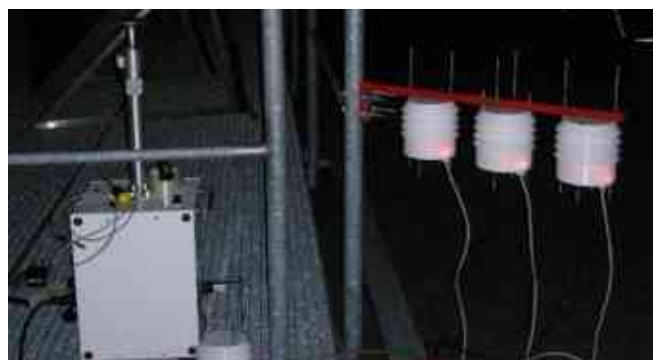


42. ábra A Honeywell, Plantower és Winsen szenzorokhoz tartozó eltérések RMSE értékei

A 5.1 fejezetben bemutatott adatok alapján a Plantower szenzor jobban kalibrálható és a fentiek alapján megbízhatóbb, mint Honeywell és Winsen szenzor. Az előzetes vizsgálatok tapasztalata alapján a továbbiakban a Platnower 7003 típusú szenzorral dolgoztam.

5.2.2 Ekvivalencia vizsgálat

Az elkészült mérőegységek ekvivalencia vizsgálatát az egyetem C/1 épület tetőteraszán elhelyezett három mérőegység (LIFE_1; LIFE_2; LIFE_3) és a TSI DustTrack 8534-M (43. ábra), mint referencia eszköz segítségével végeztem el.



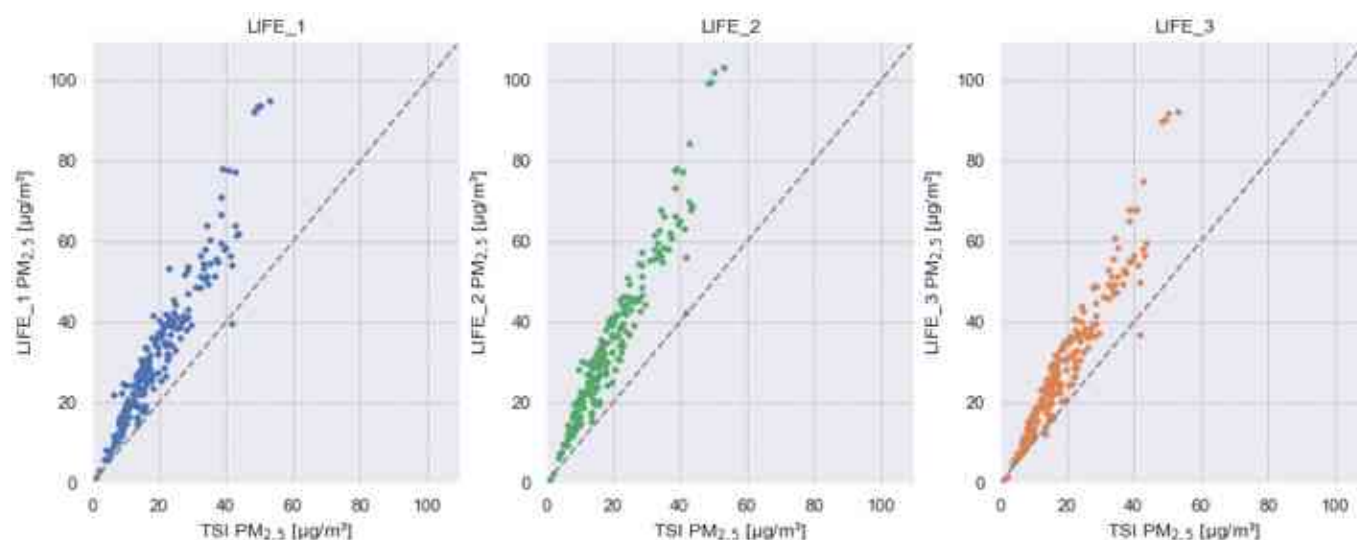
43. ábra Az ekvivalencia teszt során a Miskolci Egyetem tetőteraszán kihelyezett eszközök

Az ekvivalencia vizsgálat során a PM frakciók közül a PM_{2,5}-re fókuszáltam, annak kiemelt egészségügyi hatásai miatt. A vizsgálat során a mérőegységek nyers adatait használtam föl. A három mérőegység háromszor 3 napnyi órás átlagértékeit viszonyítottam a TSI eszközhöz, mint referenciához, tehát az egységeket 216 adatpont alapján hasonlítottam össze.

19. táblázat Ekvivalencia teszt körülményei

Paraméter	Max/min érték
Hőmérséklet [°C]	15,9/-1,9
Páratartalom [%]	91,4/33,3
Nyomás [hPa]	1002/980
PM ₁₀ [µg/m ³]	60,6/1,7
PM _{2,5} [µg/m ³]	53,1/1,1

A 216 óra mérési időtartam alatt néhány kiugró értéktől eltekintve a vizsgált három mérőegység azonos PM trendet mutat. A PM_{2,5} koncentráció 1-100 µg/m³ közötti tartományban, a PM₁₀ pedig 1-120 µg/m³ közötti tartományban mozgott.



44. ábra A LIFE_1, LIFE_2, LIFE_3 mérőegységek és TSI referencia PM_{2,5} koncentráció értékei

Az egyes LIFE mérőegységeket egymáshoz és a referencia TSI eszköz értékeihez képest vizsgáltam. Utóbbit a 44. ábra szemlélteti, statisztikai jellemzőiket pedig a 20. táblázat mutatja be.

A mérőegységek mind a TSI-hez, mind egymáshoz képest jól korrelálnak ($R^2 > 0,9$), az egymáshoz képesti átlagos abszolút hiba (MAE) 5 µg/m³ körüli, a referenciához képest pedig 15 µg/m³, a RMSE pedig 4-18 µg/m³ között változik. A bővített bizonytalansági tényezőt (REU) is vizsgáltam, mely a mérőegységek egymáshoz képesti viszonyában 20 % körüli, a referenciához képest a nyers adatokra vonatkoztatva pedig 65-85% között változik. Utóbbi kalibrációval nagy mértékben javítható.

A fentiek alapján a vizsgált mérőegységek megfelelő ekvivalenciával rendelkeznek ahhoz, hogy egy nagy felbontású PM mérőhálózatban alkalmazhatóak legyenek.

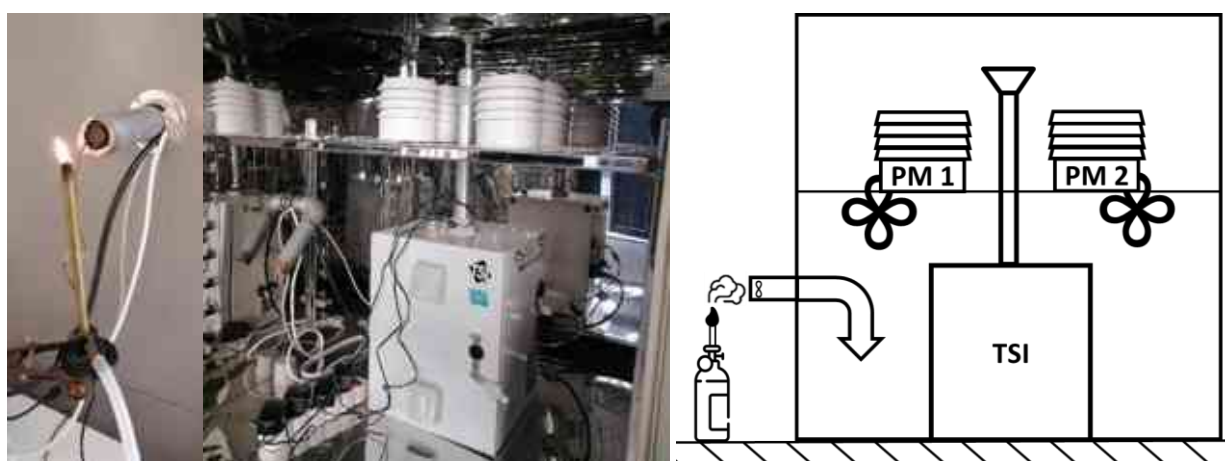
20. táblázat Ekvivalencia vizsgálat PM_{2,5}-re vonatkozó statisztikai eredményei

R ²		TSI	LIFE_1	LIFE_2	LIFE_3
MAE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
TSI		1	0,913	0,919	0,926
LIFE_1		12,4	1	0,974	0,978
LIFE_2		15	3,5	1	0,99
LIFE_3		10	2,6	5,1	1
RMSE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]					
REU [%]					
TSI		1	14,9	17,7	12,5
LIFE_1		70	1	4,2	5,7
LIFE_2		84,3	17,1	1	3,7
LIFE_3		65,7	20,1	21	1

5.3 Mérőegység kalibrációja

Az alábbiakban meghatározott módszer szerint történt az egyes porszenzorok kalibrációja, melyek azt követően már egy saját kalibrációs függvénnyel kerültek kihelyezésre. A kalibrációs vizsgálatokat klímakamrában végeztem, a szálló por forrása izobutén gáz égetéséből keletkező korom volt, melyet egy ventilátor segítségével vezettem be a kamrába.

A szálló por koncentráció méréséhez referenciaként a TSI DustTrack 8534-M eszközt használtam, ami a méretéből adódóan a klímakamra közepén került elhelyezésre. A beszívás így a klímakamra felső részének közepén történt, ahová a már átkevert füst érkezett. Fenti vizsgálataim alapján (4.3 fejezet) a klímakamrán belül a környezeti paraméterek alig változtak, így a füst eloszlásra való tekintettel a referencia eszköz beszívásához minél közelebb négy szenzoros mérőegységet helyeztem el, melyek rögzítéséhez egy perforált fém tálcát használtam (45. ábra).

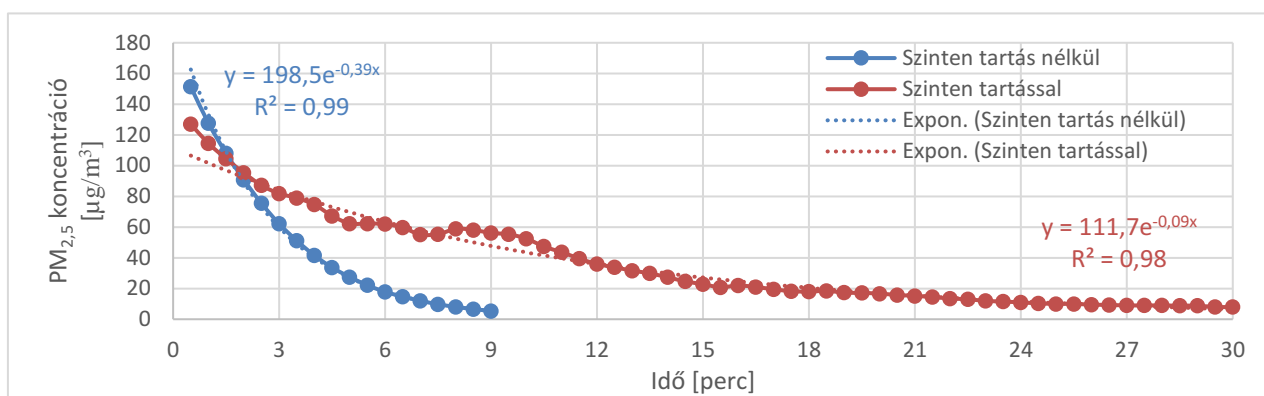


45. ábra Füst forrása a bevezető nyílás előtt valamint a klímakamra belsejében elhelyezett TSI referencia és szenzoros mérőegységek

A korom tartalmú égési maradékot (füstöt) izobutén gáz égetésével állítottam elő. A füstöt a klímakamrába ventilátor segítségével az alsó tartományokba juttattam. A belső keringetés révén a füst a

klímakamra hátsó falához szívódik, majd a felsőbb részeket átkeringetve áramlik ki. Ez nagy mértékben segíti a keveredést. Az izobutén (C₄H₈) kettős kötással rendelkező szénhidrogén, mely égése során gomolygó, fekete füst keletkezik. A klímakamra hamar telítődik a bejuttatott füsttel, így rövid ideig nagy lánghossz segítségével megemeltem a kamra porkoncentrációját, majd kis lánghossz segítségével igyekeztem szinten tartani, lassítani a tisztulást.

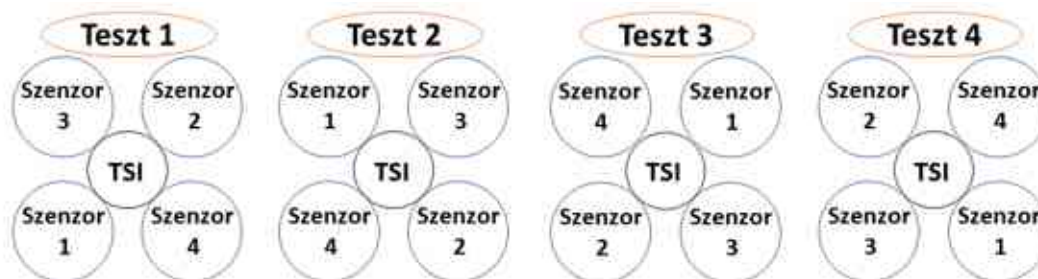
Miként a 46. ábra mutatja, szinten tartás nélkül a klímakamrában mérhető PM_{2,5} koncentráció 150 µg/m³-ről 5-6 perc alatt 20 µg/m³ alá csökken, további 5 perc elteltével pedig 5 µg/m³ alá. Szinten tartással a tisztulási idő kitolható, azonban a függvény exponenciális jellege sérül, a néhol nagyobb füstmennyiség bejuttatásakor megugrik a koncentráció, túlzott visszavételekor pedig hirtelen csökken. Ennek szabályozása manuálisan történt.



46. ábra PM_{2,5} koncentráció változása a klímakamrában az idő függvényében

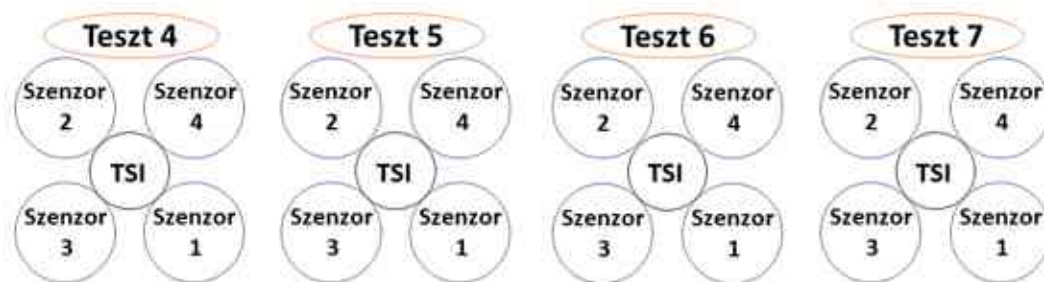
A tisztulási hányad a fentiek alapján szinten tartás nélkül átlagosan 24 µg/m³*perc, szinten tartással pedig 7,5 µg/m³*perc. A mérési idő meghosszabbítása érdekében tehát a füst, vagyis a szálló por folyamatos utánpótlását kellett biztosítani, melyet a kalibrációt végző személy szabályozott.

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 eszköz körül, ahogy azt a 47. ábra szemlélteti (Teszt 1 -Teszt 4).



47. 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 48. ábra mutatja.

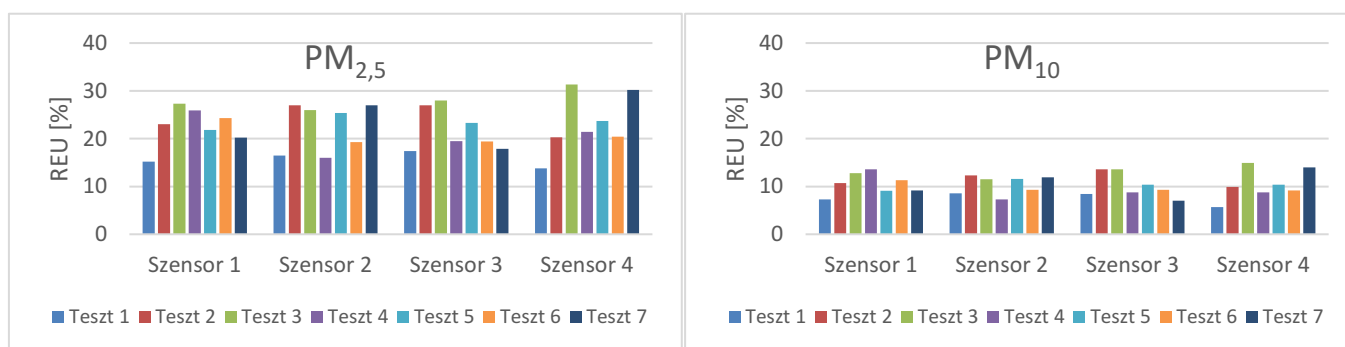


48. ábra Szenzoros mérőegységek azonos elhelyezése a TSI referencia körül a megismételhetőségi tesztek során

A vizsgálatok során a klímakamrában mért hőmérséklet 26 – 29 °C, a relatív páratartalom 33 – 63%, a nyomás pedig 992 – 1008 hPa között változott. A referencia és a mérőegységek 5 másodpercenként rögzítették az PM₁, PM_{2,5} és PM₁₀ értékeket, valamint a T, RH és P értékeket. A kiértékelés az 5 mp-es értékek 30 mp-re való átlagolása után történt.

A szenzorok és a TSI által mért 30 mp-es átlag PM₁, PM_{2,5} és PM₁₀ értékek közti összefüggést lineáris kalibrációs módszerrel határoztam meg, így az $y = a \cdot x + b$ függvényben y a TSI értékeknek x pedig a szenzor értékeknek felel meg, az a konstans a kapcsolat meredekségét a b konstans pedig az eltolás mértékét jelöli. A mérések bizonytalanságát a referencia módszernek való megfeleléshez használt számítási módszer alapján [142] végeztem el az elérhető eszközök segítségével [143], ahol a már a lineáris összefüggés alapján korrigált értékeket helyettesítettem be. A fenti számítási módszert általában 24 órás átlag értékek kiértékelésére használják, azonban az értékelést segíti a kiszámított százalékos érték.

A hét teszt eredményét összevonva vizsgáltam, így teljes képet kapunk arról, hogy milyen eltérésekre lehet számítani a módszer alkalmazásánál. Az előző fejezet alapján kiterjesztett mérési bizonytalanságot (REU) számoltam az egyes szenzorokra. Ennek az eredményeit a 49. ábra összesíti.



49. ábra Mérés bizonytalanságok szenzoronként és tesztenként a PM_{2,5} és PM₁₀ esetében

Vizsgáltam a kapott kalibrációs függvények meredekségét, melyet a -val jelöltem és a 50. ábra foglalja össze számított értékeit tesztenként.

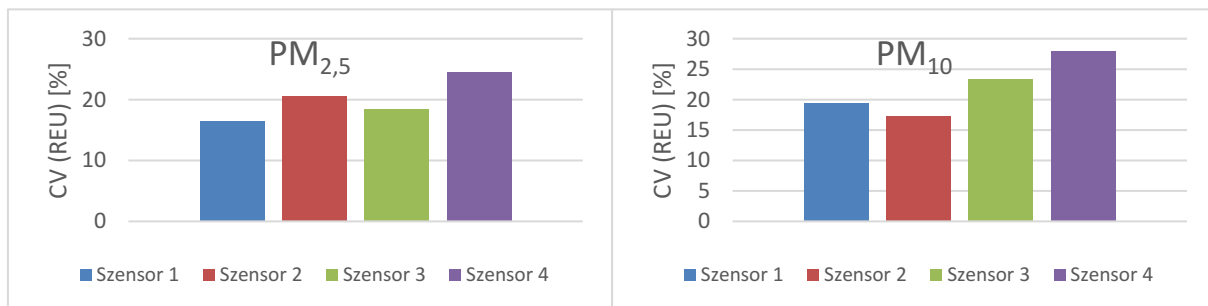


50. ábra Meredekség értékek szenzoronként és tesztenként a PM_{2,5} és PM₁₀ esetében

A mérési bizonytalanságok között látható eltérések függetlenek a mérőegységek (Szenzor) elhelyezésétől (49. ábra), a meredekség értékek esetében sem állapítható meg tendencia az elhelyezés függvényében (50. ábra). Az összes teszt és szenzor esetében a mérési bizonytalanság PM_{2,5} esetében 31,3% és 13,8%, PM₁₀ esetében 14,9% és 5,7% között változik, a meredekség értékek pedig 0,7-0,5 (PM_{2,5}), valamint 0,78-0,5 (PM₁₀) értékek közötti.

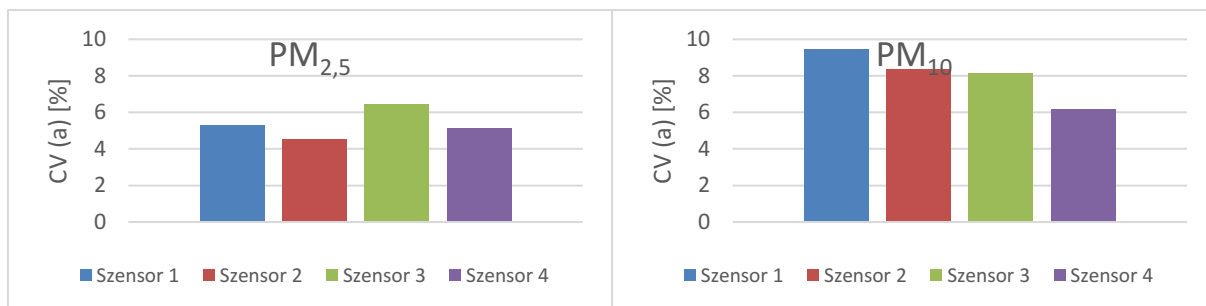
Az összes teszt alapján az egyes szenzorok értékeit a relatív szórás (más néven szóródási együttható, CV) segítségével tudjuk összehasonlítani.

A mérési bizonytalanságok relatív szórása PM_{2,5} esetében 16,5% és 24,5%, PM₁₀ esetében 17,3% és 28% között (51. ábra), a meredekség értékek relatív szórása pedig 4,5-6,5% (PM_{2,5}), valamint 6,2-9,4% (PM₁₀) között (52. ábra) változik.



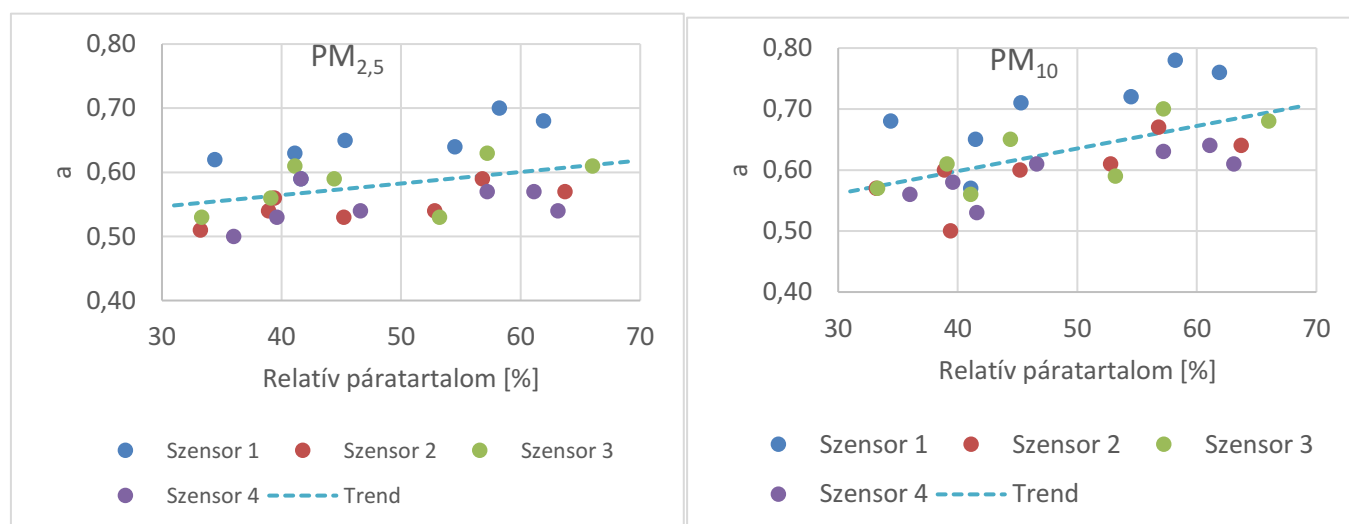
51. ábra Az összes teszt alapján számolt mérési bizonytalanság relatív szórása szenzoronként

A fentiek alapján tehát kijelenthető, hogy a szenzorok pozíciója és a kalibráció megismétléséből 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. Ezen eredmények alapján egy mérőegység kalibrációját egy pozícióban háromszori ismétléssel végeztem el.



52. ábra Az összes teszt alapján számolt meredekség értékek relatív szórása szenzoronként

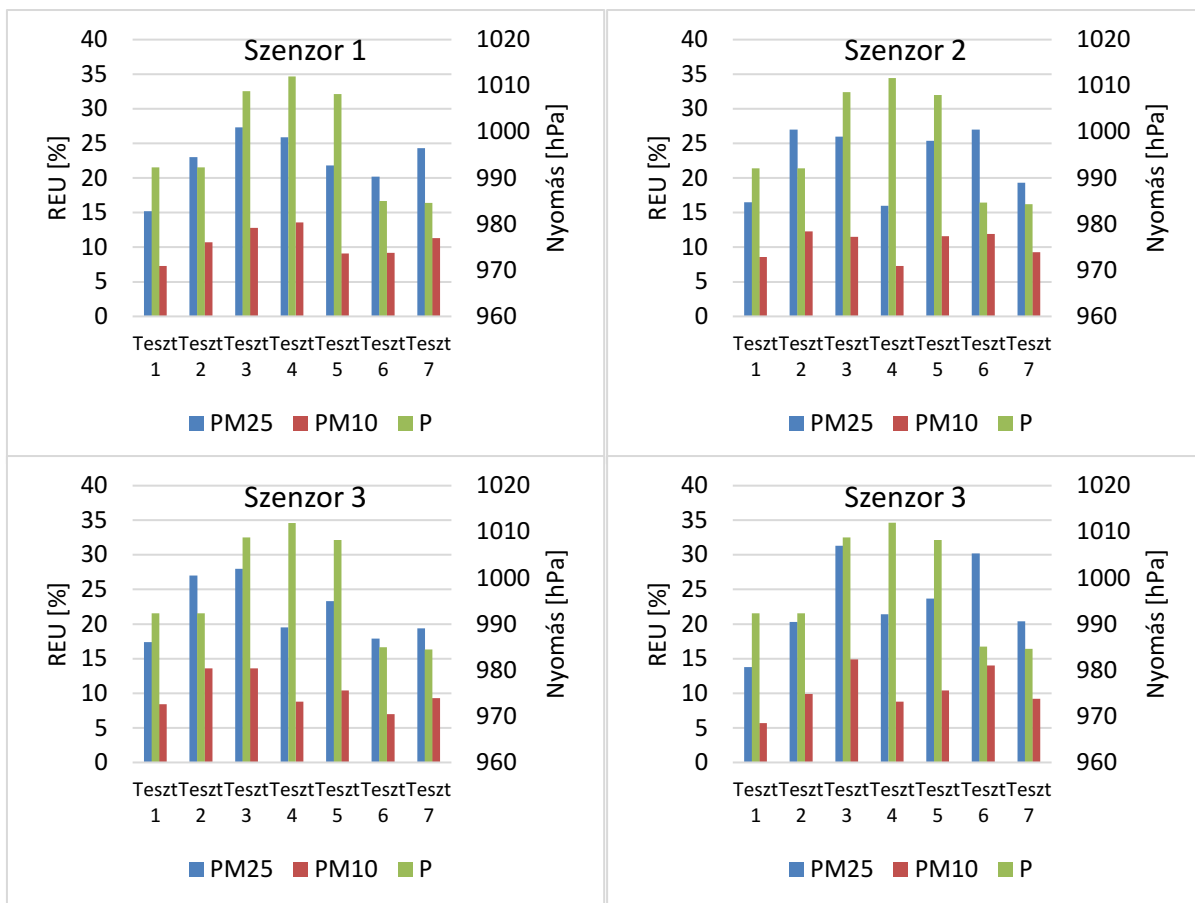
A klímakamrában végzett tesztek során a hőmérséklet 26 – 29 °C, a relatív páratartalom 33 – 63%, a nyomás pedig 992 – 1008 hPa között változott. A hőmérséklet viszonyok alig változtak, így ennek hatását nem vizsgálom. Irodalmi adatok és korábbi saját vizsgálataim alapján a páratartalom hatással van a szálló por koncentráció mérő szenzorokra ([144-146]), ezért vizsgáltam az a értékek és a relatív páratartalom alakulását a klímakamrában végzett tesztek adatai alapján.



53. ábra Tesztenként és szenzoronként mért átlagos relatív páratartalom és a hozzájuk tartozó a értékek a PM_{2,5} és PM₁₀ esetében

A 53. ábra foglalja össze a tesztek során az egyes mérőegységek (Szenzor) által mért relatív páratartalom értékeket és a számított a értékek kapcsolatát. Az összes a értéket figyelembe véve trend vonalat vettem fel, mely szemlélteti az a értékek, vagyis a kalibrációs egyenes meredekségének emelkedését a relatív páratartalom függvényében.

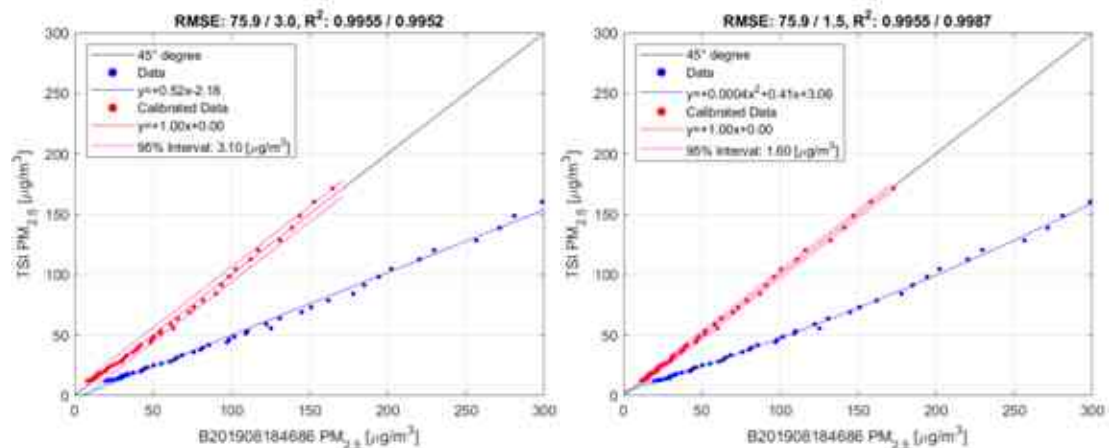
A 54. ábra foglalja össze a tesztek során az egyes mérőegységek által mért nyomás értékeket, melyek alapján megfigyelhető, hogy három különböző nyomás szint különböztethető meg, a Teszt 1, Teszt 2, valamint Teszt 3 – Teszt 5, továbbá a Teszt 6 és Teszt 7 esetében. Az azonos nyomás szintű tesztek azonos napon történtek, így bizonyos, hogy a nyomás értéket alapvetően a légköri nyomás befolyásolja.



54. ábra Számított mérési bizonytalanságok a PM_{2,5} és PM₁₀ esetében és az átlagos klímakamra nyomás tesztenként és szenzoronként bontva

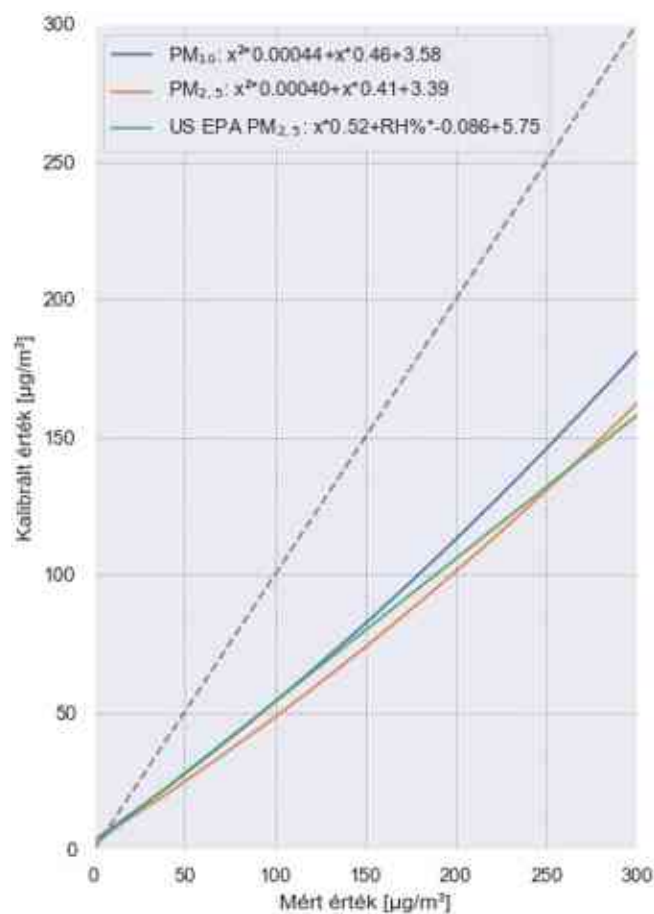
A fentiek alapján megállapítottam, hogy a mérőegységeket egységesen 40-50%-os relatív páratartalom és 25 °C-os hőmérséklet mellett 0-150 µg/m³ PM_{2,5} porkoncentráció között fogom kalibrálni.

A kalibrációt 135 db mérőegységre végeztem el, melynek során az 5 mp-ként rögzített szenzor és referencia adatokat szinkronizáltam, majd 15 mp-es időközökre átlagoltam. A Mellékletben (13.2 fejezet) megtalálható egy minta kalibrációs jegyzőkönyv, mely az összes mérőegységre dokumentálásra került. A PM_{2,5} és PM₁₀ értékek közti összefüggést másodfokú polinomináris kalibrációs módszerrel határoztam meg, így az $y=a*x^2+b*x+c$ függvényben az y a TSI értékeknek, x pedig a szenzor értékeknek felel meg. Vizsgáltam a lineáris függvény kapcsolatát is, mely jó eredményt adott, de az adatpontokban látható elhajlást pontosabban írja le a másodfokú polinom, és az RMSE és R² értékekben is jobb eredményt adott, mint az elsőfokú polinom. A 55. ábra példaként bemutatja a B201908184686 számú szenzor esetében a PM_{2,5}-re meghatározott első,- és másodfokú polinomináris kalibráció eredményeit. A másodfokú polinom RMSE értéke az elsőfokúhoz képest 50%-kal jobb, és a R² értéke is javult, ezzel együtt mindkét megközelítés kiváló szenzor kalibrálhatóságot mutat.



55. ábra Első, - és másodfokú polinomináris $PM_{2,5}$ kalibrálás eredményei a B201908184686 számú szenzor esetében

Az egyes mérőegységekre külön-külön számítottam a görbéket és rögzítettem adatbázisba az eredményeket. Az egyenként meghatározott paramétereket átlagoltam PM_{10} és $PM_{2,5}$ esetére. A 56. ábra PM frakcióként megmutatja az átlag görbét, mely szerint a mérőegység által mért értéket átszámítom a kalibrált értékre. Ábrázoltam még az US EPA ezen tartományra vonatkozó korrekciós egyenletét, melyet 45%-os páratartalomra, vagyis a klímakamrában történő kalibrálás átlagos relatív pártartalom értékére számoltam.



56. ábra Átlagolt kalibrációs görbék és egyenletei

5.4 Mérőegységek kompenzációja

Számos tanulmány rámutat arra, hogy a költséghatékony szálló por szenzorok laboratóriumban végzett kalibrációja nem elégséges, amennyiben kültéren, változatos környezeti körülmények között szeretnék használni az eszközöket [60-64]. Irodalmi adatok szerint a szenzorok méréseit első sorban a relatív páratartalom és hőmérséklet befolyásolja [147, 148], valamint ezekből meghatározható harmatpont. A páratartalom hatással lehet a szenzor detektálására, mivel hasonlóan a szerves anyagokhoz, a víz elnyeli az infravörös sugárzást és a fototranzisztor által kapott csökkentett fényintenzitás miatt a részecske koncentráció túlbecsülését okozhatja. A nagy koncentrációjú vízgőz a szenzorok áramköreinek meghibásodásához vezethet, a harmatpont függvényében pedig a detektor felületére vízgőz csapódhat ki, így hibás mérési eredményeket okozva.

A környezeti paraméterek szenzorok mérésére gyakorolt hosszú távú hatásának megismerése céljából 2019.07.06. és 2020.09.30. között összemérést végeztem az OLM M5-os, vagyis Alföldi utcai állomása (57. ábra) és egy kalibrált mérőegység segítségével. Az állomáson a GRIMM EDM 180 referencia eszköz, a mérőegységben a Plantower 7003-es szenzor üzemelt a vizsgálat teljes ideje alatt. A mérőegység a referencia eszköz beszívó csonkjával egy magasságban került elhelyezésre (57. ábra).



57. ábra Az összemérés helyszíne és a mérőegység, valamint referencia eszköz beszívó csonkja

Az adatok kiértékeléséhez a referencia eszköz perces, a mérőegység 5 mp-es nyers adatait használtam föl, melyekből órás és napi átlagokat számoltam. Az OLM állomás az alábbi környezeti paramétereket mérte és rögzítette: hőmérséklet, relatív páratartalom, szélirány, szélesség. A harmatpont (D, dew point) értékeket a Magnus-Tetens egyenlet [149] segítségével számoltam.

$$D = \frac{b * \alpha(T,RH)}{a - \alpha(T,RH)} \quad (3)$$

ahol,

D: Harmatpont [°C]

T: Hőmérséklet [°C]

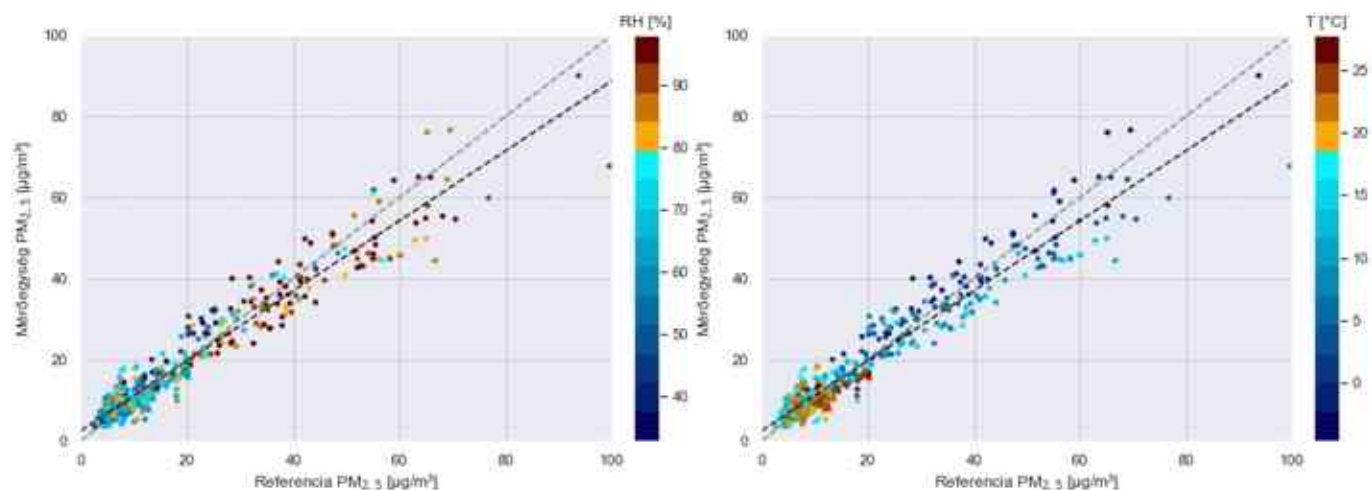
RH: Relatív páratartalom [%]

a: 17,625

b: 243,04 °C

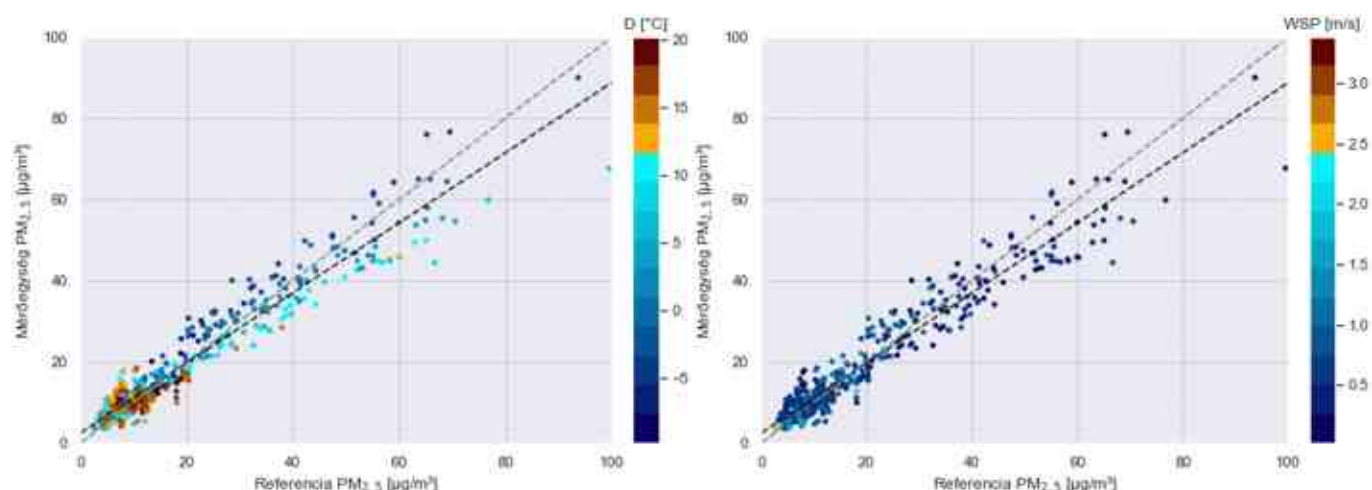
$\alpha(T,RH)$: $\ln(RH/100) + a * T / (b + T)$

Lineáris korreláció segítségével vizsgáltam a referencia és a mérőegység PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékei közötti kapcsolatot, többszörös lineáris regresszió segítségével pedig a környezeti paraméterek hatásának erősségét. A kapott eredmények alapján pedig meghatároztam a két szennyezőre azt az egyenletet, mely a statisztikai mutatók alapján a környezeti paraméterek figyelembevételével a legjobban közelíti a mérőegység kalibrált értékeit a referencia eszköz mért értékeihez. A kültéri, hosszú távú összemérés PM_{10} és $PM_{2,5}$ adatait órás és napi átlagértékek szerint vizsgáltam.

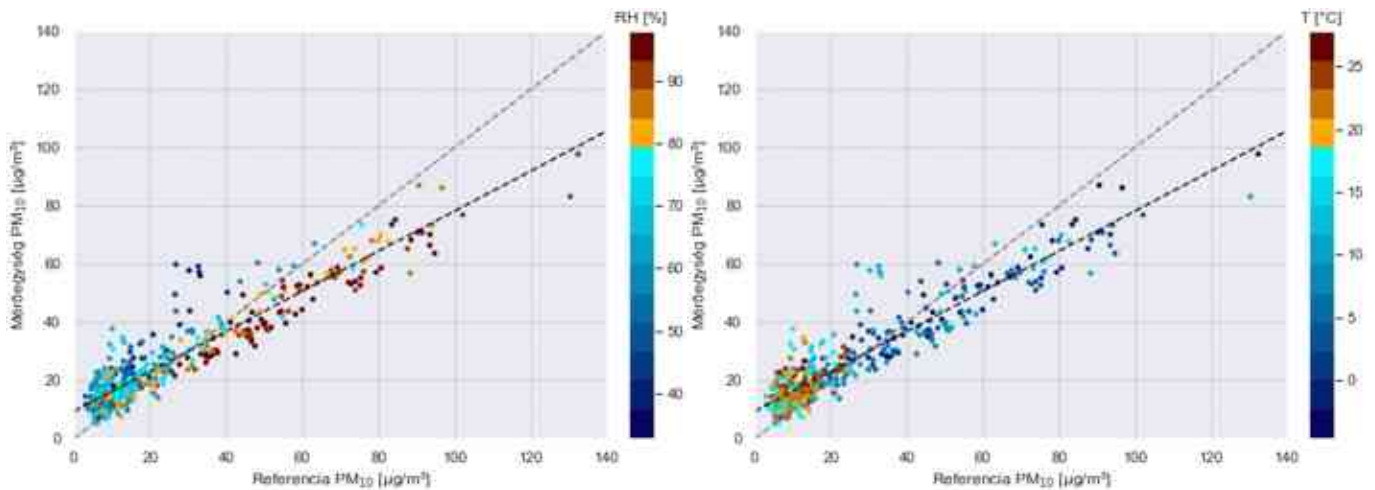


58. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért napi átlag $PM_{2,5}$ koncentráció értékei a relatív páratartalom és a hőmérséklet paraméterek összefüggésében

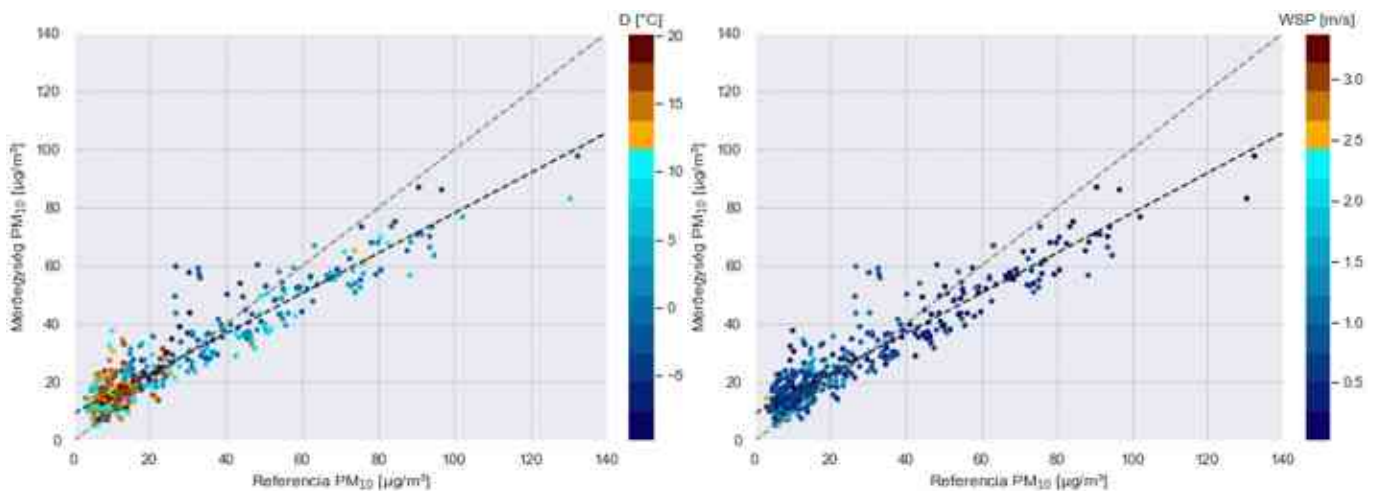
A nagyobb relatív páratartalom, valamint nagyobb hőmérséklet esetében nagyobb PM értékek figyelhetők meg (58. ábra és 60. ábra). A 60. ábra alapján látható, hogy a PM_{10} frakció esetében a relatív páratartalom értékek elkülönülnek az ideális egyenes mentén, hasonlóan a $PM_{2,5}$ frakció esetében a hőmérséklet értékekhez (58. ábra).



59. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért napi átlag $PM_{2,5}$ koncentráció értékei a harmatpont és a szélsebesség paraméterek összefüggésében



60. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért napi átlag PM_{10} koncentráció értékei a relatív páratartalom és a hőmérséklet paraméterek összefüggésében



61. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért napi átlag PM_{10} koncentráció értékei a harmatpont és a szélesség paraméterek összefüggésében

A 90% fölötti relatív páratartalomnál a mérőegység kalibrált PM_{10} értékei távolabb esnek az ideális egyenestől, mint az alacsonyabb páratartalmaknál. A 0 °C körüli hőmérsékleteknél a mérőegység kalibrált $PM_{2,5}$ értékei közelebb esnek az ideális egyeneshez, mint a 15 °C körüli értékek esetében. A $PM_{2,5}$ frakció esetében a harmatpont eloszlásán jól látszik a hőmérséklethez hasonló eloszlás (59. ábra), míg a PM_{10} frakció esetében ez nem jellemző (61. ábra). A szélesség ábrázolása alapján láthatjuk, hogy mindkét PM frakció esetében (59. ábra és 61. ábra) az alacsony szélesség értékekhez magasabb PM értékek tartoznak.

Az éves összemérés adatait felhasználva lineáris regresszió segítségével vizsgáltam a környezeti paraméterek hatásának erősségét. Az analízis eredményét a 21. táblázat foglalja össze. 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, $PM_{2,5}$ esetében pedig a harmatpont ad hozzá a

legtöbbet a kapcsolathoz, ahogy azt a 21. táblázat is mutatja. A számított értékek alátámasztják a fenti ábrák alapján tett megállapításokat.

21. táblázat Éves összemérés lineáris regresszió analíziseinek eredménye (R^2 értékei)

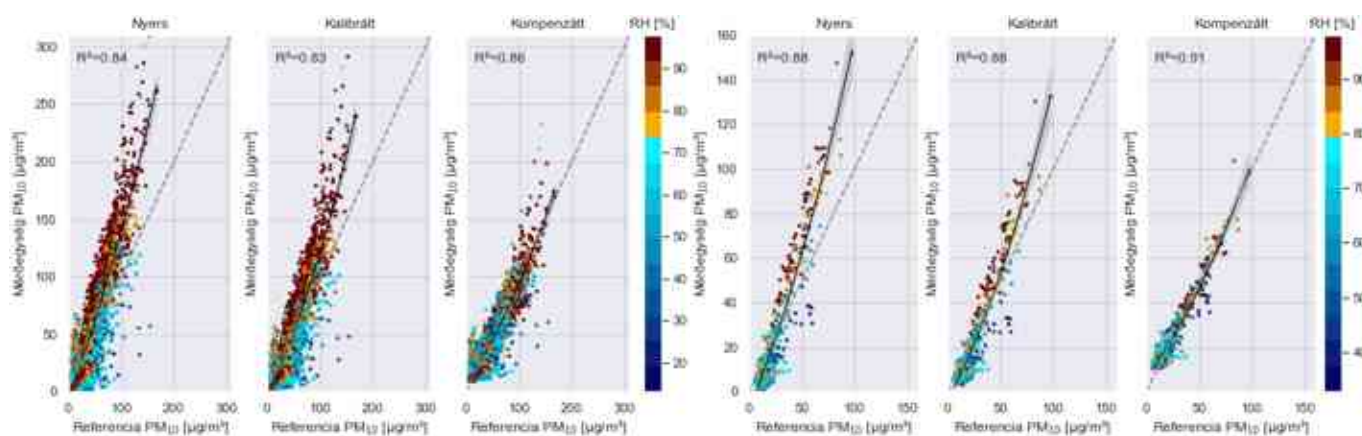
Átlagolás	Órás átlag		Napi átlag	
	PM ₁₀	PM ₂₅	PM ₁₀	PM ₂₅
Mérőegység PM				
Referencia PM	0,837	0,915	0,878	0,934
Referencia PM + Hőmérséklet	0,838	0,928	0,878	0,948
Referencia PM + Relatív páratartalom	0,851	0,915	0,909	0,934
Referencia PM + Harmatpont	0,840	0,926	0,884	0,949
Referencia PM + Szélsebesség	0,839	0,917	0,878	0,934
Összes környezeti paraméter	0,862	0,934	0,920	0,956

A ábrák és a számított értékek alapján kísérletet tettem egyenlet alkotásra, mely leírja a kapcsolatot az óras átlagos PM és környezeti paraméterek között. A legjobban közelítő eredményeket a PM frakcióként kiemelt környezeti paraméterrel (PM₁₀: RH, PM_{2,5}: D) kombinált egyenlet adta, melyet a 22. táblázat foglal össze.

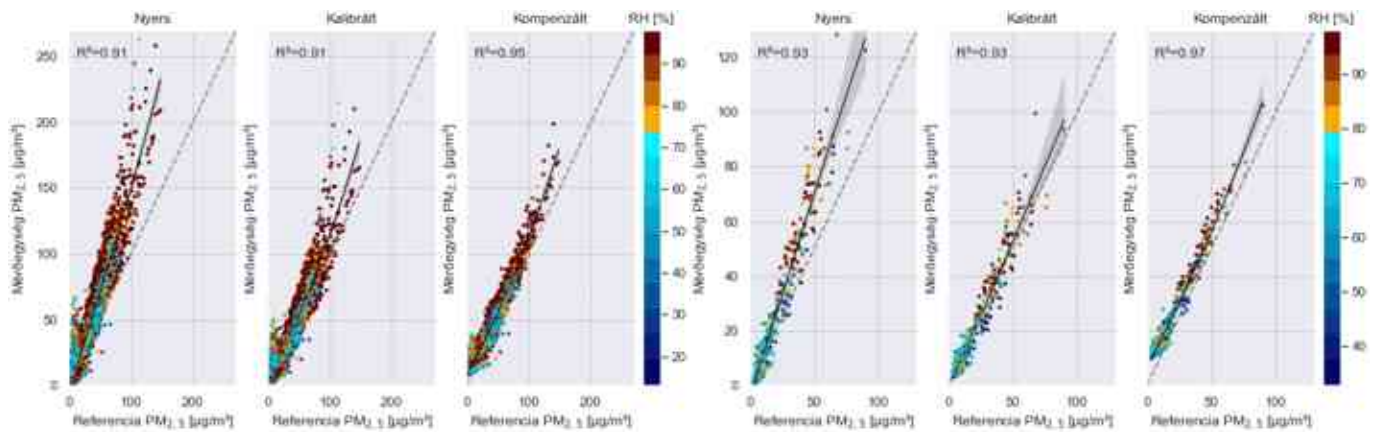
22. táblázat Az egyes PM frakcióhoz tartozó kompenzációs egyenletek

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

A 62. és 63. ábrák, valamint a 23. táblázat mutatja a kompenzált óras átlag értékekre számított jobb statisztikai mutatókat. A mérési bizonytalanság az eredeti, nyers adatokra jellemző 300% fölötti értékről kalibrációval 120% és 70%-ra, kompenzáció segítségével pedig 35% és 40%-re csökkent. A MBE közel 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, az abszolút hiba értéke (MAE) 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alatt maradt és a MSE, RMSE is nagy mértékben javult a kompenzált értékek esetében.



62. ábra Nyers, kalibrált és kompenzált mérőegység és referencia PM₁₀ értékek



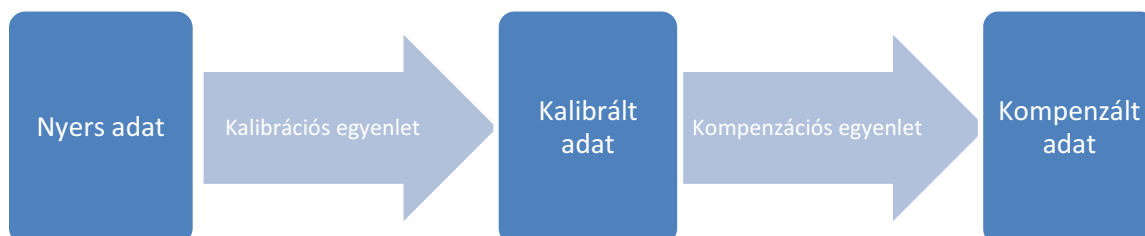
63. ábra Nyers, kalibrált és kompenzált mérőegység és referencia PM_{2,5} értékek

23. táblázat Nyers, kalibrált és kompenzált PM adatok statisztikai jellemzői

PM frakció	Adat típus	REU [%]	R ²	MBE [µg/m ³]	MAE [µg/m ³]	MSE [µg/m ³]	RMSE [µg/m ³]
PM ₁₀	Nyers	338,2	0,84	-1,6	11,6	306,2	17,5
	Kalibrált	121,5	0,83	1,3	8,6	170,9	13,1
	Kompenzált	40,1	0,86	0,0	5,5	66,5	8,2
PM _{2,5}	Nyers	367,1	0,91	-4,9	7,8	183,9	13,6
	Kalibrált	72,9	0,91	-0,2	4,0	44,6	6,7
	Kompenzált	35,2	0,95	0,0	3,1	19,0	4,4

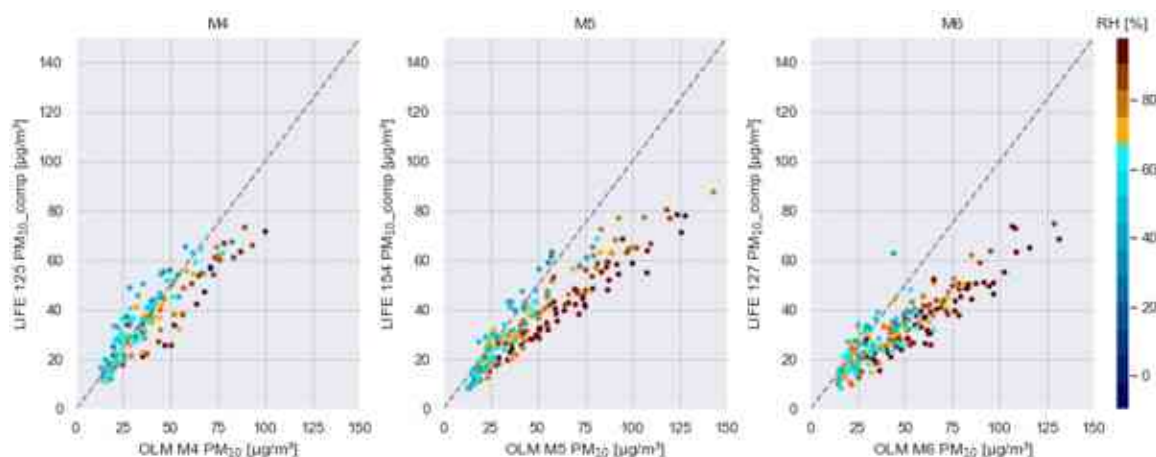
5.5 Mérőegységek korrekciós modellje

A mérőegységek mért értékeinek korrekciós modelljét a mérőegységenként egyedi kalibráció és az összes mérőegységre jellemző kompenzáció egyesítésével alkottam meg. A mérőegységeket klímakamrás kalibráció segítségével a rájuk jellemző kalibrációs egyenlettel láttam el, majd ezt az értéket a kompenzációs módszerrel meghatározott egyenlettel tovább korrigáltam. A nyers adatból így két lépésön keresztül jutottam el a mérőhálózatban vizsgált és értékelt adatokhoz (64. ábra).

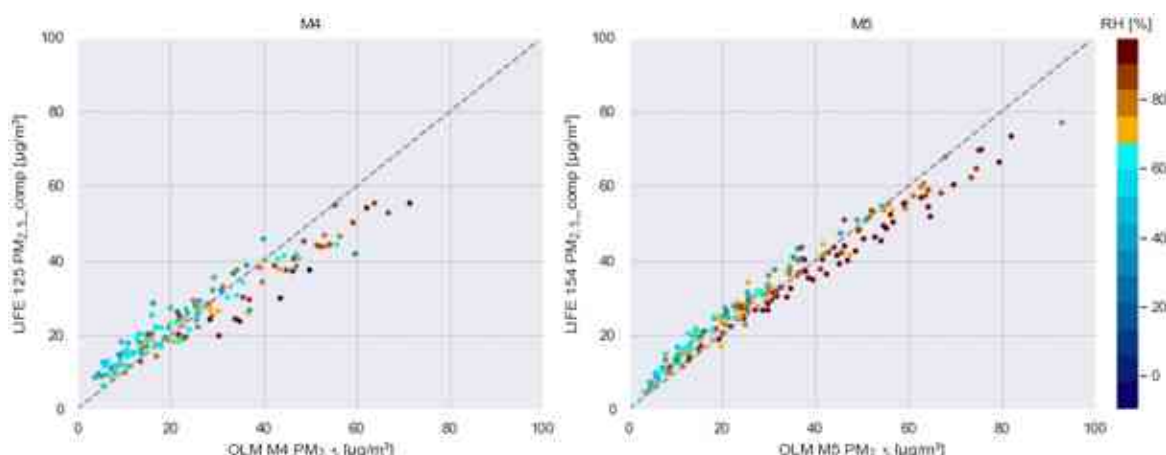


64. ábra Mérőegységek korrekciós modellje

A kalibráció és kompenzáció kombinált modelljét a 2021.09.01 – 2022.03.30. közötti időszakban a három OLM állomáson kihelyezett mérőegység adataival vizsgáltam. Referencia PM₁₀ mérés mindhárom állomáson, PM_{2,5} mérés az M4 és M5-ös állomásokon történt. A három állomáson három különböző típusú referencia műszer üzemelt. A kompenzált napi átlag PM₁₀ és PM_{2,5} értékeket a 65. ábra 66. ábra szemlélteti. Látható, hogy PM₁₀ esetében az M4-es állomás, a PM_{2,5} esetében az M5-ös állomás értékeihez kerültek legközelebb a mérőegység adatok.



65. ábra Mérőegység és referencia műszer napi PM₁₀ értékei az M4, M5 és M6 OLM állomásokon



66. ábra Mérőegység és referencia műszer napi PM_{2,5} értékei az M4, M5 OLM állomásokon

A 24. táblázat foglalja össze a mérőegységek és a vizsgált referencia állomások értékei közötti kapcsolat statisztikai mutatóit, a mért, kalibrált, kompenzált és az irodalomból ismert US EPA féle korrekciós modell segítségével számolt adattípusokra is számított jellemzőket. PM₁₀ esetére az US EPA nem alkotott képletet, így az ismert PM_{2,5} egyenletre, annak szerkezetével megegyezően meghatároztam egy lehetséges egyenletet.

US EPA féle korrekciós egyenlet PM₁₀ esetében

$$PM_{10_{corrected}} = 0,6 * PM_{10_{raw}} - 0,134 * RH + 19,3 \quad (4)$$

ahol,

PM_{10raw}: nyers PM₁₀ értékek

RH: relatív páratartalom

Az US EPA féle korrekció az M4 állomás PM₁₀ értékének esetében hozott legkisebb REU értéket, valamint a PM_{2,5} értékeknél az egyik legkisebb MBE értéket adta. A REU tekintetében általában a kompenzált értékek szerepelnek a legjobban, tehát itt a legkisebb a mérési bizonytalanság. Az MBE kivételével a többi statisztikai jellemzőben a kompenzált értékek szerepelnek a legjobban.

24. táblázat A mérőegységek és referencia állomások órás PM értékeinek statisztikai jellemzői

PM frakció	OLM állomás	Mérőegység	Adat típus	REU [%]	R ²	MBE [µg/m ³]	MAE [µg/m ³]	MSE [µg/m ³]	RMSE [µg/m ³]
PM ₁₀	M4	LIFE 125	Nyers	163,4	0,59	16,8	24,6	1 292,5	36,0
			US EPA korrekció	53,3	0,59	5,7	11,9	282,9	16,8
			Kalibrált	96,4	0,58	-4,8	13,0	289,6	17,0
			Kompenzált	57,7	0,58	2,9	11,8	275,2	16,6
	M5	LIFE 154	Nyers	226,6	0,75	36,2	39,4	3 388,8	58,2
			US EPA korrekció	73,7	0,75	16,4	18,9	676,0	26,0
			Kalibrált	103,5	0,74	4,6	13,0	406,1	20,2
			Kompenzált	71,3	0,74	12,4	16,0	537,9	23,2
	M6	LIFE 127	Nyers	301,0	0,53	56,6	58,8	7 778,9	88,2
			US EPA korrekció	132,5	0,53	30,8	32,4	2 257,0	47,5
			Kalibrált	142,4	0,50	7,6	16,4	763,5	27,6
			Kompenzált	99,8	0,50	15,3	19,2	940,7	30,7
PM _{2,5}	M4	LIFE 125	Nyers	186,6	0,66	24,4	26,3	1 464,8	38,3
			US EPA korrekció	101,3	0,66	0,6	8,3	140,4	11,9
			Kalibrált	78,0	0,65	1,2	8,1	143,2	12,0
			Kompenzált	62,2	0,65	1,7	7,5	129,1	11,4
	M5	LIFE 154	Nyers	197,3	0,88	29,3	30,3	1 937,3	44,0
			US EPA korrekció	89,5	0,88	0,1	5,8	90,8	9,5
			Kalibrált	61,0	0,87	0,1	5,1	82,6	9,1
			Kompenzált	46,7	0,87	0,7	4,6	74,7	8,6

Az éves összeméréshez képest romlottak a statisztikai mutatók, ami az új mérőegységek és referencia műszerek eltérő jellegű kapcsolatára és a téli környezeti viszonyokra vezethető vissza. Mivel az ekvivalencia vizsgálatoknál bebizonyítottam, hogy az egyes mérőegységek között nincs számottevő különbség, a korrekciós modellt alkalmazva mindegyikre a kompenzált értékek összehasonlíthatóak és tovább elemezhetőek.

A 6/2011. (I. 14.) VM rendelet 8. melléklete szerint az indikatív mérések bizonytalansága 50% alattinak kell lennie. PM_{2,5} esetében az M5 állomáson kihelyezett mérőegységre teljesül ez a követelmény a kompenzált értékeket vizsgálva (REU=46,7%), az M4 állomás mérőegysége 67%-kal csak közelíti azt. PM₁₀ esetében az M4 állomás hivatalos adataihoz képest a legkisebb a számolt bizonytalanság (57,7%), de így is nagyobb mint 50%, a többi állomásnál pedig még nagyobb az eltérés (71,3 és 99,8%). A rendelet a modellezési bizonytalanságra 100%-ot határoz meg, melynél az összes érték kisebb. A rendelet alapján tehát az indikatív méréseknek részben, a modellezési technikáknak teljesen megfelelnek a mérőegységek korrekciós modellel átszámolt értékei, így ezekkel a technikákkal megegyező fenntartásokkal és körültekintéssel fel lehet használni a mérőhálózatba rendezett mérőegységek adatait.

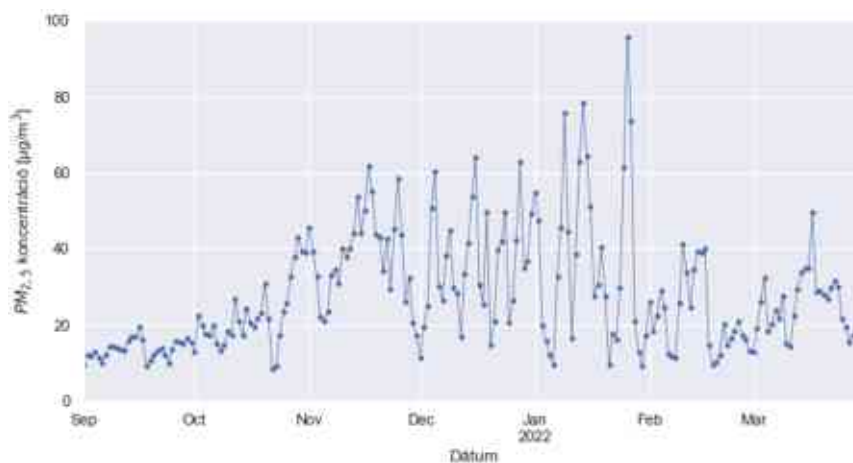
6 Mérőhálózat vizsgálata

A 47 db mérőegység adatait a 2021.09.01 – 2022.03.30. közötti időszakban vizsgáltam statisztikai és térképes megjelenítés módszereivel. A mérőegységek nyers perces adatait órás valamint napi átlagokká alakítottam, a könnyebb feldolgozás, értelmezés és összehasonlítás érdekében az alábbi módon. A mérőegységenként szöveges fájlban elmentett adatokat adatbázissá alakítottam a Python programozási nyelv segítségével. Az adatokat megtisztítottam az adatmentési hibáktól, hogy könnyen olvashatók, feldolgozhatók legyenek. Az adatminőséget validáltam oly módon, hogy az irreálisan magas értékeket nem vettem figyelembe. Ilyen értékek akkor jelentkezhetnek, ha a szenzorok meghibásodik. Az adatok rendelkezésre állását egy határértékhez kötöttem oly módon, hogy akkor tekintetem felhasználhatónak az adott órás átlag értékeket, ha az adatkimaradás kisebb volt 40%-nál. A nyers PM₁₀ és PM_{2,5} adatokat a mérőegységre jellemző kalibrációs egyenlettel, majd korrekciós egyenlettel átszámoltam. Ehhez meghatároztam a harmatpontot. Amelyik mérőegységnél nem volt elérhető környezeti paraméter adat a mérőegység ideiglenes meghibásodása miatt, a hozzá legközelebb eső elérhető adattal pótoltam a kiesett időszakot. Összesen 5088 óra adatai használtam vizsgálataimhoz.

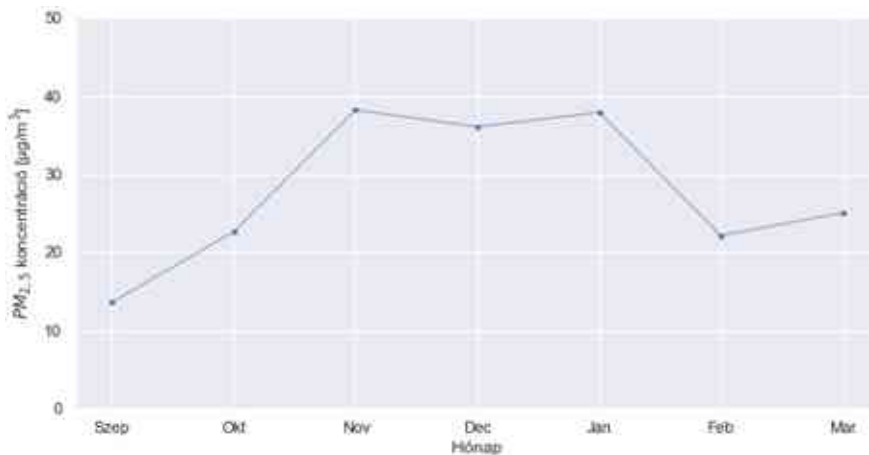
Az adatok időbeli lefutását a napi, havi átlagok, a hét napjainak átlaga és a nap óráinak átlaga szerint is vizsgáltam.

6.1 Idő alapú vizsgálat

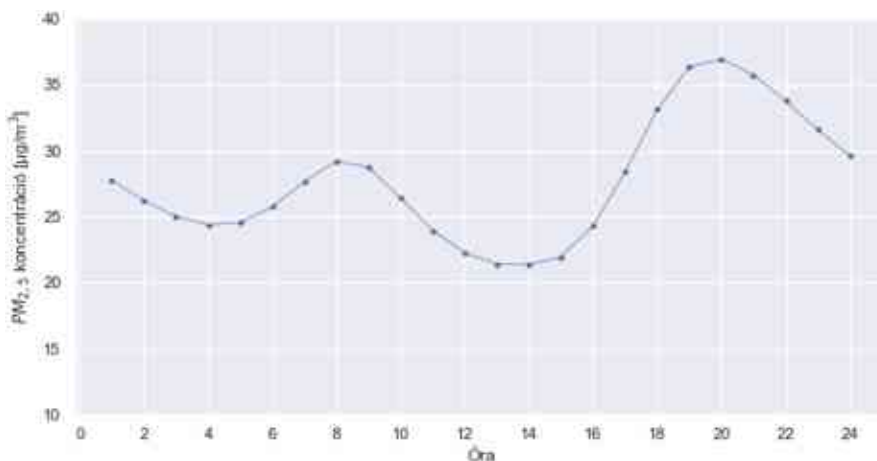
A 2021.09.01 – 2022.03.30. közötti időszakban működtetett 47 db mérőegység kompenzált PM értékeit vizsgáltam az eltelt idő és a városban lévő földrajzi elhelyezkedésük szerint. A korrekciós modellel számolt PM értékek a modellezési technikától elvárt bizonytalanságot nem lépték túl, így ennek megfelelően elemeztem az adatokat. A PM frakciók közül a PM_{2,5}-re fókuszáltam, annak kiemelt egészségügyi hatásai miatt. Az összes mérőegység összeátlagolt PM_{2,5} értékeit vizsgáltam különböző időintervallumok szerint. A 67. ábra a napi átlagok alakulását mutatja a teljes vizsgált időszakban. A nagy ingadozások a szennyezett időszakok gyors fel- és leépülésével, az időjárási viszonyok és az ezzel összefüggésben lévő kibocsátások mértékének változásával magyarázható.



67. ábra Az összes mérőegység átlagolt napi PM_{2,5} értéke 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban



68. ábra Az összes mérőegység átlagolt havi átlagos PM_{2,5} értékei 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban. A 40 µg/m³ feletti átlagolt napi értékek novemberben jelennek meg, januárban pedig már 60 µg/m³ fölött járnak. November és január között fordulnak elő szmogos időszakok, melyek során akár a 100 µg/m³-es értéket közelíti a PM_{2,5} napi átlaga. A csúcserőtelkek folyamatosan emelkednek január végéig, február, márciusra pedig visszaesnek a koncentrációk. Ez a trend a 68. ábra szerint, ahol a havi átlagos értékek változása látható, hasonló képet mutat, bár itt a november-december-január átlagai kb. azonos szinten vannak.

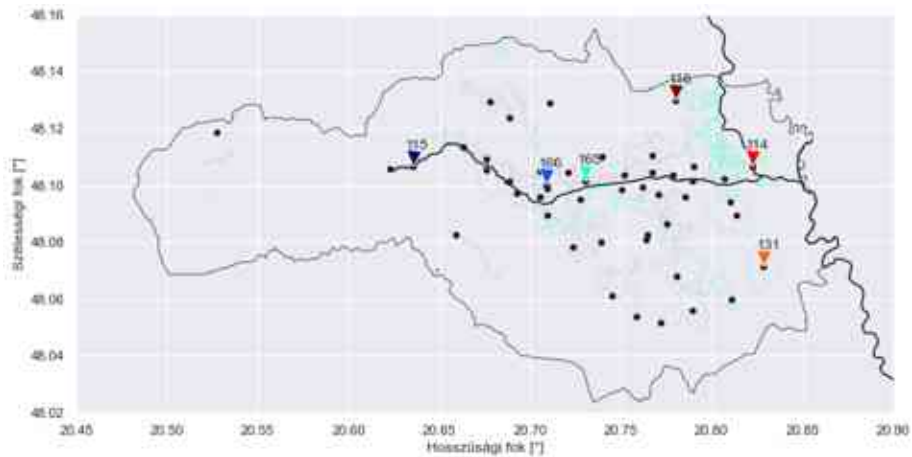


69. ábra Az összes mérőegység átlagolt óras átlagos PM_{2,5} értéke 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban. Az óras átlagos értékek (69. ábra) átlaga két csúcs időszakot mutat, egyet 8 óra körül, és egy másikat 20 óra körül. Az eltérő helyszíni adottságok miatt az óras átlagok lefutását helyszínenként is bemutatom a 25. táblázat soraiban. Láthatjuk a vizsgált időszakra vonatkozóan szenzoroként (helyszínenként) képzett óras átlagkoncentráció trendjében is megfigyelt kettős csúcst, de helyszínenként eltérő mértékben. Az átlagos óras értékeket tovább vizsgáltam a város észak-déli és a kelet-nyugati irányú fő tengelyei mentén. Kiválasztottam 3-3 mérőpontot, mely magas adatrendelkezésre állással működött és a tengelyek mentén helyezkedik el. A vizsgált mérőpontok térképes elhelyezkedését a 70. ábra mutatja színes jelölőkkel. A 71. ábra pedig ezen pontokon mért PM_{2,5} koncentrációk átlagos óras értékeit szemlélteti.

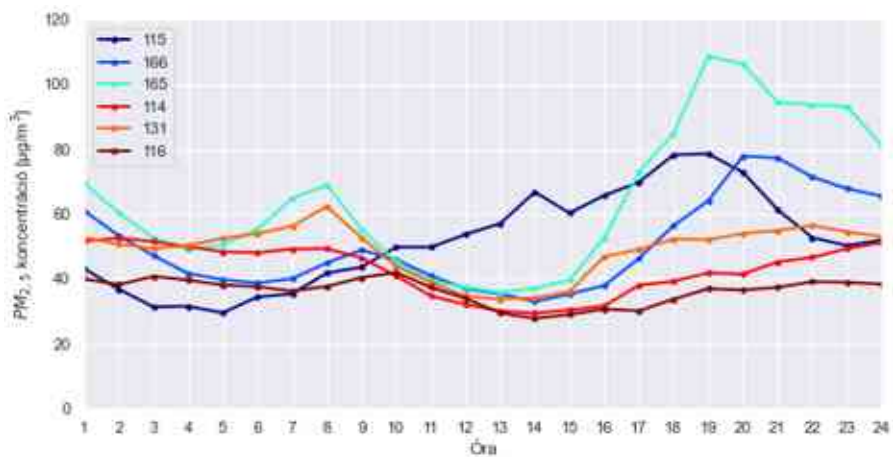
25. táblázat Átlagolt óras átlagkoncentrációk változása helyszínenként

Helyszín tulajdonság		Óra																							
Mérőegység azonosító	Elnevezés	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
111	Lillafüred	18	17	16	16	16	17	17	18	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	19	18	18	
112	Kilián Dél	25	24	22	21	20	21	22	25	27	26	24	22	21	20	21	22	27	32	36	36	35	32	29	27
114	Sajó híd	42	41	40	40	39	39	39	37	34	30	26	24	23	22	22	24	27	31	35	39	41	42	43	43
115	Felsőhámor	25	23	22	22	23	25	26	28	29	32	30	29	31	34	36	40	46	46	45	41	37	33	30	28
116	Szentpéteri kapu	32	32	33	31	30	30	30	31	31	29	26	24	21	21	21	21	22	26	29	30	30	30	31	32
119	Egyetemváros 1.	23	22	22	21	21	21	23	25	27	25	23	21	20	20	20	20	22	24	25	25	25	25	24	23
120	Lyukóvölgy	31	28	26	28	29	33	40	42	33	24	22	21	21	23	25	27	31	39	43	46	43	39	36	32
121	Hejőcsaba Futó u.	28	28	26	26	26	27	31	34	33	30	27	24	23	23	25	29	34	37	39	38	34	33	32	30
123	Tizeshonvéd u.	26	24	23	22	21	22	24	25	27	25	22	20	19	18	18	19	22	26	30	35	35	33	30	28
124	Tapolca Vízmű	18	17	17	17	17	18	18	19	21	21	19	18	18	17	17	17	17	18	18	18	19	18	18	18
125	Búza tér	34	33	32	31	32	34	35	36	34	31	28	25	24	24	24	26	30	37	43	44	44	41	38	36
126	Avasalja	43	37	34	32	32	35	42	45	40	33	28	25	24	24	25	33	47	63	70	68	70	64	58	50
127	Görömböly Lavotta u.	27	26	25	25	27	28	33	36	33	28	25	23	22	22	24	32	41	51	54	50	44	40	34	30
128	Kilián Észak	21	20	19	18	18	18	19	22	24	22	20	18	18	17	17	19	22	27	31	30	29	26	24	23
129	Pereces IV.	22	21	21	20	20	21	22	25	25	24	24	23	23	24	25	28	30	30	28	27	25	24	22	22
130	Joyson	34	34	33	33	33	33	33	33	32	28	25	23	21	21	20	21	24	29	32	33	34	35	34	34
131	Szirma	44	41	39	39	41	45	43	41	38	34	30	27	25	25	26	31	38	45	49	51	52	50	47	46
132	Bodótető	21	21	21	20	21	21	21	23	24	22	21	19	19	18	18	20	21	23	24	22	22	21	20	21
133	Tapolca Dél	14	13	13	13	13	13	13	14	15	15	14	14	13	13	13	13	14	14	15	16	15	15	14	14
135	Lórántffy u.	28	26	24	23	22	23	25	26	27	25	23	21	21	20	20	23	28	36	43	43	41	38	35	31
136	Pereces Észak	23	21	20	20	19	20	22	23	25	23	22	21	20	21	23	25	29	35	36	35	32	29	27	25
139	Szentlélek	14	13	14	13	13	13	13	14	14	14	14	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
141	Örömhegy	24	23	23	22	22	23	24	25	26	26	26	24	24	25	25	28	32	30	30	31	28	25	25	24
142	Avas II. ütem	25	25	24	23	24	24	26	27	28	27	24	22	21	21	21	22	24	25	26	26	25	25	25	25
143	Bábonyibérc	28	26	25	25	26	28	31	31	28	25	23	21	20	21	22	26	31	35	40	41	39	35	31	29
144	Bükkzentlászló	17	16	15	15	16	18	20	23	24	23	23	24	25	25	24	25	25	25	25	24	22	23	20	19
146	Avas tető	23	22	22	22	22	23	24	25	26	25	23	22	21	21	21	21	23	24	25	25	24	24	23	23
147	Papírgyár	21	20	19	19	19	20	21	23	25	25	24	24	24	24	24	27	31	33	35	33	31	28	25	22
148	Újdiósgyőr	42	37	33	32	32	35	41	41	36	29	26	23	22	22	23	27	40	58	74	78	72	65	58	50
149	Tatárdomb	32	30	29	26	27	31	37	41	41	35	31	32	31	34	33	36	42	49	52	51	48	45	39	36
151	Egyetemváros 2.	25	24	24	23	23	24	25	27	29	27	24	21	21	20	21	22	24	27	29	29	28	27	27	26
152	Vörösmarty városrész	24	23	22	21	21	22	23	25	25	22	20	18	17	17	17	18	21	24	27	29	29	28	27	25
153	Városház tér	29	27	25	25	24	25	26	28	28	26	23	20	19	18	18	19	22	27	32	37	37	36	33	31
154	Martinkertváros Alföldi	37	35	34	34	34	34	35	35	32	29	26	24	22	22	23	27	35	40	45	44	43	42	40	39
155	Népkert	36	34	32	30	29	31	32	34	35	33	30	27	25	24	24	24	25	27	30	34	36	38	40	37
156	Békeszálló	37	33	30	28	27	28	32	35	35	30	25	22	21	21	21	23	28	33	41	49	50	48	45	42
158	Martinkertváros óvoda	26	25	25	25	24	24	25	25	24	21	19	17	17	16	17	19	23	27	29	29	28	28	27	27
160	Selyemrét	39	38	37	37	37	37	38	39	38	34	30	27	25	24	24	25	28	33	37	39	40	40	40	39
162	Berekalja	21	19	19	18	18	19	21	23	23	23	22	21	20	21	23	27	32	36	36	32	30	26	24	22
163	Görömböly buszforduló	24	23	23	24	24	24	27	32	34	32	28	26	24	21	22	24	25	26	26	28	27	25	24	24
164	Balázs Győző tér	37	34	30	29	28	30	31	34	35	31	26	23	22	22	22	24	28	36	45	50	50	47	44	40
165	Újgyőri piac	47	41	38	36	39	44	48	47	39	32	28	27	25	26	29	38	54	75	90	88	82	73	65	54
166	Diósgyőri Gimnázium	35	32	29	28	28	29	30	34	35	33	29	26	25	24	25	27	33	43	50	53	51	47	43	39
167	Vasgyár	31	27	25	24	24	25	28	28	30	26	22	20	19	19	20	22	29	35	42	46	44	41	39	35
169	Diósgyőr városközpont	23	21	20	19	19	20	22	24	24	23	21	20	19	19	20	23	29	34	36	34	32	29	27	25
170	Majlát	21	20	19	19	19	20	22	24	25	25	23	22	22	22	23	26	30	34	32	30	28	26	24	22
171	Komlóstető	21	21	20	19	20	21	22	23	23	23	22	21	20	21	21	23	23	24	26	26	26	25	23	22

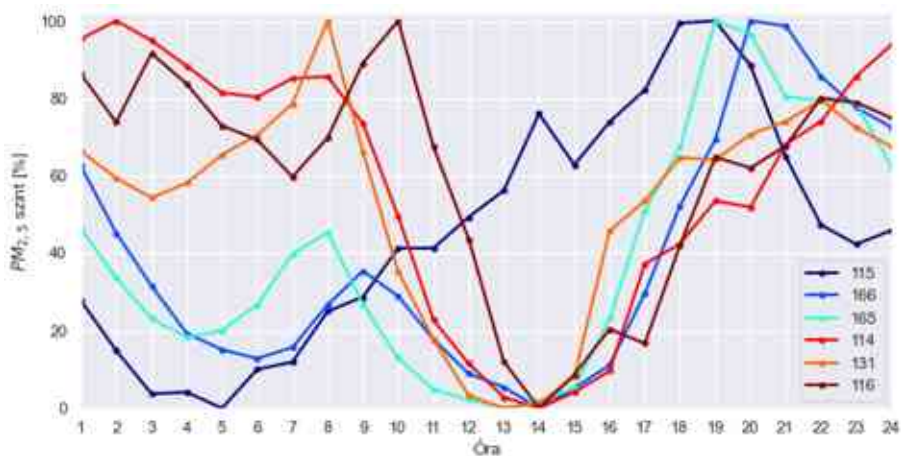
A kelet-nyugati tengelyen ülő 115, 166 és 165-ös mérőpontok magasabb koncentráció értékeket érnek el, mint az észak-déli tengelyen elhelyezkedő 114, 131 és 116-os mérőpontok. A jobb összehasonlíthatóság kedvéért az egyes mérőpontok saját értékeihez képest számított PM_{2,5} szint szerint is ábrázoltam a mérőpontok adatait (72. ábra), ahol a 100% a mérőpont legnagyobb, a 0% pedig a legkisebb koncentráció értékét jelenti.



70. ábra Vizsgálati céllal kiválasztott mérőpontok elhelyezkedése a város két fő tengelye mentén



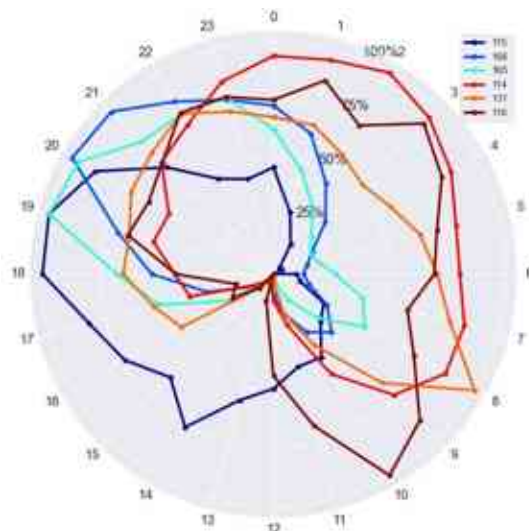
71. ábra Vizsgált mérőpontok átlagos óras $PM_{2.5}$ koncentráció értékei a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban



72. ábra Vizsgált mérőpontok óras átlagos $PM_{2.5}$ szennyezettségi szintjei a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban

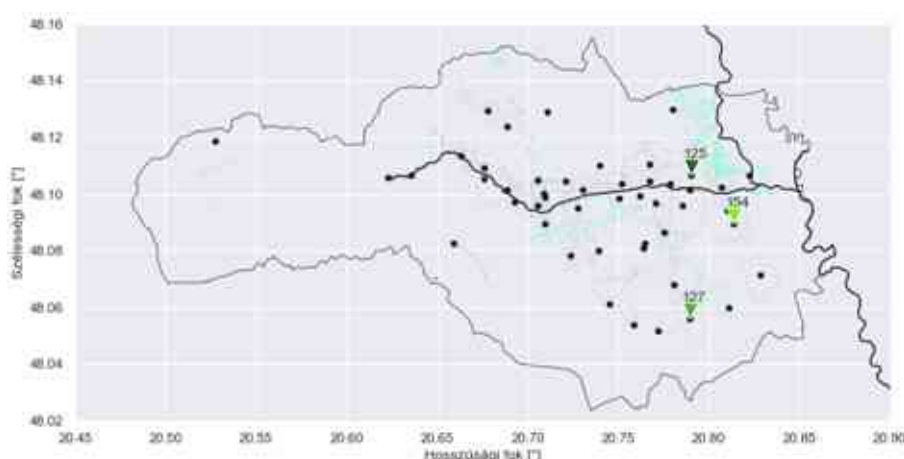
Mivel a napok órái egymásban folytatódnak a százalékos szinteket kördiagramon is ábrázoltam. A kördiagram segítségével jobban megérthető a trendek folyamatossága, a szennyező időbeli változása a különböző helyszíneken. A két tengely szerint csoportosított pontok eltérő mintázatot mutatnak. A 115-

ös mérőpont 10 órától növekedik, míg 18 órára eléri a maximumot. 19 órakor a 165-ös mérőpont is beáll maximumra, a 115-ös ekkor kezd csökkenni. 20 órára a 166-os pont éri el a maximumot, mikor már a 165-ös kezd csökkenni. 21 óra után a 166-os is csökkenő trendre áll. Az észak-déli tengelyű mérőpontok 16-17 órakor kezdenek el emelkedni, 21 órára 75% körüli szintre érnek. A 114-es tovább emelkedik és 2 órakor éri el maximumát. A 131-es 3 órára 60% alá csökken, majd 8 órakor maximumára emelkedik, a 116-os pedig 60-70%-os szintet tartva végül 10 órakor éri el maximumát. A 166-os és 165-ös mérőpontoknak is van egy kisebb reggeli csúcsuk, de ekkor csak 30-40%-os szintig emelkednek a koncentrációik.



73. ábra Vizsgált mérőpontok órás átlagos $PM_{2,5}$ szennyezettségi szintjei a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban kördiagramon

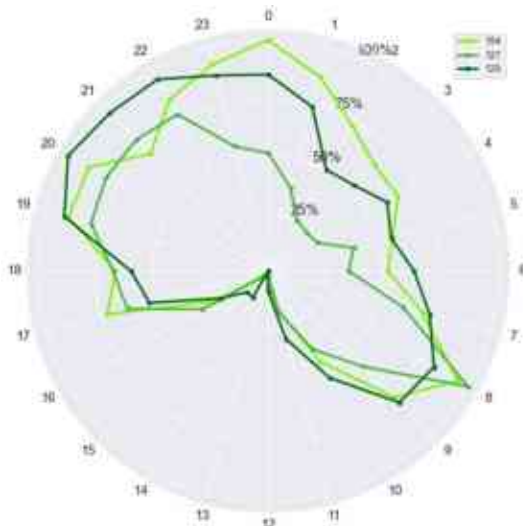
Megvizsgáltam az OLM állomásokon kialakított mérőponton (74. ábra) mért $PM_{2,5}$ koncentráció szinteket is.



74. ábra OLM állomásokon kialakított mérőpontok elhelyezkedése

A 75. ábra megmutatja, hogy a 154, 127 és 125-ös mérőpontok az észak-déli és kelet-nyugati tengelyű mérőpontok keveréke, mind az esti (20-22 óra), mind a reggeli (8-9 óra) csúcs domináns. A 154-es 19 órától 75% körül mozog, majd 0 órára éri el a maximumát, ennek 6 órára fokozatosan csökken, majd 8 órakor újabb csúcsot ér el 90%-os szinttel. A 125-ös már 20 órakor maximumon van, 2-kor 50%-on van majd reggel 8-9 körül már 80%-os csúcson. A 127-es az esti időszakban alacsonyabb szinteken mozog, 2-

re 25%-ig csökken, és 6 órakor ugrik meg, hogy 8-ra elérje a maximumát. A legtisztább időszaka (<25%) 11 és 17 óra közé esik. Ez megegyezik az észak-déli tengelyen lévő mérőpontok tiszta időszakával. A kelet-nyugati tengelyen fekvő mérőpontok közül a 115-ös 2 és 8 közötti, a 166-os 3-8 és 11-17 óra közötti, a 165-ös pedig 3-6 és 10-16 óra közötti tiszta időszakokkal rendelkezik.

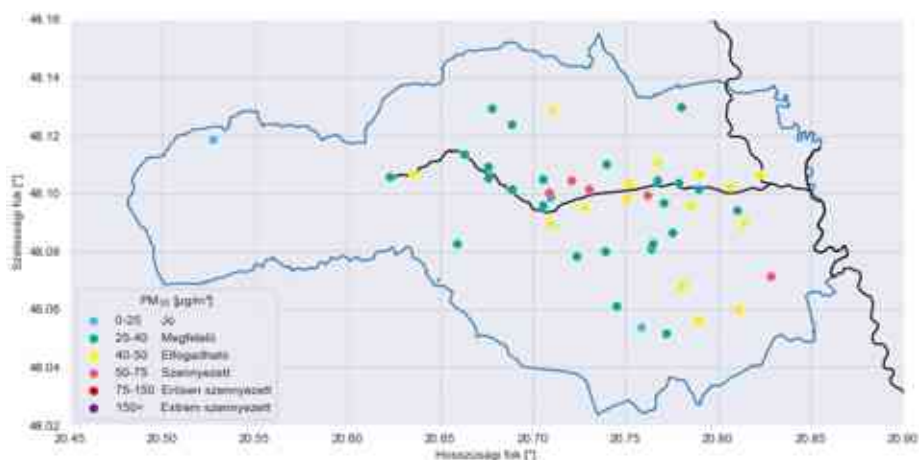


75. ábra OLM állomásokon kialakított mérőpontok órás átlagos PM_{2,5} szennyezettségi szintjei a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban kördiagramon

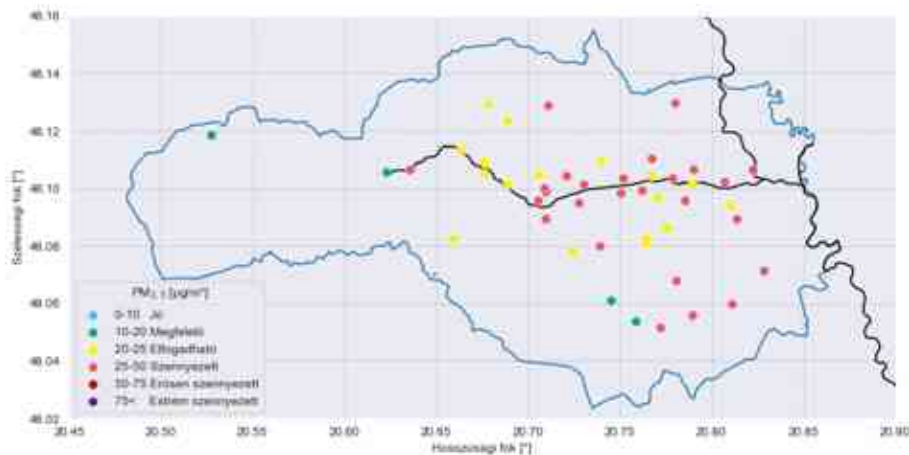
A fentiek alapján a látható, hogy a város eddig nem vizsgált területein más időintervallumokba esnek a tiszta és szennyezett időszakok, mint a hivatalos mérőállomás által reprezentált területeken.

6.2 Tér alapú vizsgálat

A mérőegységek adatainak térbeli elhelyezkedését térképen jelenítettem meg, színskála segítségével pedig a mérési helyszínekre jellemző értékeket pontként jelöltem. A teljes, 2021.09. – 2022.03. közötti vizsgált időszakra vonatkozó összes órás adatból helyszínenként képeztem egy órás átlagértéket és a PM₁₀ (76. ábra) és a PM_{2,5} (77. ábra) esetére is ábrázoltam.

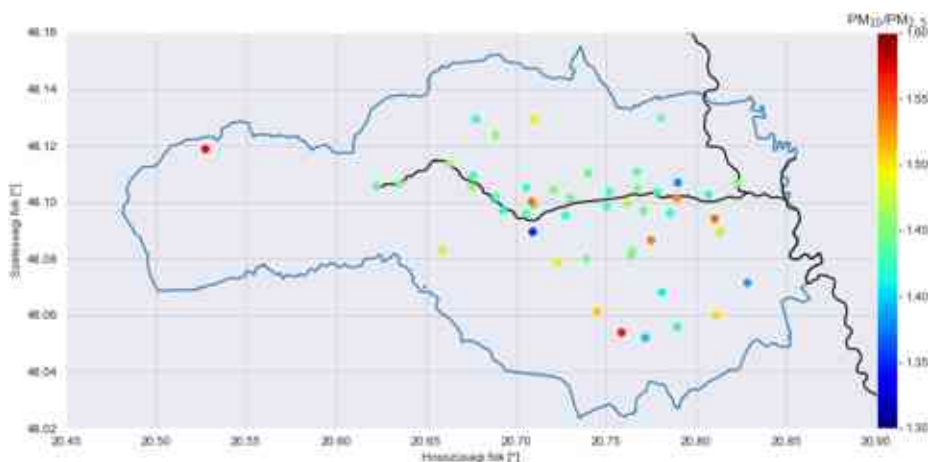


76. ábra Mérőegységek átlag PM₁₀ értékei a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban térképen megjelenítve



77. ábra Mérőegységek átlag $PM_{2,5}$ értékei a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban térképen megjelenítve

A PM koncentrációk nem lineáris skálán, hanem a levegő minősége szempontjából meghatározott skála [150] szerint kerültek megjelenítésre és színezésre. PM_{10} esetében 5 db szennyezett, 15 db elfogadható, 25 db megfelelő és 2 db jó besorolású mérési helyszínt számolhatunk össze. $PM_{2,5}$ esetében 4 db megfelelő, 17 db elfogadható és 26 db szennyezett besorolású mérési helyszínt láthatunk. A 78. ábra szemlélteti a $PM_{10}/PM_{2,5}$ arányokat a térképen, mely azt mutatja meg, hogy az egyes mérési helyszíneken melyik szennyező frakció volt túlsúlyban. Általánosan elmondható, hogy ahol ez az arány kisebb, vagyis a $PM_{2,5}$ nagyobb arányban van jelen a levegőben, ott nagyobb, vagy közelebbi az emberi tevékenységből származó szálló por kibocsátás. Két ponton, a nyugati városhatár mentén Szentléleken és a déli városhatárhoz közel Tapolca déli dombtetőjén 1,55-nél nagyobb arányt láthatunk, itt a koncentrációs értékek szintje is kisebb a többi helyszínenél (76. ábra és 77. ábra).

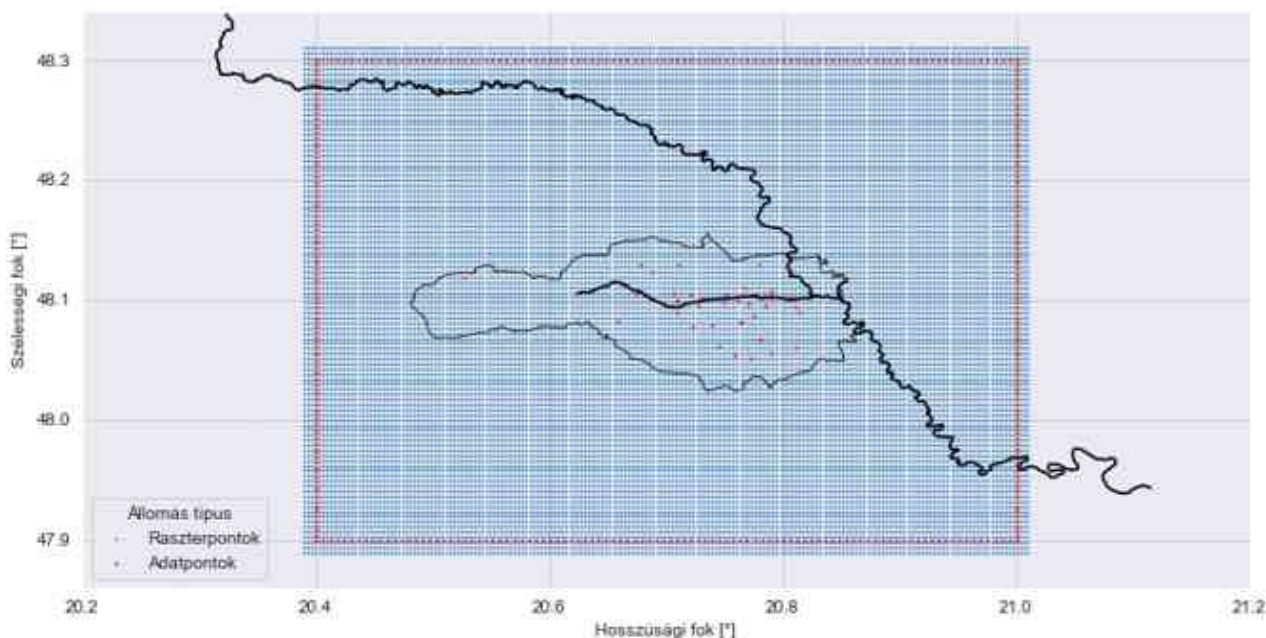


78. ábra Mérőegységek átlag $PM_{10}/PM_{2,5}$ aránya a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban térképen megjelenítve

6.3 Eloszlás térképek

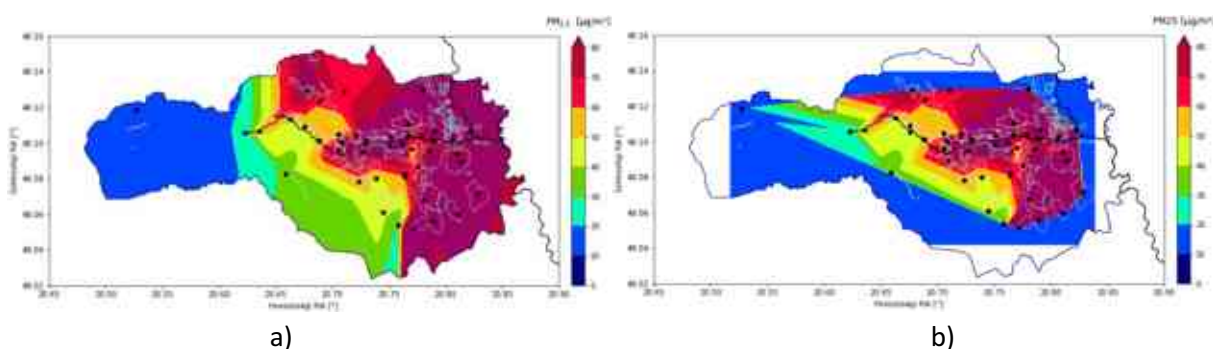
Az adatok időben és térben való vizsgálatára eloszlás térképeket használtam. A mérőpontok térbeli kiterjesztését lineáris interpoláció segítségével végeztem el. Peremfeltételként a Miskolc közigazgatási határaitól $0,1^\circ$ hosszúsági és szélességi fokra, keleti és nyugati oldalon 100 db, északi és déli oldalon 200

db, a mérőegységek aktuális időszakban vizsgált jellemzőjének legkisebb értékével megegyező adatpontot rögzítettem minden térképes megjelenítés esetében. Ezek és a telepített mérőpontok helyzetét a 79. ábra szemlélteti. A körbe határolt területet a rögzített peremfeltételek mentén, összesen 20.000 db, kb. 225x450 m-es, vagyis kb. 0,1 km² területű egységre osztottam, melyek az eloszlás területi elemeit jelentik. Ez alkotja azt a hálós rasztert, melyen az interpolációt elvégeztem és ez az adathalmaz áll az eloszlás térképek vizuális megjelenítése mögött.



79. ábra Mérési helyszínek és az interpoláció peremfeltételeire szolgáló adatpontok, valamint a raszterháló pontjai

A peremfeltételek hiányában az interpoláció kizárólag a mérési pontok között történik meg, mely nem fedti le Miskolc területét. Ezt az esetet a 80. ábra b) része szemlélteti. Az interpoláció tehát egy 100x200 oldalú raszter rácsra történt.



80. ábra Eloszlás térkép a peremfeltétel adatpontjaival (a) és nélkülük (b)

A Miskolc határain kívül eső eloszlási mintákat kikapartam, valamint a későbbi számítások során sem vettem figyelembe. A városhatáron belül, tehát a figyelembe vett területen a korábban bemutatott 20.000 db-os raszter hálóból 2.515 db raszter elem maradt.

6.4 Mérési helyszínek redukálása

Az óras $PM_{2,5}$ értékekből készült eloszlás térképeket egy 2.515 db adatpontból álló raszter hálóként elemeztem. Az egyes raszter elemek értékei az adott területre interpolált koncentráció értékekkel egyeznek meg. A számítási és mérési kapacitásokkal való takarékoság érdekében felmerül a kérdés, hogy szükség van-e minden mérési helyszín adatára, vagy vannak olyan helyszínek, melyek alhagyhatók a nélkül, hogy a bemutatott trendek érdemben megváltoznának. Megvizsgáltam, hogyan befolyásolja az eloszlás térképeket egy-egy mérési helyszín adatainak kihagyása. Ezt az elemzést elvégeztem a teljes vizsgált időszak minden óras átlagára. Ennek folyamatát azon óras értékekből számolt eloszlástérképek átlagára mutatom be, melyek raszter elemeinek átlaga (T_{avg}) meghaladja a $PM_{2,5}$ frakció $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ éves egészségügyi határértékét, hiszen ezen időszakok kritikusak egészségügyi szempontból.

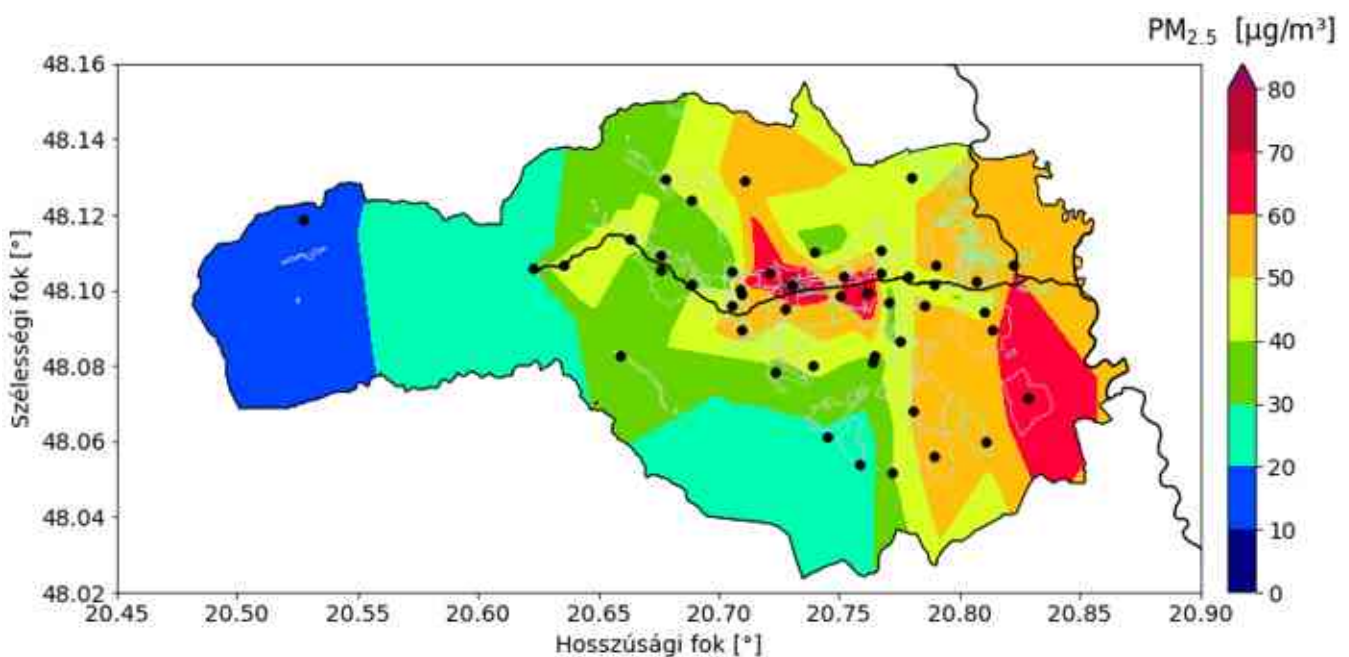
$$T_{avg} = \sum_{i=1}^m G_n / m \quad (5)$$

ahol,

G_n : n-edik eloszlás térkép 2.515 db raszter eleme

$m=2.515$, Miskolc városhatáron belüli rasztereinek száma

Mikor a város légszennyezettsége magasabb szintet ér el, a mérőhálózat adatai felértékelődnek, fontosabbá válnak. Ekkor vagyunk kíváncsiak a szennyezés eloszlására, ekkor van szükségünk a lehető legtöbb információra. A vizsgált időszakban 1898 db a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fölötti átlaggal rendelkező óras koncentráció érték. Az ennél alacsonyabb átlagok esetében a mérőhálózat adatainak kisebb a jelentősége a mérőhálózat üzemeltetője, adatainak használója szempontjából. A mérési helyszínek redukációját bemutató eljárás kiinduló állapotát, vagyis az 1898 db eloszlás térkép adatpontjainak átlagából elkészített eloszlás térképet ($G_{47,0}$) a 81. ábra szemlélteti. A teljes vizsgált időszakban 47 mérési helyszín adata áll rendelkezésre hiánytalanul, így 47 mérési helyszín adatainak interpolálásával készült el az az eloszlás térkép, mely szemlélteti a szennyezett időszakok átlagát.



81. ábra Eloszlás térkép kiinduló állapota ($G_{47,0}$, vagyis a $T_{avg} > 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ raszterek átlaga)

A kiinduló állapotot egy számértékkel jellemeztem, mely a kiinduló raszter ($G_{47,0}$) összes elemének az összege (T_0) a 20. egyenlet szerint, ebben az esetben $T_0=95992,6$. Az egyes mérési helyszíneket egyesével kihagyva új eloszlás térképeket alkottam ($G_{47,n}$), és az így kapott raszter hálókat kivontam az eredeti eloszlás térkép raszter hálójából ($G_{47,0}$) a 21. egyenlet szerint. A 21. egyenlet alapján a különbség térkép elemeit (G_{diff}) a T_0 -hez hasonlóan abszolút értékben összegeztem, így a különbségre jellemző számértéket kaptam (T_{diff}). Meghatároztam a különbségek százalékos értékét (T_p) is a kiinduló állapothoz képest (23. egyenlet).

$$T_0 = \sum_{i=1}^m G_{47,0} \quad (6)$$

ahol,

$G_{47,0}$: Kiinduló eloszlás térkép 2.515 db raszter eleme
 $m=2.515$, Miskolc városhatáron belüli rasztereinek száma

$$G_{diff,n} = (G_{47,0} - G_{47,n}) \quad (7)$$

ahol,

$G_{47,0}$: Kiinduló eloszlás térkép 2.515 db raszter eleme
 $G_{47,n}$: 47 mérési helyszín közül az n-edik mérési helyszín kihagyásával készült eloszlás térkép 2.515 db raszter eleme

$$T_{diff,n} = \sum_{i=1}^m |G_{diff,n}| \quad (8)$$

ahol,

$G_{diff,n}$: Különbség térkép 2.515 db raszter eleme
 $m=2.515$, Miskolc városhatáron belüli rasztereinek száma

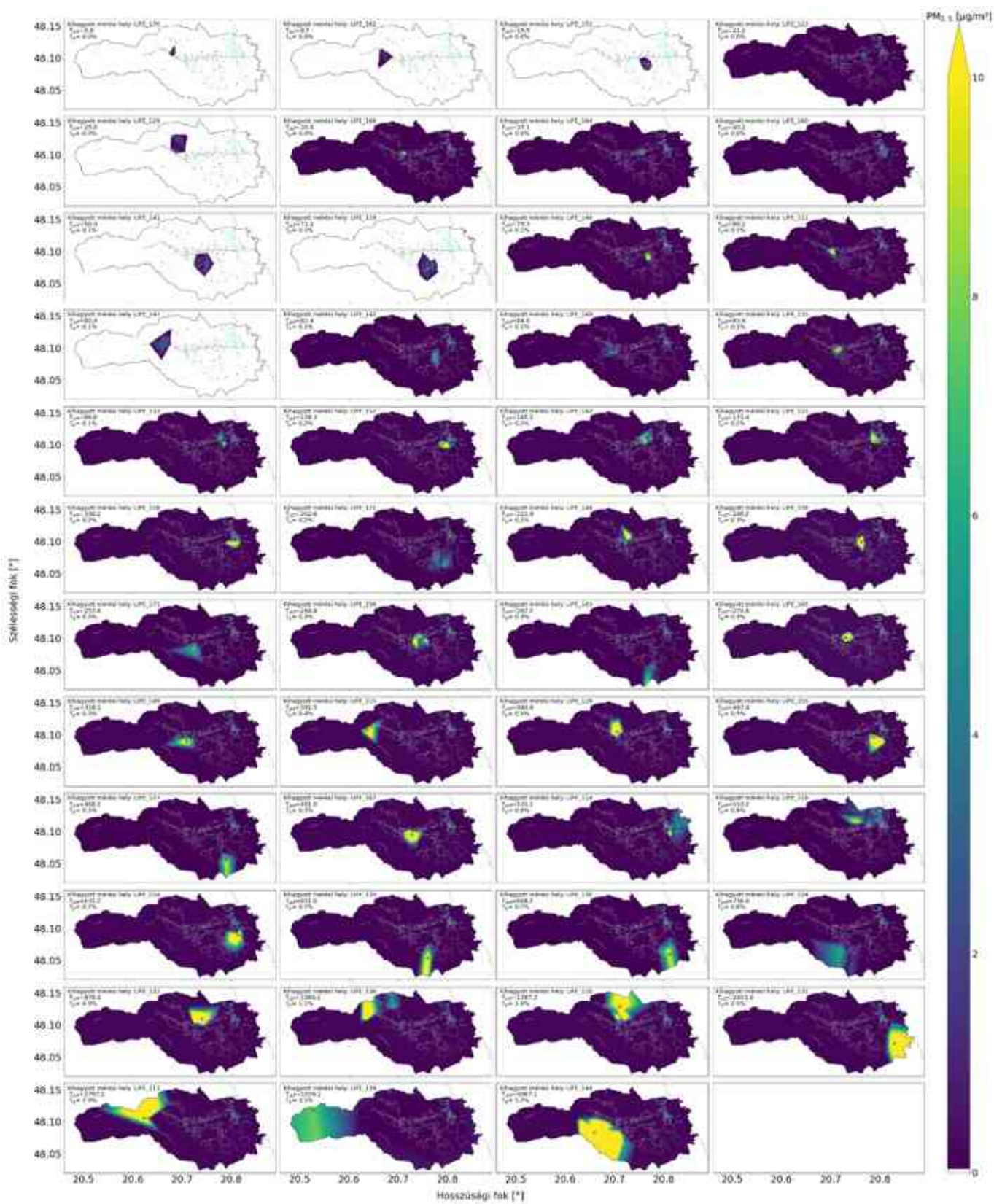
$$T_{p,n} = \frac{T_{diff,n}}{T_{base}} * 100\% \quad (9)$$

ahol,

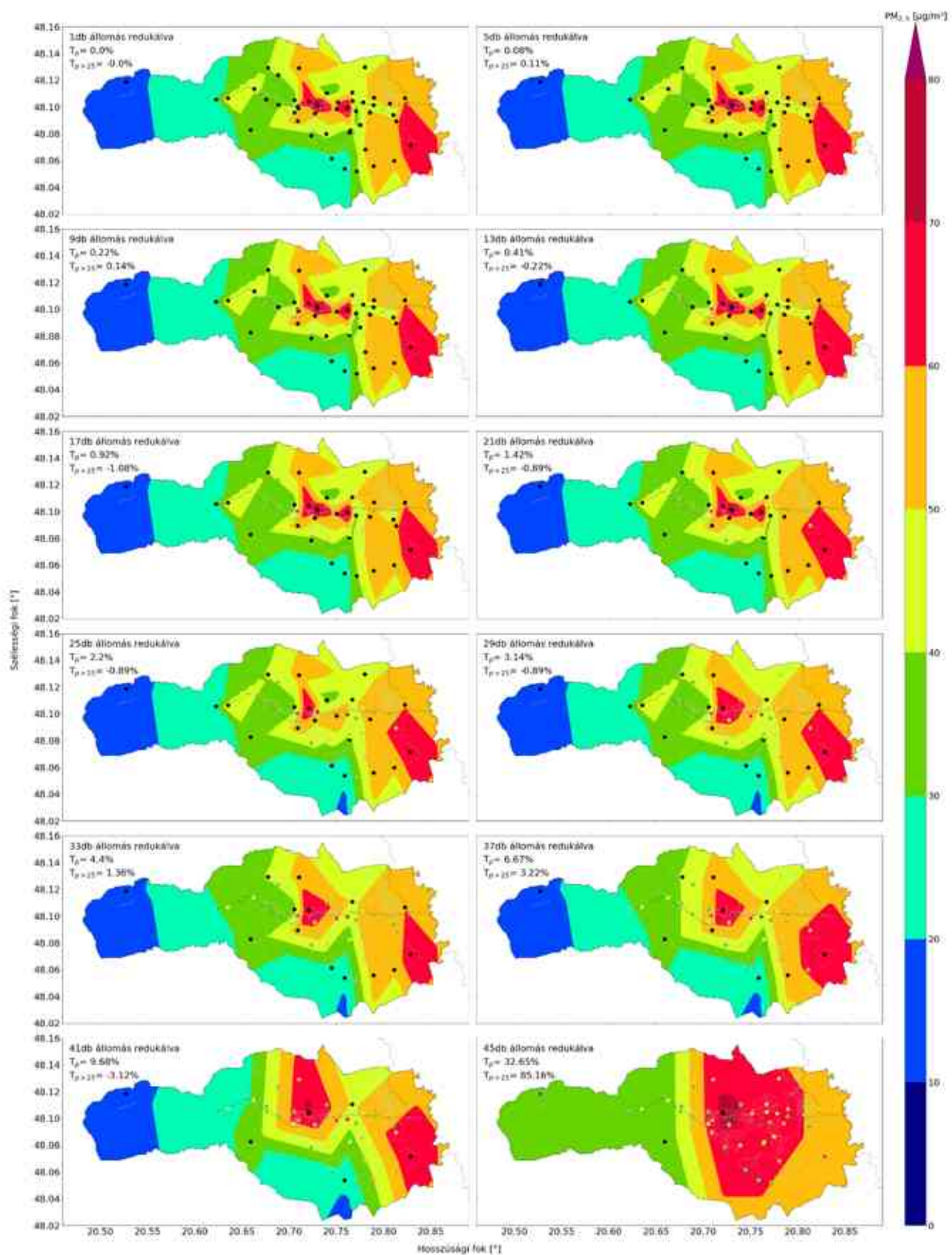
$T_{diff,n}$: Különbség térkép abszolút értékű elemeinek összege
 T_{base} : Kiinduló térkép elemeinek összege

A kiinduló állapotban 47 db mérési helyszín adatai álltak rendelkezésre, így a fenti módszer szerint készített, 47 db különbség térképet láthatunk a 82. ábrán, ahol a 115. ábrán látható alaptérkép a kiinduló pont. Az egyes különbség térképek címében láthatjuk a kihagyott mérési helyszín nevét, a számított T_{diff} és T_p értékeket. A különbség térképek a T_{diff} értékek szerint növekvő sorrendben követik egymástól jobbról balra és fentről lefelé haladva. A T_{diff} értékek nagyban függenek attól, hogy a kihagyott mérési helyszín a többihez képest hogyan helyezkedik el és mennyivel tér el szomszédjai értékétől.

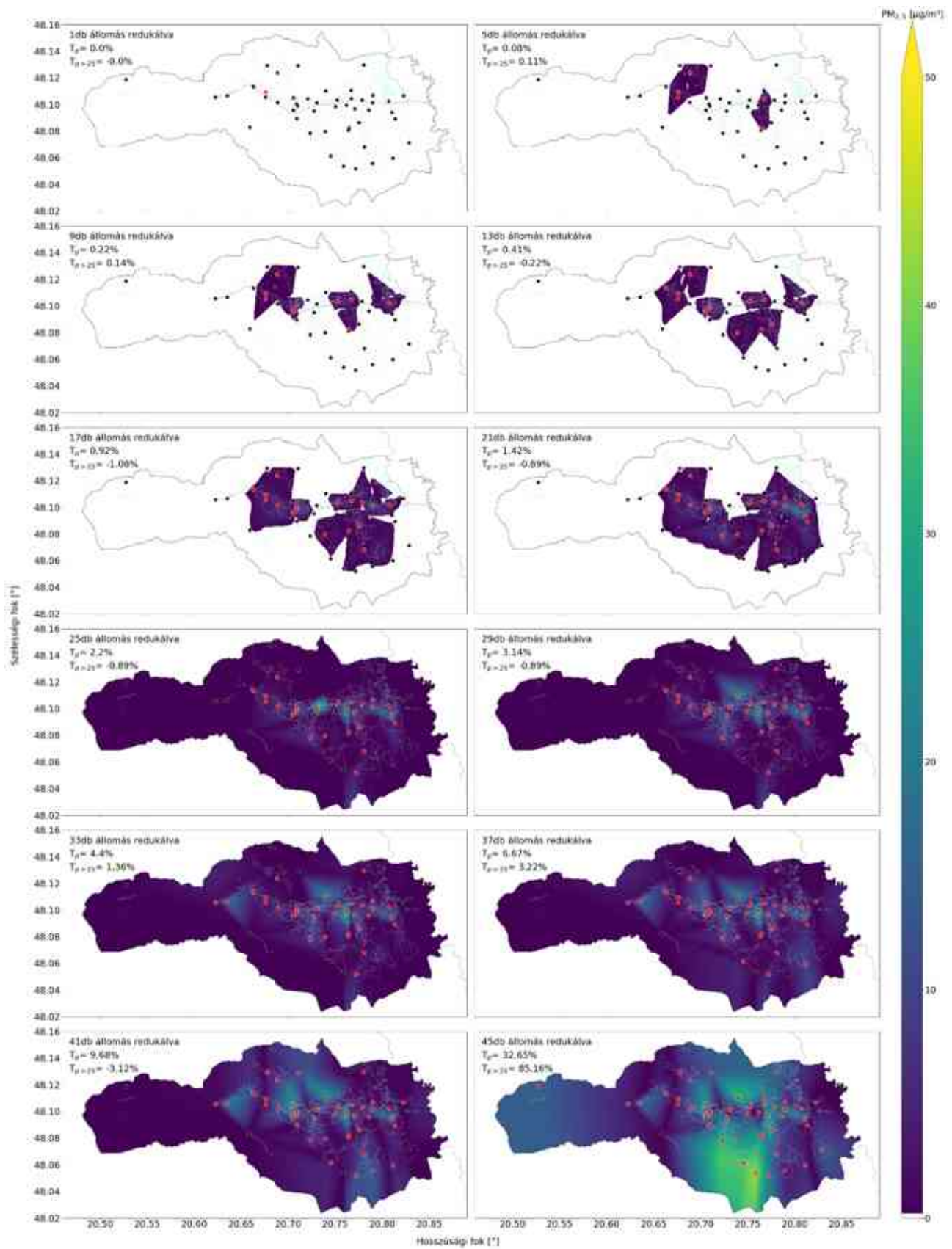
A legkisebb T_{diff} értékkel rendelkező mérési helyszín adatát kihagyva új eloszlás térképet generáltam ($G_{46,0}$), melyre újból elvégeztem az immár 46 db mérési helyszínhez tartozó T_{diff} és T_p értéket. Az így kapott legkisebb értékhez tartozó mérési helyszín adatát hagytam ki a következő lépésben és így folytattam a sort. A redukált számú mérési helyszín adataiból új eloszlás térképet készítettem, melyek közül minden negyediket a 83. ábrán láthatunk. A 84. ábra az eredeti eloszlás térkép és a kihagyott helyszínekkel készített eloszlás térkép különbségét mutatja, ugyancsak négyesével lépkedve. Az összes lépés közötti eloszlás és különbség térképet a Melléklet tartalmazza. A redukált mérési helyszínek száma szerint a 26. táblázat bemutatja az egyes lépésekben redukált mérési helyszínt és a lépéshez tartozó T_p és $T_{p>25}$ értékeket. A $T_{p>25}$ a kiinduló állapot és az egyes redukált térképek $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -nél nagyobb raszter elemeinek összege közötti százalékos arányt fejezi ki.



82. ábra A kiinduló állapot és egy-egy mérési hely kihagyásával készített eloszlás térképeinek különbség térképei



83. ábra Mérés helyszínek redukálásának lépései négyesével lépkedve eloszlás térképen



84. ábra Mérési helyszínek redukálásának lépéseivel négyesével lépkedve különbség térképen

26. táblázat Redukált mérési helyszínek sorszáma és hozzájuk tartozó T_p és $T_{p>25}$ értékek

Redukált mérési helyszínek száma	Redukált mérési helyszín	T_p [%]	$T_{p>25}$ [%]	Redukált mérési helyszínek száma	Redukált mérési helyszín	T_p [%]	$T_{p>25}$ [%]
1	LIFE_170	0,00	0,00	24	LIFE_165	1,96	-0,89
2	LIFE_162	0,02	0,08	25	LIFE_163	2,20	-0,89
3	LIFE_151	0,04	0,08	26	LIFE_167	2,16	-0,89
4	LIFE_123	0,06	0,08	27	LIFE_116	2,54	-0,89
5	LIFE_129	0,08	0,11	28	LIFE_132	2,92	-0,89
6	LIFE_166	0,12	0,11	29	LIFE_156	3,14	-0,89
7	LIFE_112	0,14	0,14	30	LIFE_119	3,39	-0,89
8	LIFE_164	0,18	0,14	31	LIFE_115	3,94	-3,27
9	LIFE_160	0,22	0,14	32	LIFE_111	4,45	1,36
10	LIFE_141	0,27	0,14	33	LIFE_155	4,40	1,36
11	LIFE_142	0,32	0,14	34	LIFE_130	4,96	1,36
12	LIFE_147	0,36	-0,20	35	LIFE_114	5,69	1,36
13	LIFE_135	0,41	-0,22	36	LIFE_124	6,29	0,66
14	LIFE_153	0,51	-0,22	37	LIFE_128	6,67	3,22
15	LIFE_152	0,57	-0,22	38	LIFE_149	7,14	4,54
16	LIFE_121	0,72	-0,22	39	LIFE_120	7,88	3,65
17	LIFE_169	0,92	-1,08	40	LIFE_127	8,58	3,65
18	LIFE_158	1,09	-1,08	41	LIFE_136	9,68	-3,12
19	LIFE_125	1,10	-1,08	42	LIFE_139	13,67	46,67
20	LIFE_154	1,19	-1,08	43	LIFE_143	18,21	46,67
21	LIFE_171	1,42	-0,89	44	LIFE_133	35,11	85,16
22	LIFE_126	1,63	-0,89	45	LIFE_131	32,65	85,16
23	LIFE_146	1,67	-0,89	46	LIFE_148	34,75	66,12

A fent bemutatott módszert alkalmaztam a teljes vizsgálati időszak 5088 db órájára, így átfogó képet alkotva a mérési helyszínek redukálhatóságáról. Ezen időszak alatt számos eloszlás és szennyezettségi szint alakult ki a városban. Az első 10 redukált mérési helyszínt és a T_p értékeket az előfordulásuk és az átlaguk szerint összesítettem a teljes időszakra, havonta (27. táblázat és 28. táblázat), valamint a 69. ábra szerinti órás átlagérték maximumokhoz tartozó időpontok (08:00 és 20:00) szerinti bontásban (29. táblázat).

27. táblázat Redukált mérési helyszínek előfordulásuk szerint havi bontásban, a teljes és a szennyezett időszakokban

Redukált mérési helyszínek száma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teljes időszak	LIFE_151	LIFE_166	LIFE_123	LIFE_112	LIFE_142	LIFE_135	LIFE_146	LIFE_170	LIFE_152	LIFE_153
Szeptember	LIFE_151	LIFE_166	LIFE_123	LIFE_164	LIFE_135	LIFE_142	LIFE_146	LIFE_128	LIFE_115	LIFE_170
Október	LIFE_123	LIFE_151	LIFE_166	LIFE_164	LIFE_135	LIFE_142	LIFE_146	LIFE_112	LIFE_153	LIFE_125
November	LIFE_151	LIFE_166	LIFE_123	LIFE_135	LIFE_112	LIFE_142	LIFE_160	LIFE_170	LIFE_152	LIFE_146
December	LIFE_151	LIFE_166	LIFE_123	LIFE_112	LIFE_142	LIFE_135	LIFE_146	LIFE_160	LIFE_152	LIFE_153
Január	LIFE_151	LIFE_123	LIFE_166	LIFE_142	LIFE_146	LIFE_112	LIFE_160	LIFE_152	LIFE_148	LIFE_153
Február	LIFE_166	LIFE_151	LIFE_123	LIFE_142	LIFE_112	LIFE_135	LIFE_146	LIFE_153	LIFE_126	LIFE_170
Március	LIFE_123	LIFE_166	LIFE_151	LIFE_112	LIFE_142	LIFE_135	LIFE_146	LIFE_164	LIFE_152	LIFE_170
Szennyezett időszakok	LIFE_170	LIFE_162	LIFE_151	LIFE_123	LIFE_129	LIFE_166	LIFE_112	LIFE_164	LIFE_160	LIFE_141

28. táblázat Az első 10 redukált mérési helyszín átlagos T_p [%] értéke havi bontásban, a teljes és a szennyezett időszakokban

Redukált mérési helyszínek száma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teljes időszak	0,01	0,02	0,04	0,07	0,09	0,13	0,17	0,22	0,27	0,33
Szeptember	0	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,12	0,15	0,18
Október	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,11	0,14	0,19	0,24	0,29
November	0,01	0,03	0,05	0,08	0,11	0,15	0,2	0,26	0,33	0,4
December	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12	0,16	0,21	0,27	0,34	0,42
Január	0,01	0,03	0,05	0,09	0,12	0,17	0,22	0,27	0,34	0,42
Február	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,12	0,16	0,2	0,26	0,31
Március	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,11	0,15	0,18	0,23	0,28
Szennyezett időszakok	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,12	0,14	0,18	0,22	0,27

29. táblázat Redukált mérési helyszínek előfordulásuk szerint a hozzá tartozó átlagos T_p [%] értékkel az összes 8:00 és 20:00 óras időszakokban

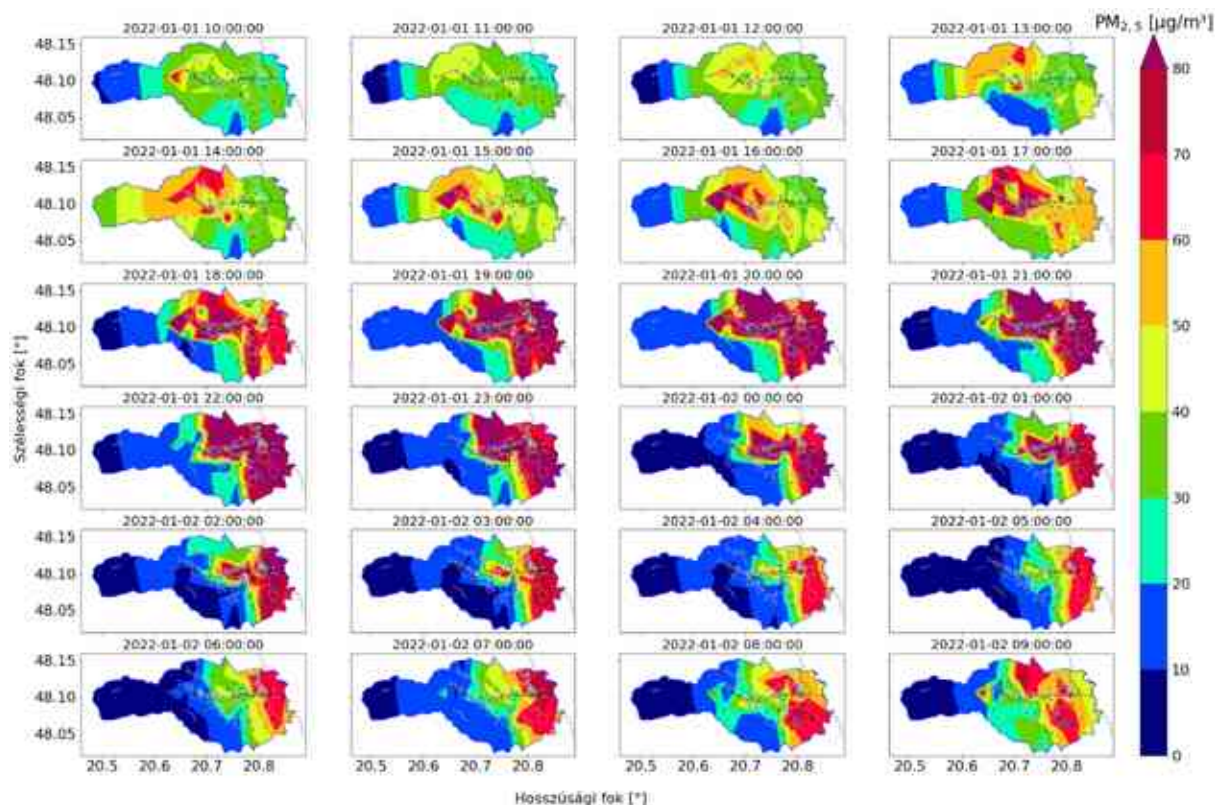
Redukált mérési helyszínek száma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8:00 helyszínek	LIFE_151	LIFE_166	LIFE_123	LIFE_135	LIFE_112	LIFE_126	LIFE_170	LIFE_160	LIFE_142	LIFE_146
8:00 T_p [%]	0,01	0,03	0,05	0,07	0,10	0,14	0,18	0,23	0,28	0,35
20:00 helyszínek	LIFE_166	LIFE_151	LIFE_123	LIFE_142	LIFE_112	LIFE_146	LIFE_170	LIFE_158	LIFE_152	LIFE_153
20:00 T_p [%]	0,01	0,03	0,06	0,09	0,14	0,18	0,24	0,31	0,39	0,48

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.

- Mérőhálózat célja lehet a folyamatok mélyebb megértése, ekkor minden lehetséges adat felhasználása javasolt.
- 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.

6.5 Időben és térben való vizsgálat

A 85. 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 $\text{PM}_{2,5}$ 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.



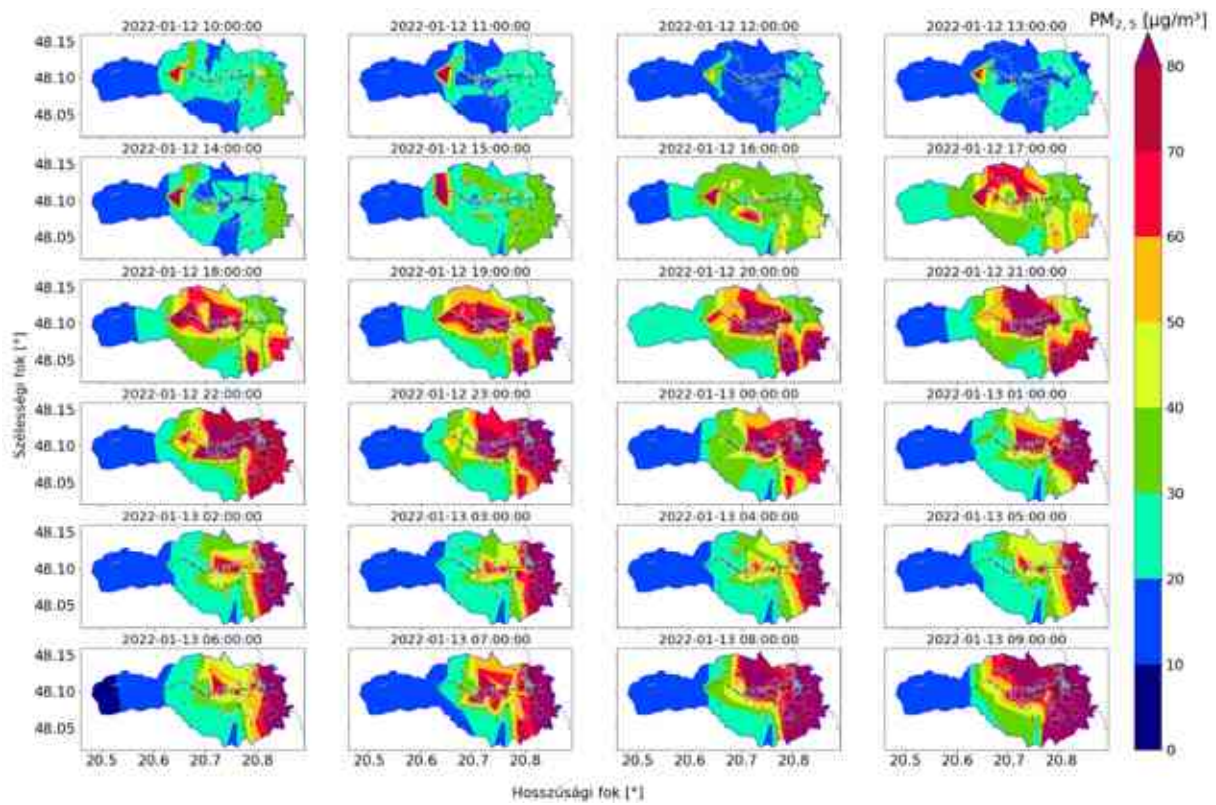
85. ábra PM_{2,5} eloszlástérképek 2022.01.01 10:00 és 2022.01.02. 09:00 között

2022.01.02. 02:00 órakor még a város középső és keleti területein akár 80 µg/m³ fölötti értékeket is láthatunk, a keleti oldal lakott részein pedig egy sávban már 20 µg/m³ 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. Hasonló trendet mutat be a 86. ábra is, mely a 2022.01.12 10:00 és 2022.01.13. 09:00 közötti időszak PM_{2,5} eloszlás térképeit foglalja össze. A nyugati rész növekedését (10-16 óra) követően északon és délkeleten is növekedés indul (17-20 óra). Az első csúcs időszak 20 és 23 óra között tetőzik, utána reggel 5 órára a város nyugati sávját kivéve kitisztul 50 µg/m³ alatti értékre.

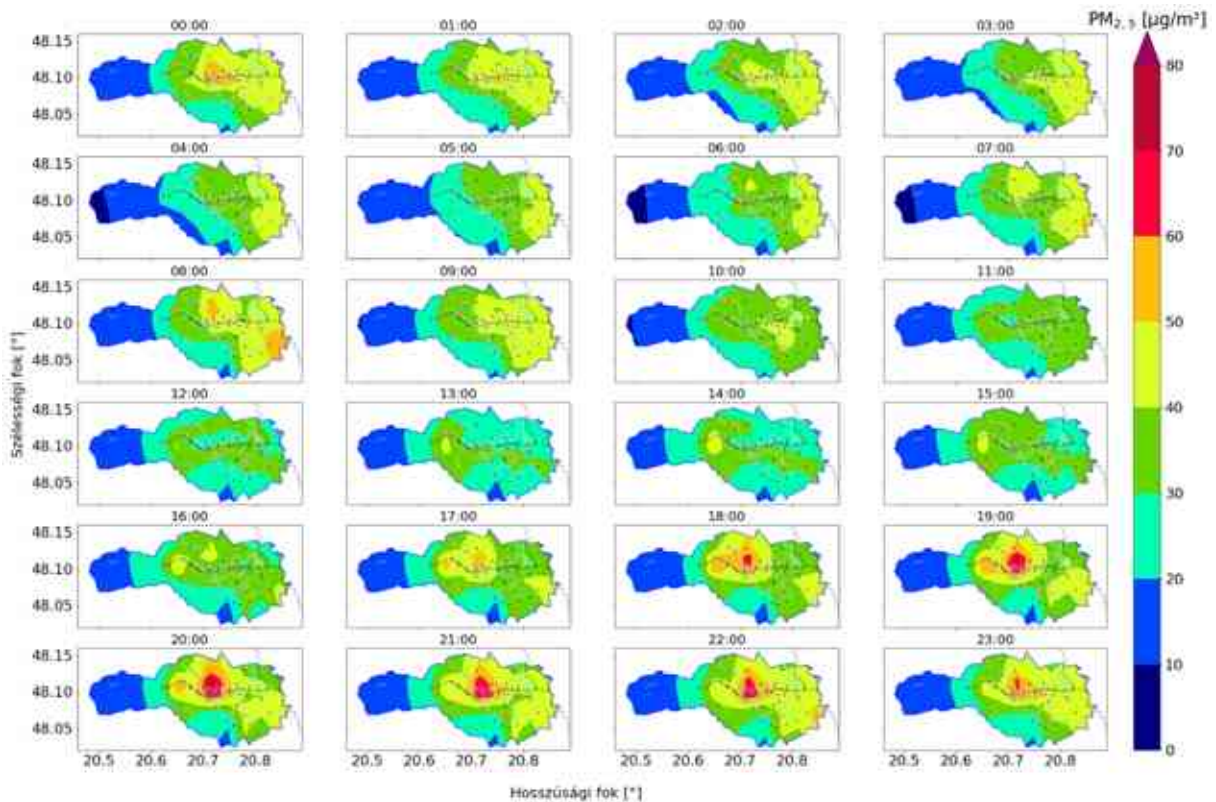
Ezt követően a város középső területei és a nyugati oldala újra emelkedésbe kezd és 8-9 órára újabb csúcsot ér el. Az ábrán látható trend, mi szerint a városban naponta kétszer alakul ki magas koncentrációjú szennyezettség, egybevág a 69. ábra alapján bemutatott órás PM_{2,5} átlagértékek trendjével.

A fentiek alapján megállapítom, hogy a mérőhálózat adatai alapján számított raszter alapú eloszlás térképek alkalmasak a Miskolcon lezajló városi léptékű légszennyezés terjedés, órás változásának leírására.

Egy hosszabb időszak órás trendjének vizsgálatához a januári hónap átlagos órás értékeit határoztam meg minden mérőállomáshoz. Egy-egy órára pedig ezekből az értékekből eloszlás térképet készítettem (87. ábra).



86. ábra PM_{2,5} eloszlástérképek 2022.01.12 10:00 és 2022.01.13. 09:00 között



87. ábra 2022. január átlagos óras eloszlás térképei

7 Összefoglalás

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.

Az értekezésben bemutatott kiválasztási módszer 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. Az értekezésben ismertetett kalibrációs módszer segítségével minden mérőegységre meghatároztam a rá jellemző $PM_{2,5}$, valamint PM_{10} frakciók kalibrációs görbáját. Hivatalos mérőállomás mellett elvégzett hosszútávú terepi mérések tapasztalatai alapján pedig a páratartalom, illetve a harmatpont függvényében további kompenzációt alkalmaztam a mért eredmények kiértékelésénél. A kalibráció és kompenzáció lépéseiből megalkottam az adatok korrekciós modelljét, mely kiküszöböli a szenzorok gyártásból adódó egyedi különbségeit és a működési elvükből adódó általános érzékenységet.

Miskolc több pontján elhelyeztük ezeket a mérőegységeket. Az általuk mért adatok SIM modul segítségével egy központi szerverre érkeztek, majd a mérőhálózat adatbázisában kerültek tárolásra. Az adatok feldolgozása, tisztítása után 47 db mérőegység korrigált átlagos óras szálló por koncentráció értékeiket vizsgáltam a 2021.09. – 2022.03. közötti időszakban időbeli lefutásuk és térbeli elhelyezkedésük alapján. Megállapítottam, hogy 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 folyamatait megfigyeltem és leírtam. 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.

8 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 presented in the thesis, 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. Using the calibration method described in the thesis, I determined the calibration curve of the PM_{2.5} and PM₁₀ fractions characteristic of each measuring unit. Based on the experience of long-term field measurements carried out at an official measuring station, I applied additional compensation depending on the humidity and dew point in the evaluation of the measured results. 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. The data they measured arrived at a central server with the help of a SIM module and were then stored in database of the measurement network. After processing and cleaning the data, I examined the corrected average hourly particulate matter concentration values of 47 measuring units in the period between 2021.09 and 2022.03 based on their time course and spatial location. I have found that 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.

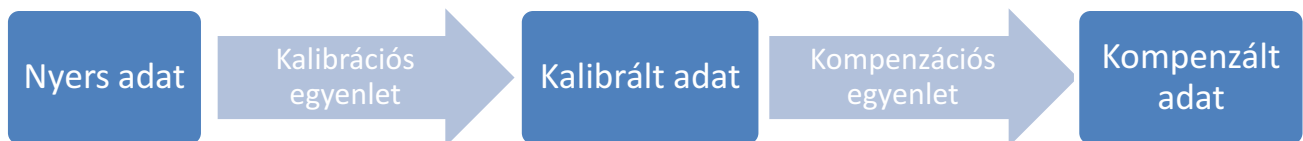
9 Új tudományos eredmények

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 nyomtatási 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 PM_{10} esetében a relatív páratartalom (RH), $PM_{2,5}$ 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
PM_{10}	$PM_{10_{comp}} = 7,75 + PM_{10_{cal}}(1,4 - 0,01 * RH) - 0,01 * RH$
$PM_{2,5}$	$PM_{2,5_{comp}} = 3,53 + PM_{2,5_{cal}}(0,9 - 0,02 * D) + 0,09 * D$

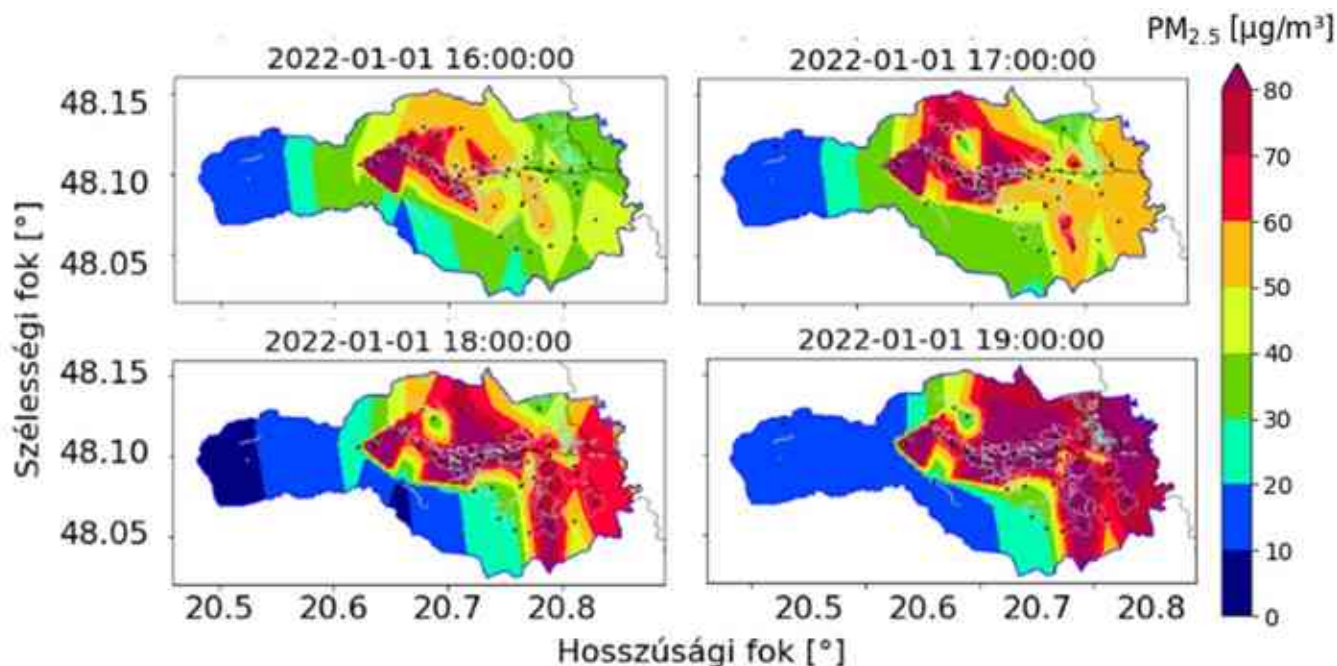
3. Miskolc szálló por koncentrációjának vizsgálata mérőhálózatban

A telepített mérőhálózat mérőegységeinek átlagos órás $PM_{2,5}$ 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 $PM_{2,5}$ 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 helyszínrre 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, adtmennyiségre, területi lefedettségre vonatkozó igény stb.) függvénye.

10 Felhasznált irodalom

- [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] <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>.
- [4] R. Caggiano, S. Sabia, and A. Speranza, "Trace elements and human health risks assessment of finer aerosol atmospheric particles (PM1)," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, pp. 36423-36433, 2019.
- [5] H. Shi, X. Cheng, J. Wang, Z. Li, and Y. Huang, "Characteristics and Source Analysis of PM1 in a Typical Steel-Industry City, Southwest China," *Atmosphere*, vol. 13, p. 1304, 2022.
- [6] A. Valavanidis, K. Fiotakis, and T. Vlachogianni, "Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms," *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, vol. 26, pp. 339-362, 2008.
- [7] J. Wu, W. Cheng, H. Lu, Y. Shi, and Y. He, "The Effect of Particulate Matter on Visibility in Hangzhou, China," *Journal of Environmental Science and Management*, vol. 21, pp. 100-109, 2018.
- [8] O. Jolliet, A. Antón, A.-M. Boulay, F. Cherubini, P. Fantke, A. Levasseur, *et al.*, "Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: impacts of climate change, fine particulate matter formation, water consumption and land use," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, pp. 1-19, 2018.
- [9] H. He, X.-Z. Liang, and D. J. Wuebbles, "Effects of emissions change, climate change and long-range transport on regional modeling of future US particulate matter pollution and speciation," *Atmospheric Environment*, vol. 179, pp. 166-176, 2018.
- [10] L. Jimoda, "Effects of particulate matter on human health, the ecosystem, climate and materials: a review," *Facta universitatis-series: Working and Living Enviromental Protection*, vol. 9, pp. 27-44, 2012.
- [11] R. D. Brook, S. Rajagopalan, C. A. Pope, J. R. Brook, A. Bhatnagar, A. V. Diez-Roux, *et al.*, "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association," *Circulation*, vol. 121, pp. 2331-2378, 2010.
- [12] J. Lepeule, F. Laden, D. Dockery, and J. Schwartz, "Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009," *Environmental health perspectives*, vol. 120, pp. 965-70, 2012.
- [13] A. Peters, E. Liu, R. L. Verrier, J. Schwartz, D. R. Gold, M. Mittleman, *et al.*, "Air pollution and incidence of cardiac arrhythmia," *Epidemiology*, vol. 11, pp. 11-17, 2000.
- [14] C. A. Pope III, R. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, K. Ito, *et al.*, "Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution," *Jama*, vol. 287, pp. 1132-1141, 2002.
- [15] N. C. f. E. Assessment and NC), *Air quality criteria for particulate matter* vol. 3: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development ..., 1996.

- [16] WHO, *Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide*: World Health Organization, 2006.
- [17] 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.
- [18] "Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air," *Official Journal of the European Union*, 2004.
- [19] "Commission Directive (EU) 2015/1480 of 28 August 2015 amending several annexes to Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council laying down the rules concerning reference methods, data validation and location of sampling points for the assessment of ambient air quality (Text with EEA relevance)," *Official Journal of the European Union*, 2015.
- [20] "Commission Implementing Decision of 12 December 2011 laying down rules for Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council as regards the reciprocal exchange of information and reporting on ambient air quality," *Official Journal of the European Union*, 2011.
- [21] "4/2002. (X. 7.) KvVM rendelet a légszennyezetségi agglomerációk és zónák kijelöléséről," ed. Magyar Közlöny.
- [22] "4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről," ed. Magyar Közlöny.
- [23] "6/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint és a helyhez kötött légszennyező források kibocsátásának vizsgálatával, ellenőrzésével, értékelésével kapcsolatos szabályokról," ed. Magyar Közlöny.
- [24] U. EPA, "Ambient Air Monitoring Reference and Equivalent Methods," *Federal Register 40 CFR Parts*, p. 50, 1997.
- [25] E. UNI, "12341: 2014," *Air Quality—Determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter. Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurements methods*, 2014.
- [26] C. A. Noble, R. W. Vanderpool, T. M. Peters, F. F. McElroy, D. B. Gemmill, and R. W. Wiener, "Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter," *Aerosol Science & Technology*, vol. 34, pp. 457-464, 2001.
- [27] J. Bol, W. Heinze, J. Gebhardt, and W. Letschert, "Method of measuring the concentration and/or size of suspended particles by forward scattering of light," ed: Google Patents, 1972.
- [28] E. S. Macias and R. B. Husar, "Atmospheric particulate mass measurement with beta attenuation mass monitor," *Environmental Science & Technology*, vol. 10, pp. 904-907, 1976.
- [29] H. Patashnick and E. G. Rupprecht, "Continuous PM-10 measurements using the tapered element oscillating microbalance," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 41, pp. 1079-1083, 1991.
- [30] C. 2018. (2018). *CEN - Technical Bodies - CEN/TC 264/WG 42* Available: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=CENWEB:7:0::::FSP_ORG_ID:2012773&cs=1FD71819F25D74834BB38751B78ACE16D

- [31] W. W. Delp and B. C. Singer, "Wildfire smoke adjustment factors for low-cost and professional PM_{2.5} monitors with optical sensors," *Sensors*, vol. 20, p. 3683, 2020.
- [32] K. K. Barkjohn, M. H. Bergin, C. Norris, J. J. Schauer, Y. Zhang, M. Black, *et al.*, "Using low-cost sensors to quantify the effects of air filtration on indoor and personal exposure relevant PM_{2.5} concentrations in Beijing, China," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 20, pp. 297-313, 2020.
- [33] 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.
- [34] S.-E. Walker and P. Schneider, "A study of the relative expanded uncertainty formula for comparing low-cost sensor and reference measurements," 2020.
- [35] M. He, N. Kuerbanjiang, and S. Dhaniyala, "Performance characteristics of the low-cost Plantower PMS optical sensor," *Aerosol Science and Technology*, vol. 54, pp. 232-241, 2020.
- [36] 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.
- [37] J. Kuula, T. Mäkelä, M. Aurela, K. Teinilä, S. Varjonen, Ó. González, *et al.*, "Laboratory evaluation of particle-size selectivity of optical low-cost particulate matter sensors," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 13, pp. 2413-2423, 2020.
- [38] H. Pawar and B. Sinha, "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*, vol. 54, pp. 685-703, 2020.
- [39] C. Malings, R. Tanzer, A. Haurlyiuk, P. K. Saha, A. L. Robinson, A. A. Presto, *et al.*, "Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation," *Aerosol Science and Technology*, vol. 54, pp. 160-174, 2020.
- [40] 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.
- [41] B. Alfano, L. Barretta, A. Del Giudice, S. De Vito, G. Di Francia, E. Esposito, *et al.*, "A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives," *Sensors*, vol. 20, p. 6819, 2020.
- [42] B. Alfano, L. Barretta, A. Del Giudice, S. De Vito, G. Di Francia, E. Esposito, *et al.*, "Correction: Alfano et al. A Review of Low-Cost Particulate Matter Sensors from the Developers' Perspectives. *Sensors* 2020, 20, 6819," *Sensors*, vol. 21, p. 3060, 2021.
- [43] B. Fishbain, U. Lerner, N. Castell, T. Cole-Hunter, O. Popoola, D. M. Broday, *et al.*, "An evaluation tool kit of air quality micro-sensing units," *Science of The Total Environment*, vol. 575, pp. 639-648, 2017.
- [44] A. Mukherjee, L. G. Stanton, A. R. Graham, and P. T. Roberts, "Assessing the Utility of Low-Cost Particulate Matter Sensors over a 12-Week Period in the Cuyama Valley of California," *Sensors*, vol. 17, p. 1805, 2017.

- [45] L. Sun, K. C. Wong, P. Wei, S. Ye, H. Huang, F. Yang, *et al.*, "Development and application of a next generation air sensor network for the Hong Kong marathon 2015 air quality monitoring," *Sensors*, vol. 16, p. 211, 2016.
- [46] P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, *et al.*, "The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities," *Environment international*, vol. 75, pp. 199-205, 2015.
- [47] M. Penza, D. Suriano, V. Pfister, M. Prato, and G. Cassano, "Urban Air Quality Monitoring with Networked Low-Cost Sensor-Systems," in *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2017, p. 573.
- [48] L. A. Wallace, A. J. Wheeler, J. Kearney, K. Van Ryswyk, H. You, R. H. Kulka, *et al.*, "Validation of continuous particle monitors for personal, indoor, and outdoor exposures," *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 21, p. 49, 2011.
- [49] M. Rogulski, "Using Low-Cost PM Monitors to Detect Local Changes of Air Quality," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 27, 2018.
- [50] A. Masic, B. Pikula, and D. Bibic, "Mobile measurement of particulate matter concentrations in urban area," in *Annals of DAAAM & Proceedings*, 2017.
- [51] M. Rogulski and A. Badyda, "Current trends in network based air quality monitoring systems," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, p. 012085.
- [52] K. Antalné Bökfı, K. P. Klucsik, T. Varga, and E. Domokos, "Opportunities to the urban air quality of characterization by the cost-effective electrochemical sensors," *International Journal of Engineering and Management Sciences*, vol. 4, p. 16, 2019.
- [53] J. Van den Bossche, J. Theunis, B. Elen, J. Peters, D. Botteldooren, and B. De Baets, "Opportunistic mobile air pollution monitoring: a case study with city wardens in Antwerp," *Atmospheric Environment*, vol. 141, pp. 408-421, 2016.
- [54] A. De Nazelle, E. Seto, D. Donaire-Gonzalez, M. Mendez, J. Matamala, M. J. Nieuwenhuijsen, *et al.*, "Improving estimates of air pollution exposure through ubiquitous sensing technologies," *Environmental Pollution*, vol. 176, pp. 92-99, 2013.
- [55] T. Nakayama, Y. Matsumi, K. Kawahito, and Y. Watabe, "Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor," *Aerosol Science and Technology*, vol. 52, pp. 2-12, 2018.
- [56] K. N Genikomsakis, N.-F. Galatoulas, P. I Dallas, L. M. Candanedo Ibarra, D. Margaritis, and C. S Ioakimidis, "Development and On-Field Testing of Low-Cost Portable System for Monitoring PM_{2.5} Concentrations," *Sensors*, vol. 18, p. 1056, 2018.
- [57] N. Castell, M. Viana, M. C. Minguillón, C. Guerreiro, and X. Querol, "Real-world application of new sensor technologies for air quality monitoring," *ETC/ACM Technical Paper*, vol. 16, 2013.
- [58] N. Castell, F. R. Dauge, P. Schneider, M. Vogt, U. Lerner, B. Fishbain, *et al.*, "Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?," *Environment international*, vol. 99, pp. 293-302, 2017.
- [59] A. Lewis and P. Edwards, "Validate personal air-pollution sensors: Alastair Lewis and Peter Edwards call on researchers to test the accuracy of low-cost monitoring devices before regulators are flooded with questionable air-quality data," *Nature*, vol. 535, pp. 29-32, 2016.

- [60] Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang, and P. Biswas, "Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement," *Aerosol Science and Technology*, vol. 49, pp. 1063-1077, 2015.
- [61] C. Borrego, A. Costa, J. Ginja, M. Amorim, M. Coutinho, K. Karatzas, *et al.*, "Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise," *Atmospheric Environment*, vol. 147, pp. 246-263, 2016.
- [62] A. L. Clements, W. G. Griswold, J. E. Johnston, M. M. Herting, J. Thorson, A. Collier-Oxandale, *et al.*, "Low-Cost Air Quality Monitoring Tools: From Research to Practice (A Workshop Summary)," *Sensors*, vol. 17, p. 2478, 2017.
- [63] J.-B. Renard, F. Dulac, G. Berthet, T. Lurton, D. Vignelles, F. Jégou, *et al.*, "LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles—Part 1: Principle of measurements and instrument evaluation," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 9, pp. 1721-1742, 2016.
- [64] J.-B. Renard, F. Dulac, G. Berthet, T. Lurton, D. Vignelle, F. Jégou, *et al.*, "LOAC: a small aerosol optical counter/sizer for ground-based and balloon measurements of the size distribution and nature of atmospheric particles—Part 2: First results from balloon and unmanned aerial vehicle flights," *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, vol. 8, pp. 1261-1299, 2015.
- [65] A. S. Bernd Laquai, "Title," unpublished |.
- [66] A. L. Northcross, R. J. Edwards, M. A. Johnson, Z.-M. Wang, K. Zhu, T. Allen, *et al.*, "A low-cost particle counter as a realtime fine-particle mass monitor," *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 15, pp. 433-439, 2013.
- [67] M. L. Bell, K. Ebisu, and R. D. Peng, "Community-level spatial heterogeneity of chemical constituent levels of fine particulates and implications for epidemiological research," *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 21, p. 372, 2011.
- [68] S. Steinle, S. Reis, and C. E. Sabel, "Quantifying human exposure to air pollution—Moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment," *Science of the Total Environment*, vol. 443, pp. 184-193, 2013.
- [69] H. E. I. P. o. t. H. E. o. T.-R. A. Pollution, *Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects*: Health Effects Institute, 2010.
- [70] C. Brandt, R. Kunde, B. Dobmeier, J. Schnelle-Kreis, J. Orasche, G. Schmoeckel, *et al.*, "Ambient PM10 concentrations from wood combustion—emission modeling and dispersion calculation for the city area of Augsburg, Germany," *Atmospheric environment*, vol. 45, pp. 3466-3474, 2011.
- [71] X.-C. Chen, T. J. Ward, J.-J. Cao, S.-C. Lee, J. C. Chow, G. N. Lau, *et al.*, "Determinants of personal exposure to fine particulate matter (PM 2.5) in adult subjects in Hong Kong," *Science of the Total Environment*, vol. 628, pp. 1165-1177, 2018.
- [72] L.-W. Hu, Z. M. Qian, M. S. Bloom, E. J. Nelson, E. Liu, B. Han, *et al.*, "A panel study of airborne particulate matter concentration and impaired cardiopulmonary function in young adults by two different exposure measurement," *Atmospheric Environment*, vol. 180, pp. 103-109, 2018.
- [73] K. Ardon-Dryer, Y. Dryer, J. N. Williams, and N. Moghimi, "Measurements of PM 2.5 with PurpleAir under atmospheric conditions," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 13, pp. 5441-5458, 2020.

- [74] J. Tryner, C. L'Orange, J. Mehaffy, D. Miller-Lionberg, J. C. Hofstetter, A. Wilson, *et al.*, "Laboratory evaluation of low-cost PurpleAir PM monitors and in-field correction using co-located portable filter samplers," *Atmospheric Environment*, vol. 220, p. 117067, 2020.
- [75] K. Kelly, J. Whitaker, A. Petty, C. Widmer, A. Dybwad, D. Sleeth, *et al.*, "Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor," *Environmental pollution*, vol. 221, pp. 491-500, 2017.
- [76] T. Sayahi, A. Butterfield, and K. Kelly, "Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors," *Environmental Pollution*, vol. 245, pp. 932-940, 2019.
- [77] B. I. Magi, C. Cupini, J. Francis, M. Green, and C. Hauser, "Evaluation of PM_{2.5} measured in an urban setting using a low-cost optical particle counter and a Federal Equivalent Method Beta Attenuation Monitor," *Aerosol Science and Technology*, vol. 54, pp. 147-159, 2020.
- [78] J. Bi, A. Wildani, H. H. Chang, and Y. Liu, "Incorporating low-cost sensor measurements into high-resolution PM_{2.5} modeling at a large spatial scale," *Environmental Science & Technology*, vol. 54, pp. 2152-2162, 2020.
- [79] B. Feenstra, V. Papapostolou, S. Hasheminassab, H. Zhang, B. Der Boghossian, D. Cocker, *et al.*, "Performance evaluation of twelve low-cost PM_{2.5} sensors at an ambient air monitoring site," *Atmospheric Environment*, vol. 216, p. 116946, 2019.
- [80] A. Mehadi, H. Moosmüller, D. E. Campbell, W. Ham, D. Schweizer, L. Tarnay, *et al.*, "Laboratory and field evaluation of real-time and near real-time PM_{2.5} smoke monitors," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 70, pp. 158-179, 2020.
- [81] N. Schulte, X. Li, J. K. Ghosh, P. M. Fine, and S. A. Epstein, "Responsive high-resolution air quality index mapping using model, regulatory monitor, and sensor data in real-time," *Environmental Research Letters*, vol. 15, p. 1040a7, 2020.
- [82] Y. Lu, G. Giuliano, and R. Habre, "Estimating hourly PM_{2.5} concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A Los Angeles case study," *Environmental Research*, vol. 195, p. 110653, 2021.
- [83] <https://bayareamonitor.org/article/all-particulate-is-local-new-tech-helps-map-community-air-quality/>.
- [84] S. Kim, S. Park, and J. Lee, "Evaluation of performance of inexpensive laser based PM_{2.5} sensor monitors for typical indoor and outdoor hotspots of South Korea," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 1947, 2019.
- [85] I. Stavroulas, G. Grivas, P. Michalopoulos, E. Liakakou, A. Bougiatioti, P. Kalkavouras, *et al.*, "Field evaluation of low-cost PM sensors (Purple Air PA-II) under variable urban air quality conditions, in Greece," *Atmosphere*, vol. 11, p. 926, 2020.
- [86] C. McFarlane, P. K. Isevlambire, R. S. Lumbuenamo, A. M. E. Ndinga, R. Dhammapala, X. Jin, *et al.*, "First measurements of ambient PM_{2.5} in kinshasa, democratic republic of Congo and Brazzaville, republic of Congo using field-calibrated low-cost sensors," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 21, 2021.
- [87] D. L. Robinson, "Accurate, low cost PM_{2.5} measurements demonstrate the large spatial variation in wood smoke pollution in regional Australia and improve modeling and estimates of health costs," *Atmosphere*, vol. 11, p. 856, 2020.

- [88] A. L. Holder, A. K. Mebust, L. A. Maghran, M. R. McGown, K. E. Stewart, D. M. Vallano, *et al.*, "Field evaluation of low-cost particulate matter sensors for measuring wildfire smoke," *Sensors*, vol. 20, p. 4796, 2020.
- [89] Z. Wang, W. W. Delp, and B. C. Singer, "Performance of low-cost indoor air quality monitors for PM_{2.5} and PM₁₀ from residential sources," *Building and Environment*, vol. 171, p. 106654, 2020.
- [90] J. Li, S. K. Mattewal, S. Patel, and P. Biswas, "Evaluation of nine low-cost-sensor-based particulate matter monitors," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 20, pp. 254-270, 2020.
- [91] Y. Zou, M. Young, J. Chen, J. Liu, A. May, and J. D. Clark, "Examining the functional range of commercially available low-cost airborne particle sensors and consequences for monitoring of indoor air quality in residences," *Indoor Air*, vol. 30, pp. 213-234, 2020.
- [92] J. Tryner, C. Quinn, B. C. Windom, and J. Volckens, "Design and evaluation of a portable PM 2.5 monitor featuring a low-cost sensor in line with an active filter sampler," *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 21, pp. 1403-1415, 2019.
- [93] B. Ford, J. R. Pierce, E. Wendt, M. Long, S. Jathar, J. Mehaffy, *et al.*, "A low-cost monitor for measurement of fine particulate matter and aerosol optical depth—Part 2: Citizen-science pilot campaign in northern Colorado," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 12, pp. 6385-6399, 2019.
- [94] M. Si, Y. Xiong, S. Du, and K. Du, "Evaluation and calibration of a low-cost particle sensor in ambient conditions using machine-learning methods," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 13, pp. 1693-1707, 2020.
- [95] K. Barkjohn, B. Gantt, and A. Clements, "Development and Application of a United States wide correction for PM_{2.5} data collected with the PurpleAir sensor," *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 2020.
- [96] U. Epa, "Technical assistance document for the reporting of daily air quality—The Air Quality Index (AQI)," *Environmental Protection Agency*, 2018.
- [97] <https://map.purpleair.com/1/mAQI/a10/p604800/cc0#1.56/26.3/-74.4>.
- [98] <https://fire.airnow.gov/>.
- [99] K. Johnson, A. Holder, S. Frederick, and A. Clements, "PurpleAir PM_{2.5} U.S. Correction and Performance During Smoke Events 4/2020," presented at the International Smoke Symposium, Raleigh, NC, 2020.
- [100] 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 PM_{2.5} sensors," presented at the EPA Tools and Resources Webinar, webbased, 2021.
- [101] A. Hamm, Y. Shibuya, S. Ullrich, and T. C. Cerratto Pargman, "What makes civic tech initiatives to last over time? Dissecting two global cases," in *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2021, pp. 1-17.
- [102] <https://nettigo.eu/products/sensor-community-kit-sds011-sht31-english-language-harness-cable-edition>.

- [103] 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.
- [104] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen, and M. Vogt, "Performance Assessment of a Low-Cost PM2. 5 Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway," *Atmosphere*, vol. 10, p. 41, 2019.
- [105] M. Blon, "Untersuchungen zur Messung von Feinstaub–Das Citizen Science Projekt luftdaten. info," ed: Nürtingen, Reutlingen, Stuttgart: Hochschulen Esslingen, 2017.
- [106] N. Ilieva, Y. Nikolova, I. Predyov, and N. Kozarev, "Sensors applicability for PM2. 5 and PM10 air concentration measurements," *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 53, pp. 496-503, 2018.
- [107] K. Ivanov, "Urban air pollution regression-kriging mapping of the city of Sofia," *Book of proceedings, Climate, atmosphere and water resources in the face of climate change, CAWRI–BAS, ISSN*, vol. 2683, pp. 114-126, 2020.
- [108] <https://sensor.community/hu/>.
- [109] R. Bielecki and M. Kaźmierczak, "Evaluation of air quality in the Miechów district, Poland," *World Scientific News*, vol. 110, pp. 219-226, 2018.
- [110] P. Kunecki, W. Franus, and M. Wdowin, "Statistical study and physicochemical characterization of particulate matter in the context of Kraków, Poland," *Atmospheric Pollution Research*, vol. 11, pp. 520-530, 2020.
- [111] <https://airly.org/>.
- [112] P. Kowalski and W. Warchałowski, "The comparison of linear models for pm10 and pm2. 5 forecasting," *WIT Trans. Ecol. Environ*, vol. 230, pp. 177-188, 2018.
- [113] M. Vogt, P. Schneider, N. Castell, and P. Hamer, "Assessment of low-cost particulate matter sensor systems against optical and gravimetric methods in a field co-location in norway," *Atmosphere*, vol. 12, p. 961, 2021.
- [114] M. Banach, T. Talaśka, J. Dalecki, and R. Długosz, "New technologies for smart cities–high-resolution air pollution maps based on intelligent sensors," *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, vol. 32, p. e5179, 2020.
- [115] <https://airsenseur.org/>.
- [116] <http://www.ensensetech.com/>.
- [117] <https://aqicn.org/products/gaia/>.
- [118] <https://www.levego.hu/>.
- [119] <https://opensensemap.org/>.
- [120] <http://hungairy.hu/projekt>.
- [121] *Magyarország megsértette a környezeti levegő minőségével kapcsolatos uniós jogi szabályokat*, E. U. Bírósága C-637/18. sz. ügyben hozott ítélet, 2021.
- [122] <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities?continent=59af92ac3e70001c1bd78e52>.
- [123] (2019, 07.23.). *Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM)* Available: <http://www.levegominoseg.hu>

- [124] Z. Ferenczi, E. Homolya, and L. Bozó, "Detailed Assessment of a Smog Situation Detected in the Sajó Valley, Hungary," in *International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application*, 2018, pp. 351-356.
- [125] A. Varga-Balogh, Á. Leelőssy, and R. Mészáros, "Effects of covid-induced mobility restrictions and weather conditions on air quality in Hungary," *Atmosphere*, vol. 12, p. 561, 2021.
- [126] F. László, "A levegő védelme Miskolcon (helyi stratégiák és rendeletek)," *Publicationes Universitatis Miskolciensis. Sectio Juridica et Politica*, vol. 36, pp. 341-366, 2018.
- [127] K. Lantai, "Levegőminőség vizsgálata, szmoghelyzetek elemzése az Észak-Magyarország régióban," *Anyagmérnöki Tudományok*, vol. 38, pp. 309-318, 2013.
- [128] S. István, ed, 2011.
- [129] P. Seibert, Beyrich, F., Gryning, S.-E., Joffre, S., Rasmussen, A., and Tercier, P., "Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height," *Atmos. Environ.*, vol. 34, pp. 1001–1027., 2000.
- [130] G. Götz and F. Rákóczi, *A dinamikus meteorológia alapjai*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1981.
- [131] B. Murthy, R. Latha, A. Tiwari, A. Rathod, S. Singh, and G. Beig, "Impact of mixing layer height on air quality in winter," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 197, p. 105157, 2020.
- [132] N. Dezső, "Miskolc Klímája és levegőminősége valamint a levegőminőséget alakító tényezők BAZ megyei KTKHT," ed. Miskolc, 2005.
- [133] M. B. L. Kiss, Csongor; Trohák, Attila; Palotás, Árpád Bence, "Szállópor koncentráció mérő szenzorok összehasonlító elemzése," *28th International Conference on Computers and Education*, pp. 250-255, 2018.
- [134] C. Báthory, M. L. Kiss, A. Trohák, Z. Dobó, and Á. B. Palotás, "Preliminary research for low-cost particulate matter sensor network," in *E3S Web of Conferences*, 2019, p. 00004.
- [135] C. Programme. *EU-DEM v1.1 - Copernicus Land Monitoring Service*. Available: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>
- [136] W. Schwanghart and D. Scherler, "TopoToolbox 2–MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences," *Earth Surface Dynamics*, vol. 2, pp. 1-7, 2014.
- [137] K. Wang, F.-e. Chen, W. Au, Z. Zhao, and Z.-l. Xia, "Evaluating the feasibility of a personal particle exposure monitor in outdoor and indoor microenvironments in Shanghai, China," *International journal of environmental health research*, vol. 29, pp. 209-220, 2019.
- [138] S. J. Johnston, P. J. Basford, F. M. Bulot, M. Apetroaie-Cristea, N. H. Easton, C. Davenport, *et al.*, "City scale particulate matter monitoring using LoRaWAN based air quality IoT devices," *Sensors*, vol. 19, p. 209, 2019.
- [139] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, and P. Modzel, "Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM2.5 Monitoring," *Journal of Sensors*, vol. 2018, 2018.
- [140] F. M. Bulot, S. J. Johnston, P. J. Basford, N. H. Easton, M. Apetroaie-Cristea, G. L. Foster, *et al.*, "Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment," *Scientific reports*, vol. 9, pp. 1-13, 2019.

- [141] D. A. Hapidin, C. Saputra, D. S. Maulana, M. M. Munir, and K. Khairurrijal, "Aerosol chamber characterization for commercial particulate matter (PM) sensor evaluation," *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 19, pp. 181-194, 2019.
- [142] <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/equivalence.pdf>.
- [143] <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/Equivalence%20Tool%20v10.xlsm>.
- [144] L.-A. Tortajada-Genaro and E. Borrás, "Temperature effect of tapered element oscillating microbalance (TEOM) system measuring semi-volatile organic particulate matter," *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 13, pp. 1017-1026, 2011.
- [145] R. Jayaratne, X. Liu, P. Thai, M. Dunbabin, and L. Morawska, "The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 11, pp. 4883-4890, 2018.
- [146] L. R. Crilley, M. Shaw, R. Pound, L. J. Kramer, R. Price, S. Young, *et al.*, "Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring," *Atmospheric Measurement Techniques*, pp. 709-720, 2018.
- [147] M. B. L. Kiss., Csongor; Trohák, Attila; Palotás, Árpád Bence, "Szállópor koncentráció mérő műszer páratartalom kalibrációja," *Villamosmérnöki Tudományok Határok Nélkül*, p. 7, 2018.
- [148] C. Báthory, M. Kiss L., A. Trohák, D. Zsolt, and Á. B. Palotás, "Preliminary Research For Low-Cost Particulate Matter Sensor Network " presented at the EKO-DOK 2019 11th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering, Poland, 2019.
- [149] M. G. Lawrence, "The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, pp. 225-234, 2005.
- [150] <https://miskolc.pmmonitoring.hu/tanacsok>.
- [151] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?– Arguments against avoiding RMSE in the literature," *Geoscientific model development*, vol. 7, pp. 1247-1250, 2014.
- [152] L. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre, and F. Bonavitacola, "Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 215, pp. 249-257, 2015.
- [153] L. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre, and F. Bonavitacola, "Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO2," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 238, pp. 706-715, 2017.
- [154] T. Duvivier and T. Bréchet, "" Low-cost air quality sensors: an opportunity to raise awareness and improve air pollution monitoring."
- [155] S. G. d. Santos, U. Pfeffer, and J. Poulleau, "GUIDE TO THE DEMONSTRATION OF EQUIVALENCE OF AMBIENT AIR MONITORING METHODS," 2003.
- [156] "12341: 2014 Determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter. Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurements methods," in *Air Quality*, ed: BSI, 2014.

11 Disszertáció témájában született saját publikációk és előadások

J. Nemzetközi rangos folyóiratcikkek

- J1. 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>

OJ. Folyóiratcikkek

- OJ1. 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.
- OJ2. 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
- OJ3. 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.
- OJ4. 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.
- OJ5. 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

P. Nemzetközi konferencia kiadványban publikált cikkek

- P1. 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.
- P2. 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.
- P3. 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
- P4. 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
- P5. 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.

OP. Egyéb konferencia kiadványban publikált cikkek

- OP1. 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.
- OP2. 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.
- OP3. 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) kiadó: Magyar Égéstudományi Bizottság

C. Nemzetközi konferencia előadások

- C1. Csongor Báthory, Attila Béres, Árpád B. Palotás: Smog issues of the Sajó valley, height of the air inversion layer (poszter), *2. EnergyWaterFoodNexus (EWFN) International Summit*, Orlando, Florida, USA, 2017. 10. 19-20.
- C2. 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.
- C3. L. Kiss Márton, Báthory Csongor, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Szállópor koncentrációt mérő szenzorok összehasonlító elemzése, *SzámOkt 2018, XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, 28th International Conference on Computers and Education*, 2018.10.11-14.
- C4. 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.
- C5. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Zsolt Dobó, Palotás Árpád Bence: Reliability of particulate matter sensor operation during uncomfortable weather conditions (poster), *ECM 2019, 9th European Combustion Meeting*, Lisszabon, Portugália, 2019.04.14-17.
- C6. Báthory Csongor, Garami Attila, Palotás Árpád Bence: Artificial neural network calibration of low-cost particulate matter sensor (e-poster), *Adaptív digitális állam*, Duna Palota, Budapest, 2019. 11. 5-6.
- C7. Báthory Csongor: Development of a low-cost sensor based particulate matter monitoring network in Miskolc, Hungary, *3. EnergyWaterFoodNexus (EWFN) International Summit Fall 2019*, Tallahassee, Florida, USA, 2019. 11. 6-8.
- C8. Báthory Csongor, Béres Attila, Pecsmány Péter, Szalontai Lajos, Palotás Árpád Bence: Stationary and mobile particulate matter concentration measurement (poster), *3. EnergyWaterFoodNexus (EWFN) International Summit Fall 2019*, Tallahassee, Florida, USA, 2019. 11. 6-8.
- C9. Báthory Csongor, Dobó Zsolt: Fényjelzéssel ellátott ipari légszennyezettség jelző rendszer (poszter), *International Symposium on Environmental, Health and Safety (ISEHS 2021)*, Debrecen, Magyarország, 2021.03.31-04.01.

- C10. Báthory Csongor, Zsolt Dobó: Industrial air pollution indicator system with light signal (poster), *10th European Combustion Meeting – Virtual Edition (ECM 2021)*, Nápoly, Olaszország, 2021.04.14-15.
- C11. Csongor Báthory: First operational experience of a high-resolution particulate matter monitoring system in Miskolc, *International Conference on Air Pollution – Moving Towards Clean Air for Europe*, Budapest, 2021.11.09.

OC. Egyéb konferencia előadások

- OC1. Báthory Csongor, Palotás Árpád Bence: Kevertérségi rétegvastagság vizsgálati módszerei, *Doktoranduszok Fóruma*, Miskolc, Miskolci Egyetem, 2017.11.16.
- OC2. Csongor Báthory, Attila Béres, Árpád B. Palotás: Smog issues of the Sajó valley, elevation of the air inversion layer (poszter), *3. MÉB Égéstudományi Konferencia*, Budapest, 2017. 11. 17.
- OC3. Báthory Csongor, Palotás Árpád Bence: A légköri inverzió energetikai megközelítése, *Jedlik Ányos Szakmai Napok, Veszprém*, Pannon Egyetem, 2018.04.19-21. III. helyezés
- OC4. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Alacsony költségű porszenzorok PM10 és PM2,5 értékeinek kapcsolata, *Villamosmérnöki Tudományok Határok Nélkül*, Miskolci Egyetem, 2018.11.09.
- OC5. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: Alacsony költségű porszenzorok PM10 számítási módszerei (poszter), *Villamosmérnöki Tudományok Határok Nélkül*, Miskolci Egyetem, 2018.11.09.
- OC6. Báthory Csongor, Kiss L. Márton, Trohák Attila, Palotás Árpád Bence: GPS alapú indikatív szállópormérés (poszter), *Villamosmérnöki Tudományok Határok Nélkül*, Miskolci Egyetem, 2018.11.09.
- OC7. Csongor Báthory, Márton L. Kiss, Attila Trohák, Árpád Bence Palotás: Calculation methods of low-cost particulate matter sensors (poszter), *4. MÉB Égéstudományi Konferencia*, Miskolci Egyetem, 2018.11.10.
- OC8. Csongor Báthory, Márton L. Kiss, Attila Trohák, Árpád Bence Palotás: GPS based indicative particulate matter measurement (poszter), *4. MÉB Égéstudományi Konferencia*, Miskolci Egyetem, 2018.11.10.
- OC9. Báthory Csongor, Béres Attila, Pecsmány Péter, Szalontai Lajos, Palotás Árpád Bence: Stacioner és mobil szállópor koncentráció mérés Miskolcon (poster), *Környezetmérnöki Konferenciát és Szakmai Nap*, Debreceni Egyetem 2019. 11. 7-8
- OC10. Báthory Csongor: Low-Cost Sensor based Particulate Matter Monitoring, *Anyagtudományi szimpózium*, Miskolci Egyetem, 2019.11.18.
- OC11. Báthory Csongor, Dobó Zsolt, Palotás Árpád Bence: Mobile sensor measurements around Miskolc, *Doktoranduszok Fóruma*, Miskolc, Miskolci Egyetem, 2019.11.21.
- OC12. Báthory Csongor, Béres Attila, Pecsmány Péter, Szalontai Lajos, Palotás Árpád Bence: Szállópor koncentráció mérés kiterjesztése mozgó szenzor segítségével (poszter), *5. MÉB Égéstudományi Konferencia*, Budapest, BME „D” épület, 2019.11.29.

- OC13. Báthory Csongor, Dobó Zsolt, Palotás Árpád Bence: Szállópor-koncentráció kis költségű mérésének lehetőségei Miskolcon, 5. *MÉB Égéstudományi Konferencia*, Budapest, BME „D” épület, 2019.11.29.
- OC14. Báthory Csongor: A PM monitoring rendszer megvalósítása, a Miskolci Egyetem tervezett tevékenységeinek bemutatása, *LIFE IP - HUNGAIKY MISKOLC projektbemutató konferencia*, Miskolc Polgármesteri Hivatal Közgyűlési terem, 2020.02.18.
- OC15. Csongor Báthory, Zsolt Dobó, Árpád Bence Palotás: Seasonal evaluation of a low-cost particulate matter sensor (Poszter), 6. *MÉB Égéstudományi Konferencia*, Miskolc, 2020.08.24.

12 Köszönetnyilvánítás

Ezúton is köszönöm Prof. Dr. Palotás Árpád Bence témavezetőmnek az értekezésem elkészítésében nyújtott szakmai segítséget, a témavezetés vállalását. Támogatásával alapvetően hozzájárult szakmai fejlődésemhez és sikeres munkámhoz.

Köszönetet mondok a Miskolci Egyetem Tüzeléstani- és Energetika Intézeti Tanszék oktatóinak, munkatársainak a szakmai segítségért, biztatásért és támogatásért.

Kiemelt köszönettel tartozom Dr. Dobó Zsolt segítségéért a kutatási munkám koordinálásában, rám szánt önzetlen erőfeszítéséért a mérés és publikálás területén jelentkező nehézségek során.

Köszönöm a Miskolc Város Önkormányzat munkatársainak, Nagy Dezsőnek, Uramné Lantai Katalinnak és Márton Ádámnak a munkáját, az együttműködést, a közös gondolkodást és a megosztott információkat, melyek nagyban segítettek a mérőhálózat kialakítását.

Köszönöm a OLM állomásokat üzemeltető Uram Jánosnak a segítséget és a tanácsokat.

A PhD értekezés nem születhetett volna meg a LIFE IP HungAIRy (LIFE17 IPE/HU/000017) projekt támogatása nélkül, mely az Európai Unió LIFE programjának támogatásával valósul meg.

13 Mellékletek

13.1 Az adatok statisztikai mutatószámai

A kalibrációs modellek teljesítményét jellemzően egy vagy több teljesítménymérőn keresztül fejezik ki. Ezek olyan függvények, amelyek a kalibrációs modell kimenete és a referenciaállomástól kapott értékek közötti eltérést jellemzik. A meglévő tanulmányok teljesítménymérői különböznek, ami megnehezíti a vizsgálatok összehasonlítását. A következőkben röviden összefoglalom a fő teljesítménymutatókat.

Átlagos hiba (mean bias error, MBE)

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i) \quad (10)$$

ahol,

n: minták száma

y_i : cél érték

y'_i : becsült érték

Átlagos abszolút hiba (mean absolute error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i| \quad (11)$$

Átlagos négyzetes hiba (mean squared error, MSE)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (12)$$

Átlagos négyzetes hiba gyöke (root mean squared error, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (13)$$

Az MSE és az RMSE nagyon hasonlóak. Az MSE geometriailag úgy értelmezhető, mint a pontok átlagos illeszkedése egy regressziós modellhez, míg az RMSE a pontok átlagos távolsága a regressziós modelltől. Az RMSE és az MSE a hibákat nagyságukkal arányosan mérlegeli, míg a MAE minden hibát egyformán mérlegel. Ez érzékenyebbé teszi az RMSE-t és az MSE-t a kiugró értékekre [151], ami arra utal, hogy a MAE jobb mérőszám az átlagos teljesítmény mérésére, míg az (R)MSE hasznos a modell kiugró értékekre való érzékenységének mérésére. A gyakorlatban ajánlatos mindkét mérőszámot használni, mivel így kiegészítő információhoz jutunk a modell teljesítményével kapcsolatban [151]. Az MBE azt méri, hogy az átlagos hiba pozitív vagy negatív és felhasználható annak meghatározására, hogy a modell alul- vagy túlbecsüli-e a szennyező értékeket. Megjegyzendő, hogy az eltérő előjelű hibák kioltják egymást. Spinelle és társai [152, 153] elosztották az RMSE-t és az MBE-t a referenciamérések szórásával, és a kapott értékeket céldiagramban ábrázolták. A céldiagramok hasznosak e két teljesítménymutató megjelenítéséhez és a különböző modellek gyors összehasonlításához. Az abszolút mértékű hibák alternatívája a relatív hibamértékre támaszkodni, amely a hibát a valódi mérésekkel arányosan fejezi ki.

Átlagos relatív hiba (mean relative error, MRE)

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (14)$$

Átlagos relatív hiba százalék (mean absolute percentage error, MAPE)

$$MAPE = MRE * 100\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| * 100\% \quad (15)$$

Az MRE hasznos annak kifejezésére, hogy a becsült értékek milyen messze vannak a referenciaértékektől, míg a MAPE a teljesítményt jellemzi, ha ugyanazt a modellt több szennyezőanyagra alkalmazzák.

A determinációs együttható vagy R^2 azt méri, hogy egy változó mennyire befolyásolja a másik változót. Kalibrációs modell esetén az R^2 azt a százalékos eltérést méri, amelyet a modell megad. Az R^2 kiszámításához két mutatót kell meghatározunk:

Az átlagtól való eltérések négyzetének teljes összege

$$SS_{tot} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (16)$$

ahol, \bar{y} a cél értékek átlaga.

Maradékok négyzetösszege vagy átlagos négyzetes hiba (ld. a (12) -es egyenlet)

$$SS_{res} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 = MSE \quad (17)$$

Az R^2 -et a két mutató segítségével a (18) -es egyenlet szerint számíthatjuk.

Determinációs együttható

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (18)$$

Az R^2 az olcsó szenzorhálózatok esetében hasznos lehet kalibrálási modellek felmérésére a tekintetben, hogy becsült értékek eloszlása mennyire egyezik a referencia mérések eloszlásával.

A 6/2011. (I. 14.) VM rendelet 8. melléklete az AQD alapján meghatározott mérési bizonytalanságot 50%-ban határozza meg az szálló porokra indikatív módszerek esetében és 100%-ban a modellek esetében. Az Európai Szabványügyi Bizottság (Comité Européen de Normalisation, CEN) Útmutató a mérési bizonytalanság kifejezéséhez (ENV 13005-1999) készített elvei, az MSZ ISO 5725:2000 számú szabvány módszere, valamint a CEN „Jelentés a levegőminőségről - A levegő mérési referenciamódszereihez kapcsolódó bizonytalansági becslés megközelítése” (CR 14377:2002E) című jelentésében foglalt útmutató alapján ez a mérési bizonytalanság a relatív kiterjesztett mérési bizonytalanság (Relative Expanded Uncertainty, REU)[34, 154-156].

Relatív kiterjesztett mérési bizonytalanság

$$U_r(y) = \frac{k \sqrt{V(y)}}{y} \quad (19)$$

ahol,

y: a mért koncentráció

V(y): az értékelési módszer becsült szórása, esetünkben a szenzoros mérés becsült varianciája

k: egy adott, a bizonytalansági állításhoz tartozó úgynevezett lefedettség tényező.

Mivel általában azt feltételezzük, hogy a mérési hibák normális eloszlásúak, 95 %-os megbízhatósági szint megfelel a $k = 2$ tényezőnek, 99%-os megbízhatósági szint megfelel a $k = 3$ tényezőnek a (19) -es egyenletben. E tényező nélkül, azaz $k = 1$ esetén a (19) -es egyenlet egyszerűen az y mérés relatív bizonytalanságaként definiálható [34, 154]. A (19) -es egyenlet használatának döntő szempontja az értékelési módszer, vagyis a szenzor mérési hiba szórásának értékelése vagy becslése, melyet a (20) -es egyenlet részletesebben ismeret.

Részletezett relatív kiterjesztett mérési bizonytalanság

$$U_r(y_i) = k * \frac{\sqrt{\frac{RSS}{n-2} + u^2(x_i) + (b_0 + (b_1 - 1)x_i)^2}}{y_i} \quad (20)$$

ahol,

y_i : a mért érték

x_i : a referencia érték

$u^2(x_i)$: a referenciaeszköz bizonytalansága. $u^2(x_i) = 0,67(\mu\text{g}/\text{m}^3)^2$ [155]

b_0 és b_1 : az egyszerű lineáris regresszió meredeksége és az abszcissa metszéspontja

k : lefedettség tényező

RSS: az ortogonális regresszióból származó (relatív) eltérések négyzetösszege (Residual Sum of Square)

$$RSS = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 * x_i - b_1)^2 \quad (21)$$

ahol,

n : a megfigyelések száma.

A relatív szórás (más néven szóródási együttható) segítségével az átlag körül terjesztett számkészlet eltéréseinek mértékét tudjuk meghatározni, jele CV (coefficient of variation).

$$CV = \frac{\sigma}{A} * 100\% \quad (22)$$

ahol,

σ : szórás

A: átlag

13.2 Kalibrációs jegyzőkönyv



LIFE Project Number:

LIFE17 IPE/HU/000017

Kalibrációs jegyzőkönyv

Mérési körülmények

Mérés helyszíne: Miskolc-Egyetemváros, Műhelycsarnok

GPS koordináták: N 48.081312, E 20.762490

EOV koordináták: Y 777783, X 305597

Mérés kezdete: 2021.03.26. 15:27

Mérés vége: 2021.03.26. 15:40

Mérés időtartama: 13 perc

Eszköz azonosítók

Vizsgált szenzor: Plantower PMS7003 (B201908184686)

Referencia mérőeszköz: TSI DustTrack 8534-M

Hőmérséklet, páratartalom és nyomás szenzor: BME680

Mikrokontroller: Raspberry Pi 3 B

Klímakamra beállítások: T = 25 °C, RH = 40%

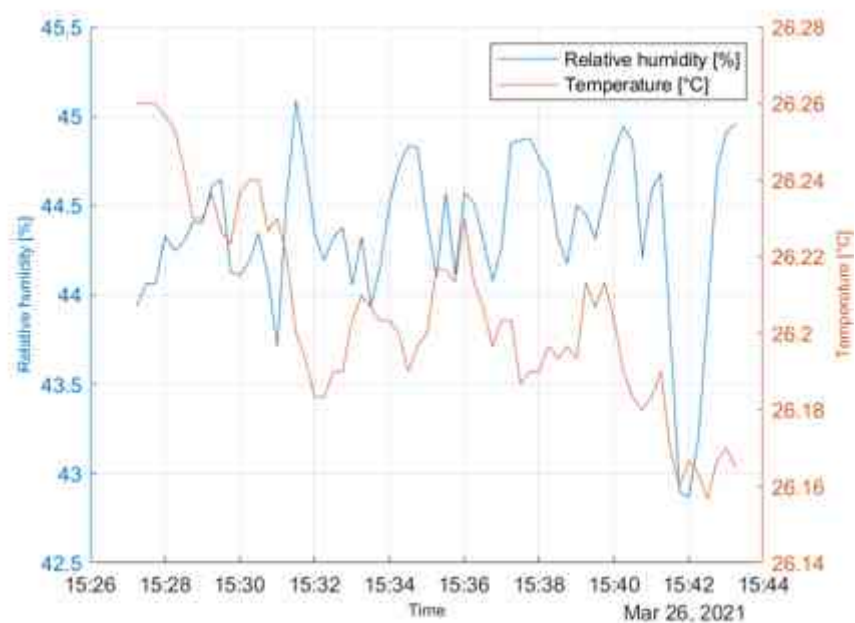
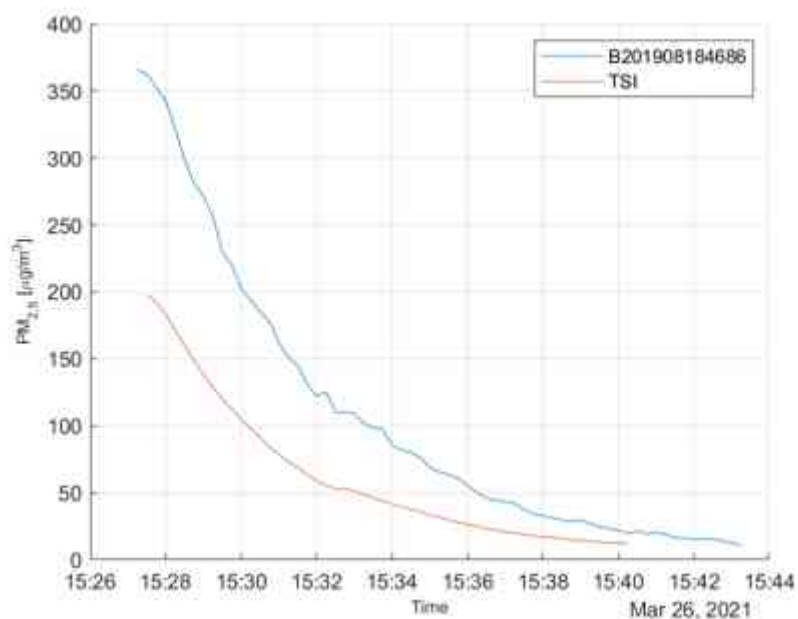
Mintavétel 5 mp-ként történt, a kalibrációs görbe 15 mp-es átlagára lett számítva.

Készítette:

Báthory Csongor (MIE)

2021.04.02.

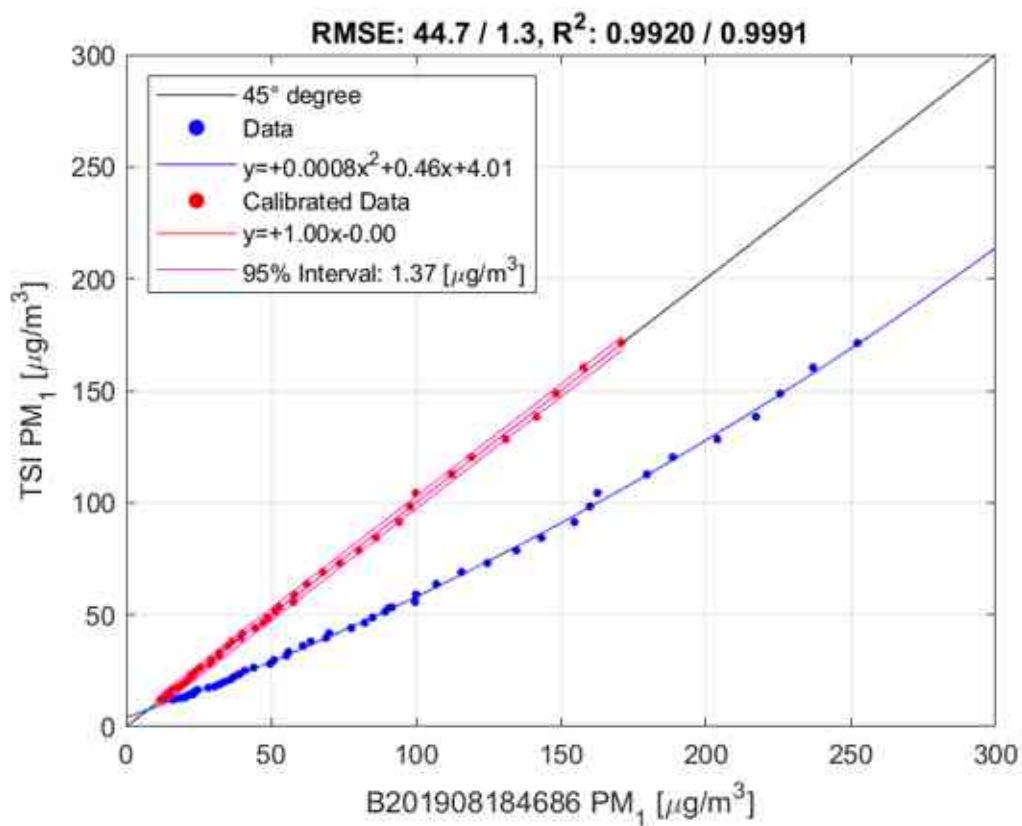
Mérés idővonal menti áttekintése



	MAX	MIN	MEAN
PM1 [ug/m3]	252	16	88
PM2,5 [ug/m3]	321	20	108
PM10 [ug/m3]	328	21	111
RH átlag [%]	45	44	44
T átlag [°C]	26	26	26

PM₁ kalibráció és statisztikai adatok

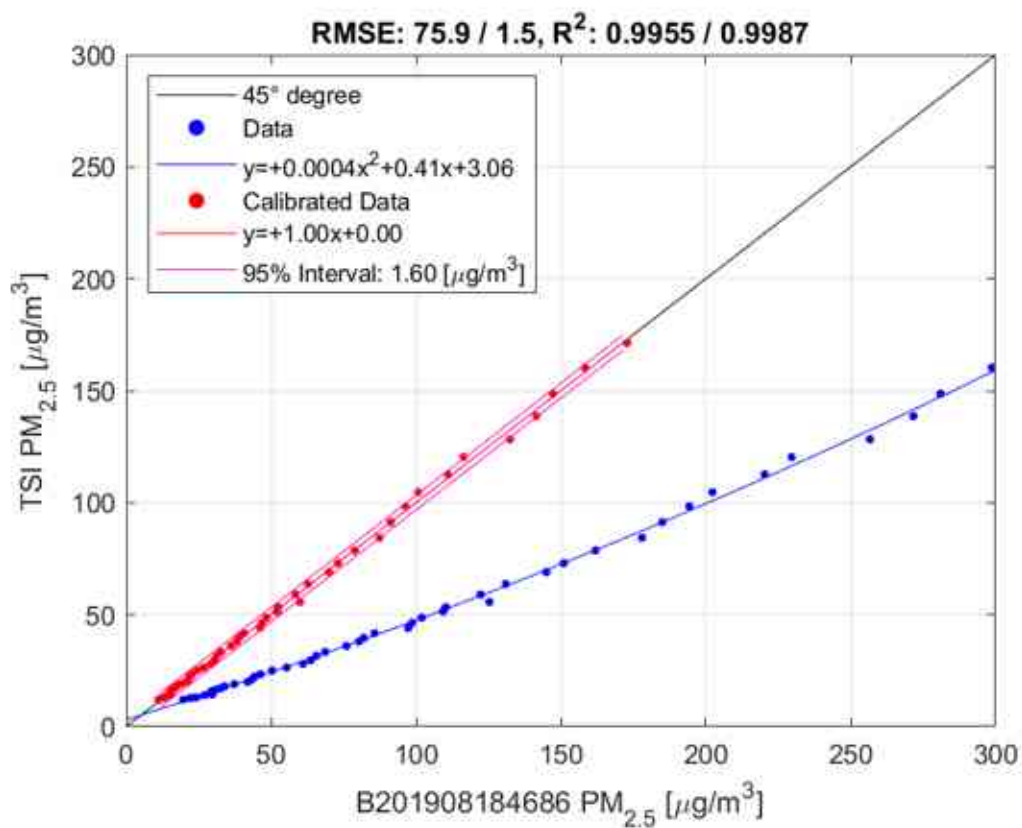
Az adatok lineáris illesztése 95%-os predikciós intervallummal



	Raw	Calibrated
Korrelációs együttható (Pearson) négyzete	0.992	0.9991
Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke [µg/m ³]	44.7	1.3

PM_{2.5} kalibráció és statisztikai adatok

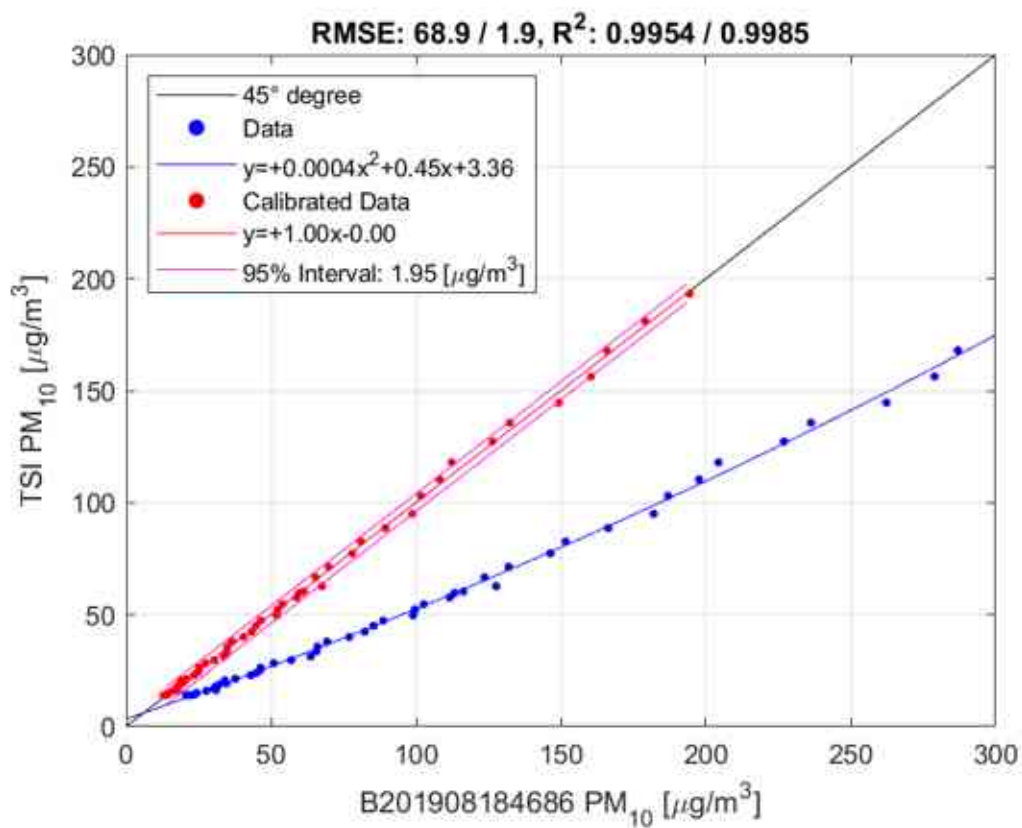
Az adatok lineáris illesztése 95%-os predikciós intervallummal



	Raw	Calibrated
Korrelációs együttható (Pearson) négyzete	0.9955	0.9987
Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke [μg/m ³]	75.9	1.5

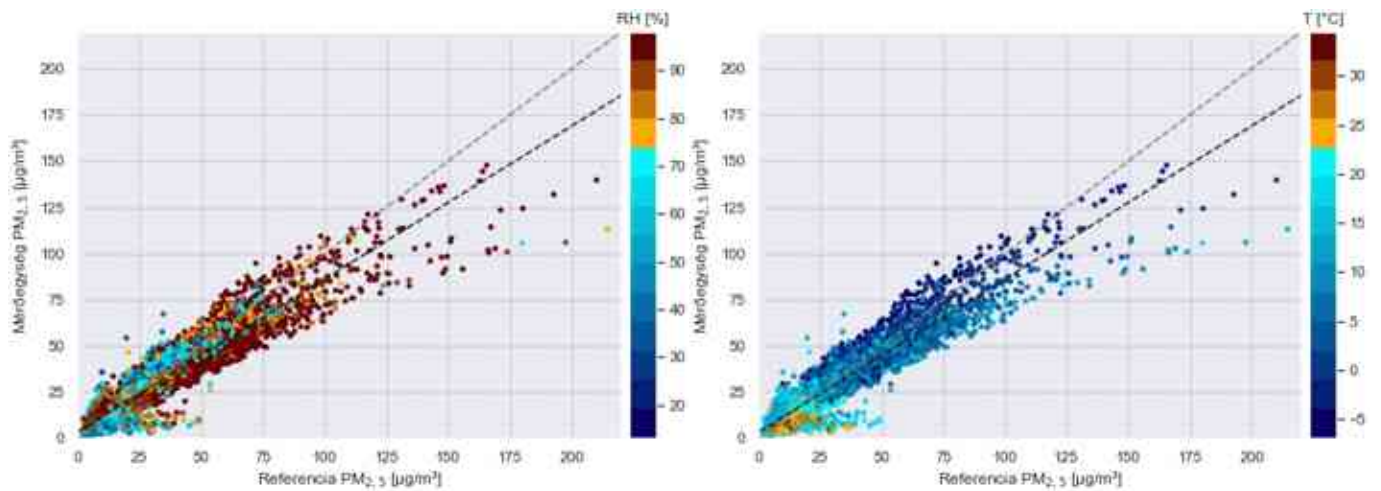
PM₁₀ kalibráció és statisztikai adatok

Az adatok lineáris illesztése 95%-os predikciós intervallummal



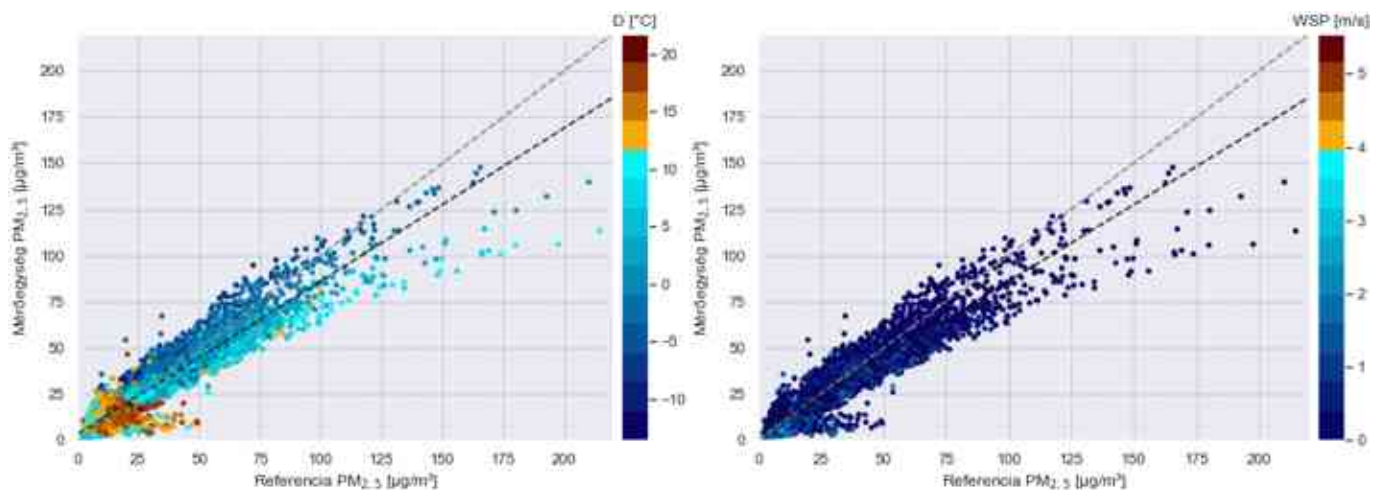
	Raw	Calibrated
Korrelációs együttható (Pearson) négyzete	0,9954	0,9985
Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke [µg/m ³]	68,9	1,9

13.3 Éves összemérés óras álagainak kapcsolata a környezeti paraméterekkel

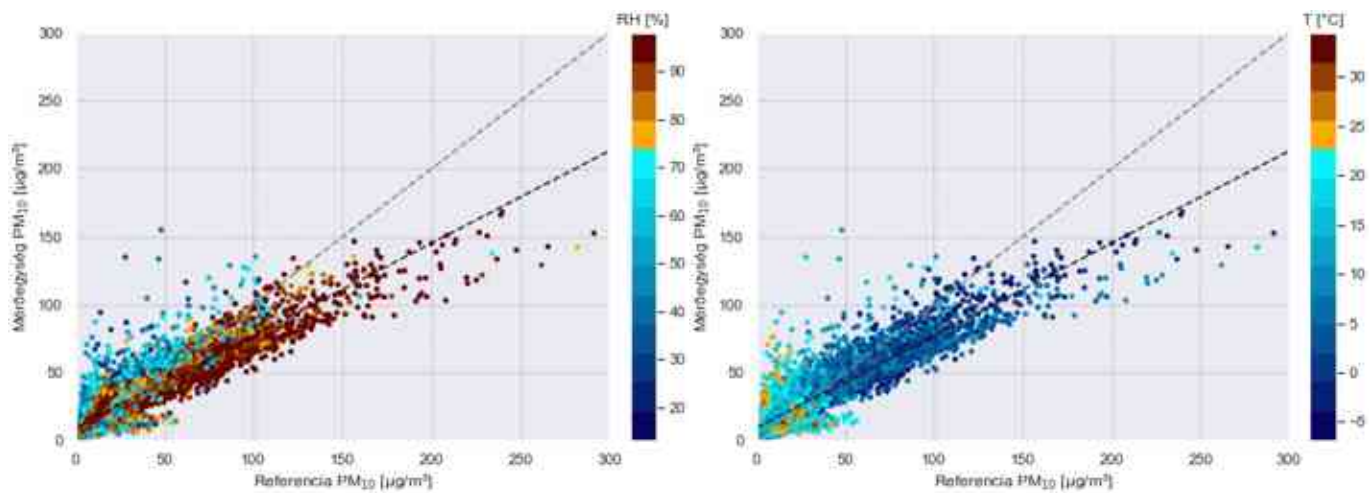


88. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért óras átlag $PM_{2,5}$ koncentráció értékei a relatív páratartalom és a hőmérséklet paraméterek összefüggésében

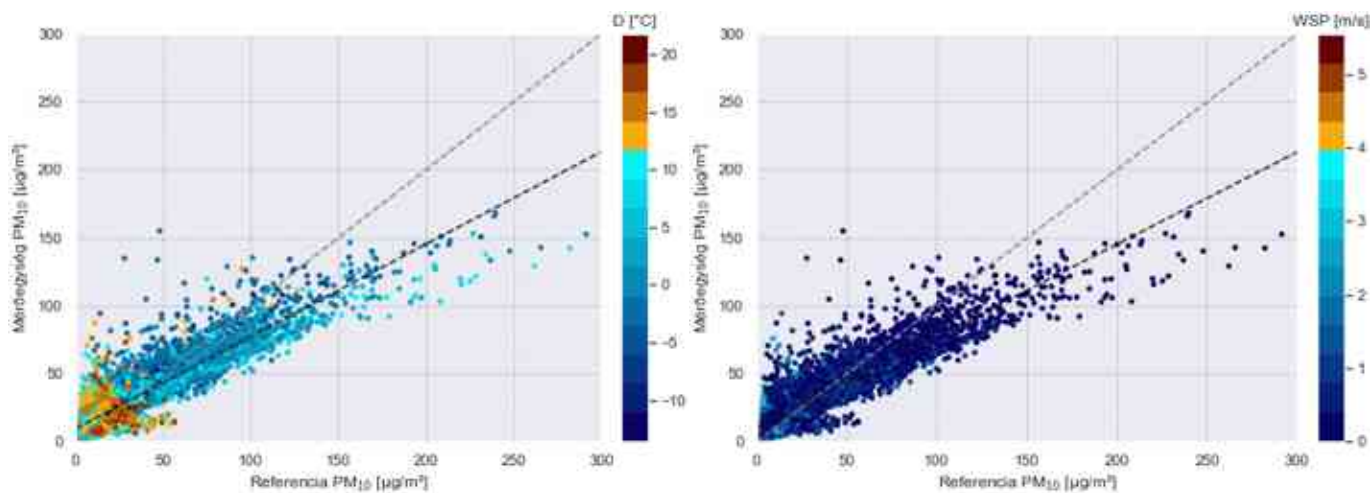
Az óras átlagok kapcsolata a környezeti paraméterekkel (88. ábra, 89. ábra, 90. ábra, 91. ábra) megegyezik a napi átlagokéval, azonban láthatjuk, hogy az adatpontok a nagyobb PM értékek esetében az egyenestől elhajlanak, tehát a kapcsolat nem lineáris jellegű. Az alacsonyabb PM értékek tartományában ($<50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) nagyobb a bizonytalanság a referencia és a mérőegység adatainak kapcsolatában és a környezeti paraméterek sem mutatnak jellemző eloszlást.



89. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért óras átlag $PM_{2,5}$ koncentráció értékei a harmatpont és a szélesség paraméterek összefüggésében

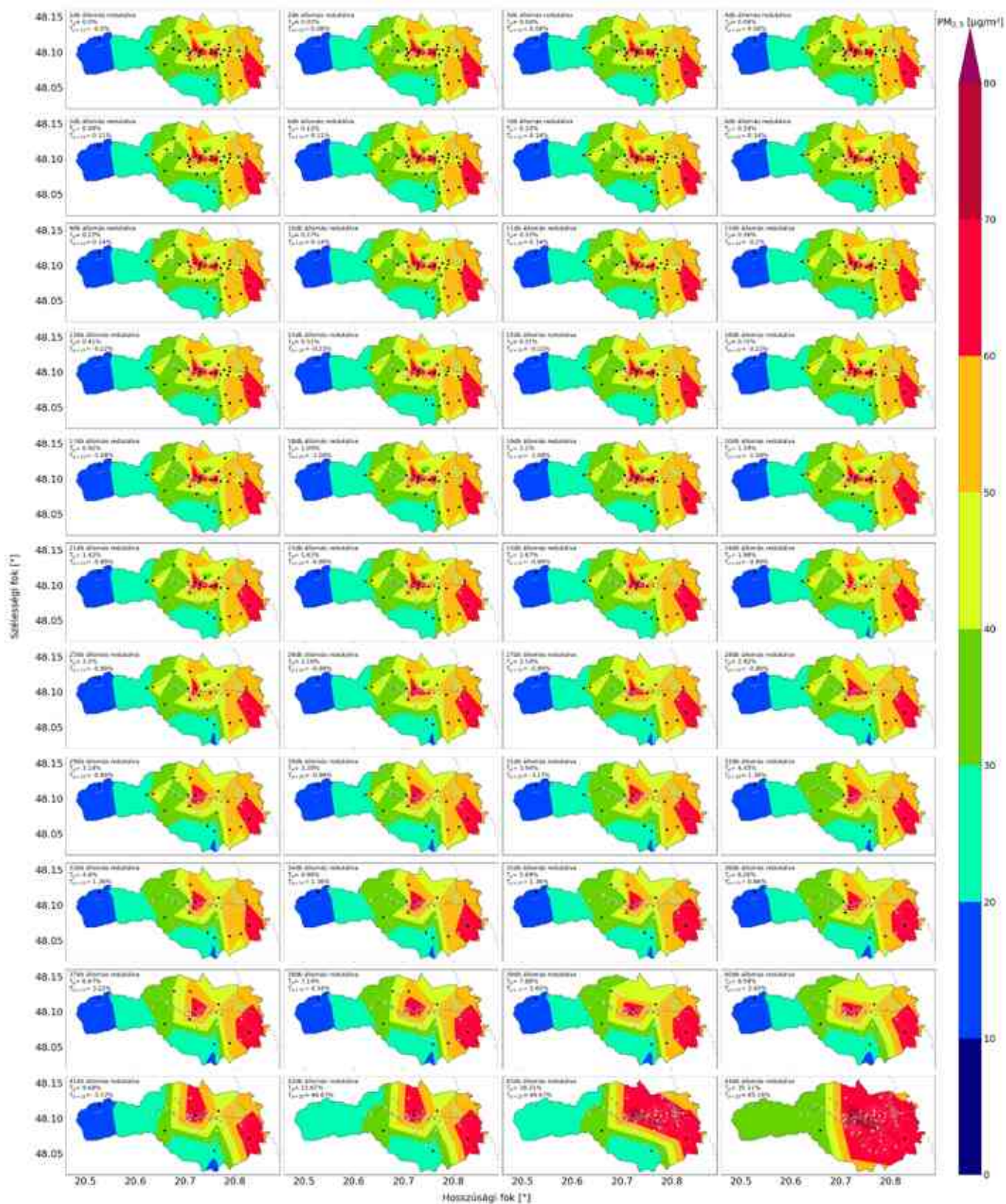


90. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért órás átlag PM_{10} koncentráció értékei a relatív páratartalom és a hőmérséklet paraméterek összefüggésében

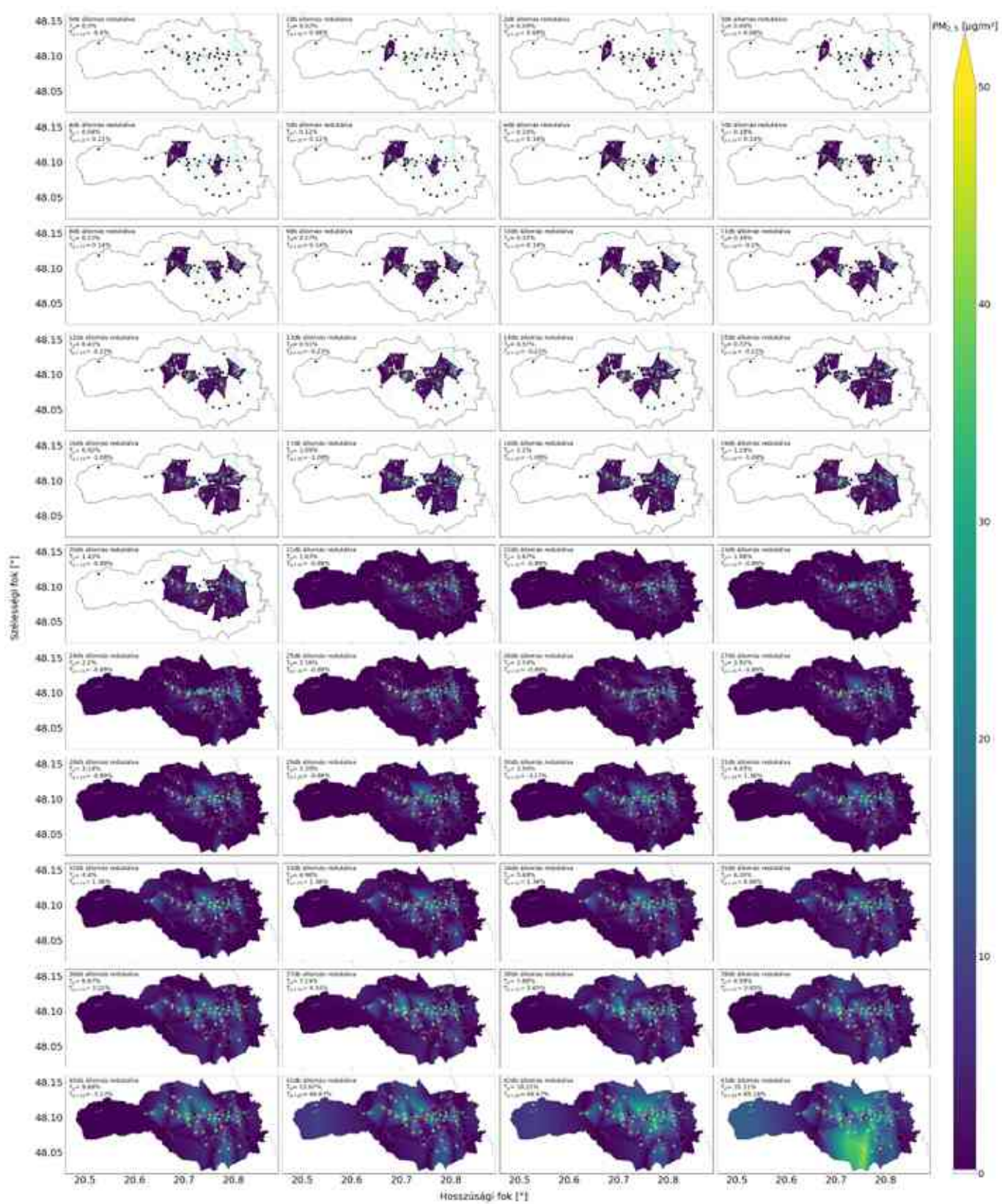


91. ábra Az összemérés során a referencia és a mérőegység által mért órás átlag PM_{10} koncentráció értékei a harmatpont és a szélsebesség paraméterek összefüggésében

13.4 Mérés helyszín redukálásának lépései



92. ábra Mérés helyszínek redukálásának lépései eloszlás térképen



93. ábra Mérési helyszínek redukálásának lépései különbség térképen