

SZAKDOLGOZAT

Szunyogh Balázs

2023



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Környezettudományi Intézet
Környezetmérnök alapszak

Pécel város levegőminőségének elemzése és értékelése

Belső konzulens: Dr. Béres András
Tudományos főmunkatárs

Készítette: Szunyogh Balázs

Gödöllő
2023

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	4
1. Irodalomfeldolgozás.....	5
1.1. A környezeti levegő minősége és összetétele	5
1.2. Légszennyező anyagok.....	6
1.3. A szálló por bemutatása	9
1.4. A szálló por mérete	11
1.5. Szálló porok keletkezése és forrásai	12
1.6. A szálló por kémiai összetétele	15
1.7. Szálló por okozta egészségügyi hatások	17
1.8. A szálló por mérésének módszerei	20
1.9. Szálló porra vonatkozó határértékek	22
1.10. Szálló por Magyarországon.....	25
1.11. Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) bemutatása.....	26
2. Anyag és módszer	28
2.1. Mintavételi pont jellemzése	28
2.2. Az alkalmazott mérőműszer	30
2.3. Kalibráció és mérés	32
2.4. Időjárási adatok.....	34
3. Mérési eredmények bemutatása	35
4. Mérési eredmények értékelése	41
5. Következtetések és javaslatok	46
5.1. Következtetések a mérési eredmények alapján	46
5.2. Javaslatok	47
Összefoglalás.....	48
Irodalomjegyzék.....	50
Ábrajegyzék	56
Táblázatok jegyzéke.....	58

Bevezetés

A levegőminőség kérdése egyre inkább a figyelem középpontjába kerülő globális probléma az emberiség számára. A levegőminőség romlása az ipari fejlődés, a városiasodás és az egyre növekvő emberi szükségletek és igények folyamatának eredményeképpen alakult ki. Napjainkban a híradásokból is egyre gyakrabban értesülhetünk arról, hogy egyes városokban vagy régiókban romlott a levegő minősége, meghaladva ezzel az egészségügyi határértéket. Azonban a híradásokon túl, a saját környezetünkben is találkozhatunk időnként az említett problémával. Hazánkban leggyakrabban a késő őszi, téli időszakban tapasztalhatjuk, hogy a levegő minősége nem olyan, mint elvárnánk, hanem kellemetlen szagú, fullasztó vagy esetleg a látási körülményeket befolyásolja hátrányosan. Ezt a levegőminőségi problémát általában a szálló por szennyezés okozza. A szálló por koncentrációját befolyásolják a forrásai, illetve környezeti tényezők (pl.: időjárás és a domborzati viszonyok). Az említett időszak kedvez a szálló por okozta levegőminőségi problémák kialakulásához, ugyanis a fűtéssel megnövekedik a kibocsátó források száma, a szélcsendes, páratartalmú időjárás pedig a szennyezés felhalmozódásában játszik szerepet.

A szálló port az egyik legveszélyesebb légszennyező komponensként tartják számon az emberi egészségre és a környezetre gyakorolt rendkívül káros hatása miatt. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) becslései szerint évente 7 millió haláleset tudható be a szálló por okozta megbetegedéseknek. Magyarországon évente közel tízezer korai haláleset tudható be a szálló por okozta megbetegedéseknek.

Hazánkban az elmúlt 20 év szálló por kibocsátásban folyamatos csökkenés figyelhető meg, viszont ennek ellenére a PM_{10} kitettség tekintetében meghaladjuk az EU27 átlagot.

A szálló por mérésére alkalmas automata légszennyezettség mérő állomások hazánkban leginkább nagyobb városokban és jelentős ipari területeken találhatóak. Sajnos az ország bizonyos területeiről nem rendelkezünk szálló por koncentráció adatokkal. Budapest agglomerációjában mindössze 3 városban található automata légszennyezettség mérő állomás.

Szakedolgozatom megírása során Pécel város PM_{10} és $PM_{2,5}$ frakciójú szálló por koncentrációjának mérését, értékelését és a közeli mérőállomások adataival történő összevetését tűztem ki célul. A mérési adatok összehasonlításával bizonyítani szeretném azt a felvetést, hogy a szálló por okozta légszennyezés nem csak lokális, hanem regionális szinten okoz problémát.

1. Irodalomfeldolgozás

Ebben a fejezetben először összefoglalom a környezeti levegő összetételét és bemutatom a leggyakoribb légszennyező anyagokat. Ezt követően részletes bemutatásra kerülnek a szálló porral kapcsolatos információk, illetve a hazai légszennyezettségi mérőhálózat.

1.1. A környezeti levegő minősége és összetétele

A levegőminőség fogalmát a levegő alkotóelemeinek összetételével és azok koncentrációjával definiálhatjuk. Fontos tisztázni az elején, hogy környezeti levegő alatt a légkör egészét értjük, amelynek nem része zárt terek levegője. A környezeti levegőt alkotó gázokat összetétel és tartózkodási idő szerint csoportosíthatjuk. Az összetételt tekintve három csoportba sorolhatjuk, ezek az alapgázok, a vendéggázok és a szennyezőanyagok. Az alapgázok közé tartoznak azok a levegőt alkotó gázok, amelyeknek a jelenléte és koncentrációja hosszú távon állandó, így ezeket tartózkodási idő szerinti csoportosítás alapján az állandó gázok közé sorolhatjuk. Alapgázok közé tartozik koncentráció szerinti csökkenő sorrendben: a nitrogén (N), oxigén (O), argon (Ar) és a szén-dioxid (CO₂). Az áttekintett szakirodalmakban a szén-dioxid besorolása nem volt egyértelmű, egyesek az alapgázok, míg mások nyomgázok közé sorolták be. Véleményem szerint a szén-dioxid az alapgázok közé sorolandó, ugyanis a légkörben ősidők óta megtalálható. Légköri mennyisége az élőlények biológiai életciklusából, természetes tüzekből, vulkanikus folyamatokból és az emberi tevékenységekből származik. Alapgázokhoz tartozik még az igen alacsony koncentrációval előforduló hidrogén (H) és különféle nemesgázok, mint például a hélium (He), neon (Ne), kripton (Kr), xenon (Xe), radon (Rn) (Géczi & Béres, 2011). A gázok környezeti levegőben előforduló százalékos koncentrációja az alábbi táblázatban kerül bemutatásra.

1. táblázat: A légkört alkotó gázok százalékos megoszlása (forrás: Lutgens et al., 2019)

Gáz	Térfogata a levegőben
nitrogén(N)	78,10%
oxigén(O)	20,90%
argon(Ar)	0,93%
szén-dioxid(CO ₂)	0,04%
nemesgázok és hidrogén(H)	0,01%

A vendéggázoknak vagy vendéganyagoknak nevezzük a más szférából (hidroszféra, litoszféra), az űrből és élőlények anyagcsere folyamatainak révén levegőbe jutó anyagokat és

gázokat. Ezek az anyagok nem tartoznak a levegő alapvető alkotóelemei közé, koncentrációjuk alacsony és igen változó, továbbá tartózkodási idejük anyagtól függően néhány naptól több évig változhat. A legjellemzőbb vendéganyagok közé tartozik a vízgőz (H₂O), szilárd részecskék (por, korom, hamu, stb.), ózon (O₃), pollen, baktériumok és különféle gázok. Habár a vendéganyagok alacsony koncentrációban fordulnak elő a környezeti levegőben, mégis fontos szerepet játszanak különféle meteorológiai folyamatokban és a Föld hőháztartásában (Radnainé, 2011).

A légszennyező anyagok csoportjába tartoznak azok az anyagok, amelyek a levegő minőségét hátrányosan befolyásolják, károsítják vagy károsak lehetnek az emberi egészségre és környezetre, illetve károsítják, károsíthatják az anyagi javakat. Légszennyezésről abban az esetben beszélhetünk, ha a vizsgált anyagok környezeti levegőben meghatározható koncentrációja meghaladja a Magyarországon hatályos *a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről* szóló 4/2011. (I. 14.) VM rendelet 1. mellékletében szennyezőanyagokra meghatározott, vonatkozó egészségügyi határértéket. A rendelet bizonyos szennyezőanyagokra órás, 24 órás és éves határértéket is meghatároz.

2. táblázat: Légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 4/2011 VM rendelet I. számú melléklete alapján (saját táblázat)

Légszennyező anyag	Határérték(µg/m ³)		
	órás	24 órás	éves
Kén-dioxid	250	125	50
Nitrogén-dioxid	100	85	40
Szén-monoxid	10000	5000	3000
Szálló por (PM ₁₀)	-	50	40
Ózon	-	120	-

1.2. Légszennyező anyagok

A légszennyező anyagokat forrásuk szerint két csoportra, természetes és emberi forrásból származókra oszthatjuk. Természetes eredetű légszennyező források a hidroszféra, litoszféra és az élőlények folyamatai. Ezekből a forrásokból származó szennyezőanyagok távoli területekre is eljuthatnak, illetve nagy területi kiterjedésűek. A hidroszférából jelentős mennyiségű aeroszol kerül a levegőbe a hullámverés során. A beszáradó vízcseppekkel kálium (K), nátrium (Na), klorid (Cl) és szulfát (SO₄²⁻) ionokból álló vegyületek kerülnek a légkörbe. Ezen kívül

jelentős mennyiségben juttat anyagcsere-termékeket is a levegőbe, mint például szén-dioxidot (CO_2) (Bartófi, 2011).

A litoszféra felszínéről időjárási folyamatok segítségével jellemzően szilárd halmazállapotú szennyezőanyagok, szervesetlen és szervesanyag tartalmú porok kerülnek a légkörbe. A vulkánkitörések nagy mennyiségben juttatnak a levegőbe aeroszolókat és gázokat (SO_2 , H_2S , CO_2 , CO). Az egyre rendszeresebben és nagyobb területeken tapasztalható szélsőséges időjárási körülmények, mint például a forró nyár és az aszályos periódusok jelentősen növelik az erdő- és bozóttüzek kialakulásának gyakoriságát. Az így kialakuló tüzek nagy mennyiségben juttatnak a levegőbe szennyezőanyagokat, mint például szén-monoxidot (CO). Továbbá a levegőbe kerülő korom, hamu és por távoli területekre is eljuthat (Radnainé, 2011). Erre bizonyítékul szolgál, hogy a 2023 nyarán a Kanadát érintő erdőtüzek füstje egészen Európa nyugati részéig eljutott [1].

Villámlások alkalmával nitrogén-oxidok (NO_x) keletkeznek. A növények virágzása során pollen kerül a levegőbe, ami az arra érzékenyeknél allergiás reakciókat válthat ki. Állati és növényi eredetű bomlástermékekkel kellemetlen szagú, bűzös gázok, mint például ammónia (NH_3) és kén-hidrogén (H_2S) keletkezik.

Bár az összes szennyezőanyag kibocsátást tekintve a természetes forrásból származó szennyezőanyag mennyiség többszörösen meghaladja az antropogén forrásból származó szennyezőanyag mennyiséget, mégsem vezet a bioszféra szempontjából káros szennyezőanyag-koncentráció kialakulásához (Radnainé, 2011), köszönhetően a környezeti levegő öntisztulási folyamatainak.

Az emberi, vagy más néven antropogén forrásból származó légszennyező anyagok emberi tevékenységek során keletkeznek. Az emberi tevékenységekhez kapcsolódó légszennyező forrásokat négy fő alcsoportba lehet sorolni: ipari, lakossági tüzelés, közlekedés és mezőgazdasági tevékenységek. Ezekből a forrásokból származó légszennyezés egyik jellegzetessége, hogy lokálisan koncentráltak, általában városokban, ipartelepeken, autópályák mentén helyezkednek el (Bartófi, 2011). Az Egyesült Amerikai Államokban működő Amerikai Környezetvédelmi Hivatal (United States Environmental Agency - EPA) számára az 1970-ben elfogadott Tiszta Levegő Törvény (Clean Air Act) előírja, hogy határozza meg azt a hat közönséges légszennyezőt (criteria air pollutants), amelyek károsítják az emberi egészséget és a környezetet, illetve gazdasági károkat okozhatnak. Az így meghatározott légszennyező anyagokhoz tartozik és említésre méltó a felszínközeli ózon (O_3), kén-dioxid (SO_2), szén-

monoxid (CO), nitrogén-dioxid (NO₂) és a szálló por. Megjegyzendő, hogy a szén-dioxidot nem tartják klasszikus értelemben vett légszennyező anyagnak. A környezeti levegőben lévő koncentrációja az emberi egészségre nem képes negatív hatást gyakorolni. A szén-dioxidnak üvegházhatású gáz révén leginkább az éghajlatváltozásban és a globális felmelegedésben van relevanciája. Az említett légszennyezők forrásai és tulajdonságai kerülnek továbbiakban bemutatásra.

Felszínközeli ózon (O₃):

Az ózon kellemetlen szagú, mérgező gáz. A felszínközeli ózon nem közvetlen kibocsátással kerül a levegőbe, hanem elsődleges szennyezőanyagok, ún. prekursor anyagok és a napfény hatására lejátszódó fotokémiai reakciók során keletkezik, így másodlagos szennyezőanyagként tekinthető. A felszínközeli ózon keletkezésében prekursor anyagként a nitrogén-oxidok (NO_x), a szén-monoxid és az illékony szénhidrogének (VOC) vesznek részt. Ezeknek a szennyezőanyagoknak fő forrása leginkább a közlekedés, így a felszínközeli ózon kialakulására napsütötte területeken található forgalmas utak mentén, leginkább városokban és autópályákon lehet számítani. Magyarországon jellemzően a nyári hónapokban emelkedik meg a koncentrációja, leginkább a városokban.

Kén-dioxid (SO₂):

Szúrós szagú, mérgező gáz. A Központi Statisztikai Hivatal (KSH) 1990-2020 közötti kén-dioxid kibocsátási adataiból megállapítható, hogy a háztartási és az ipari kibocsátás több mint 90%-al csökkent [2]. Ez a nagymértékű csökkenés a lakossági széntüzelés visszaszorulásának és az ipari-energetikai forrásoknál a kéntelenítő berendezések alkalmazásának tudható be. Kén-dioxid a levegőbe kéntartalmú fosszilis tüzelőanyagok (fekete- és barnakőszén, kőolaj) égetésével kerülhet, illetve természetes forrásból vulkanikus tevékenységekkel. Napjainkban a kibocsátás legnagyobb része a hőerőművekből, kohászatból és műtrágyagyártásból származik. A levegő páratartalmával kapcsolatba lépve a savas esők kialakulásáért felelős.

Szén-monoxid (CO):

Szintelen, erősen mérgező gáz. Tökéletlen égés során képződik. Természetes forrása az erdő- és bozóttüzek. Legfőbb antropogén forrása a belső égésű motorokkal felszerelt járművekkel történő közlekedés és áruszállítás, illetve a lakossági fűtés. Hazánkban a fűtési időszakban, novembertől-márciusig jellemzően magasabb a koncentrációja, mint az év további időszakában.

Nitrogén-dioxid (NO₂):

A nitrogén-dioxid nagyon reakcióképes, erősen oxidáló, szúrós szagú és savas kémhatású gáz. A nitrogén-dioxid másodlagos szennyezőanyag is tekinthető, mivel általában nem közvetlen kibocsátással kerül a levegőbe, hanem nitrogén-monoxid (NO) és más nitrogén-oxidok (NO_x) kémia és légköri reakciója során képződik. Természetes forrásai közé tartoznak a vulkanikus tevékenységek, az erdő- és bozóttüzek, talajban élő nitrifikáló baktériumok és a villámlás. Az emberi kibocsátás legnagyobb mértékben a közlekedéshez, fosszilis tüzelőanyagok égetéséhez és ipari tevékenységekhez köthető.

Szálló por:

Mivel szakdolgozatom a szálló porral foglalkozik, ezért ennek a szennyezőanyag a részletes bemutatása kerül előtérbe a továbbiakban. Ennek során ismertetem, hogy mi is a szálló por, milyen forrásai vannak, mik a kialakulásának okai, milyen egészségügyi hatásai vannak. Bemutatásra kerül továbbá a szálló por mérése, összehasonlításra kerülnek a szálló porra vonatkozó határértékek és ajánlások és a magyarországi kibocsátás.

1.3. A szálló por bemutatása

A levegőbe kerülő porokat elkülöníthetjük az ülepedő por és a szálló por csoportjába. Ülepedő poroknak tekinthetjük a 10 mikrométernél nagyobb aeroszolokat. A gravitációs ülepedés folyamatosan csökkenti a 10 mikrométernél nagyobb részecskék számát, ezek tartózkodási ideje a légkörben csupán néhány órára tehető, gyakran már a forrás közelében kiülepednek. Az ülepedő porok jellemzően természetes eredetűek, mechanikai folyamatokkal és a felszín aprózódásával keletkeznek és közvetlenül kerülnek a levegőbe a szél segítségével. Ilyen természetes folyamat például a defláció, erózió, homok és porviharok, melyek során jellemzően nagy mennyiségben kerül por a levegőbe.

A másik csoportba, a szálló por csoportjába a 10 mikrométernél kisebb átmérőjű aeroszolok tartoznak. Ezeknek az aeroszoloknak az ülepedési sebességük igen lassú, a légköri tartózkodási idejük jóval hosszabb. A hosszabb tartózkodási idő azzal is magyarázható, hogy szerepet játszanak a felhőképződési folyamatokban kondenzációs magvaként. Ezt követően csapadékkal együtt, nedves ülepedéssel távoznak a légkörből, így tartózkodási idejük a víz tartózkodási idejéhez hasonló, 5-9 nap (Zicher *et al.*, 2007).

A szálló por az angol nyelvű szakirodalmakban használt megfelelője a „*particulate matter*” kifejezés, melyet sokszor csak rövidítve „*PM*” betűszóként használnak. A továbbiakban összegyűjtöttem, hogy a különféle külföldi szervezetek, ügynökségek miként definiálják a szálló port.

Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) a szálló port így definiálja: „Szilárd és folyékony részecskék keveréke a levegőben, amelyek elég kicsik ahhoz, hogy ne ülepedjenek le a Föld felszínére a gravitáció hatására, az aerodinamikai átmérőjük alapján osztályozva.” (WHO, 2021)

A Nemzetközi Elméleti és Alkalmazott Kémiai Szövetség (IUPAC) meghatározása a következő: „Általános kifejezés, amelyet a levegőben lévő, bármilyen méretű szilárd vagy folyékony részecskék leírására használnak. Az aeroszol kifejezést a levegőben szálló por leírására általánosan ajánlott használni.” (Calvert, 1990)

Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA) így definiálja a szálló port: „A szálló por szilárd anyagok és folyadéksepek keverékéből áll. A részecskék egy része közvetlenül kerül kibocsátásra, egyébként pedig akkor keletkezik, amikor a különböző forrásokból származó szennyező anyagok reakcióba lépnek a légkörben. A részecskék különböző méretűek, a 10 mikrométernél kisebbek képesek bejutni a tüdőnkbe és súlyos egészségügyi problémákat okozni.” [3]

Az Amerikai Környezetvédelmi Hivatal (EPA) definíciója szerint a szálló por „a levegőben található szilárd részecskék és folyadéksepek keveréke.” [4]

Összefoglalva az eddigieket a szálló port így definiálnám: a levegőben megtalálható, szilárd és folyékony halmazállapotú részecskék keveréke, melyek aerodinamikai átmérője 10 µm alatti, így nehezen ülepednek és belélegezve az egészségre ártalmas hatást fejthetnek ki.

Megjegyzendő, hogy a magyar nyelvben használt szálló por kifejezés bizonyos értelemben helytelen megnevezés, mivel a „por” alatt szilárd halmazállapotú anyagot értünk. A fent idézett definíciókból megállapítható, hogy a szálló por nem csupán szilárd részecskékből áll, hanem nedves részecskéket is tartalmaz. Az angol nyelvben használt „*particulate matter*” megnevezés magyarra fordítva finomszemcsés anyagot vagy finomszemcsés részecskét jelent, ez a megnevezés helytállóbb lenne, mivel megnevezésében magába foglalja a szilárd és folyékony halmazállapotú részecskéket is. A dolgozatomban legtöbbször a szálló por megnevezést fogom

használni, hiszen a köztudatban és a hazai jogszabályokban ez az általánosan elterjedt megnevezés.

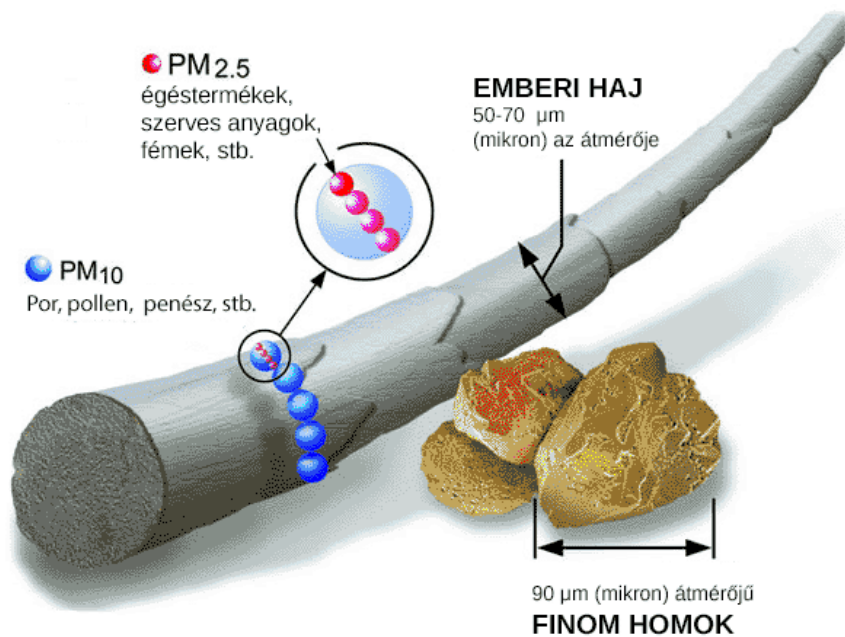
1.4. A szálló por mérete

A szálló por egyik legfontosabb elkülönítési szempontja a méret szerinti felosztás. A méret függvényében változnak az egészségügyi hatások, levegőben történő transzportja, légköri tartózkodási ideje, kémiai összetétele, forrása, illetve eltérő határértékek vonatkoznak rájuk. A szilárd részecskék változatos alakúak és összetettek lehetnek, míg a folyadék részecskék többnyire gömb alakúak. A részecskék méretét gázfázisban ekvivalens aerodinamikai átmérővel jellemzik (Kertész, 2000). Egy részecske aerodinamikai átmérője egy olyan gömb átmérője, amelynek sűrűsége 1 g/cm^3 (azaz a vízzel megegyező sűrűségű), amely a levegőben a mérendő részecskével azonos sebességgel ülepedik (Sjöholm et al., 2001). Ennek létjogosultsága abból fakad, hogy az aeroszolok viselkedését leíró elméletek csak gömb alakú részecskéket tudnak kezelni (Kertész, 2000).

A szálló porokat méret szerint három csoportba szokás sorolni: a PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ és $\text{PM}_{0,1}$ frakcióba. Az első csoportba a $10 \text{ }\mu\text{m}$ -nél kisebb, de $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ -nél nagyobb aerodinamikai átmérővel rendelkező részecskék tartoznak, ezek az ún. durva részecskék. Ezt a csoportot PM_{10} -ként szokták jelölni. A $\text{PM}_{2,5}$ jelölés a $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ -nél kisebb, de $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ -nél nagyobb részecskéket jelöli, ezeket finom részecskéknek nevezik. *A levegő védelméről* szóló 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet az alábbiak szerint definiálja a határértékkel rendelkező PM_{10} és $\text{PM}_{2,5}$ frakciót.

PM_{10} : „a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a PM_{10} mintavételének és mérésének referenciamódszerére az MSZ EN 12341:2001 szabványban meghatározott $10 \text{ }\mu\text{m}$ aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn.” [5]

$\text{PM}_{2,5}$: „a szálló por azon frakciója, amelynek legalább 50%-a átmegy a $\text{PM}_{2,5}$ mintavételének és mérésének referenciamódszerére az MSZ EN 14907:2006 szabványban meghatározott $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ aerodinamikai átmérőjű szelektív szűrőn.” [5]



1. ábra: PM_{10} és $PM_{2,5}$ méretének szemléltetése (forrás: [4])

Az utóbbi évtizedekben a mérőműszerek fejlődésének köszönhetően egyre nagyobb figyelmet kapnak a legkisebb csoportba tartozó ultrafinom részecskék (UFP – ultrafine particles) (Nazaroff, 2023). Ezeknek az aerodinamikai átmérője $0,1 \mu\text{m}$ -nél kisebb. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) a 2021-es levegőminőség iránymutatásában az ultrafinom részecskéket így definiálja: „Olyan részecskék, amelyek aerodinamikai átmérője kisebb vagy egyenlő mint $0,1 \mu\text{m}$ (azaz 100 nm). Kis tömegük miatt koncentrációjukat általában a részecskeszám-koncentrációban mérik és fejezik ki egységnyi légtérfogatra vonatkoztatva (részecskeszám/ cm^3).” (WHO, 2021)

1.5. Szálló porok keletkezése és forrásai

A szálló porok igen változatos forrásokból származhatnak. Fontos tisztázni az elején, hogy keletkezésük szerint megkülönböztetünk elsődleges és másodlagos aeroszolókat. Elsődleges aeroszolóknak nevezzük azokat a szilárd vagy folyékony halmazállapotú részecskéket, amelyek képződése egy adott forrásban történik és közvetlenül onnan kerülnek kibocsátásra. A másodlagos aeroszolok a levegőben keletkeznek összetett fizikai és kémia folyamatok során. Ilyen folyamat például a nukleáció és a kondenzáció, melyben különféle forrásokból származó prekursor légszennyező gázok vesznek részt (WHO, 2021).

Az elsődleges részecskék származhatnak természetes és antropogén forrásokból. Természetes forrásból származó részecskék elsősorban a szél segítségével kerülnek a levegőbe. Óceáni környezetben hullámveréssel só és különféle ásványi anyag tartalmú aeroszolok, szárazföldi

környezetben mállással és talajerózióval képződő porszemcsék közvetlenül jutnak a levegőbe. Említésre méltó természetes forrás még az erdő- és bozóttüzek, vulkanikus tevékenységek során képződő hamu és korom, illetve az ún. bioaeroszol részecskék, melyek magukba foglalják a növényi polleneket, spórákat és baktériumokat (Salma, 2012). Elhanyagolható mértékben az űrből származó kozmikus részecskék is hozzájárulnak a levegő aeroszolverheléséhez, viszont ez csak a magaslégköri területeket érinti, ahol egyébként is nagyon alacsony a részecskekoncentráció (Tomasi & Lupi, 2017).

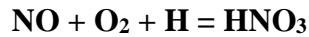
Az antropogén eredetű elsődleges részecskék az ipari tevékenységekhez, tüzelőanyagok égetéséhez, közlekedéshez és a mezőgazdasághoz köthetők. Az ipari tevékenységek és a tüzelőanyagok égetése - legyen szó például lakossági fűtésről - által okozott kibocsátás leginkább a fosszilis tüzelőanyagok égetéséhez köthető. A közlekedésből származó kibocsátás egyaránt köthető a belső égésű motorokkal működő gépjárművek aeroszol frakciójú égéstermékeihez, a fékezés és gumik kopásából származó részecskékhez, illetve a közlekedés során felvert porhoz. A mezőgazdasági területek az olykor helytelen szántási és vetési technikák és mezővédő erdősávok hiánya miatt eshetnek a szélrózsa és a defláció áldozatául, így az ezeknek a hatásoknak kitett területekről jelentős mennyiségű por képes a levegőbe jutni (Salma, 2012).

Az ipari tevékenységekhez köthető elsődleges részecskék kibocsátása az elmúlt 20 évben jelentősen csökkent Észak-Amerikában és Európában a szabályozásoknak és a monitoring rendszereknek köszönhetően. Viszont az elmúlt 50 év során jelentősen növekedett a kibocsátás a világ olyan területein, ahol az iparosodás szigorú kibocsátási korlátok nélkül nőtt, különösen Ázsiában (Tomasi & Lupi, 2017).

Az elsődleges aeroszokok méretüket tekintve leginkább a PM₁₀-es, azaz a durva részecskékhez sorolhatók be, de a finom részecskék (PM_{2,5}) is származhatnak elsődleges forrásból (Salma, 2012).

A másodlagos aeroszokok - mint már korábban említésre került - nem közvetlen kibocsátással kerülnek a levegőbe, hanem prekursor gázokból alakulnak ki fizikai és kémiai reakciók útján. Az egyik ilyen keletkezési mód a nukleáció, mely során a prekursor gázok egy kevésbé rendezett fázisában (pl.: gőz) a tér bizonyos részein egy rendezettebb fázis keletkezik (pl.: folyadék). A folyamat lehet homogén, amely során csak a kondenzálódó anyagok vesznek részt az aeroszol képzésben, valamint lehet heterogén, itt egy már meglévő kondenzációs magon történik az aeroszol képződés (Salma, 2012). Prekursor gáznak tekinthető a SO₂, NO_x és az

illékony szerves vegyületek (VOC) (Zicher *et al.*, 2007). Az említett prekursor gázokból aztán szulfát (SO_4^{2-}), nitrát (NO_3^-) és szervesanyag tartalmú aeroszolok keletkeznek a légkörben, amelyek közül az alábbi reakciókat tartják a legfontosabbnak (Tomasi & Lupi, 2017).

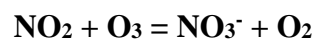


Fontos figyelembe venni, hogy ebben az esetben a másodlagos aeroszolat létrehozó prekursor gázoknak határozzuk meg a forrást. Az elsődleges aeroszolokhoz hasonlóan beszélhetünk természetes és antropogén forrásokról.

A szulfát (SO_4^{2-}) aeroszolok prekursor gázainak egyik természetes forrása az élő szervezetek anyagcsere végtermékei. A szulfátredukáló baktériumok a talajban, mocsarakban és növényekben lejátszódó anyagcsere folyamataik révén végtermékeként kén-hidrogént (H_2S) juttatnak a levegőbe, amely ott kén-dioxiddá (SO_2) oxidálódik. A vulkáni tevékenységek és természetes tüzek szintén hozzájárulnak a légköri kén-dioxid (SO_2) koncentráció növeléséhez. A szulfát (SO_4^{2-}) aeroszolok nukleációval vagy meglévő részecskéken való kondenzációval keletkeznek (Tomasi & Lupi, 2017).

Antropogén forrását tekintve a legjelentősebb a fosszilis tüzelőanyagok - főként szén és olaj - égetése. Szélcsendes, párás, hideg időben ezek a kibocsátások drámai szennyezési hatásokat okozhatnak városi területeken. Az így kialakuló szennyezés a redukáló szmog, más néven London-típusú szmog. Ezt a fosszilis tüzelőanyagok égetése során keletkező korom és kén-dioxid váltja ki. A levegőbe kerülő korom kondenzációs magként szolgál, amelybe aztán beleoldódó SO_2 és SO_3 savas kémhatású kénessavas és kénsavas aeroszolt hoznak létre (Géczi & Béres, 2011).

A nitrát (NO_3^-) aeroszolok prekursor gázainak a N_2O , NO és a NO_2 számítanak. Ezek a gázok a talajban fixált nitrogénből nitrifikáló és denitrifikáló baktériumok anyagcsere folyamataik során kerülnek a levegőbe. Az erdő- és bozóttüzek során is nitrogén tartalmú gázok kerülnek a levegőbe.



Az emberi eredetű kibocsátás a fosszilis tüzelőanyagok égetéséből, ipari tevékenységekből, a közlekedésből és a mezőgazdaságból származik (Tomasi & Lupi, 2017).

A szerves szénbázisú aeroszolok illékony szerves szénhidrogénekből képződnek. Ezek természetes tüzek során, a biomassza égéséből, illetve szárazföldi növények által izopren és terpén kibocsátásból származnak.

Az illékony szénhidrogének antropogén forrása közé tartozik a benzin és gázolaj üzemű motorok kibocsátása, hőerőművek és a cigarettafüst. (Tomasi & Lupi, 2017).

A másodlagos aeroszolok méretük szerint a 2,5 mikrométer alatti tartományba, azaz a finom és az ultrafinom szemcsékbe tartoznak bele (Salma, 2012).

1.6. A szálló por kémiai összetétele

A durva és finom méretcsoportba tartozó részecskék eltérő képződési mechanizmussal, eltérő forrásokból származnak, ezáltal a kémiai összetételükben is különböznek egymástól. Fontos elkülöníteni, hogy a részecskék természetes vagy antropogén forrásból származnak-e. A szárazföldi környezetből származó durva részecskék és elsődleges finom részecskék elsősorban a felszín mechanikai kopásából, kőzetek mállásából és aprózódásból keletkeznek, így ezek főként olyan kőzetalkotó elemeket tartalmaznak, mint a szilícium (Si), alumínium (Al), vas (Fe), mangán (Mn), kalcium (Ca), magnézium (Mg). Óceáni területek felett különféle sókból (NaCl, MgSO₄, KCl) és oldataiból állnak. Ezek mellett szerves anyagot is tartalmaznak, amely származhat a talaj legfelső humuszos rétegéből, illetve lehet biogén eredetű, mint például virágok pollenje, spórák, baktériumok (Salma, 2012).

Az antropogén forrásból származó részecskék rendkívül változatos kémiai összetételűek lehetnek attól függően, hogy a közlekedésből vagy különféle ipari technológiából származnak. A járművek kipufogógázai az üzemanyag tökéletlen égéséből eredő illékony szénhidrogén tartalmú aeroszolat, kormot és olyan gázokat (SO₂, NO_x) tartalmaznak, melyek prekursorai a másodlagos részecskéknek. Korábban a járművek nagymértékben hozzájárultak az ólomszennyezettséghez, amely abból adódott, hogy üzemanyagához ólomvegyületet adtak, hogy így növeljék az oktánszámot, csökkentsék a motor kopogását. Szerencsére az ólmozott benzin használatát hazánkban és az Európai Unióban a 2000-es évek környékén betiltották (Kertész, 2000). A különféle ipari tevékenységekből és folyamatokból származó részecskék forrása lehet a fosszilis tüzelőanyagok égetése, amely során tartalmazhatnak kormot, hamut, potenciálisan toxikus fémeket (Cr, Cd, Pb, stb.) és átmeneti fémeket (As, Sb), illékony szerves szénhidrogéneket (Salma, 2012).

A másodlagos finom szemcsék összetételüket tekintve függnek a prekursor gázoktól. Attól függően, hogy milyen gázból keletkeztek tartalmazhatnak kénsavat, ammóniumot és szerves vegyületeket (Salma, 2012).

3. táblázat: Fő összetevői a PM₁₀ és PM_{2,5} szálló pornak Európában (forrás: Putaud et al., 2009)

Régió	Összetevő	PM ₁₀			PM _{2,5}		
		Vidék	Város	Utca	Vidék	Város	Utca
Észak-Nyugat Európa	Ásványi por	4%	12%		5%	1%	
	Tengeri só	12%	10%	7%	4%	1%	
	SO ₄ ²⁻	13%	14%	8%	21%	18%	
	NO ₃ ⁻	16%	14%	12%	16%		
	Szerves anyag	15%	18%	16%	25%		
	Elemi szén	4%	5%	9%	7%		
	Összes szén	14%	18%	20%	25%		
Dél-Európa	Ásványi por	15%	21%	28%	11%	14%	
	Tengeri só	3%	12%	5%	6%	2%	
	SO ₄ ²⁻	16%	12%	5%	15%	15%	
	NO ₃ ⁻	14%	9%	8%	7%	7%	
	Szerves anyag		26%		23%		
	Elemi szén		6%		8%		
	Összes szén	13%	21%	28%	30%	38%	
Közép-Európa	Ásványi por	9%	12%	15%	3%	5%	6%
	Tengeri só	2%	2%	2%	1%	1%	1%
	SO ₄ ²⁻	19%	15%	9%	17%	19%	12%
	NO ₃ ⁻	13%	12%	8%	6%	13%	10%
	Szerves anyag	23%	21%	21%	15%	22%	26%
	Elemi szén	6%	10%	17%	5%	14%	21%
	Összes szén	32%	32%	38%	19%	31%	35%

A fenti adatokból látható, hogy a vizsgált durva (PM₁₀) és finom (PM_{2,5}) szálló por fő alkotója Európában a szerves anyag, szulfát (SO₄²⁻) és a nitrát (NO₃⁻). A PM₁₀ részecskék esetében az ásványi por és tengeri só nagyobb százalékban fordul elő, mint a PM_{2,5} frakció esetében. Ez a keletkezési mechanizmussal magyarázható, ugyanis a durva (PM₁₀) frakció jóval nagyobb mennyiségben származik elsődleges forrásból, mint a finom (PM_{2,5}) frakció. Megfigyelhető még, hogy Közép-Európában a tengeri só mennyisége jóval alacsonyabb, mint Észak-Nyugat Európában és Dél-Európában. Ez a tengertől és óceántól való távolsággal és az ülepedéssel magyarázható. A tengeri, óceáni területeken levegőbe került részecskék koncentrációja idővel fokozatosan ahogy transzportjuk során a szárazföldi területek felé érnek (Putaud et al 2009).

1.7. Szálló por okozta egészségügyi hatások

A légszennyezés az emberi egészségre gyakorolt rendkívül káros hatása miatt az egyik legjelentősebb környezeti veszélyként tartják számon. Ez különösen igaz a szálló porra, amit az egyik legveszélyesebb légszennyező komponensnek tartanak (WHO, 2021; IARC, 2013). A szálló por szennyezettség világszerte érinti az embereket, és főleg a kevésbé fejlett és közepes jövedelmű országoknak okoz aránytalanul nagy terhet [6]. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) becslései szerint évente 7 millió körül van azoknak a haláleseteknek a száma, amely szálló por - különösen a finom frakciója (PM_{2,5}) - okozta betegségeknek tudható be (WHO, 2021). Az európai lakosság körében is jelentős egészségügyi aggodalomra ad okot a szálló por okozta légszennyezés, ugyanis az Európai Unió városi lakosságának 97%-a volt kitéve a finom részecskéjű (PM_{2,5}) szálló por azon szintjének, melyek meghaladják a WHO levegőminőségi irányelvében meghatározott szintet. Mindemellett 2021-ben 307 000 korai haláleset volt betudható a PM_{2,5} szálló pornak az Európai Unió 27 tagállamában [7].

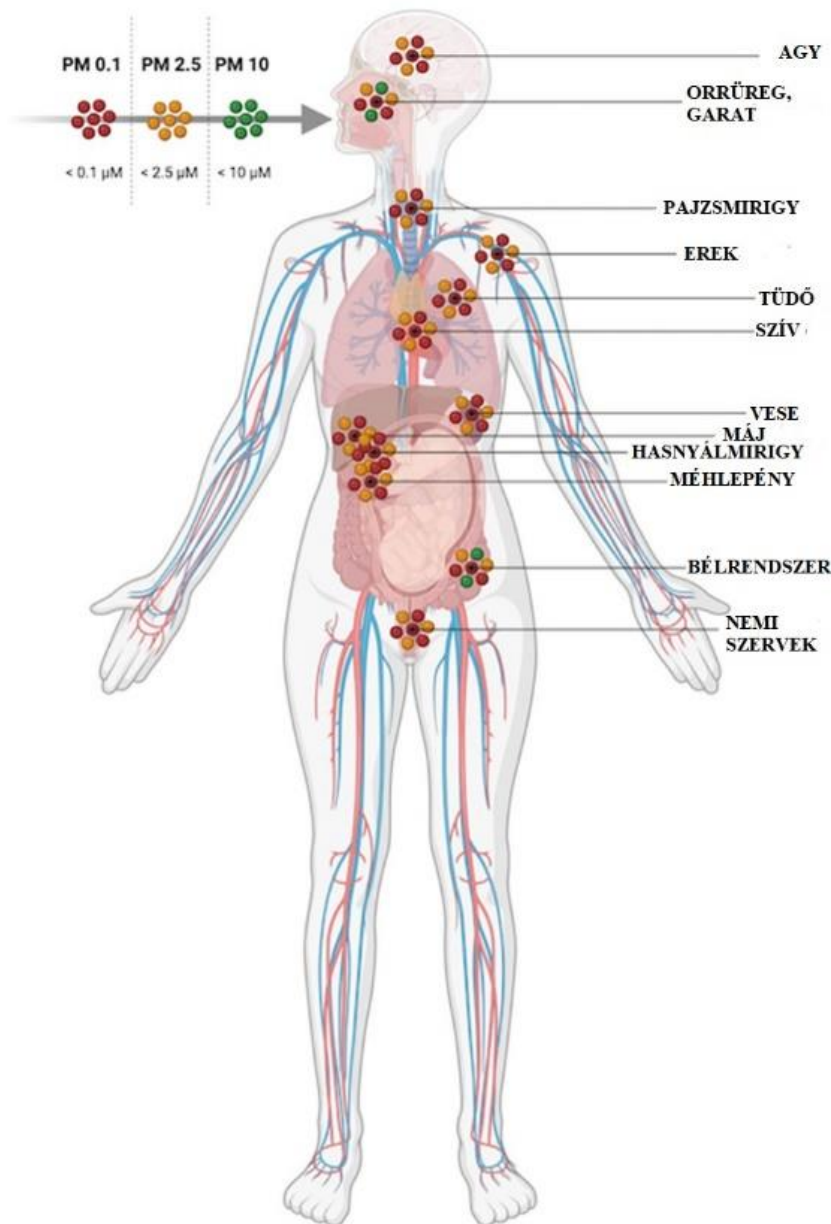
Mindennapjaik során folyamatosan ki vagyunk téve a szálló por okozta szennyezésnek, miközben az otthonunkban tartózkodunk, közlekedünk, dolgozunk vagy éppen szabadidős tevékenységet folytatunk a szabadban. A szálló por okozta légszennyezés összefüggésbe hozható sok betegség előfordulásának és halálozási arányának növekedésével. Számtalan tanulmányban igazolták, hogy a finom szálló por magas kockázatot jelent a krónikus felső- és alsó légúti megbetegedések, asztma, daganatos légzőszervi megbetegedések, stroke, iszkémiás szívbetegségek kialakulásában és az ehhez kapcsolódó halesetek bekövetkezésében (Thangavel et al., 2022; Salma 2012). Továbbá összefüggésbe hozható káros terhességi kimenetekkel is, mint például a terhesség alatti magas vérnyomás, koraszülés és alacsony születési súly (Thangavel et al., 2022). A Nemzetközi Rákkutató Ügynökség (International Agency for Research on Cancer – IARC) a szálló por okozta légszennyezést 2016-ban az emberben bizonyítottan rákkeltők csoportjába (Group 1) sorolta. [8]

A szálló por okozta szennyezés egyes társadalmi csoportokra jóval nagyobb veszélyt jelent, mint a normál egészségű lakosságra. A gyerekek potenciálisan érzékenyebbek lehetnek a felnőtteknél hasonló szálló por koncentráció esetében, ugyanis több időt töltenek a szabadban, nagyobb az aktivitásuk és az egy testtömeg-kilogrammmra jutó percnyi légzési mennyiségük. Mindez pedig növeli a tüdőfelszínükre eső szálló por dózist. A másik nagy veszélyezett társadalmi csoportot az idősek alkotják. Ez betudható az idő múlásával járó fiziológiai folyamatok fokozatos hanyatlásának, illetve az idős emberek körében más társadalmi

csoporthoz képest magasabb az előzetes szív- és érrendszeri, légzőszervi megbetegedések aránya, amelyek szintén érzékenységet okozhatnak a szálló porral szemben (*Sacks et al.*, 2010).

A belélegzés útján szervezetünkbe jutó részecskék okozta egészségügyi hatás függ a részecskék méretétől és azok kémiai összetételétől. A részecskék mérete meghatározza, hogy azok a légzőrendszer mely részén ülepednek ki és szervezetünk melyik részébe képesek bekerülni. A durva részecskék (PM_{10}) kiülepedése a felső légutakban, jellemzően már az orrüregben megtörténik (*Pryor et al.*, 2022). Ezzel szemben a finom ($< PM_{2,5}$) és ultrafinom ($< PM_{0,1}$) részecskék már képesek lejutni az alsó légutakba és ott lerakódni. A belélegzett részecskék lerakódnak a légutak, a tüdőhörgők és a tüdőhólyagocskák felszínén, majd ezt követően beléphetnek a tüdő különféle sejtjeibe (*Thangavel et al.*, 2022). Ettől kezdve a lerakódott részecskék kettős úton fejtik ki biológiai hatásukat. A kiülepedett részecskék hatására oxidatív stressz alakul ki, aktíválódnak a környező tüdősejtek és oxidatív reaktív vegyületek, mint például szabad gyökök és hidrogén-peroxid (H_2O_2) keletkeznek. Ez károsítja a sejtek normál funkcióját és gyulladáshoz vezet a légzőszervrendszerben. A gyulladás jelentős szerepet játszik a légzőrendszer károsodásában. Okozhatja tüdősejtjeinek, valamint a makrofágok károsodását, ami csökkenti a tüdő szöveti védelmét, így érzékenyebbé válik a légúti vírusos és bakteriális megbetegedésekkel szemben, súlyosbítja a légzőszervi betegségek (asztma, hörghurut) tüneteit. A másik úton kifejtett hatása során a gyulladás kialakulása után a finom részecskék kisméretű darabjai, oldódó összetevői és az ultrafinom részecskék bekerülnek a vérkeringésbe, majd befolyásolják annak tulajdonságait és funkciót. A véráramba bekerült részecskék és oldódó anyagok aztán a test különféle szerveibe is eljutnak (*Salma*, 2012; *Thangavel et al.*, 2022). Ezt bizonyítja, hogy egy kísérlet során egészséges önkéntesekkel arany nanorészecskéket lélegeztettek be, majd az inhalációt követően az arany részecskék jelenlétét kimutatták a vérükből és a vizeletükből (*Miller et al.*, 2017). A tüdőben gyulladást okozhat, növeli a vírusos és bakteriális tüdőgyulladás előfordulási arányát, növeli a tüdőrák kialakulásának kockázatát, a gyerekeknél tüdőfejlődési rendellenességet okozhat és szerepet játszik az asztma kialakulásában, illetve a tüneteinek súlyosbításában. A szívben és az érrendszerben a részecskék növelik a szívinfarktus kockázatát, növeli a vér alvadékonyságát. Várandós nőknél növeli a koraszülés és az alacsony testsúllyal születés kockázatát. A májban elzsírosodást, ún. nem alkoholos zsírmájat okozhat. A belekben a bél baktériumflórájában okozhat változást. Az agyba eljutó részecskék növelik a stroke, az Alzheimer- és a Parkinson-kór kialakulásának kockázatát. Egyre több bizonyíték utal arra, hogy a szálló

porkitetségkockázati tényező az elhízás és a 2-es típusú cukorbetegség kialakulásában (Pryor et al., 2022; Thangavel et al., 2022).



2. ábra: A részecskék méret tekintetében a test különféle szerveibe és részeibe juthatnak el (forrás: Pryor et al., 2022)

A szálló pornak való kitettség káros egészségügyi hatásai elsősorban a hosszú távú (hónapok, évek) expozíció során alakulnak ki. Viszont a rövid távú (órás, napos) expozíció is képes negatív hatást kifejteni az emberi egészségre. Rövid távú expozíció során jellemzően csak akut hatásokat fejtenek ki, mint például szemviszketés, légúti nyálkahártya irritáció, nehézlégzés, asztmás roham. A hosszú távú expozíció során krónikus betegségek és tüneteik alakulhatnak ki

(Pryor et al., 2022; Thangavel et al., 2022; Sacks et al., 2010). A rövid és hosszú távon okozott tünetek az alábbi táblázatban kerültek összefoglalásra.

4. táblázat: Szálló por rövid és hosszú távú expozíció hatásai (forrás: Thangavel et al., 2022)

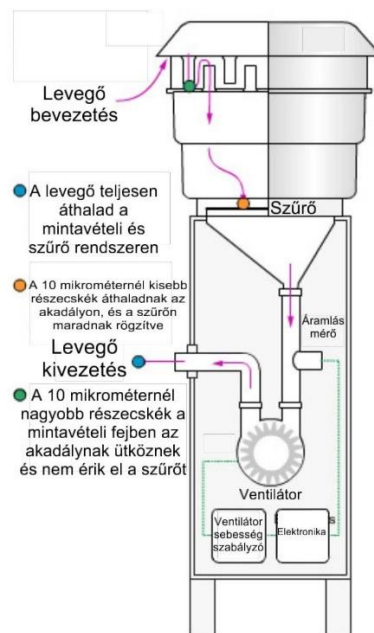
Expozíció	Érintett rendszer	Egészségügyi hatás
Rövid távú	Szív- és érrendszer	Növekvő szívinfarktus és iszkémia előfordulás Szívelégtelenségek Növekvő trombózis előfordulás aránya Növekvő aritmia előfordulás aránya Növekvő stroke előfordulás aránya
	Légzőszervrendszer	Növekvő zihálás Asztma súlyosbodás Légzőszervi fertőzések Krónikus tüdőbetegségek súlyosbodása
Hosszú távú	Szív- és érrendszer	Növekvő szívinfarktus előfordulás aránya Véralvadékonyság növekedése Érelmeszesedés kialakulása
	Légzőszervrendszer	Növekedett gyulladás előfordulása a tüdőben Növekedett tüdőgyulladás előfordulása Tüdőrák kialakulásának kockázata Károsodott tüdőfejlődés gyerekeknél Asztma kialakulása
	Magzat	Koraszülés kockázatának növekedése Alacsony születési súly
	Agy	Alzheimer-kór kialakulásának kockázata Parkinson-kór kialakulásának kockázata Neurodegeneratív betegségek kialakulásának kockázata

1.8. A szálló por mérésének módszerei

A szálló por mérése esetén négyféle paramétert mérhetünk, amelyek a következők: részecske tömegkoncentrációt, részecskék száma, részecskék mérete és a részecskék felülete. A légszennyezettség mérés esetén leginkább a részecske méretcsoport (PM₁₀ és PM_{2,5}) szerinti tömegkoncentrációt szokták mérni, ugyanis ezekre a paraméterekre vannak a határértékek és az előírások megszabva (Amaral et al., 2015)

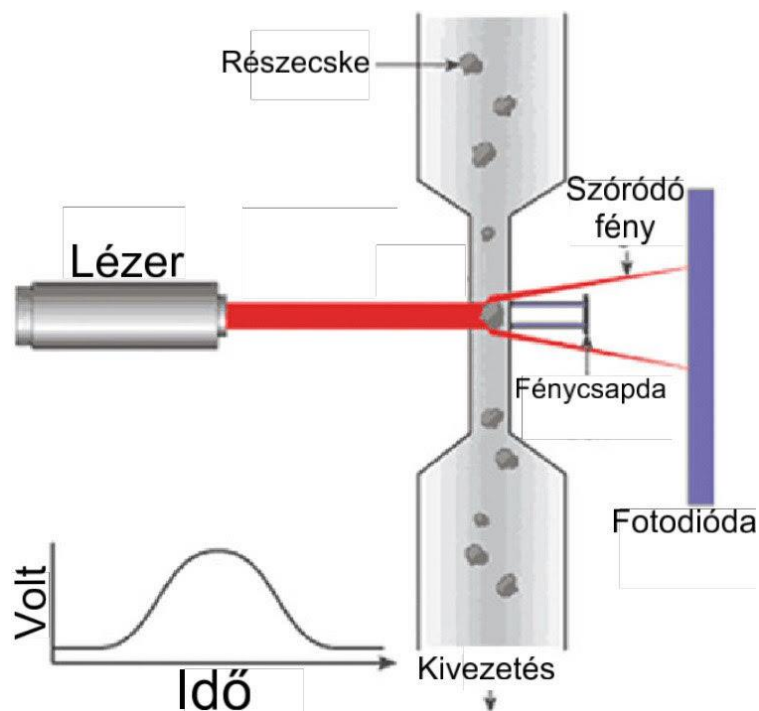
A részecske tömegkoncentráció mérés a leggyakrabban alkalmazott mérési paraméter a szálló por esetében. Ez a levegőben lévő részecskék tömegét jelenti térfogategységre vetítve, amelyet általában mikrogramm/köbméterben ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) mértékegységben szoktak megadni. A tömegkoncentráció mérést leggyakrabban a PM_{10} és a $\text{PM}_{2,5}$ méretcsoportra nézve végzik (Kirešová & Guzan, 2022). A két legelterjedtebb mérési módszer erre a paraméterre nézve a gravimetria és az optika elvén alapul (Lowther et al., 2019).

A gravimetriás módszerben a részecskék tömegkoncentráció mérése a szűrők mintavétel előtti és utáni tömegmérésén alapul. A szűrő mintavétel előtti és utáni súlykülönbsége és a mintavételi időszak alatt a szűrőn átáramoltatott levegő térfogata alapján számolják ki a szálló por környezeti levegőben meghatározható tömegkoncentrációját. Ezzel az elvvel a mintavétel időátlagos tömegkoncentrációját kapjuk a mintavételi időszakra vonatkozóan. A szűrők felületén bármilyen méretű részecske kiülepedhet, ezért a nagyobb méretű részecskéket ($> 10 \mu\text{m}$) ciklon és ütköztetők alkalmazásával távolíthatják el (Winkel et al., 2014). A szűrők általában üvegszálból készülnek, amelyeket a kémiai reakciók elkerülése végett bevonattal (pl.: politetrafluoretilén) látnak el. A szűrő felületén megtapadt részecskék kémiai összetételét és számát további mérésekkel és műszerekkel lehet vizsgálni a későbbiekben (Kirešová & Guzan, 2022). A módszer előnye, hogy a közvetlen mérés miatt pontos eredményeket kaphatunk. Hátránya, hogy nem lehet valós idejű mérést folytatni vele, a szűrők mérése időigényes és anyagvesztés történhet a mérés előkészítés során (a beszárítás folyamata az illékony komponensek távozását okozhatja) (Lowther et al, 2019).



3. ábra: Gravimetriás szálló por mérőműszer rajza (forrás: [9])

Az optikai mérési módszer a részecskék és a fény kölcsönhatásán alapul. A mérés során a levegő egy kamrába kerül, amit egy fényforrás - jellemzően lézer fénysugár - világít meg. Amikor a fénysugár a részecskét éri, akkor szóródik vagy elnyelődik. A fényszódás és elnyelődés mértékét fotodetektor méri, majd a mintavételi levegőtérfigat figyelembevételével határozza meg a részecske tömegkoncentrációt (Kirešová & Guzan, 2022; Lowther et al., 2019). A berendezésekben általában a látható tartományba eső fénysugarat (~600 nm) alkalmaznak. A módszer előnye, hogy ezek a készülékek képesek valós időben végezni a mérést, mindemelett kompakt méretűek, hordozhatóak. Hátrányuk, hogy a mérést közvetett módon végzik, ezért a gravimetriás módszerhez képest kevésbé pontosak (Lowther et al., 2019).



4. ábra: Optikai elven alapuló szálló por mérés (forrás: Dambruoso et al., 2013)

1.9. Szálló porra vonatkozó határértékek

Az alábbiakban bemutatásra és összehasonlításra kerülnek az Amerikai Egyesült Államok és az Európai Unió szálló porra vonatkozó határértékei, illetve az Egészségügyi Világszervezet (WHO) legfrissebb 2021-ben megjelent iránymutatása.

Az Európai Unió légszennyezettségre vonatkozó határértékei az Európai Parlament és Tanács által megalkotott *a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű 2008/50/EK* irányelv alapján lettek meghatározva. Határérték túllépés esetén az illetékes

hatóságoknak légszennyezés kezelési terveket kell kidolgozniuk és végrehajtaniuk, hogy a szennyezőanyag koncentrációt határérték és célérték alá csökkentsék [10].

5. táblázat: Az Európai Unióban és Magyarországon érvényben lévő szálló por határ- és célértékek (saját táblázat)

Szennyező anyag	Méretcsoport	Átlagolási idő	Koncentráció	Megjegyzés	Évente engedélyezett határérték túllépések száma
Szálló por	PM _{2,5}	éves	25 µg/m ³	Célérték	-
		éves	20 µg/m ³	Határérték	-
	PM ₁₀	24 órás	50 µg/m ³	Határérték	35
		éves	40 µg/m ³	Határérték	-

A PM_{2,5} frakcióra célkitűzéseket vezettek be a lakosság finom részecske expozíciójának szabályozására. Ezeket a célokat nemzeti szinten állapítják meg és az átlagexpozíció-mutató (ÁEM) alapján kerülnek meghatározásra. Az átlagexpozíció-mutató három éves futamidőre vonatkozó éves átlagos PM_{2,5} koncentrációt jelent, amelyet a kiválasztott agglomerációkban és nagyobb városi területeken található monitoring állomásokon mérnek [10].

Magyarországon a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről szóló 4/2011. (I. 14.) VM rendelet foglalkozik a szálló porra vonatkozó határértékekkel. Mivel hazánk az Európai Unió tagországa, ezért a rendeletben meghatározott határérték és célérték koncentrációk megegyeznek az EU-s értékekkel, illetve onnan kerültek átvételre [11].

Az Amerikai Egyesült Államokban az 1970-es Tiszta Levegő Törvény (Clean Air Act) utasítására az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) megalkotta a Nemzeti Környezeti Levegőminőségi Előírásokat (National Ambient Air Quality Standards - NAAQS), amelyben elsődleges és másodlagos határértékeket szabtak a légszennyező anyagokra. A törvény továbbá előírja az EPA számára, hogy ötévente vizsgálja felül a határértékeket. Az elsődleges határértékek közegészségügyi védelmet nyújtanak, beleértve az érzékeny népességcsoportok, például az asztmások, gyerekek és idősek egészségének védelmét. A másodlagos határértékek a közjólét védelmét szolgálják, amibe beletartozik a látási viszonyok csökkenése, valamint az állatok, a termények, a növények és az épületek károsodási elleni védelme [12].

6. táblázat: NAASQ táblázatban meghatározott szálló por határértékek (saját táblázat)

Szennyező anyag	Méretcsoport	Elsődleges/ másodlagos	Átlagolási idő	Határérték	Megjegyzés
Szálló por	PM _{2,5}	elsődleges	éves	12,0 µg/m ³	éves átlag, 3 év átlagában
		másodlagos	éves	15,0 µg/m ³	éves átlag, 3 év átlagában
		elsődleges és másodlagos	24 órás	35,0 µg/m ³	98% érték, 3 év átlagában
	PM ₁₀	elsődleges és másodlagos	24 órás	150,0 µg/m ³	3 év átlagában évente legfeljebb egy alkalommal túlléphető

Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) rendszeresen integrálja a légszennyezés egészségügyi hatásaira vonatkozó tudományos bizonyítékokat, valamint figyelemmel kíséri az országok légszennyezés terén elért haladását. A legfrissebb, 2021-es kiadású Levegőminőségi iránymutatásában (WHO global air quality guidelines) a szálló por koncentrációra vonatkozóan szigorúbb értékeket találhatunk, mint a korábbi, 2005-ben publikált kiadásban. Ennek egyik oka, hogy a WHO levegőminőségi irányelveiben foglalt ajánlások a rendszeres irodalmi áttekintések és szigorú értékelési módszerek alapján, valamint a világ minden részéről származó szakértők és az irányelvek végfelhasználóinak széles körű konzultációja alapján készülnek [13]. A 7. táblázatban összehasonlításra kerül az említett két kiadásban meghatározott szálló porra vonatkozó iránymutatások.

7. táblázat: A 2005-ben és 2021-ben a WHO által publikált Levegőminőségi irányelv szálló porra vonatkozó iránymutatás változásai (saját táblázat)

Szennyező anyag	Méretcsoport	Átlagolási idő	2005-ös kiadás koncentráció	2021-es kiadás koncentráció
Szálló por	PM _{2,5}	24 órás	25 µg/m ³	15 µg/m ³
		éves	10 µg/m ³	5 µg/m ³
	PM ₁₀	24 órás	50 µg/m ³	45 µg/m ³
		éves	20 µg/m ³	15 µg/m ³

A táblázatokban meghatározott koncentráció értékeket összehasonlítva szembevetendő, hogy a WHO-s iránymutatások jóval szigorúbbak, mint az Európai Unió és az Egyesült Államok határértékei.

1.10. Szálló por Magyarországon

Hazánkban a légszennyező komponensek közül a szálló por okozza a legnagyobb problémát. Ezt a megállapítást az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) 2021-es adatai is megerősítik. PM₁₀ szálló por esetében 3 állomás kivételével mindegyik mérőállomáson előfordult 24 órás egészségügyi határérték túllépés, emellett 6 állomás meghaladta az egy évben engedélyezett 35 darab határérték túllépéses napot. PM_{2,5} szálló por esetében a sajtószentpéteri mérőállomás az éves határértéket is átlépte (MFO LRK Adatközpont, 2023). Ezen kívül az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA) becslése szerint 2022-ben több mint 9500 korai haláleset volt betudható PM_{2,5} szálló por okozta szennyezésnek Magyarországon [14].

A Központ Statisztikai Hivatal (KSH) 2020-as adatai szerint a PM₁₀ szálló por éves teljes kibocsátás több mint fele háztartási eredetű, míg a maradék kibocsátás iparhoz és közlekedéshez köthető (8. táblázat). Az ipari eredetű kibocsátásért legnagyobb részben a mező- és erdőgazdálkodás, illetve az építőipar a felelős. PM_{2,5} szálló por esetében a teljes kibocsátás 5/6 része háztartási eredetű (9. táblázat) [15].

8. táblázat: PM₁₀ szálló por kibocsátás 2010-2020 között (saját táblázat)

A nemzetgazdasági ágak és háztartások PM ₁₀ szállópor-kibocsátása [tonna]											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Nemzetgazdasági	30 737	27 243	22 016	25 046	30 223	28 744	26 978	24 608	27 259	28 238	25 390
Háztartási	42 510	48 726	52 181	52 570	42 768	44 853	43 612	41 437	34 381	31 954	31 310
Teljes kibocsátás	73 247	75 968	74 197	77 617	72 991	73 597	70 591	66 045	61 640	60 192	56 700

9. táblázat: PM_{2,5} szálló por kibocsátás 2010-2020 között (saját táblázat)

A nemzetgazdasági ágak és háztartások PM _{2,5} szállópor-kibocsátása [tonna]											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Nemzetgazdasági	9 490	9 069	7 833	7 225	7 936	7 813	7 321	6 953	7 558	7 276	6 297
Háztartási	41 146	47 245	50 598	51 001	41 395	43 406	42 169	40 024	33 124	30 697	30 175
Teljes kibocsátás	50 637	56 314	58 430	58 226	49 330	51 219	49 491	46 978	40 682	37 973	36 472

Mindkét méretcsoport teljes kibocsátása évenként váltakozó tendenciát mutat, viszont a 2015-2020-as időszakban minimális csökkenés látható (8-9. táblázat).

Hazánkban a szálló por forrásai területi szinten változnak. Vidéki területeken a szilárd tüzelőanyagon alapuló lakossági fűtés a fő forrás, míg a városokban a közlekedéshez köthető a kibocsátás nagy része. Évszaktól függően is változhat a kibocsátási arány, télen a fűtés, míg nyáron a közlekedés felelős legnagyobb mértékben a szálló por szennyezésért. Az említett két időszak közül a legtöbb határérték túllépés késő ősszel és télen szokott előfordulni. Ennek oka a szilárd tüzelőanyagokon alapuló lakossági fűtés – a közlekedési eredetű kibocsátások

hatásaival is párosulva. Ezt a problémát tovább súlyosbítja, hogy tüzelésre alkalmatlan anyagokat, mint például textíliát, műanyagot és magas nedvességtartalmú fát is felhasználnak fűtési célra. Az elavult fűtőberendezések, mint például a vegyestüzelésű kazánok, vaskályhák mindamellett, hogy alacsony hatásfokkal rendelkeznek, működésük magas környezetre gyakorolt szennyezőanyag kibocsátással jár. Az őszi és téli időszakban jellemző párás, hideg, szélcsendes – a légköri terjedés, a hígulás szempontjából kedvezőtlen – időjárás nagymértékben hozzá tud járulni a szálló por koncentráció növekedéséhez.

Magyarországon a Sajó-völgy települései és városai (Putnok, Kazincbarcika, Sajószentpéter, Miskolc, stb.) és az ország további nagyobb városai (Budapest, Debrecen, Pécs, Nyíregyháza, stb.) érintett leginkább a szálló por okozta szennyezésben. Ezeken a területeken szokott leggyakrabban előfordulni határérték túllépés. A Sajó-völgyben a szálló por szennyezés a szilárd tüzelőanyagokkal történő fűtésnek tudható be, viszont a helyzetet súlyosbítja a terület topográfiai viszonya. A völgyekben elhelyezkedő területek szélvédettek, így a szennyezés nehezen távozik a területről. A nagyobb városok esetében ez legnagyobb részben a közlekedésnek, míg kisebb részben a lakossági fűtésnek tudható be.

1.11. Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) bemutatása

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által működtetett Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) tájékoztató jellegű információt ad a felhasználók számára egyes városok és régiók levegőminőségi állapotáról. A hálózat 58 fix és 2 mobil mérőállomásból áll, amelynek óránként frissülő adatai térképen vannak megjelenítve. A térképen megjelenő adatok a levegőminőségi index szerint kerülnek a kategorizálásra a szennyezőanyag mért koncentrációja alapján.

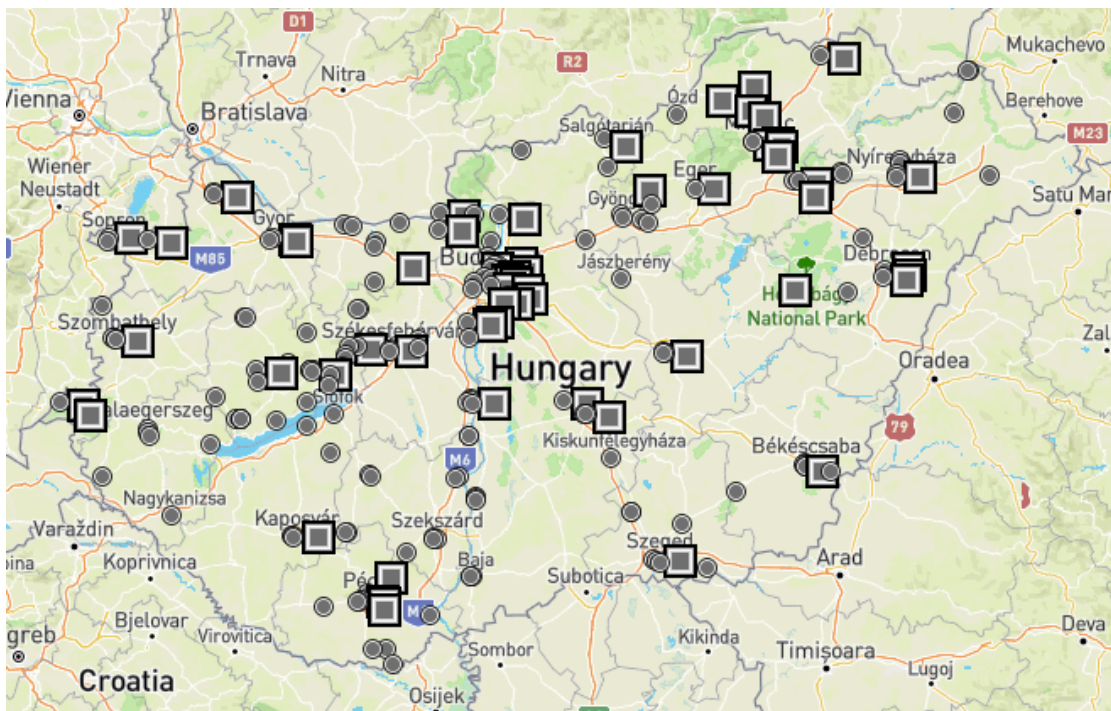
A lakosság részére a környezeti levegő minőségének megértését a levegőminőségi index (Air Quality Index – AQI) teszi egyszerűbbé, ezzel tájékoztatást kaphatnak egyes városok és régiók levegőminőségi állapotáról. A levegőminőségi index hazánkban az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) által óránként mért szennyezettségi adatok alapján minősíti a levegőt. Az európai levegőminőségi index öt fő légszennyező anyag koncentrációját figyelembe véve határozza meg a levegő minőségét. A figyelembe vett szennyezőanyagok a következők: szálló por (PM₁₀ és PM_{2,5}), nitrogén-dioxid (NO₂), ózon (O₃), kén-dioxid (SO₂). A magyar légszennyezettségi index kiegészül még két szennyezőanyaggal, a benzollal (C₆H₆) és a szén-monoxiddal (CO). Az indexszintre történő besorolás a mért légszennyező anyagok

koncentrációjával történik. Adott anyagra nézve minden indexszint rendelkezik egy bizonyos koncentráció tartománnyal és egy ehhez kapcsolódó színjelzéssel. A térképen feltüntetett mérőállomások indexszint szerinti színezése az adott helyen mért legmagasabb koncentrációjú szennyezőanyag figyelembevételével történik [16].

Szennyezőanyagok koncentrációja*						
	Kiváló	Jó	Megfelelő	Szennyezett	Erősen szennyezett	Rendkívül szennyezett
Benzol	0-4	4-8	8-10	10-20	20-30	30-50
CO	0-4000	4000-8000	8000-10000	10000-20000	20000-30000	30000-50000
PM_{2,5}	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800
PM₁₀	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200
NO₂	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	340-1000
O₃	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	380-800
SO₂	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	750-1250

5. ábra: Magyar levegőtisztasági index szennyezőanyagra meghatározott szintjei (forrás: [16]) (* a szennyezőanyagok koncentrációja [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] alapján)

A levegőtisztasági index értékeihez egészségügyi üzenetek is tartoznak. Ezek az üzenetek ajánlásokat nyújtanak az általános egészségi állapotú és az érzékeny, légzőszervi, szív- és érrendszeri problémákkal küzdő személyeknek [16].



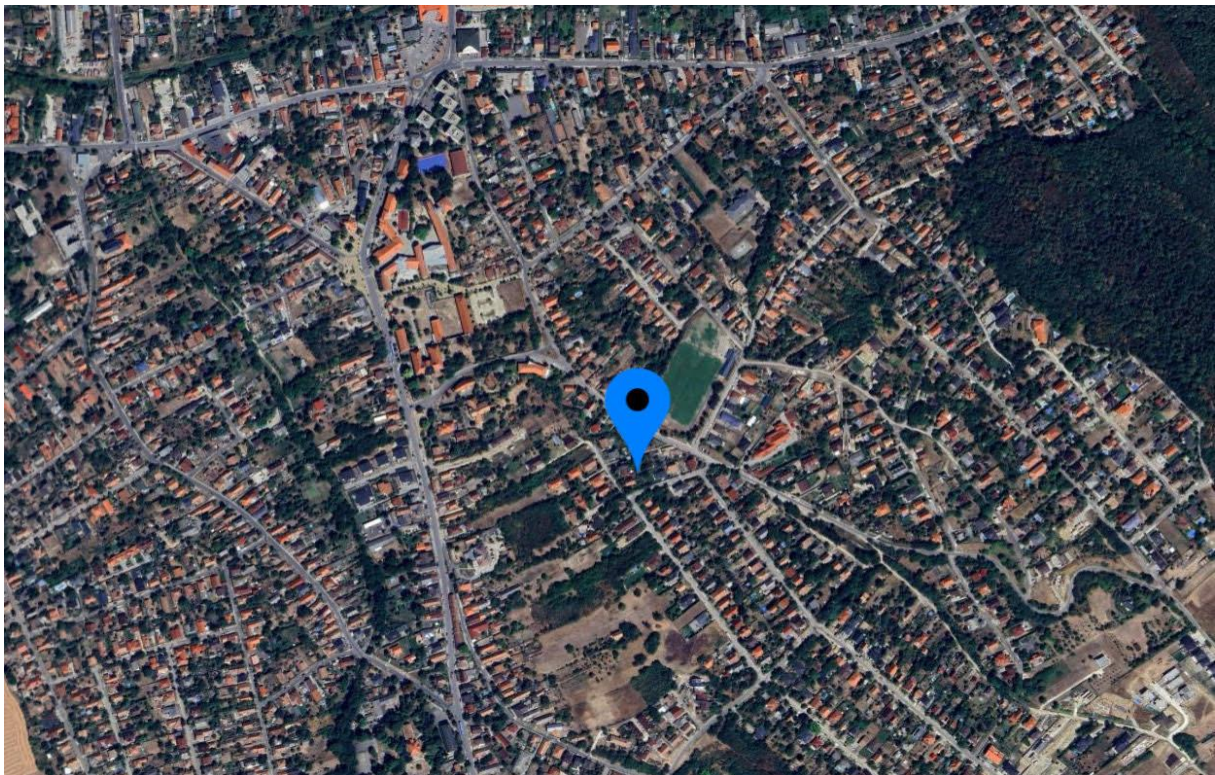
6. ábra: OLM automata mérőállomásai a térképen négyzettel ábrázolva (forrás: [17])

2. Anyag és módszer

A következőkben bemutatom az elvégzett levegőminőségi mérések helyszínét, módszerét, a vizsgálati eredmények értékelési módszerét.

2.1. Mintavételi pont jellemzése

A szálló por szennyezettség mérésére Pécel város belterületén került sor. Koordináták: 47.486038396, 19.3458054175. A mintavételi pont a város délkeleti részén, kertés lakóövezetben található. A mintavételi pont közelében nem található jelentős kibocsátó forrás, illetve forgalmas út se, így a település legnagyobb részére jellemző háttér koncentrációt lehetett meghatározni. Szálló por kibocsátásra lakossági forrásból számíthatunk, leginkább fűtési szezonban a szilárd tüzelőanyagok égetéséből adódóan.

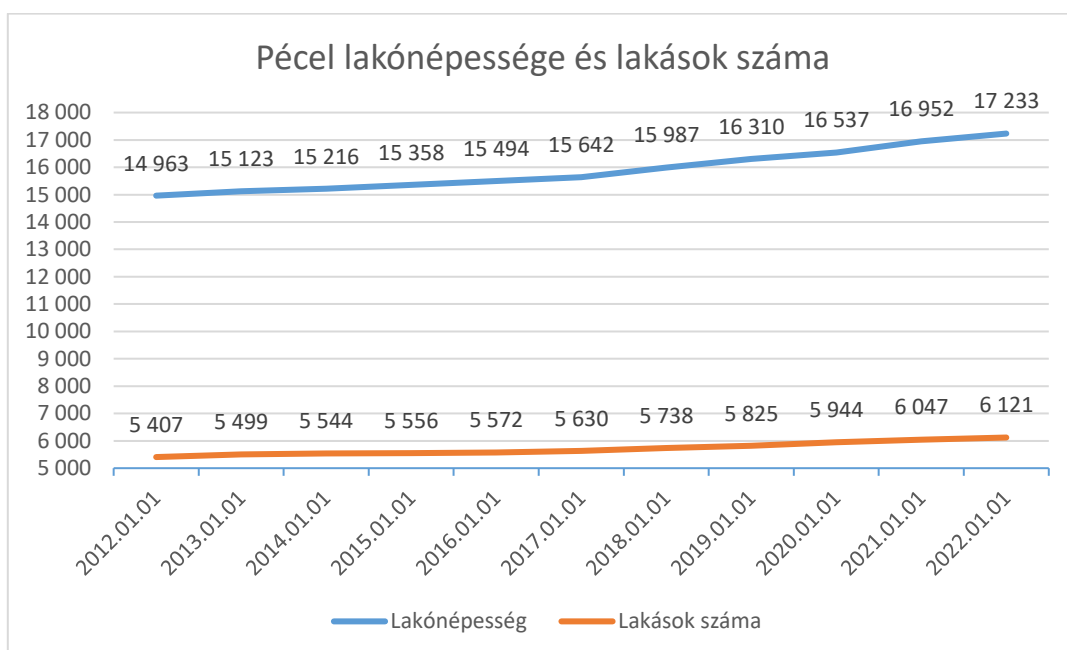


7. ábra: Mérési pont Pécel belterületén (jelölővel jelzett pontban)(forrás: [18])

Pécel város Pest vármegyében Budapesttől keletre, a Gödöllői-dombság nyugati peremén, a Rákos-patak völgyében található. Területe 43,63 km². A várost északnyugati irányból Nagytarcsa, északkeletről Isaszeg, délkeletről Süllyás és Mende, délről Gyömrő és Maglód, illetve keleti irányból Budapest XVII. kerülete határolja. Pécel külterületén leginkább mezőgazdasági hasznosításban lévő szántók találhatóak, de az északi és keleti belterületek

közvetlen határában erdős területek fekszenek. A település belterületének legnagyobb részét kertés házak teszik ki.

Mivel Budapest keleti agglomerációjában található, ezért az elmúlt években az agglomeráció településeit és városait érintő népességnövekedés Pécel város lakosságában is megfigyelhető. A területet érintő népességnövekedés alapvető oka a munkahelyek és gazdasági lehetőségek száma a fővárosban és annak közvetlen környezetében. Az említett lehetőségek indikálta gyorsütemű népességnövekedés a lakások számának növekedésével együtt jár. A Központi Statisztikai Hivatal Pécelre vonatkozó lakosság és lakások számának évenkénti adatai az 8. ábrán kerülnek bemutatásra.



8. ábra: Pécel lakónépessége és a lakások száma (forrás: [19])

A fenti adatokból látható, hogy az elmúlt tíz évben Pécel lakosságának száma több mint 2000 fővel, a lakások száma pedig több mint 600 darabbal emelkedett. Az említett adatok figyelembevételével arra következtetnek, hogy a levegő terheltsége is növekedett. Erre enged következtetni, hogy a lakások számának növekedésével nőtt a lakossági fűtőberendezések száma is. Mint korábban említésre került a lakossági fűtés az egyik legjelentősebb szálló por forrás a kisvárosokban és településeken. Viszont meg kell jegyezni, hogy az újépítésű házakat valószínűleg korszerű fűtési berendezésekkel láthatták el, amelyek mindamelllett, hogy magasabb hatásfok érhető el, levegőterhelése is alacsonyabb. A feltételezett levegőterhelés

növekedéséhez a lakosságszámmal valószínűleg együtt növekvő személygépjármű állomány is hozzájárulhat.

Budapesthez való közelségének meghatározó szerepe van a város közlekedési forgalmában. Pécelt keleti irányból az M0-ás autópálya határolja, déli irányból pedig a 31-es autót. 2022-ben az M0 autópálya átlagos napi forgalma 87 946 egységjármű/nap volt a Pécel mellett található 50+653 kilométerszelvényen (*Magyar Közút, 2022*). Feltételezem, hogy az autópálya közelsége és elhelyezkedése hatást gyakorol Pécel levegőminőségére. Erre a feltételezésre területen jellemző északnyugati, nyugati szélirány enged következtetni, amely a keleti a város keleti oldalán elhelyezkedő M0-ás autópálya kibocsátását Pécel felé szállíthatja [20]. A városon keresztül fut a Budapest-Hatvan vasútvonal. A kiépített felsővezeték hálózatnak köszönhetően a vonalon közlekedő vonatok jelentős része villanymozdony, amelynek nincsen légszennyező anyag kibocsátása.

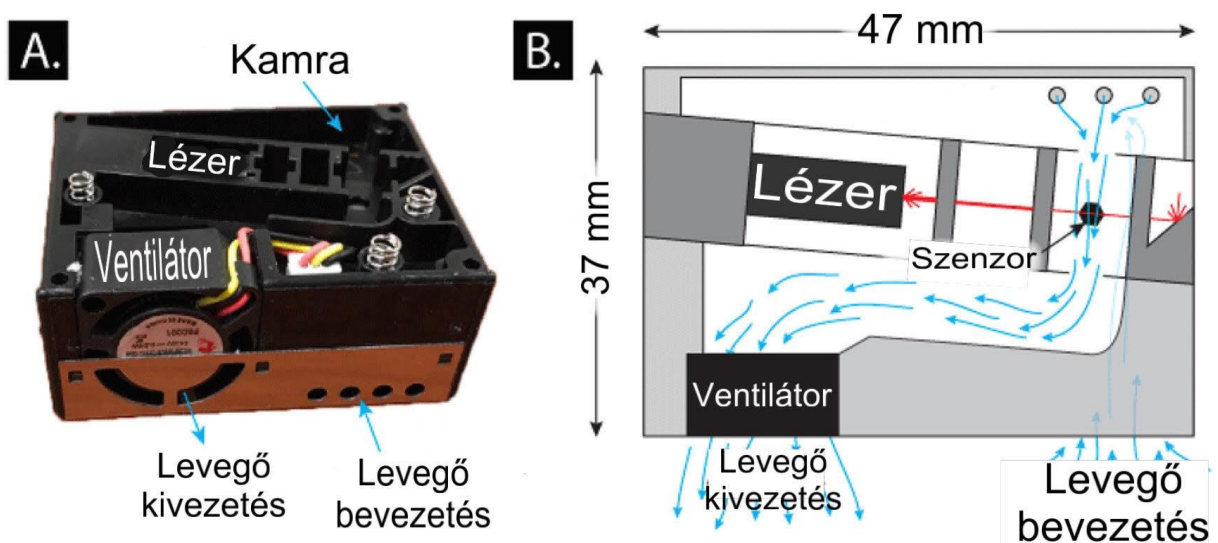
Pécel a *légszennyezettségi agglomerációk és zónák kijelöléséről* szóló 4/2002. (X. 7.) KvVM rendelet alapján az 1. számú Budapest és környéke zónacsoportba lett besorolva [21]. A rendelet jelöli ki Magyarországon azokat a területeket, amelyekre vonatkoztatva kell meghatározni a légszennyező anyagok koncentrációját, illetve a mérőpontok számát [22]. A rendelet alapján Pécel a PM₁₀ tekintetében a B zónacsoportba lett besorolva. Ennek alapján a PM₁₀ koncentrációra meghaladja a vonatkozó határértéket és a túrértéket a területen.

A település területén nem üzemel légszennyezettség mérőállomás, a legközelebb található két mérőállomást Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat üzemelteti Budapest X. kerületében található Gergely utcában és a XVIII. kerületben található Gilice téren. Korábban, 2011. április 11-15. között a KVI-Plusz Kft. végzett légszennyezettség mérést mobil mérőállomással. A mért adatok alapján a PM₁₀ szálló por átlagos koncentrációja 14,8 µg/m³, míg a maximális koncentrációja 19,6 µg/m³ volt, így a mért értékek nem haladják meg a 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben meghatározott határértéket [23].

2.2. Az alkalmazott mérőműszer

A szálló por tömegkoncentráció méréséhez egy alacsony költségű mérőműszert használtam. A műszerben egy optikai elven alapuló lézersugár szóródás mérő szenzor (Plantower PMS 7003) található. A szenzor ventilátor segítségével egy érzékelő kamrán keresztül áramoltatja át a környezeti levegőt. A kamrán átáramló levegő 680 nm-es fénysugárral van megvilágítva. Ha a fénysugár útjába egy részecske kerül, akkor a fény szóródni fog a részecske felületéről. Ezt a

szóródó fényt egy fotodióda érzékeli és azt elektromos jellé alakítja át. A fényszóródás növekedése arányos a beérkező részecskék számával. A fotodióda a szóródott fényt által generált elektromos jelekből a szenzor képes meghatározni a rajta áthaladó részecskeszámot, amelyet aztán a gyártó által meghatározott algoritmus segítségével tömegkoncentrációvá alakít. A részecskék fényszórása különböző tartományokba esik, így a szenzor képes meghatározni a PM₁, PM_{2,5} és a PM₁₀ frakciók tömegkoncentrációját (Jiang et al., 2021; Sayahi et al., 2019) A szenzor gyártója szerint a PMS 7003 képes érzékelni a 0,3 µm és 10 µm mérettartomány közé eső részecskéket ±15%-os pontossággal 0 és 999 µg/m³ koncentráción belül.

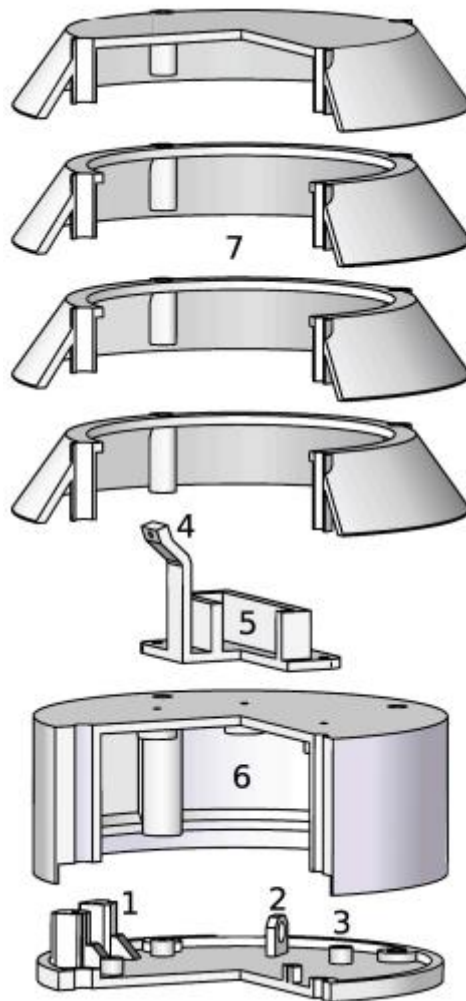


9. ábra: (A) Plantower PMS 7003 és (B) sematikus rajza (forrás: Sayahi et al., 2019)

A szálló por mérő berendezés tartalmazott egy Bosch BME680 típusú páratartalom, hőmérséklet és légnyomásmérő szenzort is. A relatív páratartalom hatással van a részecskék méreteloszlására és ezáltal az aerodinamikai tulajdonságaira is. A higroszkópos részecskék képesek a levegő páratartalmából felszívni a nedvességet, illetve a részecskék felületén kondenzálódhat a víz, ez pedig megváltoztatja a részecske méretét. A bekövetkező méretváltozás befolyásolja a részecske ülepedését (Peng et al., 2018). A páratartalom mérő szenzor segítségével biztosítani lehet a korábban bemutatott optikai szálló por mérő szenzor mérési eredményeinek megbízhatóságát.

A mért adatok gyűjtését és tárolását egy Raspberry Pi 3 egykártyás számítógép végezte. A számítógép egy GSM-modul segítségével az adatokat GSM-hálózaton keresztül képes volt továbbítani, ezzel lehetővé téve a távoli hozzáférést.

Az említett szenzorok, adattároló és továbbító eszközök egy szellőzőjáratokkal ellátott műanyag tokba kerültek beépítésre.



10. ábra: A szálló por mérőműszer sematikus rajza. 1 - GSM modul foglalata. 2 - Antenna foglalata. 3 - Raspberry Pi 3 egylapkás számítógép foglalata. 4 - Bosch BME 680 páratartalom mérő foglalata. 5 - Plantower PMS 7003 szálló por szenzor foglalata. 6 – Adattároló és továbbító készüléket lezáró burkolat. 7 – Levegő ki- és beáramlását lehetővé tévő burkolat. (forrás: Báthory et al., 2021)

2.3. Kalibráció és mérés

A műszer kalibrálása a Miskolci Egyetem laboratóriumában történt. Fontos megjegyezni, hogy az említett laboratórium nem rendelkezik a kalibrálás elvégzéséhez szükséges akkreditációval, továbbá a Levegőtisztaság-védelmi Referencia Központ által kiadott típusjóváhagyási igazolással sem rendelkezik, így a mérési eredmények nem szabványosak [24].

A kalibrálás során referenciaeszközként egy TSI DustTrak 854 301-M1 típusú aeroszol monitort használtak. A referenciaeszköz az érvényes szabályozásnak megfelelően kalibrált és

akkreditált volt. A kalibrálás klímakamrában (FRM-600-S) történt. A kalibrálás a klímakamrában referenciaeszközhöz képest szabályozott hőmérséklet és páratartalom mellett, 25°C-on és 50%-os relatív páratartalom mellett történt. A kalibráláshoz kormot használtak, amit izobutilén lánggal állítottak elő. A kormot szabályozott sebességű ventilátorokkal juttatták a klímakamrába, ahol a belső légcirkuláció biztosította a szemcsék homogén eloszlását. A kalibráláshoz percenkénti átlagokat használtak. A várható kalibrációs hiba körülbelül 3-4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ vagy 17-18%-os relatív hibának megfelelő (Báthory et al., 2021).

A Pécelen elhelyezett szálló por mérő berendezés 2022. december 1. és 2023. augusztus 31. között mérte a koncentráció értékeket. A berendezés úgy volt beállítva, hogy 6 percig mért perces átlagértékeket, majd ezt követően 5 percig nem mért. Ezzel a beállítással minden órában 35 darab perces átlagérték állt rendelkezésemre. Mielőtt a perces átlagértékeket átlagoltam volna órás átlagértékekre, majd az órás átlagértéket 24 órás átlagértékekre, előtte elvégeztem egy adatszűrést, melynek célja az volt, hogy kiszűrjem a kiugró értékeket. Mivel a mérőberendezés kertes lakóövezetben volt elhelyezve, ezért előfordult olyan eset, hogy a szomszédos lakóépületektől a szilárd tüzelésből származó füst pont a berendezés környezetébe szállt. Az ilyen esetek az adatsorban egyik percről a másik akár 3-4-szeres koncentráció növekedést eredményeztek 1-5 percig a perces átlagértékekben, majd ezt követően a perces átlagértékek visszatértek a füst okozta koncentrációnövekedés előtti szintre. Az ilyen anomáliák kiszűrése azért volt indokolt, mivel órás átlagszámítás esetén a valósnál magasabb átlagokat eredményezett volna.

A kiugró értékek meghatározására először dobozdiagrammot, más néven box plot-ot készítettem. Itt meghatároztam az alsó kvartilist (Q1) és a felső kvartilist (Q3), ezt követően pedig interkvartilis terjedelmet (IQR) számoltam.

Alsó kvartilis (Q1): a rendezett adatsornak az az értéke, amelynél az adatsor értékeinek negyede kisebb és a háromnegyede nagyobb, másképpen megfogalmazva a minimum és a medián közötti értékek mediánja [25].

Felső kvartilis (Q3): a rendezett adatsornak az az értéke, amelynél az adatsor értékeinek háromnegyede kisebb és a negyede nagyobb, azaz a medián és a maximum közötti értékek mediánja [25].

Interkvartilis terjedelem (IQR): a felső kvartilis és az alsó kvartilis értékeinek különbsége ($Q3-Q1$), vagyis az a tartomány, ahol az adatsor értékeinek középső fele található [25].

Ezt követően a felső kvartilisból és az interkvartilis terjedelemből Tukey-kerekítéssel meghatároztam azt a felső határértéket, amely felett egy érték kiugró értéknek tekinthető.

$$Q3+k*(Q3-Q1) \quad (1)$$

Ahol a k egy nem negatív állandó és leggyakrabban 1,5 értéket használnak. Így felső határérték megállapításra az alábbi képletet használtam.

$$Q3+1,5*(Q3-Q1) \quad (2)$$

A dobozdiagramot és Tukey-kerekítést a napi perces értékek alapján számoltam ki, hogy minél pontosabb felső határértéket határozhatok meg. Így minden naphoz kiszámításra került a felső határérték, amivel az adott naphoz tartozó kiugró értékeket határoztam meg.

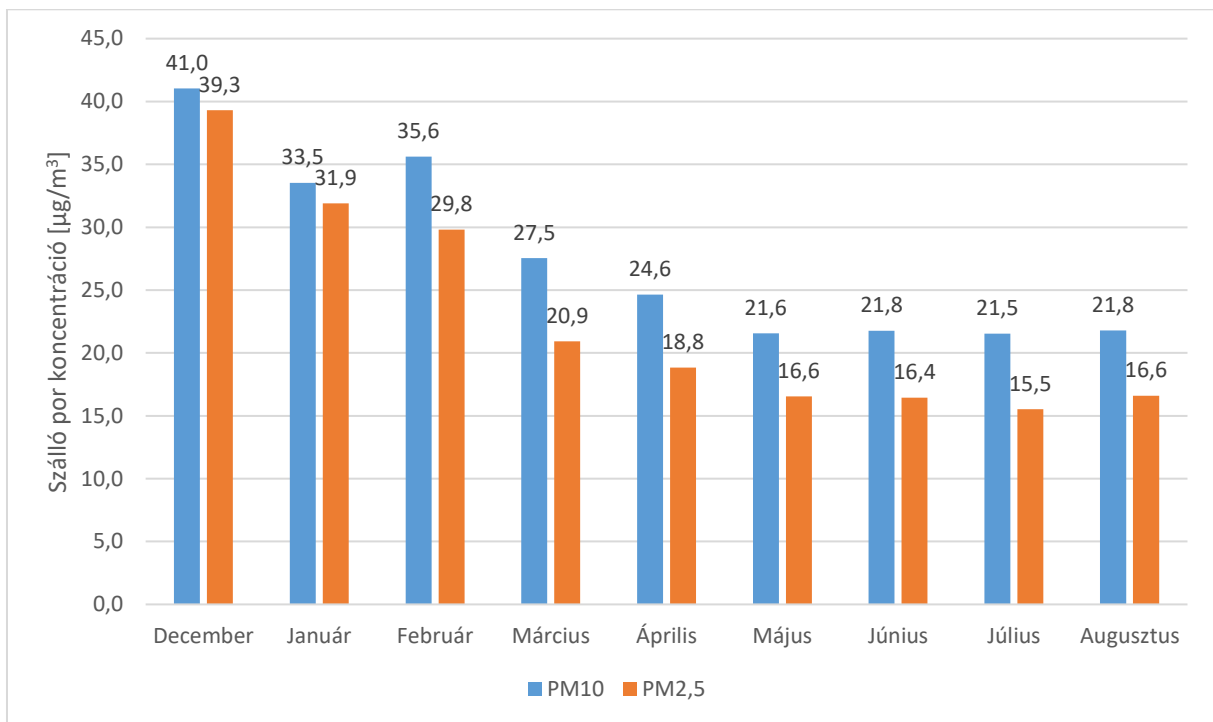
A kiugró értékeket ezt követően töröltem az adatsorból és elvégeztem a perces átlagértékek órára történő, az óras átlagértékek pedig 24 órára történő átlagolását.

2.4. Időjárási adatok

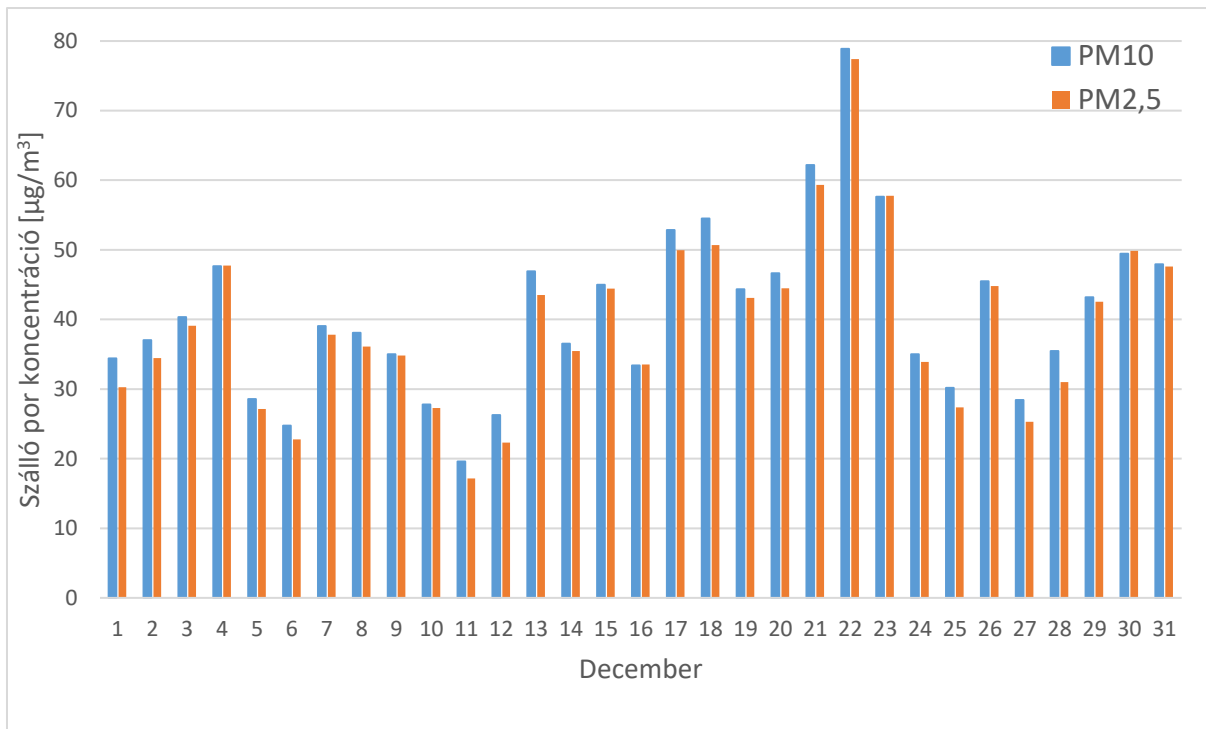
A napi átlag szélesség adatok egy Pécelen üzemelő meteorológiai mérőállomásról származnak, ezeket az adatokat dr. Kadocsa Emese bocsátotta rendelkezésemre. Az átlag szélesség adatokat a péceli és a közeli mérőállomások adataival történő összevetés során használtam fel, hogy láthatóvá váljon a szálló por koncentrációváltozási trendek és a légmozgás közötti összefüggés.

3. Mérési eredmények bemutatása

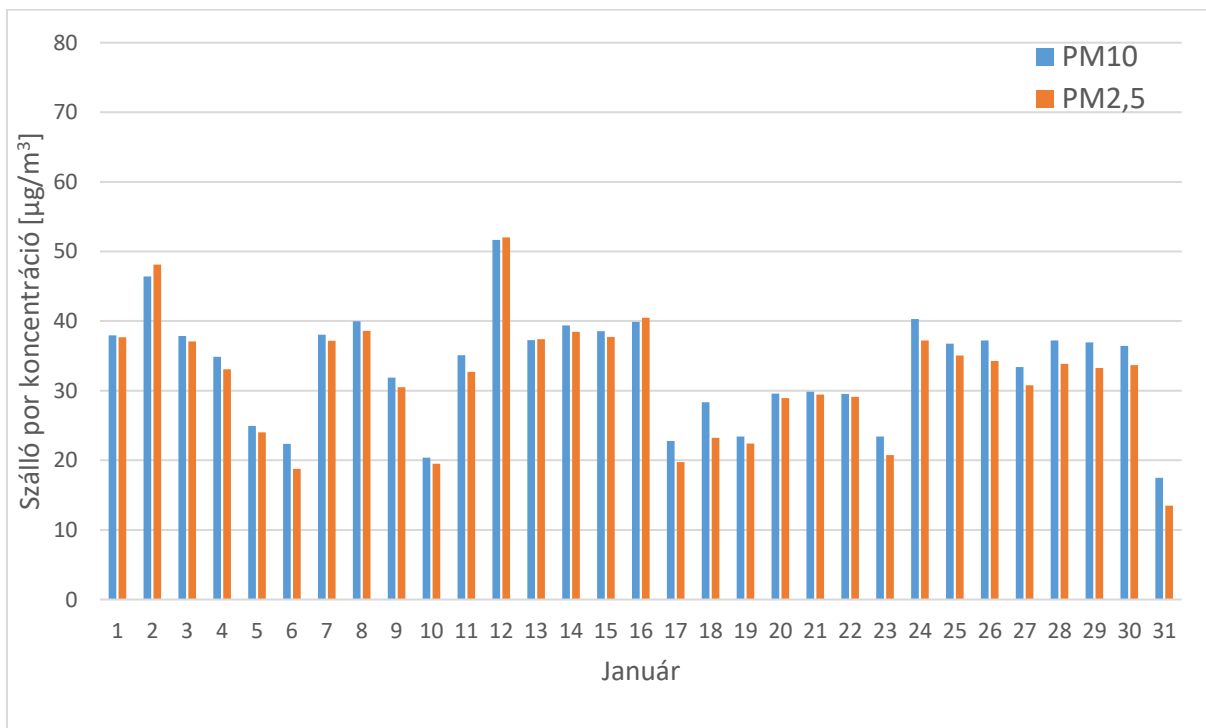
A mintavételi ponton elvégzett szálló por (PM_{10} és $PM_{2,5}$) koncentráció mérési eredményeit a következő ábrákon mutatom be. A 11. ábra a 9 hónapig tartó mérési időszak havi átlagos szálló por koncentráció eredményeit mutatja be a PM_{10} , illetve a $PM_{2,5}$ vonatkozásában. A 12-20. ábra a 24 órás átlagokat mutatja be havi bontásban a PM_{10} illetve a $PM_{2,5}$ frakcióra vonatkozóan.



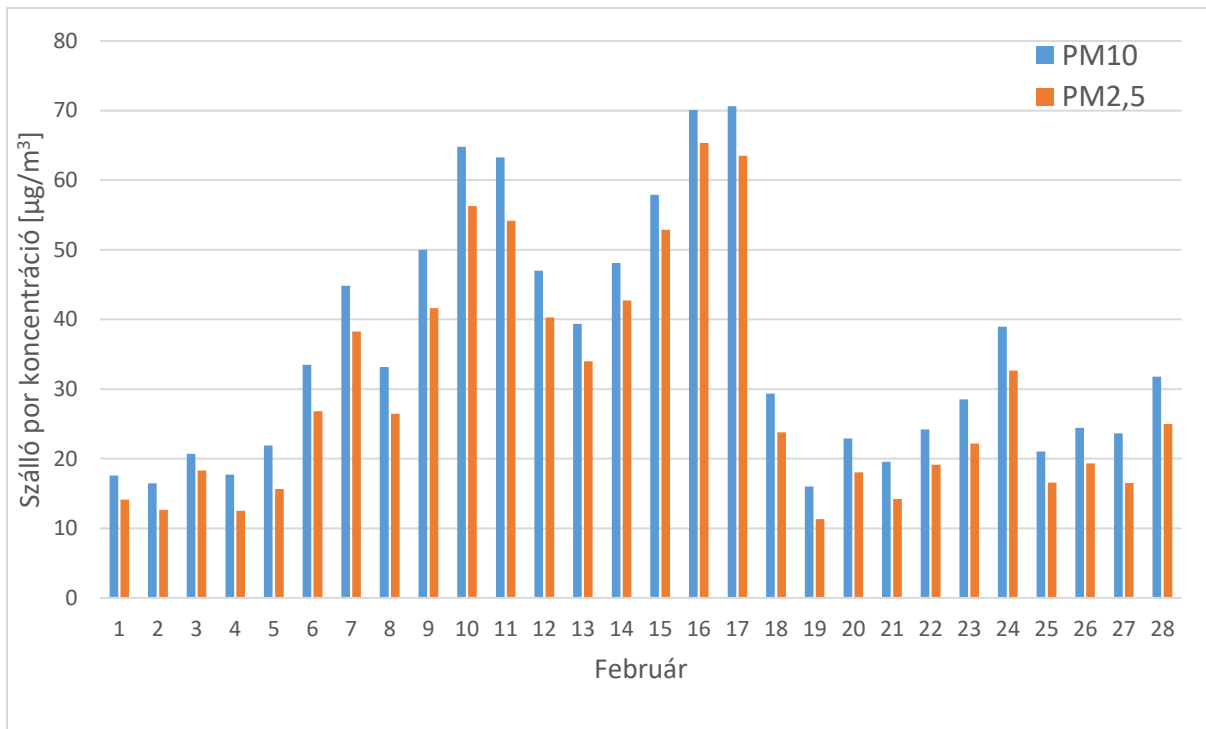
11. ábra: 2022. december és 2023. augusztus közötti havi átlagos szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásban (saját ábra)



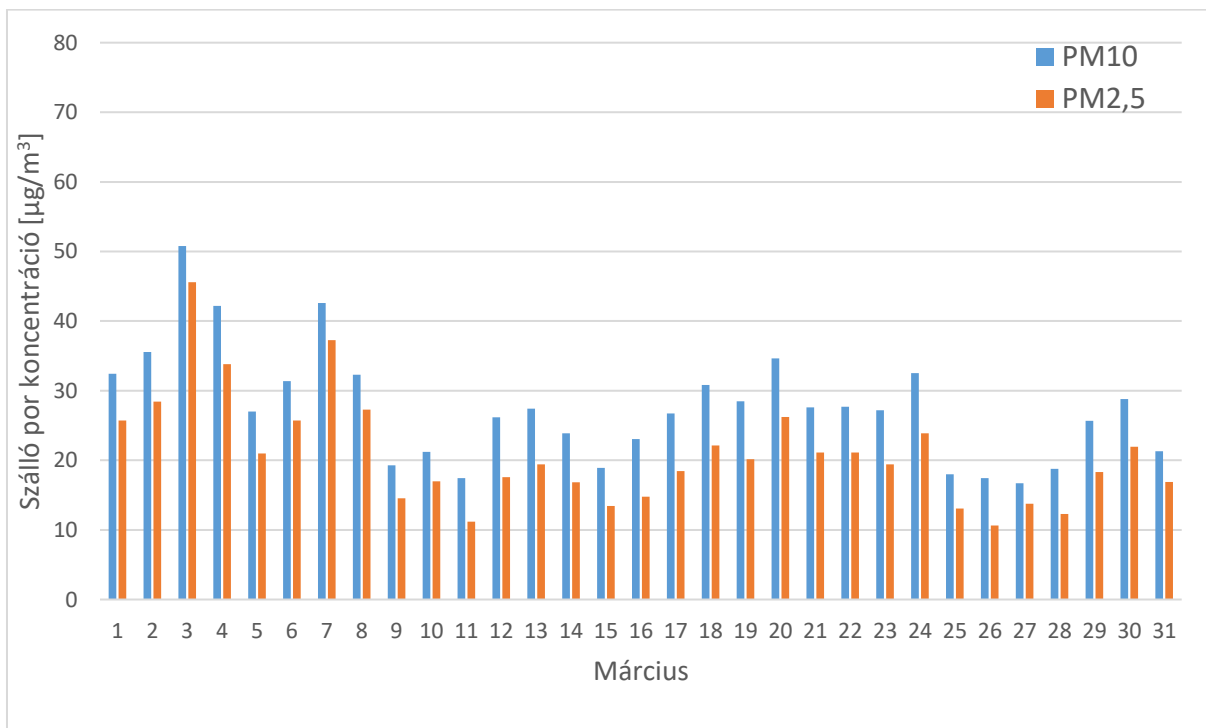
12. ábra: 2022. decemberi átlagos napi szálló por koncentráció PM₁₀ és PM_{2,5} vonatkozásában (saját ábra)



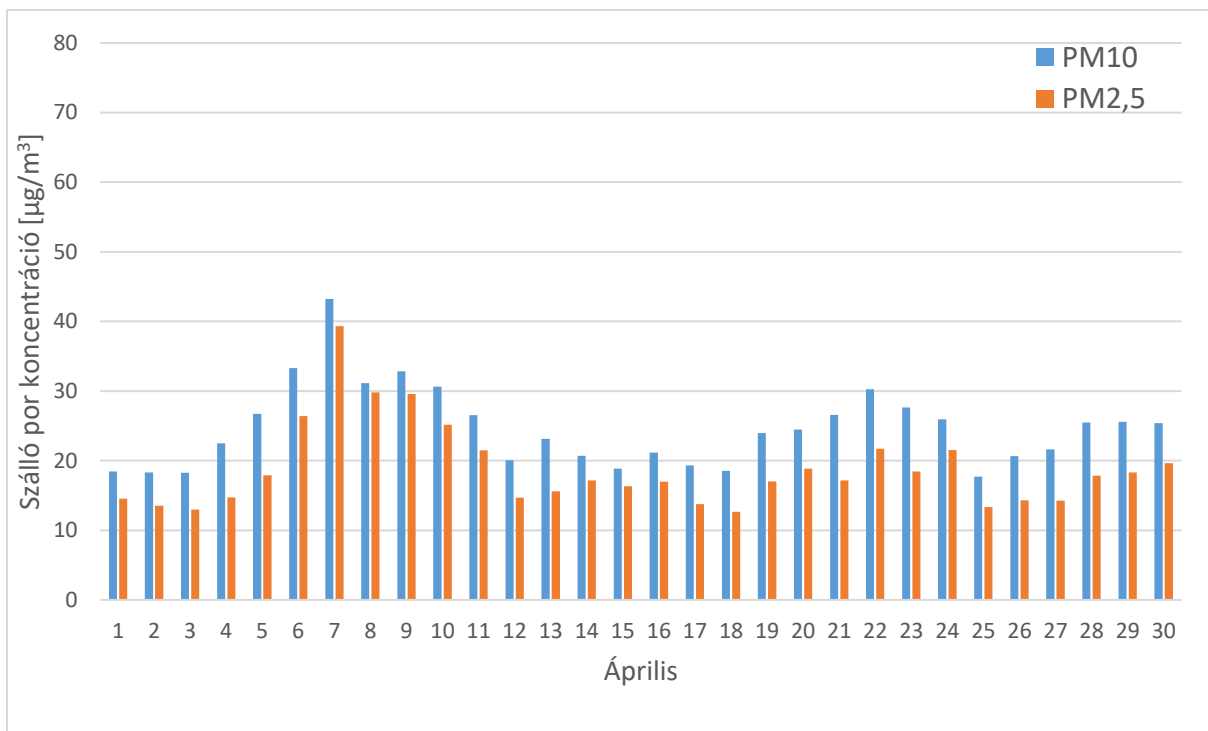
13. ábra: 2023. januári átlagos napi szálló por koncentráció PM₁₀ és PM_{2,5} vonatkozásában (saját ábra)



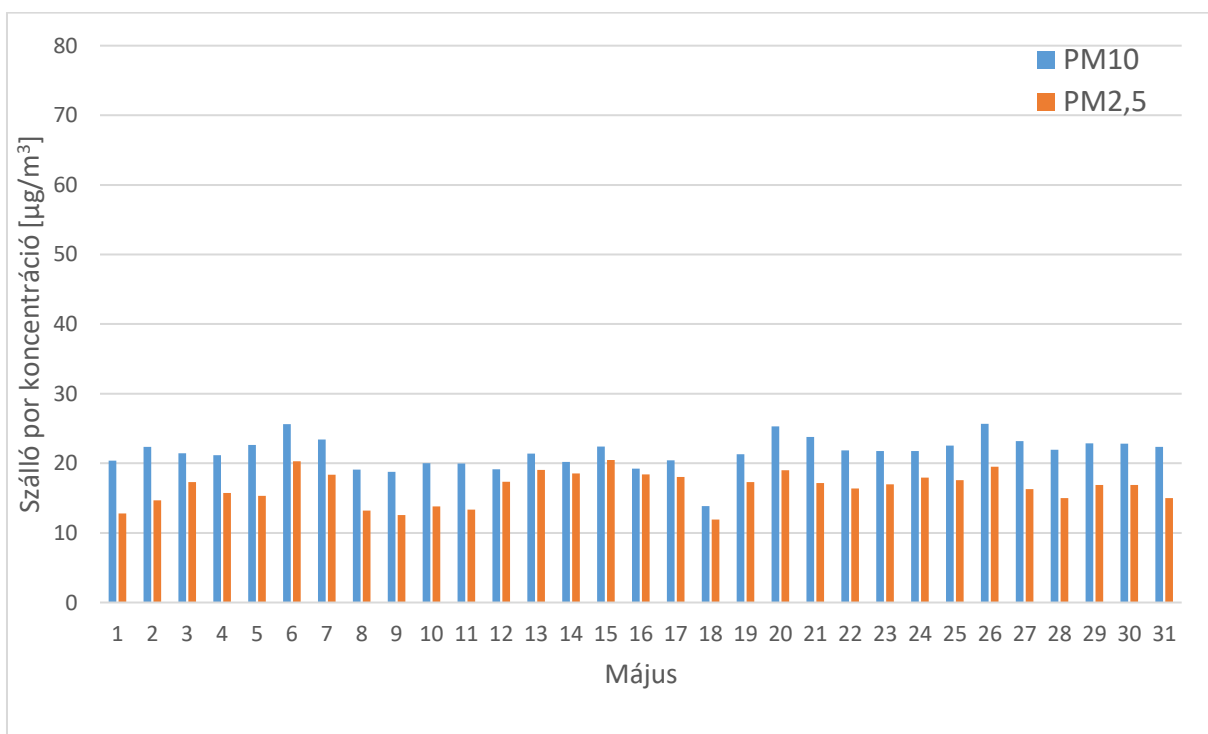
14. ábra: 2023. februári átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)



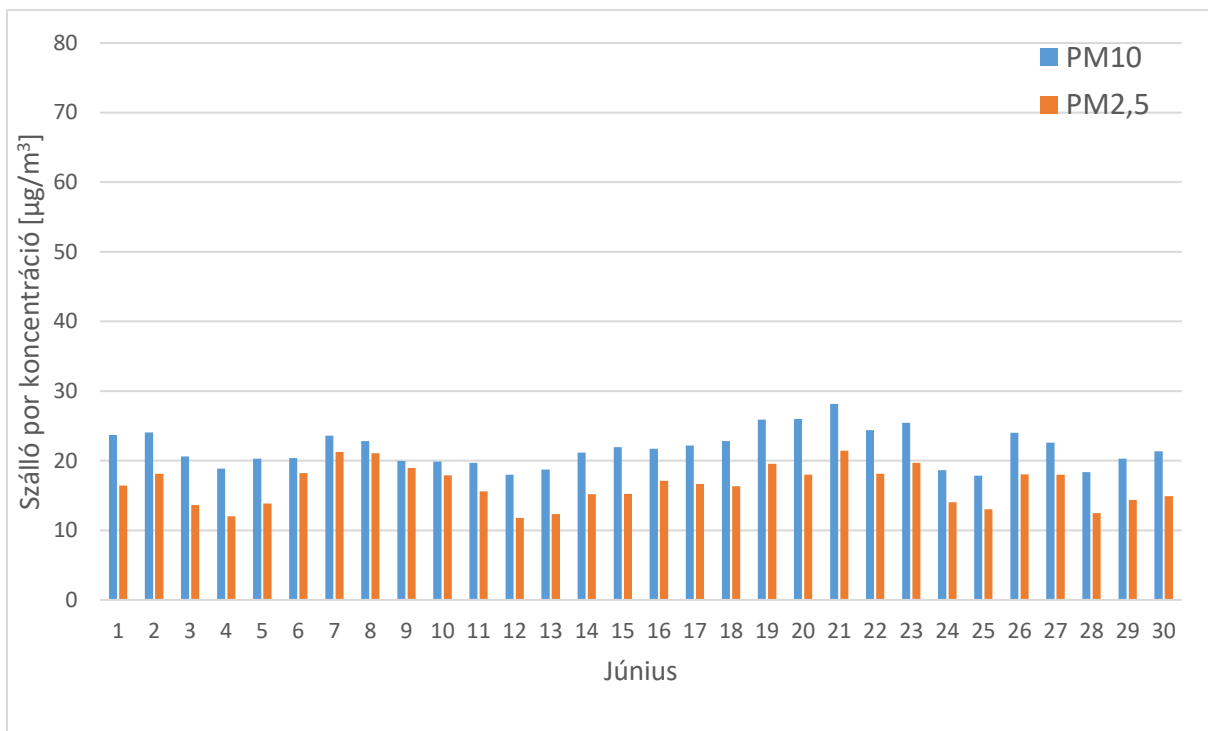
15. ábra: 2023. márciusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)



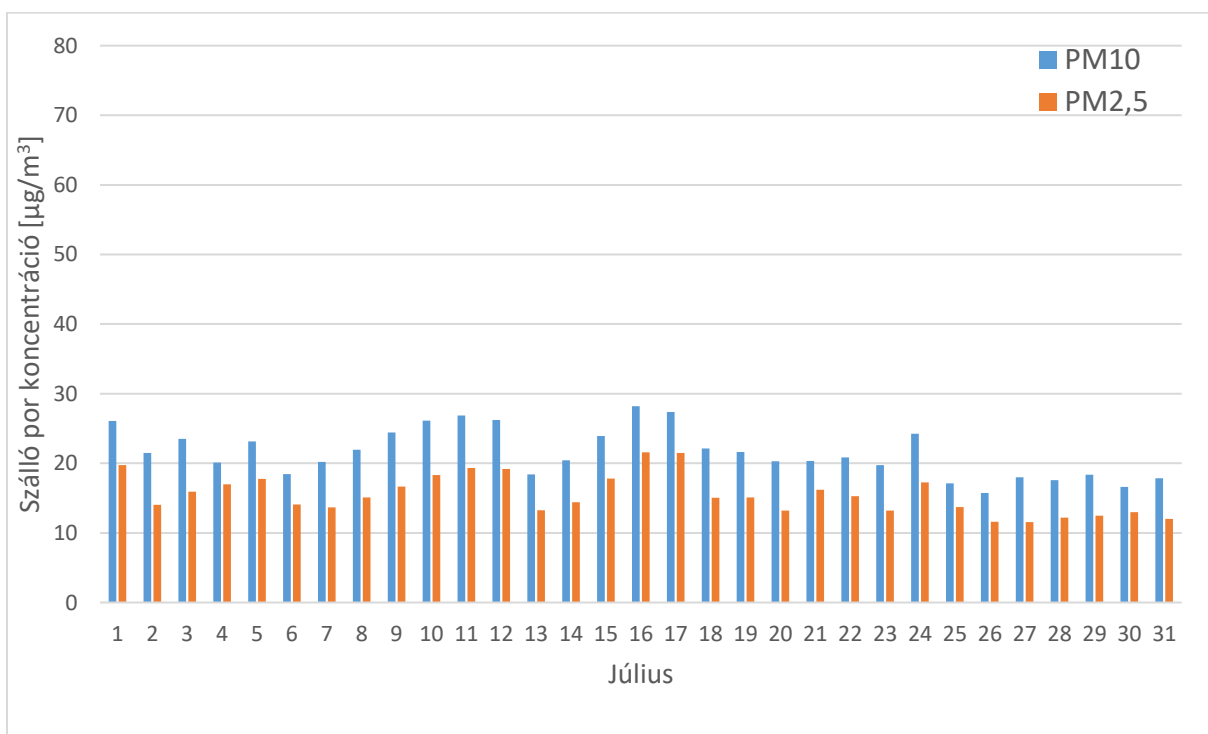
16. ábra: 2023. áprilisi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)



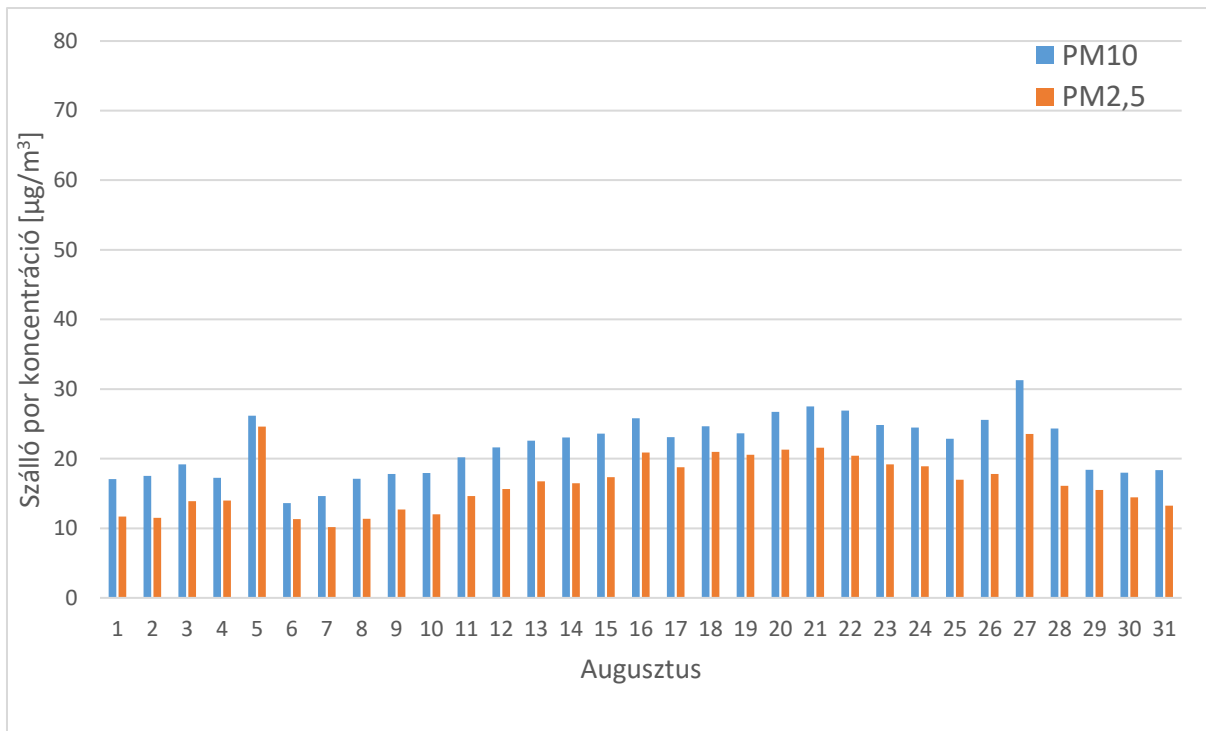
17. ábra: 2023. májusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)



18. ábra: 2023. júniusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)



19. ábra: 2023. júliusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)



20. ábra: 2023. augusztusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában (saját ábra)

4. Mérési eredmények értékelése

A bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy Pécel város kertés lakóövezetben elhelyezett mérési ponton mért PM₁₀ frakciójú szálló por éves átlagos koncentrációja 27,7 µg/m³. A szálló por PM₁₀ frakció éves átlagos koncentrációja a mérési ponton kisebb, mint a vonatkozó 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben meghatározott éves 40 µg/m³ határérték. A mért éves átlagos koncentráció alapján megállapítható, hogy a levegő minősége a levegőminőségi index szerint a PM₁₀ frakciójú szálló por tekintetében jónak tekinthető, mivel a mért 27,7 µg/m³ koncentráció a 2. terhelési index 20-40 µg/m³ tartománya közé esik. Továbbá megállapítható, hogy a mintavételi ponton a 2022. december 1. és 2023. augusztus 30. közötti mérési időszakban 13 olyan nap volt, amikor a mért érték átlépte a 24 órás légszennyezettségi egészségügyi határértéket (50 µg/m³). A legtöbb 24 órás egészségügyi határérték túllépés februárban (6) és decemberben (5) történt, illetve a legmagasabb havi átlagkoncentrációt is ezekben a hónapokban mértem a PM₁₀ frakció esetében.

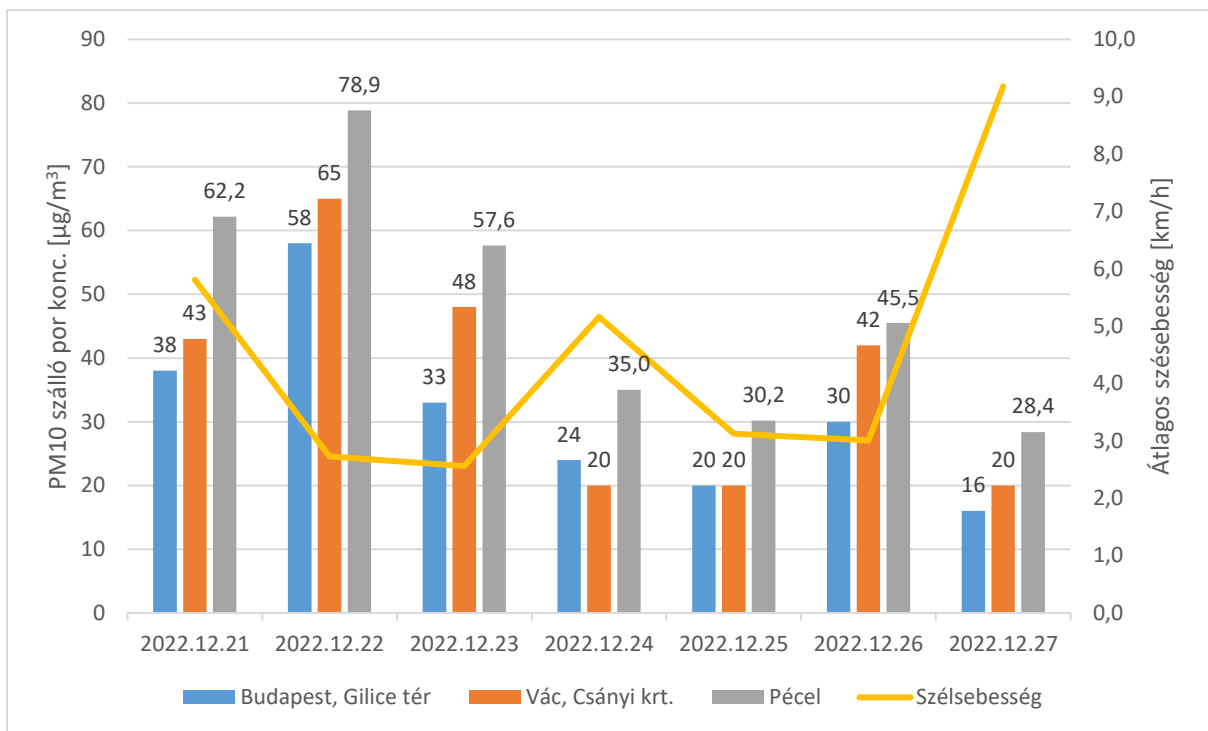
A mérési eredményekből megállapítható, hogy a szálló por PM_{2,5} frakciójának éves átlagos koncentrációja 22,9 µg/m³. Ez az érték meghaladja az Európai Parlament által meghatározott, 2020. január 1-től érvényes 20 µg/m³ határértéket. A mért éves átlagos koncentráció alapján megállapítható, hogy a levegő minősége a levegőminőségi index szerint a PM_{2,5} frakciójú szálló por tekintetében megfelelőnek tekinthető, mivel a mért 22,9 µg/m³ koncentráció a 3. terhelési index 20-25 µg/m³ tartománya közé esik.

A 11. ábrán megfigyelhető, hogy a téli hónapokban kisebb a PM₁₀ és PM_{2,5} frakció közötti koncentráció különbség, mint a tavaszi és nyári hónapokban. Ebből az feltételezhető, hogy a téli, fűtési eredetű szálló por kibocsátással terhelt időszakban az égés során közel azonos arányban keletkezik PM₁₀ és PM_{2,5} frakciójú szálló por. A tavaszi és nyári időszakban - amikor a fűtési eredetű szálló por kibocsátással nem kell számolni - az említett két frakció koncentrációja közötti különbség nagyobb. Ebből megállapítható, hogy a PM_{2,5} frakciójú szálló por szennyezés leginkább a fűtésből adódó kibocsátásnak tudható be.

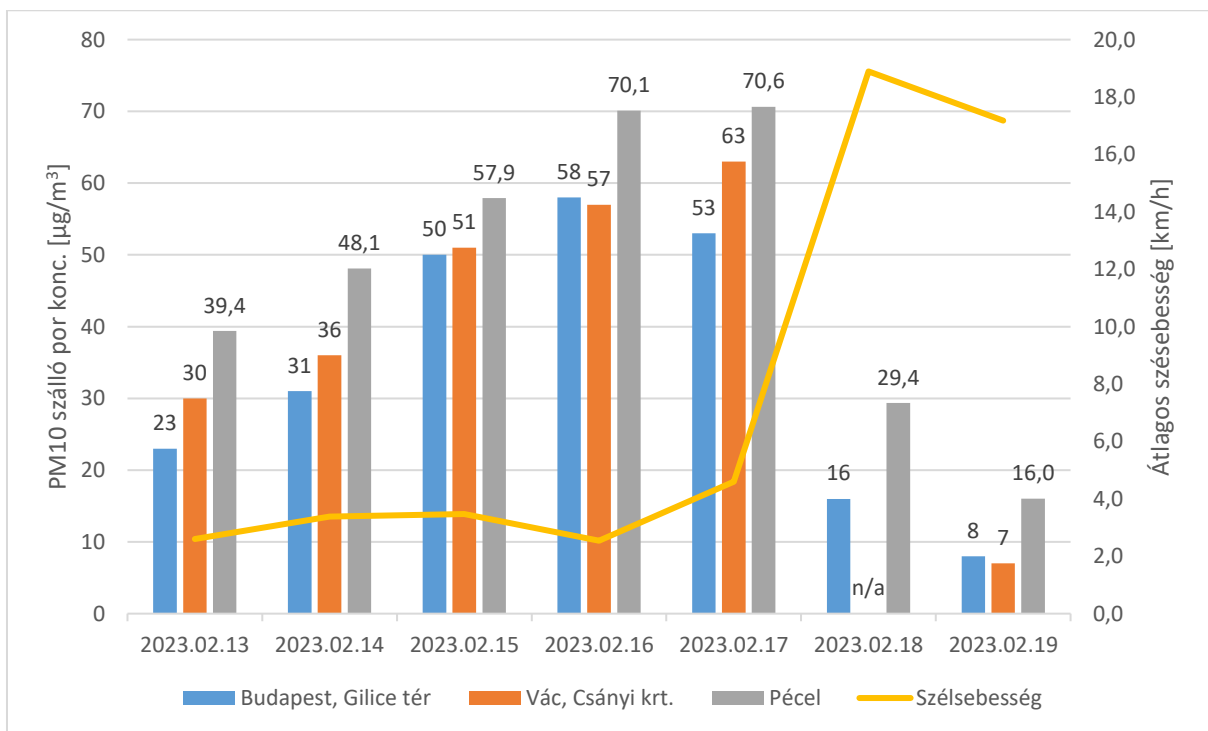
10. táblázat: PM₁₀ és PM_{2,5} szálló por havi koncentrációjának különbsége (saját táblázat)

Hónap	December	Január	Február	Március	Április	Május	Június	Július	Augusztus
Koncentrációkülönbség [%]	4,4	5,1	19,6	31,6	30,8	30,3	32,4	38,7	31,4

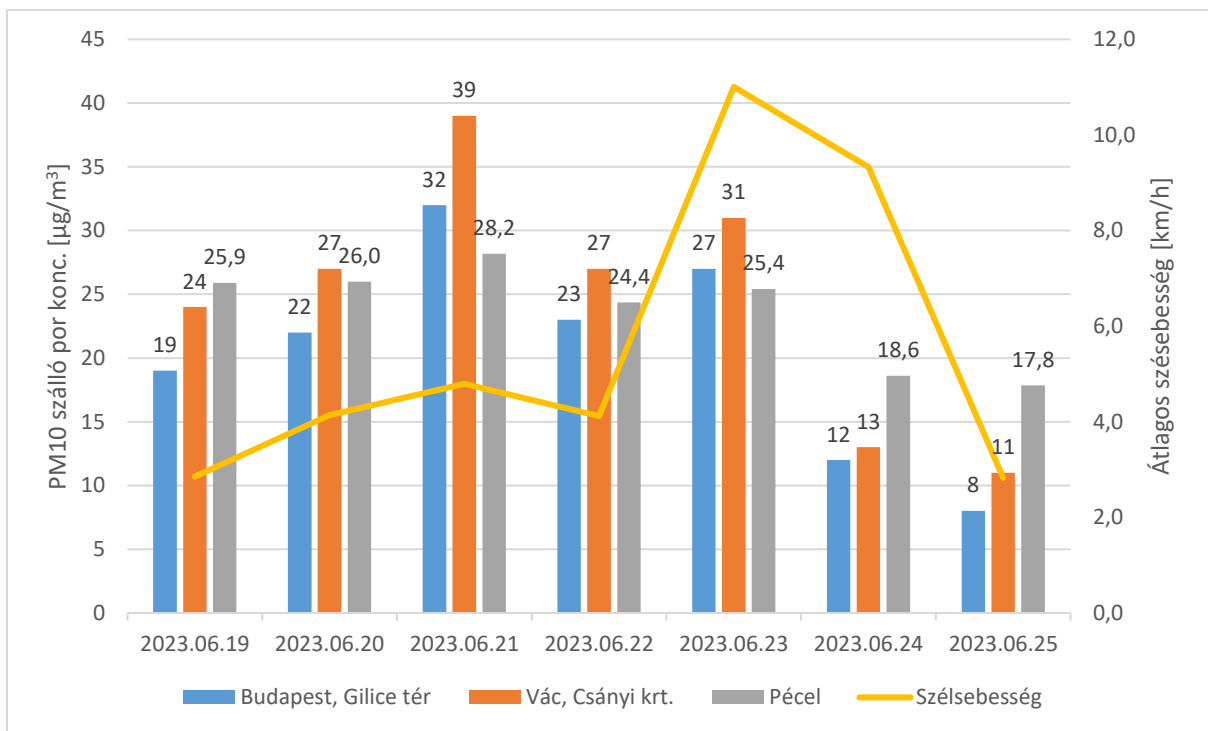
Ahogy a bemutatott ábrákon is látható, a szálló por gyorsan, 1-2 nap alatt képes nagy koncentrációváltozásokat mutatni, különösen igaz ez a téli napokra. Mivel célkitűzéseim között szerepelt annak bizonyítása, hogy a szálló por szennyezettség nem csak lokális, hanem regionális szintű probléma, ezért célszerűnek tartom a mérési eredményeimet a mérési pontomhoz legközelebb eső automata légszennyezettség mérő állomások mérési adataival összevetni. Az összevetés során a mérési pontomhoz legközelebb eső két automata légszennyezettség mérő állomás Budapest X. kerületében található Gergely utcában és a XVIII. kerületben található Gilice téren üzemel. Továbbá mérési adataimat összevettem a Vácon üzemeltetett – mérési helyszínhez hasonlóan Budapest agglomerációjában található – állomás mérési eredményeivel. Az összevetés során figyelembe veszem és ábrázolom az adott napra Pécelen jellemző átlagos szélességet.



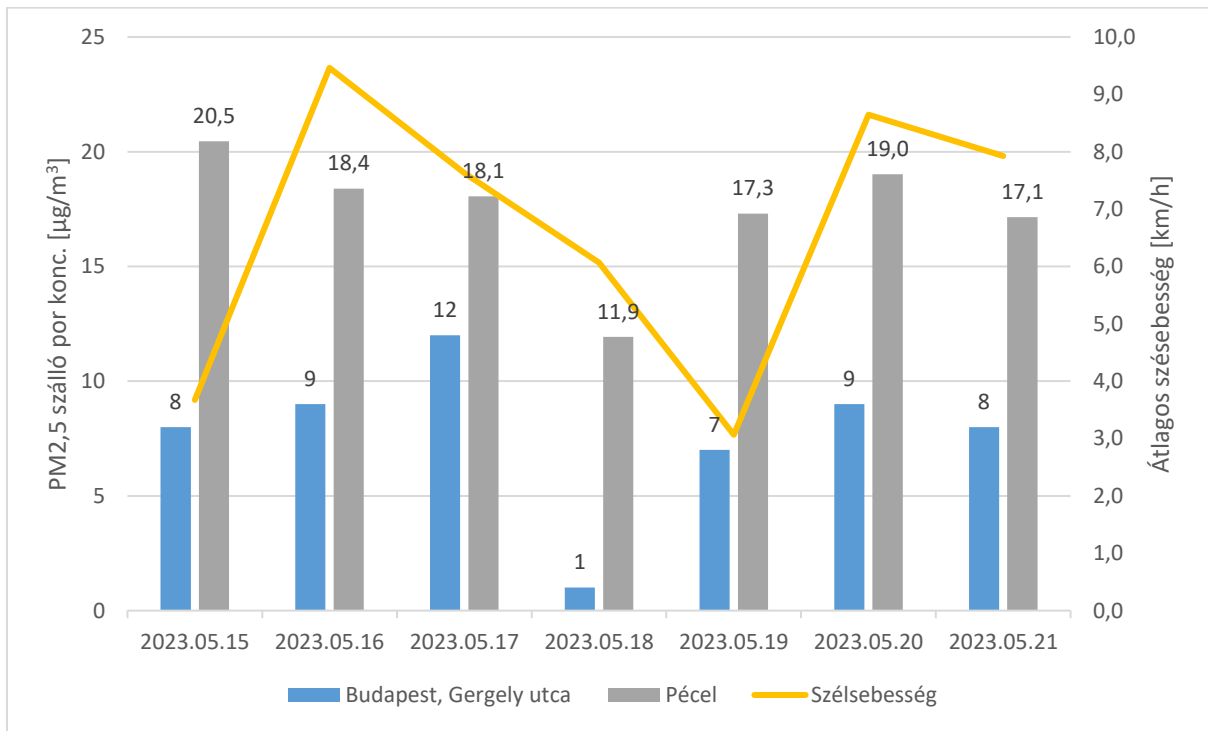
21. ábra: A Pécelen mért PM₁₀ szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gilice téri és Vác, Csányi körüti mérési eredményekkel 2022. december 21-27. között (saját ábra)



22. ábra: A Pécelen mért PM₁₀ szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gilice téri és Vác, Csányi körüti mérési eredményekkel 2023. február 13-19. között (saját ábra)



23. ábra: A Pécelen mért PM₁₀ szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gilice téri és Vác, Csányi körüti mérési eredményekkel 2023. június 19-25. között (saját ábra)



24. ábra: A Pécelen mért PM_{2,5} szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gergely utcai mérési eredményekkel 2023. június 19-25. között (saját ábra)

A PM_{10} frakciójú szálló por koncentrációját más mérőállomások mérési adataival bemutató és összevető *21-23. ábrákon* a 24 órás átlagok nagyságrendi és a koncentráció változási trendek tekintetében hasonlóság fedezhető fel. Ez alátámasztja azt a megállapítást, hogy a szálló por okozta levegőszennyezés nem csak lokális, hanem regionális szintű probléma. Látható, hogy a napi átlag szélsőérték mindegyik bemutatott mérési helyszínen hatással volt a koncentráció nagyságrendekre és változási trendekre. Megfigyelhető, hogy a Pécelen mért 24 órás PM_{10} frakciójú szálló por koncentrációk kisebb eltérést mutatnak a Péceltől távolabb (36 km) elhelyezkedő Vác, Csányi körúton található automata mérési adataihoz képest, mint a Budapest, Gilice téren található automata mérőállomás adataihoz képest, amely Pécelhez közelebb (13,7 km) helyezkedik el. Ennek egyik oka az lehet, hogy Vácon és Pécelen valószínűleg több háztartásban fűtenek szilárd tüzelőanyagokkal, mint Budapesten, ahol jellemzőbb a földgáz és távhő alapú fűtés. Ezt a megállapítást az is alátámasztja, hogy a *23. ábrán* bemutatott nyári időszakban, amikor a fűtésből származó szálló por kibocsátással nem kell számolni, kisebb a szálló por koncentráció különbség átlaga (31,5%) a Budapest, Gilice téri automata mérőállomás mérési adataihoz képest, mint *21. ábrán* (57,2%) és a *22. ábrán* (54,3%) bemutatott téli időszakban.

A *24. ábrán* a 24 órás $PM_{2,5}$ koncentrációban jelentős (átlagosan 253,7%) eltérés figyelhető meg, így ebből arra lehet következtetni, hogy a $PM_{2,5}$ frakciójú szálló por koncentrációját sokkal inkább befolyásolják a lokális, mint regionális hatások és kibocsátások.

5. Következtetések és javaslatok

5.1. Következtetések a mérési eredmények alapján

A bemutatott és összevetett mérési eredmények alapján az alábbi következtetéseket lehet megfogalmazni.

- Pécel város kertés lakóövezetben elhelyezett mérési ponton mért PM₁₀ frakciójú szálló por éves átlagos koncentrációja 27,7 µg/m³. A szálló por PM₁₀ frakcióra vonatkozó éves átlagos koncentrációja a mérési ponton kisebb, mint a vonatkozó 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben meghatározott éves 40 µg/m³ határértéket. A mért éves átlagos koncentráció alapján megállapítható, hogy a levegő minősége a levegőminőségi index szerint a PM₁₀ frakciójú szálló por tekintetében jónak tekinthető, mivel a mért 27,7 µg/m³ koncentráció a 2. terhelési index 20-40 µg/m³ tartománya közé esik.
- Megállapítható, hogy a mintavételi ponton a 2022. december 1. és 2023. augusztus 30. közötti mérési időszakban 13 olyan nap volt, amikor a mért érték átlépte a 24 órás légszennyezettségi egészségügyi határértéket (50 µg/m³). A legtöbb 24 órás egészségügyi határérték túllépés februárban (6) és decemberben (5) történt, illetve ezekben a hónapokban volt a legmagasabb havi átlagkoncentrációt a PM₁₀ frakció esetében.
- Megállapítható, hogy a szálló por PM_{2,5} frakciójának éves átlagos koncentrációja 22,9 µg/m³. Ez az érték meghaladja az Európai Parlament által meghatározott, 2020. január 1-től érvényes 20 µg/m³ határértéket. A mért éves átlagos koncentráció alapján megállapítható, hogy a levegő minősége a levegőminőségi index szerint a PM_{2,5} frakciójú szálló por tekintetében megfelelőnek tekinthető, mivel a mért 22,9 µg/m³ koncentráció a 3. terhelési index 20-25 µg/m³ tartománya közé esik.
- A téli hónapokban kisebb a PM₁₀ és PM_{2,5} frakció közötti koncentráció különbség, mint a tavaszi és nyári hónapokban. Ebből az feltételezhető, hogy a téli, fűtési eredetű szálló por kibocsátással terhelt időszakban az égés során közel azonos arányban keletkezik PM₁₀ és PM_{2,5} frakciójú szálló por. A tavaszi és nyári időszakban - amikor a fűtési eredetű szálló por kibocsátással nem kell számolni - az említett két frakció koncentrációja közötti különbség nagyobb. Ebből megállapítható, hogy a PM_{2,5} frakciójú szálló por szennyezés leginkább a fűtésből adódó kibocsátásnak tudható be.

- A PM₁₀ frakciójú szálló por koncentrációját más mérőállomások mérési adataival bemutató és összevető 21-23. ábrákon a 24 órás átlagok nagyságrendi és a koncentráció változási trendek tekintetében hasonlóság fedezhető fel. Ez alátámasztja azt a megállapítást, hogy a szálló por okozta levegőszennyezés nem csak lokális, hanem regionális szintű probléma.
- A napi átlag szélesség mindegyik bemutatott mérési helyszínen hatással volt a koncentráció nagyságrendekre és változási trendekre.
- Megfigyelhető, hogy a Pécelen mért 24 órás PM₁₀ frakciójú szálló por koncentrációk kisebb eltérést mutatnak a Péceltől távolabb (36 km) elhelyezkedő Vác, Csányi körúton található automata mérési adataihoz képest, mint a Budapest, Gilice téren található automata mérőállomás adataihoz képest, amely Pécelhez közelebb (13,7 km) helyezkedik el. Ennek egyik oka az lehet, hogy Vácon és Pécelen valószínűleg több háztartásban fűtenek szilárd tüzelőanyagokkal, mint Budapesten, ahol jellemzőbb a földgáz és távhő alapú fűtés. A megállapítást az is alátámasztja, hogy a 23. ábrán bemutatott nyári időszakban, amikor a fűtésből származó szálló por kibocsátással nem kell számolni, kisebb a szálló por koncentráció különbség átlaga (31,5%) a Budapest, Gilice téri automata mérőállomás mérési adataihoz képest, mint 21. ábrán (57,2%) és a 22. ábrán (54,3%) bemutatott téli időszakban.
- A 24 órás PM_{2,5} koncentrációban jelentős (átlagosan 253,7%) eltérés figyelhető meg a 24. ábrán, így ebből arra lehet következtetni, hogy a PM_{2,5} frakciójú szálló por koncentrációját sokkal inkább befolyásolják a lokális, mint regionális hatások és kibocsátások.

5.2. Javaslatok

A mérési eredményeim alapján és más automata mérőállomások adataival történő összevetés alapján az alábbi javaslatokat tudom megfogalmazni.

- Célszerűnek tartom a mérésem során felhasznált alacsony költségű szálló por mérőegység telepítését további településekre, illetve egy ilyen rendszerekből álló mérőhálózat létrehozását, hogy pontosabb képet kapjunk az ország szálló por szennyezettségéről. Ezzel együtt javasolt lenne az optikai eleven alapuló szálló por mérőkre mérési szabványt létrehozni, hogy a mért adatok hitelesítettek legyenek.
- Célszerűnek tartom még a jövőben további mérések elvégzését Pécelen egy akkreditált mobil légszennyezettség mérő állomással, hogy hiteles képet kapjunk Pécel város szálló por szennyezettségéről.

Összefoglalás

Szakedolgozatom célkitűzéseként Pécel város szálló por koncentrációjának mérésekkel történő meghatározását és értékelését, illetve a kapott eredmények más mérőállomások eredményeivel történő összevetését tűztem ki célul. Ezzel a célkitűzéssel egy olyan Budapest keleti agglomerációjában található város szálló por szennyezettségét kívántam meghatározni, ahonnan az elmúlt 10 évből nem rendelkezünk adatokkal.

A szakedolgozatom megírása során a témával kapcsolatos szakirodalmakra, kiadványokra és szakportálokra támaszkodva először összefoglaltam a környezeti levegő összetételét és az általános légszennyező anyagokat mutattam be. Ezt követően foglalkoztam a szakedolgozatom fő témájával, a szálló porral. Ennek során összefoglaltam az alapvető tudnivalókat, fizikai és kémiai tulajdonságait, egészségügyi hatását. Foglalkoztam a magyarországi szálló por szennyezettséggel, a vonatkozó nemzetközi és hazai határértékekkel, ajánlásokkal. Továbbá bemutattam az Országos Légszennyezettségi Mérés-hálózatot.

A Pécel város területén a szálló por mérő berendezés olyan helyre lett elhelyezve, ahol a település legnagyobb részére jellemző háttér koncentrációt lehet meghatározni. A mérési időszak 9 hónapig tartott, 2022. december 1-től 2023. augusztus 31-ig. Ez idő alatt a műszer folyamatosan működött és perces átlagértékeket mért a PM_{10} , $PM_{2,5}$ és PM_1 frakciójú szálló porra. A mérési adatok feldolgozása során a PM_{10} és $PM_{2,5}$ frakció esetében meghatároztam azokat a kiugró értékeket, amelyek kiszűrése azért volt indokolt, hogy az átlagok kiszámítása során minél hitelesebb órás és 24 órás átlagokat kapjak. A kiugró értékektől megtisztított eredményeket ezután átlagoltam és diagrammokon ábrázoltam. Az összehasonlítás során a Pécelen és a közeli mérőállomásokon mért 24 órás koncentrációk lefutását és nagyságrendjét vettem össze, melynek során figyelembe vettem a napi átlag szélességet is.

A kapott mérési eredményekből megállapítottam, hogy Pécel levegője PM_{10} frakciójú szálló por éves átlagos koncentrációja $27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, így a levegő minősége a levegőminőségi index szerint a PM_{10} frakció tekintetében jónak tekinthető. A mérési időszak alatt 13 olyan nap volt, amikor a mért érték átlépte az $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -ben meghatározott a 24 órás légszennyezettségi egészségügyi határértéket.

Megállapításra került, hogy a szálló por $PM_{2,5}$ frakciójának éves átlagos koncentrációja $22,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ez az érték meghaladja az Európai Parlament által meghatározott, 2020. január 1-től érvényes $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ határértéket. A levegő minősége a levegőminőségi index szerint a $PM_{2,5}$ frakció tekintetében megfelelőnek tekinthető.

A péceli mérési eredményeket összevettem két budapesti és egy agglomerációban üzemelő automata mérőállomás adataival. Az összehasonlítás során megállapításra került, hogy a PM_{10} frakcióra mért értékek az említett mérési pontokon közel azonos koncentráció trendeket és mennyiségi nagyságrendeket mutatnak. Így megállapítható, hogy a szálló por okozta szennyezés nem csak lokális, hanem regionális szintű probléma.

Irodalomjegyzék

Lutgens K. F. - Tarbuck J. E. - Herman L. R. (2019): The atmosphere: an introduction to meteorology, Fourteenth Edition, ISBN 0-134-75858-7

Géczi G. - Béres A. (2011): Levegőtisztaság-védelem, egyetemi jegyzet, Szent István Egyetemi Kiadó

Fülöp T. - Hanus I. - Molnár K. - Örvös M. - Patkó I. - Pitrik J. (2011): Levegőtisztaság-védelem, Környezetmérnöki Tudástár, 11. kötet, Veszprém, Pannon Egyetem - Környezetmérnöki Intézet, ISBN 978-615-5044-36-6, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/11-Levegotisztasagvedelem.pdf>

Barótfi I. (2011): Környezetgazdálkodás, Szent István Egyetem, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://docplayer.hu/43388625-Kornyeztgazdalkodas-dr-barotfi-istvan.html>

Zichler Sz. - Ocskay R. - Salma I. (2007): Budapest levegőszennyezettségének története, Levegő Munkacsoport, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://www.levego.hu/kiadvanyok/budapest-levegoszennyezettsegenek-tortenete/>

World Health Organization (2021): *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, ISBN 978-92-4-003422.8, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Calvert J. (1990): Glossary of atmospheric chemistry terms, Atmospheric Chemistry Division, IUPAC, DOI: [10.1351/pac199062112167](https://doi.org/10.1351/pac199062112167)

Kertész Zs. (2000): Városi és barlangi aeroszolok vizsgálata PIXE és mikro-PIXE módszerrel, [PhD-értekezés], Debrecen, Debreceni Egyetem TTK, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://dea.lib.unideb.hu/server/api/core/bitstreams/580c6a1e-8f89-4932-b203-c49f5b4bead8/content>

Sjöholm P. - Ingham B. D. - Lehtimäki M. - Perttu-Roiha L. - Goodfellow H. - Torvela H. (2001): *Industrial Ventilation Design Guidebook*, 13 - Gas-cleaning technology, 1197-1316 p., ISBN 978-0-12-289676-7, DOI: [10.1016/B978-0-12-289676-7.X5000-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-289676-7.X5000-0)

Nazaroff W. W. (2023): Ten questions concerning indoor ultrafine particles, Berkeley, University of California, *Building and Environment*, Volume 243, 2023, 110641., DOI: [10.1016/j.buildenv.2023.110641](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110641)

Salma I. (2012): A légköri aeroszol, *Környezetkémia*, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, 90-104. o., ISBN 978-963-279-543-0, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://salma.web.elte.hu/teaching/Kornyezetkemia.pdf>

Tomasi C. - Lupi A. (2017): Primary and Secondary Sources of Atmospheric Aerosol, *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate, First Edition*, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527336451_c01.pdf

Putaud J.-P. - Dingenen R. Van - Alastuey A. - Bauer H. - Birmili W. - Cyrus J. - Flentje H. - Fuzzi S. - Gehrig R. - H.C. Hansson H.C. - Harrison R.M. - Herrmann H. - Hitzenberger R. - Hüglin C. - Jones A.M. - Kasper-Giebl A. - Kiss G. - Koussa A. - Kuhlbusch T.A.J. - Löschau G. - Maenhaut W. - Molnar A. - Moreno T. - Pekkanen J. - Perrino C. - Pitz M. - Puxbaum H. - Querol X. - Rodriguez S. - Salma I. - Schwarz J. - Smolik J. - Schneider J. - Spindler G. - ten Brink H. - Tursic J. - Viana M. - Wiedensohler A. - Raes F. (2009): A European aerosol phenomenology e 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe, *Atmospheric Environment*, Volume 44, (2010), 1308-1320 p., DOI: [10.1016/j.atmosenv.2009.12.011](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.12.011)

International Agency for Research on Cancer (2013): *Air pollution and cancer, IARC scientific publication*, NO. 161., ISBN 978-92-832-2166-1, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Air-Pollution-And-Cancer-2013>

Thangavel P. - Park D. - Young-Chul L. (2022): Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022 Jun; 19(12): 7511., DOI: [10.3390/ijerph19127511](https://doi.org/10.3390/ijerph19127511)

Sacks D. J. - Stanek W. L. - Luben J. T. - Johns O. D. - Buckley J. B. - Brown S. J. - Ross M. (2010): Particulate Matter–Induced Health Effects: Who Is Susceptible?, *Environmental Health Perspectives*, 2011 Apr; 119(4): 446–454 p., DOI: [10.1289/ehp.1002255](https://doi.org/10.1289/ehp.1002255)

Pryor T. J. - Cowley O. L. - Simonds E. S. (2022): The Physiological Effects of Air Pollution: Particulate Matter, Physiology and Disease, *Front Public Health*, 2022; 10: 882569., DOI: [10.3389/fpubh.2022.882569](https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.882569)

Miller R. M. - Raftis B. J. - Langrish P. J. - McLean G. S. - Samutrtai P. - Connell P. S. - Wilson S. - Vesey T. A. - Fokkens B. H. P. - Boere F. John A. Kystek P. - Campbell J. C. - Hadoke F. W. P. - Donaldson K. - Cassee R. F. - Newby E. D. - Duffin R. - Mills L. N. (2017): Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease, *ACS Nano*, 2017 May 23; 11(5): 4542–4552 p., DOI: [10.1021/acsnano.6b08551](https://doi.org/10.1021/acsnano.6b08551)

Amaral S. S. - Jr. Carvalho De A. J. - Costa M. A. M. - Pinheiro C. (2015): An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments, *Atmosphere* 2015, 6(9): 1327-1345 p., DOI: [10.3390/atmos6091327](https://doi.org/10.3390/atmos6091327)

Kiresová S. - Guzan M. (2022): Measurement of particulate matter: principles and options of measurement at present, *Acta Electrotechnica et Informatica*, Vol. 22, No. 2, 2022, 8–18 p., DOI: [10.2478/aei-2022-0007](https://doi.org/10.2478/aei-2022-0007)

Lowther D. S. - Jones C. K. - Wang X. - Whyatt D. J. - Wild O. - Booker D. (2019): Particulate Matter Measurement Indoors: A Review of Metrics, Sensors, Needs, and Applications, *Environmental Science & Technology*, 2019, 53, 20, 11644–11656., DOI: [10.1021/acs.est.9b03425](https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03425)

Dambruoso R. P. – Gennaro de G. – Loiotile D. A. – Gilio D. A. – Giungato P. – Marzocca A. – Mazzone A. – Palmisani J. – Porcelli F. – Tutino M. (2013): School Air Quality: Pollutants, Monitoring and Toxicity, *Environmental Chemistry for a Sustainable World* 4, DOI: [10.1007/978-3-319-02387-8_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02387-8_1)

Winkel A. - Demeyer P. - Feilberg A. - Jørgensen M. - Puterflam J. - Engel P. (2014): Measurement of particulate matter: recommendations for the VERA test protocol on air cleaning technologies, Wageningen, Wageningen UR (University & Research centre) Livestock Research, *Livestock Research Report* 797., (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://edepot.wur.nl/320606>

MFO LRK Adatközpont (2023): 2022. évi összesítő értékelés hazánk levegőminőségéről az automata mérőhálózat adatai alapján, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://legszenyezettseg.met.hu/storage/media/ertekelesek/2022%20automata.pdf>

Magyar Közút Nonprofit Zártkörűen Működő Részvénytársaság (2023): *A közúti forgalom figyelemmel kísérése 2022*, (Letöltés dátuma: 2023.10.27.) Forrás: <https://www.kozut.hu/download/a-kozuti-forgalom-figyelemmel-kiserese-2022/>

Sayahi T. - Butterfield A. - Kelly E. K. (2018): Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors, *Environmental Pollution*, Volume 245, 2019, p. 932-940. DOI: [10.1016/j.envpol.2018.11.065](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.065)

Jiang Y. - Zhu X. - Chen C. - Ge Y. - Wang W. - Zhao Z. - Cai J. - Kan H. (2021): On-field test and data calibration of a low-cost sensor for fine particles exposure assessment, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Volume 211, 2021, 111958., DOI: [10.1016/j.ecoenv.2021.111958](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111958)

Peng Y. - Siu Z. - Zhang Y. - Wang T. - Norris P. - Pan W-P. (2018): The effect of moisture on particulate matter measurements in an ultra-low emission power plant, *Fuel*, Volume 238, 2019, 430-439 p., DOI: [10.1016/j.fuel.2018.10.140](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.140)

Báthory Cs. - Dobó Zs. - Garami A. - Palotás Á. - Tóth P. (2021): Low-cost monitoring of atmospheric PM — development and testing, *Journal of Environmental Management*, Volume 304, 2022, 114158, DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.114158](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114158)

Internetes források

[1] Péter Alvarez (2023): Gigantikus füstfelhő érte el Európát. www.index.hu, Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://index.hu/kulfold/2023/06/28/fustfelho-europa-levego-szennyez-es-erdotuz-kanada/>

[2] Központi Statisztikai Hivatal: 5.3.13. Nemzetgazdasági ágak és háztartások kén-dioxid (SO₂) kibocsátása (1990–). Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ua030d.html

[3] European Environmental Agency: What is particulate matter and what are its effects on human health? Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://www.eea.europa.eu/help/faq/what-is-particulate-matter-and>

[4] United States Environmental Protection Agency: Particulate Matter (PM) Basics. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

- [5] 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről., Letöltés dátuma: 2023.10.27.,
Forrás: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1000306.kor>
- [6] World Health Organization: Ambient air pollution. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás:
[https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/indicator-groups/indicator-group-
details/GHO/ambient-air-pollution](https://www.who.int/data/gho/data/themes/topics/indicator-groups/indicator-group-details/GHO/ambient-air-pollution)
- [7] European Environmental Agency (2021): Air quality in Europe 2021. Letöltés dátuma:
2023.10.27., Forrás: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/>
- [8] International Agency for Research on Cancer: Agents classified by the IARC Monographs,
Volumes 1–134. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: [https://monographs.iarc.who.int/list-of-
classifications/](https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications/)
- [9] Queensland Government (2017): High and low volume air samplers. Letöltés dátuma:
2023.10.27., Forrás: [https://www.qld.gov.au/environment/management/monitoring/air/air-
monitoring/measuring/samplers](https://www.qld.gov.au/environment/management/monitoring/air/air-monitoring/measuring/samplers)
- [10] European Environmental Agency (2021): Air quality standards. Letöltés dátuma:
2023.10.27., Forrás: [https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-
quality-standards](https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards)
- [11] 4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött
légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás:
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100004.vm>
- [12] United States Environmental Protection Agency: NAAQS Table. Letöltés dátuma:
2023.10.27., Forrás: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
- [13] World Health Organization: What are the WHO Air quality guidelines? Letöltés dátuma:
2023.10.27., Forrás: [https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-
air-quality-guidelines](https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines)
- [14] European Environmental Agency (2022): Hungary – air pollution country fact sheet.
Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: [https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-
sheets/2022-country-fact-sheets/hungary-air-pollution-country](https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2022-country-fact-sheets/hungary-air-pollution-country)
- [15] Központi Statisztikai Hivatal: 15.1.1.22. A nemzetgazdasági ágak és háztartások szállópor-
kibocsátása. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás:
https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0021.html

- [16] Országos Meteorológiai Szolgálat: A magyar levegőminőségi index. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://legszenyezettseg.met.hu/levegominoseg/informacio/eq-index-tajekoztato>
- [17] Országos Meteorológiai Szolgálat: Állomáshálózat. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://legszenyezettseg.met.hu/levegominoseg/informacio/allomashalozat>
- [18] Google Maps, Forrás: <https://www.google.com/maps/>
- [19] Központi Statisztikai Hivatal: Helységnévtár: Pécel. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: https://www.ksh.hu/apps/hntr.telepules?p_lang=HU&p_id=04057
- [20] Országos Meteorológia Szolgálat: Magyarország szél viszonyai. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/
- [21] 4/2002. (X. 7.) KvVM rendelet a légszennyezettségi agglomerációk és zónák kijelöléséről. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0200004.kvv>
- [22] Országos Meteorológia Szolgálat: Levegőminőségi zónák Magyarországon. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://legszenyezettseg.met.hu/levegominoseg/informacio/levegominosegi-zonak>
- [23] www.pecelinfo.hu (2011): Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <http://www.pecelinfo.hu/index.php/hirek/helyi-hirek/97-nepszer/6004-papirunk-is-van-a-jo-levegrl>
- [24] www.pmmonitoring.hu: GYIK - Gyakran Ismételt Kérdések. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://miskolc.pmmonitoring.hu/gyik>
- [25] Központi Statisztikai Hivatal: A dobozdiagram magyarázata. Letöltés dátuma: 2023.10.27., Forrás: <https://www.ksh.hu/s/kiadvanyok/termofoldarak-es-berleti-dijak-2021/boxplot.html>

Ábrajegyzék

Oldalszám

1. ábra: PM ₁₀ és PM _{2,5} méretének szemléltetése	12.
2. ábra: A részecskék méret tekintetében a test különféle szerveibe és részeibe juthatnak el	19.
3. ábra: Gravimetriás szálló por mérőműszer rajza	21.
4. ábra: Optikai elven alapuló szálló por mérés	22.
5. ábra: Magyar levegőminőségi index szennyezőanyagra meghatározott szintjei	27.
6. ábra: OLM automata mérőállomásai a térképen négyzettel ábrázolva	27.
7. ábra: Mérési pont Pécel belterületén (jelölővel jelzett pontban)	28.
8. ábra: Pécel lakónépsége és a lakások száma	29.
9. ábra: (A) Plantower PMS 7003 és (B) sematikus rajza	31.
10. ábra: A szálló por mérőműszer sematikus rajza. 1 - GSM modul foglalata. 2 - Antenna foglalata. 3 - Raspberry Pi 3 egylapkás számítógép foglalata. 4 - Bosch BME 680 páratartalom mérő foglalata. 5 - Plantower PMS 7003 szálló por szenzor foglalata. 6 – Adattároló és továbbító készülékeket lezáró burkolat. 7 – Levegő ki- és beáramlását lehetővé tévő burkolat	32.
11. ábra: 2022. december és 2023. augusztus közötti havi átlagos szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozóan	35.
12. ábra: 2022. decemberi átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	36.
13. ábra: 2023. januári átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	36.
14. ábra: 2023. februári átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	37.
15. ábra: 2023. márciusi átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	37.
16. ábra: 2023. áprilisi átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	38.
17. ábra: 2023. májusi átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	38.
18. ábra: 2023. júniusi átlagos napi szálló por koncentráció PM ₁₀ és PM _{2,5} vonatkozásában	39.

19. ábra: 2023. júliusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában 39.
20. ábra: 2023. augusztusi átlagos napi szálló por koncentráció PM_{10} és $PM_{2,5}$ vonatkozásában 40.
21. ábra: A Pécelen mért PM_{10} szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gilice téri és Vác, Csányi körúti mérési eredményekkel 2022. december 21-27. között 43.
22. ábra: A Pécelen mért PM_{10} szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gilice téri és Vác, Csányi körúti mérési eredményekkel 2023. február 13-19. között 43.
23. ábra: A Pécelen mért PM_{10} szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gilice téri és Vác, Csányi körúti mérési eredményekkel 2023. június 19-25. között 44.
24. ábra: A Pécelen mért $PM_{2,5}$ szálló por koncentráció összehasonlítása a Budapest, Gergely utcai mérési eredményekkel 2023. június 19-25. között 44.

Táblázatok jegyzéke

	<i>Oldalszám</i>
1. táblázat: A légkört alkotó gázok százalékos megoszlása	5.
2. táblázat: Légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 4/2011 VM rendelet I. számú melléklete alapján	6.
3. táblázat: Fő összetevői a PM ₁₀ és PM _{2,5} szálló pornak Európában	16.
4. táblázat: Szálló por rövid és hosszú távú expozíció hatásai	20.
5. táblázat: Az Európai Unióban és Magyarországon érvényben lévő szálló por határ- és célértékek	23.
6. táblázat: NAASQ táblázatban meghatározott szálló por határértékek	24.
7. táblázat: A 2005-ben és 2021-ben a WHO által publikált Levegőminőségi irányelv szálló porra vonatkozó iránymutatás változásai	24.
8. táblázat: PM ₁₀ szálló por kibocsátás 2010-2020 között	25.
9. táblázat: PM _{2,5} szálló por kibocsátás 2010-2020 között	25.
10. táblázat: PM ₁₀ és PM _{2,5} szálló por havi koncentrációjának különbsége	41.

NYILATKOZAT

Szunyogh Balázs (név) (hallgató Neptun azonosítója: VN5VOD) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védelemre javaslom / nem javaslom.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen / nem

Kelt: Gödöllő év 2023. 10. hó 31. nap



Belső konzulens

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve:	Szunyogh Balázs
A Hallgató Neptun kódja:	VN5VOD
A dolgozat címe:	Pécel város levegőminőségének elemzése és értékelése
A megjelenés éve:	2023
A konzulens intézetének neve:	Környezettudományi Intézet
A konzulens tanszékének a neve:	Környezetanalitikai és Környezettechnológiai Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem. Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2023 év 10. hó 31. nap



Hallgató aláírása