

DIPLOMADOLGOZAT

Szalontainé Gáspár Natália Eszter

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Akvakultúra és Környezetbiztonsági Intézet

Környezetgazdálkodási agrármérnök mesterképzési szak

ÉPÍTÉSI TECHNOLOGIÁK HATÁSA A LÉGSZENNYEZÉSRE

Belső konzulens:

Dr. habil. Géczi Gábor

egyetemi docens

**Belső konzulens
tanszéke:**

Környezetanalitikai és
Környezettechnológiai Tanszék

Készítette:

Szalontainé Gáspár

Natália Eszter

Gödöllő

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzések	3
2. Szakirodalmi áttekintés	5
2.1. A légszennyezéssel kapcsolatos intézkedések, történelmi áttekintés	5
2.2. A szálló por jellemzői	8
2.3. A szálló por és a meteorológia tényezők kapcsolata	10
2.3.1. A szálló por és a hőmérséklet összefüggései	11
2.3.2. A szálló por összefüggései a csapadékkal és páratartalommal	12
2.3.3. A szálló por és a szél összefüggései	13
2.3.4. A szálló por szezonális változásai	15
2.4. Építkezésből származó légszennyező anyagok	16
2.4.1. Az építőanyagok előállítása	16
2.4.2. Az építkezés folyamata	17
2.4.3. Az épületek használati szakasza	19
2.4.4. Az épület életvégi szakasza	20
2.4.5. Egy fenntarthatóbb alternatíva	20
2.5. Az építkezéshez köthető szálló por emisszió egészségügyi vonatkozása	21
3. Alkalmazott módszerek	25
3.1. A mért terület jellemzése	25
3.2. A mérőműszer	26
3.3. A mért adatok feldolgozása	26
4. Eredmények és értékelésük	30
4.1. A mért értékek összevetése a HungaroMet Nonprofit Zrt. hivatalos adataival .	30
4.2. Rendeleti határértékek, és azok átlépése	33
4.3. Adatok összevetése a WHO javaslatával	34
4.4. A mért adatok szórása és szélsőértékei	34

4.5. Órákra és a hét napjaira vetített mérések	36
4.6. Időjárási tényezőkkel való kapcsolat feltárása	37
4.7. Egy csapadékos és egy csapadékmentes nap szálló por értékeinek elemzése . .	39
5. Következtetések és javaslatok	41
5.1. A $PM_{2,5}$ PM_{10} -hez viszonyított aránya	41
5.2. Környékbeli mérőállomások adataival való összevetés	41
5.3. Rendeleti határértékekkel való összevetés	42
5.4. WHO által javasolt határértékekkel való összevetés	42
5.5. Mért PM értékek szórása	43
5.6. A szállópor óránkénti átlagainak értelmezése	43
5.7. A hétvégi alacsonyabb szállópor értékek	43
5.8. A szálló por és a meteorológia változók összefüggése	44
5.9. Egy száraz és csapadékos nap összehasonlítása	44
6. Összefoglalás	45
Köszönetnyilvánítás	47
Irodalomjegyzék	48
Ábrajegyzék	57
Táblázatjegyzék	59

1. Bevezetés és célkitűzések

A diplomadolgozatomban légszennyezés - azon belül is a PM (particulate matter, azaz szálló por) - értékek vizsgálata kerül fókuszba. A szálló por koncentrációjának megengedett maximális értékével kapcsolatosan a WHO ajánlásokat fogalmaz meg ([http1](#)), a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet ([http2](#)) pedig korlátozza azt. A szabályozások fő oka a magas szálló porkoncentráció egészségügyi kockázataiból fakad (Sharma et al., 2020; Luo et al., 2016; Bowe et al., 2019). Ezek közé tartozik a demencia, a 2-es típusú cukorbetegség, a krónikus légúti- és vesebetegség, de a szív- és érrendszeri megbetegedések is.

A PM értékek természetes szint felé emelkedésének számos oka lehet. Ezek közé sorolható például a közlekedés, az ipari tevékenységek, a fűtés, a mezőgazdasági égetés, vagy éppen az építkezési tevékenységek (Kis-Kovács, 2015). Diplomadolgozatomban elsősorban az építkezési tevékenységek környezetszennyező hatását vizsgálom, különös tekintettel a PM értékekre. Az építkezések során keletkező porok és kipufogógázok, valamint a nehézgépek használata jelentős mértékben növelheti a levegőben található részecskék koncentrációját, ami hozzájárulhat a lokális légszennyezéshez.

Számos publikációban olvashatunk olyan vizsgálatokról, melyekben a szerzők a légszennyező anyagok koncentrációját mérik építkezési területeken (Azarmi et al., 2016). Általános észrevételként megállapítható, hogy a szennyező anyagok koncentrációja rendszerint határértéken túli szintekre emelkedik (Chaloulakou et al., 2003). E tanulmányok javarészt azt a következtetést állapítják meg, hogy a levegőminőség mérését rendszeresebbé és alaposabbá kellene tenni, illetve fokozott intézkedésekre volna szükség a szennyezettség csökkentése érdekében. Az ilyen mértékű szennyezésnek való tartós kitettség ugyanis megkeserítheti a helyi lakosok életét, melyet több tudománynépszerűsítő cikk (Vigh, 2024; Halász, 2021) is tárgyal.

Dolgozatomban azt a célt tűztem ki, hogy lakóhelyem (Budapest 23. kerület, Virágölgy lakópark) szálló por alakulását vizsgáljam, melynek közelében aktív építkezési munkálatok zajlanak. 2024 januárjában beüzemelttem egy olyan készüléket, mely képes többek közt a levegő PM₁₀ és PM_{2,5} szintjének mérésére. Azzal a szándékkal kezdtem el a mérések végzését és

az adatok elemzését, hogy megvizsgálhassam, a lakosok mekkora mértékű szálló por hatásnak vannak kitéve. Dolgozatomban szeretném felhívni a figyelmet a kültéri levegő rendszeres vizsgálatának fontosságára annak érdekében, hogy a családok minél kevésbé legyenek kitéve az egészségüket veszélyeztető részecszekoncentrációnak. A szálló por megfigyelése és elemzése a Virág völgy lakóparkban különösképpen fontos feladat: sok kisgyermekes család költözött ide, akik esetében a magasabb légszennyezettség több szempontból is veszélyes lehet. A magasabb $PM_{2,5}$ szint kisgyermekeknél például különféle légúti fertőzéseket, illetve asztmát is előidézhet (Gehring et al., 2010). A helyzet súlyosságát illusztrálja az is, hogy a várandós édesanyáknál is megfigyelhető egyrészt a koraszülés esélyének megnövekedése, másrészt pedig az alacsonyabb születési arány (Zhu et al., 2015).

Célkitűzésem közé tartozik az is, hogy a lakóhelyem közelében elhelyezkedő hivatalos mérési pontok adataival is összevegyem az általam végzett méréseket. Így pontosabb kép kapható arról, hogy az építkezési munkák milyen hatást gyakorolnak környezetükre. Az általam felszerelt szenzorból érkező adatok minősítéséhez és elemzéséhez a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet (<http2>) levegőszennyezettségi határértékeit, a *HungaroMet Nonprofit Zrt.* Légszennyezettség Indexelését (Adatközpont, 2023) és a *WHO* (<http1>) határérték ajánlásait használom fel. Ezek a határértékek referenciaértékeket biztosítanak a helyi lakosság által rendszeresen belélegzett levegő minőségének megítéléséhez.

A dolgozat 2. fejezete a szakirodalmi áttekintést tartalmazza, ahol a kapcsolódó publikált kutatómunkákat és megfigyeléseket ismertetem. A 3. fejezetben az alkalmazott módszereket mutatom be. A 4. fejezetben a mérésekkel kapcsolatos eredményeket és azok értékelését tárgyalom. Az 5. fejezetben a mért adatokból és az elvégzett kutatómunkámból levont következtetéseket és javaslatokat fogalmazom meg. Végül a 6. fejezetben összegzem a diplomadolgozat főbb témáit és eredményeit.

2. Szakirodalmi áttekintés

Ebben a fejezetben áttekintem a munkámhoz kapcsolódó főbb szakirodalmi munkákat, a légszennyezés témájában tett főbb intézkedéseket, a légszennyezés alapfogalmait, különös tekintettel a szálló porra. Ismertetem a légszennyezettségre vonatkozó jogszabályokat és határértékeket, amelyek a szálló por koncentrációjának szabályozására vonatkoznak. Ezt követően tárgyalom a szálló por jellemzőit és a kapcsolatát különböző meteorológiai tényezőkkel. Végül bemutatom az építkezés során keletkező légszennyező anyagokat, és kitérek az egészségügyi kockázatokra is.

2.1. A légszennyezéssel kapcsolatos intézkedések, történelmi áttekintés

A szennyezett levegő fogalmát a legjobban talán Angyal és munkatársai írják le könyvükben (Angyal et al., 2012) a következőképpen: *„Szennyezett levegőről akkor beszélünk, amikor az adott légtér vagy a természetes alkotóktól minőségileg eltérő komponenseket tartalmaz vagy a természetes alkotók a szokásostól eltérő mennyiségben szerepelnek, és ezek az ember testi, szellemi, társadalmi vagy biológiai környezetét és tevékenységét kedvezőtlenül, illetve károsan befolyásolják.”* A levegő terhelése történhet természetes (pl. vulkánkitörés) vagy mesterséges módon (pl. bányászat, mezőgazdaság, építőipar), de akár a kettő egymásra gyakorolt hatása és az azt követő pozitív visszacsatolások következtében is (pl. a permafroszt vidékek metán kibocsátása (Nzotungicimpaye és Zickfeld, 2017)). A légszennyező anyagok a kibocsátást (emisszió) követően szétterjednek a környezeti levegőben (transzmisszió). A transzmisszió során a légszennyező anyagokat öt különböző hatás érheti: keveredés (hígulás), elszállítódás, szóródás, ülepedés, illetve kémiai átalakulás. Az, hogy melyik folyamat megy végbe, függ az emisszió helyétől, a hely felszíni adottságaitól (pl. domborzat jellege, felszínborítottság, felszínérdesség), valamint a meteorológiai tényezőktől (pl. légkör stabilitás, vertikális hőmérsékleti gradiens, szél sebessége és iránya).

A légszennyező anyagok az elszállítódással országhatárokon átívelő problémát okozhatnak a lakosoknak és a különböző ökoszisztémáknak. Emellett a légszennyező anyagok gazdasági terhet is tesznek a társadalomra. Gondoljunk csak olyan költségekre, mely a társadalom tétlenségéből fennmaradó légszennyezésből származik. Például Európában a levegőszennyezés okozta egészségügyi és gazdasági tevékenységeket érintő becsült 2021-es éves költség 330–940 milliárd euró volt, melybe beleszámolták az egészségügyi költségeket, a kieső munkanapokat, a terméshozam csökkenését, az épület károkat és még sok más tényezőt is. Ezeknek a károknak a költsége jóval meghaladja a cselekvés (levegőminőség javítása) költségét, mely csupán 70–80 milliárd euró volt (http3).

Amikor a légszennyezést már nem lokális jellegű problémának értékelték, több ország összefogásával megszülethetett a Genfi egyezmény (1979. nov. 13.) a nagy távolságra jutó, országhatárokon áterjedő levegőszennyezésről (http4). Magyarország ennek az egyezménynek aláírásával vállalta, hogy korlátozza a légszennyező anyagok kibocsátását. A megállapodás szerint hazánkban a légszennyező anyagok leltárát is évente el kell készítenie. Ezt a leltárat az *OLM (Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat)* készíti el. A leltárba foglalt anyagok közé tartoznak a fő légszennyezők (NO_x , NMVOC, SO_x , NH_3 , CO), a részecskék ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP és BC), a nehézfémek (Pb, Cd, Hg, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn) és a szerves szennyezők (dioxinok/furánok, PAH-ok, HCB-k, PCB-k) (http5). A szennyező anyagok osztályozására az *OLM* a *Légszennyezettségi Indexet* használja. A kategorizálást az adott évre és állomásra végzik el. A szálló por esetében a 2.1. táblázatból olvashatók ki az indexeléshez használt intervallumok és a besorolások (Adatközpont, 2023).

2.1. táblázat. *Légszennyezettségi Index* a szálló por éves átlagokra az *OLM* összesítő értékelésében használtak szerint
(Forrás: Adatközpont, 2023)

Légszennyezettségi index			1	2	3	4	5
			<i>kiváló</i>	<i>jó</i>	<i>megfelelő</i>	<i>szennyezett</i>	<i>erősen szennyezett</i>
Szálló por (PM_{10})	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	éves átlag	0-16	16-32	32-40	40-80	80-
Szálló por ($\text{PM}_{2.5}$)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	éves átlag	0-10	10-20	20-25	25-50	50-

A levegőtisztaság védelem vonatkozásában 2001. május 22. napjáról kell említést tennünk, amikor elfogadásra került a környezetben tartósan megmaradó szerves szennyező anyagokról (POP, azaz Persistent Organic Pollutants) szóló Stockholmi Egyezmény (http6). Ezt az egyezményt azóta bővítették (http7): kiegészítették új anyagokkal, melyek mérgező tulajdonságokkal rendelkezhetnek, ellenállhatnak a lebomlásnak, biológiailag

felhalmozódhatnak a szárazföldi és vízi ökoszisztémákban.

Később 2015-ben az Egyesült Nemzetek Szervezete (ENSZ) fogalmazta meg a Fenntartható Fejlődési Célokat ([http8](http://8)), melynek tizenhét célkitűzése között több is kapcsolódik a légszennyezettség csökkentéséhez. Ezt követően az Egészségügyi Világszervezet (WHO) is elkezdett foglalkozni a témával, mely során elindította az *Air quality, energy and health* kezdeményezést ([http9](http://9)). A platform intézkedéseket mutat be a 2023-2030 közötti a levegőszennyezés értékelésére, illetve javaslatot ad a csökkentésükre. Ezen túl összegzi egészségügyi következményeit, így helyet ad a kutatómunkának és döntéshozók tájékozódásának. 2021-ben a WHO közzétett egy újabb irányelvet, mely a „A globális levegőminőségi irányelvei: szálló por ($PM_{2,5}$ és PM_{10}), ózon, nitrogén-dioxid, kén-dioxid és szén-monoxid” névre hallgat ([http1](http://1)). Ebben megtalálhatjuk például a szálló por határértékeket, melyek hosszú vagy rövidtávú kitettség esetére vonatkoznak (2.2. táblázat). A legtöbb esetben, a $PM_{2,5}$ a PM_{10} tömegének körülbelül 50-80% -át teszi ki. Fontos, hogy a két értéket összehangolják minden olyan helyzetben, amikor $PM_{2,5}$ és PM_{10} mérések is rendelkezésre állnak. Amennyiben hozzáférünk mind a két adathoz, előnyben kell részesíteni a $PM_{2,5}$ levegőminőségi irányadó szintet.

2.2. táblázat. WHO ajánlása rövid és hosszú távú $PM_{2,5}$ és PM_{10} határértékekre
(Forrás: WHO adatok)

	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Rövid távú (24 h)	$15 \mu g/m^3$	$45 \mu g/m^3$
Éves	$5 \mu g/m^3$	$15 \mu g/m^3$

Szintén ezen évben, 2021. május 12-én az Európai Bizottság kiadta a következő dokumentumát: *Bolygónk egészségessé tétele mindenki számára Uniós cselekvési terv: Út a szennyezőanyag-mentes levegő, víz és talaj felé* ([http10](http://10)). Ebben a dokumentumban felhívják a figyelmet a beltéri levegőminőség biztosításának fontosságára és az épületekből származó levegőszennyezés veszélyeivel is foglalkoznak. Az Európai Bizottság ebben a dokumentumban fogalmazta meg - sőt célkitűzésébe foglalta -, hogy 2030-ig a légszennyezés egészségügyi hatásait (pl. korai elhalálozások) több mint 55% -kal kell csökkenteni.

Jelenleg még az európai törvényben nem határoznak meg az építkezések során érvényes követelményeket az egyes légszennyező anyagokra vonatkozóan. A feljebb látottak (Genfi, Stokholmi Egyezmény stb.) mégis bizakodásra adnak okot, ugyanis ezekben a levegő tisztasága mégis egyre jobban előtérbe kerül, és találkozhatunk ajánlási szabványokkal is. Hazánkban a légszennyezéssel kapcsolatban a következő jogszabályokat találjuk:

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

A szálló porra a 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben előírt határértékeket a 2.3. táblázatban találjuk. Ezek az értékek várhatóan változni fognak, mivel az *Európai Bizottság* 2030-ra szigorúbb irányelvet fog meghatározni. Céljuk ugyanis az, hogy öt évente felülvizsgálják a legújabb tudományos eredmények alapján a levegőminőségi előírásokat, hogy így biztosítsák az európai polgárok jólétét (<http11>).

2.3. táblázat. 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben meghatározott $PM_{2,5}$ és PM_{10} határértékek
(Forrás: 4/2011. (I. 14.) VM rendelet)

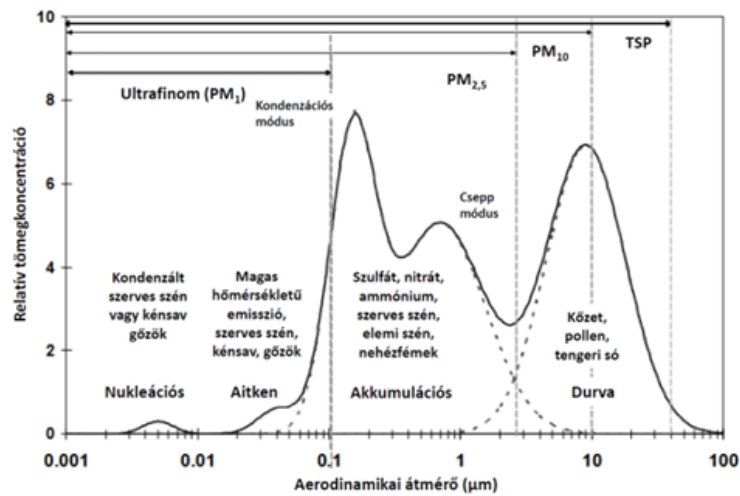
	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Rövid távú (24 h)	-	$50 \mu g/m^3$ ¹
Éves	$25 \mu g/m^3$	$40 \mu g/m^3$

2.2. A szálló por jellemzői

A részecskéket a levegőben aeroszoknak nevezzük. Definíció szerint ebbe a kategóriába a levegőben lebegő szilárd és folyékony halmazállapotú anyagok tartoznak. A részecskék mérettartománya széles skálán mozog (2.1. ábra). A PM_x az $x \mu m$ -nél kisebb aerodinamikai átmérőjű aeroszol-részecskéket jelenti. Fontos határ a $2,5 \mu m$ aerodinamikai átmérő, ugyanis az ennél kisebb részecskéket nevezzük finom frakciónak, míg az ennél nagyobb, de a $10 \mu m$ aerodinamikai átmérőt nem elérő részecskéket durva részecskének (PM_{durva}). A szakirodalomban találkozhatunk még a $PM_{0,1}$ (ultra finom) részecskékkel és a TSP (teljes szálló por) részecskék is említésre kerülnek (Papp, 2024).

Nem csak méretük, hanem keletkezésük, összetételük, a levegőből való kikerülésük, egészségügyi kockázatuk, környezetre, éghajlatra gyakorolt hatásuk szerint is osztályozhatjuk a részecskéket. Összetételük szerint elsődleges és másodlagos részecske kategóriába sorolhatók az aeroszokok. Az elsődleges részecskék a légkörbe közvetlenül - a pillanatnyi

2.1. ábra. Részecskék mérettartomány eloszlása aerodinamikai átmérő és relatív koncentráció szerint lognormális összefüggésben
(Forrás: Papp, 2024)



kémiai formájukba - kibocsátás, defláció vagy reszuszpenzió útján kerülnek. Az elsődleges részecskék méret szerinti eloszlása általában lefedi a teljes tartományt. A másodlagos részecskék ezzel szemben jellemzően PM₁ és PM_{2,5} mérettartományba esnek. Keletkezésük fontos aspektusa, hogy a levegőben egy vagy több gáz halmazállapotú prekursor anyagokból jönnek létre. Ha figyelembe vesszük az összetételüket, beszélhetünk másodlagos szerves részecskékről, valamint másodlagos szervetlen részecskékről is (Lagzi et al., 2013).

Az aeroszolak összetételét tekintve megkülönböztetünk kémiai és bioaeroszolakat. Az utóbbi magába foglalja a vírusokat, a baktériumokat, a spórákat, a pollent, a hámot, a szarut, az ürüléket is. A kémiai összetétel osztályozása változatosabb: ásványi összetevők (szilikátok, karbonátok, szulfátok, fémek stb.), ionok (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} stb.) és a szénvegyületek (az elemi szén, a szerves szén, a szervetlen szén). A légkörbe került aeroszol részecskék viszonylag rövid, 1-2 hét tartózkodási idővel jellemezhetők. Azonban ez idő alatt a részecskék a Föld energia mérlegére vannak hatással. Bizonyos aeroszolak (pl. szulfátokból, nitrátokból és szerves vegyületekből álló) a Napból érkező sugárzás szórásával, visszaverésével csökkentik a felszínre jutó energia mennyiségét és a felszíni hőmérsékletét. Ellenben a koromrészecskék az üvegházgázokhoz hasonlóan napsugárzást képesek abszorbeálni, így növelik a felszínközeli hőmérsékletet. A kiülepedett koromrészecskék a havas területeken az albedó csökkentésével avatkoznak bele az energiamérlegbe. Az előzőekben felsorolt aeroszol tulajdonságok közvetlen hatást gyakorolhatnak az éghajlatra, azonban érdemes figyelembe venni a közvetett hatásokat is. A felhő képződésben például nagy szerepet töltenek be az aeroszol részecskék. A heterogén (részecske jelenlétében történő) kondenzáció elősegíti a csapadékképződést. A részecskeszám

növekedésével több kondenzációs mag áll rendelkezésre. Több kisebb csepp alakul ki, így csökken a csapadékképződés valószínűsége és növekszik a felhők élettartalma. Jellemző, hogy ezek a felhők a napsugárzást jobban reflektálják, növelve a planetáris albedó értékét hosszabb időre. Ezek mind a felszíni hőmérséklet csökkenését eredményezik (Lagzi et al., 2013).

A szálló por környezetre gyakorolt hatásáról sem szabad elfeledkeznünk. Az épített környezet anyagával bizonyos aeroszol alkotók reakcióba léphetnek, erodálhatják azok szerkezetét, akár esztétikailag is megváltoztathatják. Az élővilág is tapasztalhatja az aeroszol részecskék negatív hatását: a kiüledő vas például korlátozza a fitoplankton növekedését. Súlyosítja a helyzetet, hogy az aeroszokok akár ezer kilométerre is kifejthetik hatásukat a forrástól viszonyítva. Találunk azonban pozitív hatást is. Az előbb említett planktoncsoport számára a saharai porból származó aeroszol táplálékforrás is lehet. Hasonlóan afrikai aeroszolt találtak Pérez és munkatársai 2005 és 2006 között Barcelonában (Pérez et al., 2008). Vizsgálták a PM_{10} , $PM_{2,5}$ és PM_1 értékeket, melyekben magas ásványianyag-tartalomra lettek figyelmesek. Ezt részben antropogén eredetű, részben viszont feltehetőleg az afrikai porviharok következményeinek tulajdonították.

Hazánkban is több vizsgálat foglalkozik a szálló por alakulásával és annak eredetével, például a 2018-ban megjelent tudományos munka (Perrone et al., 2018) többek között Budapestet vette górcső alá. Az átlagos $17,4 \mu g/m^3$ a $PM_{2,5}$ értékek (Budapest, Gilice tér, városi háttérszennyezettség mérés) származásuk szerinti eloszlása a következő volt: 24% biomaszából, 23% talajból, 22% másodlagos aeroszoból, 19% vanádium és báriumban gazdag gázolajból, 12% pedig nitrit gazdag biomaszából.

2.3. A szálló por és a meteorológia tényezők kapcsolata

A légszennyező anyagok egészségügyi kockázata függ a koncentráció mértékétől, amit megannyi meteorológiai tényező, valamint időjárási helyzet befolyásolhat (Barmpadimos et al., 2012). Például ha a légrétegződés stabil, az idő pedig szélcsendes, akkor kicsi a felszín közeli keveredési rétegvastagság². Az alacsony határréteg nem kedvező a levegő és a szennyezőanyagok függőleges átkeveredésének. A szennyező anyag se keveredni, se szóródni nem tud, ráadásul a kémiai reakciók végbemenetelét sem segíti elő. A kémiai reakciók sebességét továbbá a hőmérséklet is befolyásolhatja. Abban az esetben, ha a rétegződés stabil marad, valószínűbb lesz a szennyező anyag ülepedése. Ha azonban a

²A troposzférának azon legalsó tartománya, amelyre a függőleges átkeverődés jellemző. Ezért a földfelszínről érkező hatások közvetlenül 1–2 órán belül érvényesülnek.

szélsébség horizontális irányban erős, dominánssá válik az elszállítódás. Az elszállítódás egy adott helyen csökkenti, viszont távolabb dúsíthatja a szennyező anyagokat. Erre láthatunk példát akkor, amikor Európában jelentős porszennyezéssel találkozunk, mely a Szaharából származik (Varga, 2020). Az elmúlt években már itthon is megnövekedett mennyiségben megfigyelhetővé vált a szaharai por (Tóth és Ferenczi, 2024). Varga munkája szerint 1979–2018 között a Kárpát-medencében 218 szaharai poreseményt azonosítottak (Varga, 2020). A poresemények vizsgálatából kiderül, hogy többnyire tavasszal és nyáron fordulnak elő olyan szinoptikus meteorológiai események, amelyek lehetővé teszik a szaharai por Kárpát-medencébe szállítódását. Szerencsére az európai szabályozás lehetővé teszi a Szaharából származó aeroszol koncentráció utólagos levonását a mért PM_{10} koncentrációból az elszámolások alkalmával. Az érkezett többlet szálló por mennyiségének becslésére Tóth és Ferenczi nyújt útmutatást tanulmányukban (Tóth és Ferenczi, 2024).

2.3.1. A szálló por és a hőmérséklet összefüggései

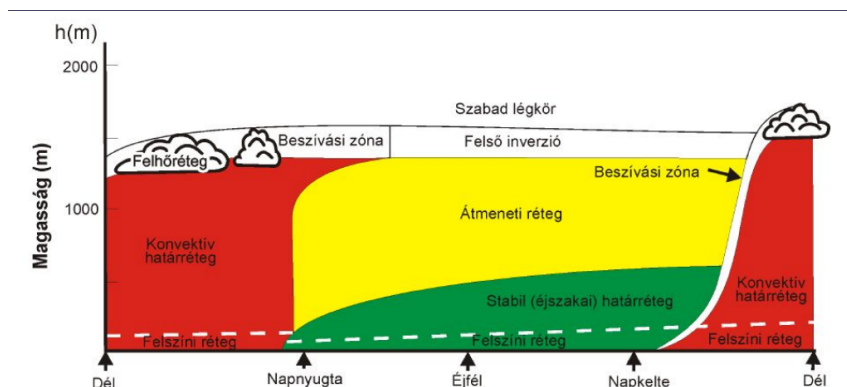
A magas hőmérséklet kedvez a magasabb szálló por koncentrációnak, amely számos tanulmány alátámaszt (Pateraki et al., 2012; Sirithian és Thanatrakolsri, 2022; Barmpadimos et al., 2012). Barmpadimos és munkatársai öt európai országban, hét városi és vidéki háttérállomáson vizsgálták a PM_{10} , $PM_{2,5}$ és PM_{durva} koncentrációk trendjét és változékonyságát 1998 és 2010 között. Arra a következtetésre jutottak, hogy a hőmérséklet növekedésével PM_{durva} koncentrációja növekszik szinte az egész tartományon (Barmpadimos et al., 2012). Észak-Thaiföldön egy tanulmány keretében a 2016 és 2020 közötti a párás időszakokat (januártól áprilisig) vizsgálták (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022). Elemzésük szintén szignifikáns pozitív korrelációt mutatott ki a légköri hőmérséklet a $PM_{2,5}$ és PM_{10} koncentráció között. A magasabb hőmérséklet elősegíti a másodlagos részecskék keletkezést. Pateraki és munkatársai megfigyelték, hogy az intenzív fotokémiai kedvez a szekunder szulfát képződésének (Pateraki et al., 2012). A legmagasabb hőmérsékletű napokon érték el csúcértékeiket a finom részecskék mérésében, de hasonló eredményeket vettek észre a nagyobb átmérőjű frakcióknál is. Az éves hőmérsékleti minták gyakorisági elemzése egyértelmű összefüggést mutat a PM -túllépések és a $11,8\text{ °C}$ hőmérsékletet meghaladó napok között. A kísérletet 53 hónapig végezték, mediterrán területen. Ezeken túl még is találunk olyan publikációt, amely szignifikáns kapcsolatot nem talált a hőmérséklet és a szállópor koncentráció között (Yan et al., 2023).

2.3.2. A szálló por összefüggései a csapadékkal és páratartalommal

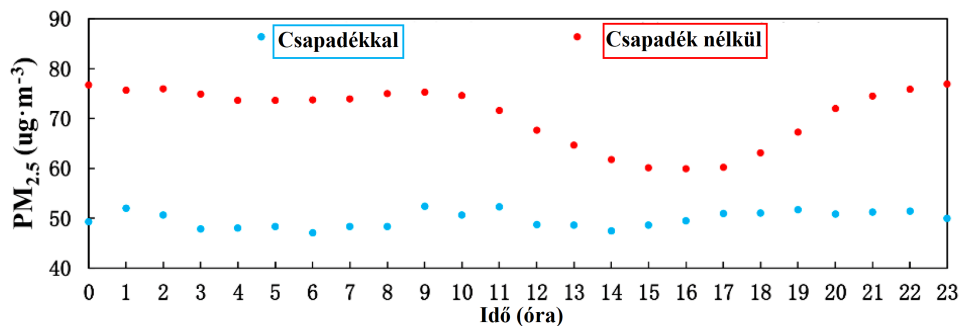
A csapadék $PM_{2,5}$ eltávolító hatásait vizsgálták különböző csapadékinzintázások és szennyezettségi szintek mellett Zhao és munkatársai tanulmányukban (Zhao et al., 2020). A kutatás során figyelembe vették a planetáris határreteg (2.2. ábra) napi változásait is, ugyanis az befolyásolja a $PM_{2,5}$ koncentrációt. Egy másik tanulmány szerint planetáris határreteg magassága negatívan korrelál a $PM_{2,5}$ koncentrációval (Pan et al., 2019). Zhao adatai alapján is a $PM_{2,5}$ tömegkoncentrációja egyértelmű napi ingadozást mutatott, amely összhangban volt reggeli 200–300 m, dél körül pedig körülbelül 1000 m magasságú planetáris határreteg magasságával (2.3. ábra). Egyértelművé vált számukra, hogy határreteg magasságának változása befolyásolja a légszennyezőanyagok átkeverődését.

A csapadék $PM_{2,5}$ -re gyakorolt eltávolító hatásának tisztázása érdekében a kutatók egy olyan időszakot választottak, amikor a planetáris határreteg kis mértékben változik: ez pekingi idő szerint 15:00-17:00 között volt. Olyan rövid távú konvektív csapadékeseményekre összpontosítottak, amelyek nem haladták meg az egy órát. Megállapították, hogy amikor a csapadék mennyisége és a $PM_{2,5}$ koncentrációja magas volt, pozitív eltávolító hatás érvényesült, amely jelentősen csökkentette a $PM_{2,5}$ koncentrációt. Intenzív csapadék idején a csapadékcseppek és az aeroszolok ütközése és összeolvadása válik meghatározóvá, elősegítve a cseppek növekedését és a kihullását. Ezzel szemben gyenge csapadék és alacsony $PM_{2,5}$ koncentráció esetén a negatív eltávolítási hatás dominál. Ez azt jelenti, hogy a csapadék nem volt képes hatékonyan eltávolítani a levegőben lévő $PM_{2,5}$ részecskéket. Ennek magyarázata az lehet, hogy a napsugárzás és a vízgőz elősegítheti a gázok részecskévé történő átalakulását és a finom aeroszol részecskék növekedését, ezáltal növelheti a nagyobb méretű aeroszol koncentrációját. Azaz a finom aeroszol részecskéknél higroszkópos növekedése domináns

2.2. ábra. Planetáris határreteg alakulása egy átlagos napon, nyugodt időjárási helyzet mellett (Forrás: Timár, 2017)



2.3. ábra. PM_{2,5} tömegkoncentráció egy nap alatti változása csapadékos és csapadék nélküli esetekre átlagolva a 2015–2017 közötti időszakban Peking-Tianjin-Hebei régióban
(Forrás: Saját szerkesztés Zhao et al., 2020 alapján)



gyenge csapadék esetén. Egy 2024-ben megjelentetett tudományos publikáció szintén ezt igazolja (Xu et al., 2024). Xu és munkatársai a submikron aeroszol részecskék (PM₁) higroszkóposágát, összetételét, forrásait és méretbeli eloszlását vizsgálták fejlett köd-aeroszol mintavételi rendszerrel. Eredményeik azt mutatják, hogy az 1 és 2,5 μm közötti aeroszoloknál viszonylag könnyen higroszkópos növekedést tapasztalnak, ha viszont már 2,5 μm -nél nagyobb méretre nőnek, ez nem mondható el. Egy másik tanulmány is megállapította, hogy a csapadék kisebb mértékben csökkenti a finom PM koncentrációkat, mint a durva PM koncentrációkat (B. Zhang et al., 2018). A vizsgálat során a csapadékmentes napok finom ($48,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) és a durva ($39,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) szálló por koncentrációjának 72%-a illetve 69%-a volt a csapadék nélküli napokon mért koncentrációnak ($67,7$ és $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Általánosan megfigyelhető, hogy a növekvő páratartalom mellett az aeroszolok koncentrációja csökkenő tendenciájú. A hőmérséklet és szálló por összefüggését elemző - már említett - tanulmány (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022) kitért a relatív páratartalom és a PM_{2,5} és a PM₁₀ koncentráció korrelációjának vizsgálatára. A városi és vidéki területen a PM_{2,5} és a PM₁₀ is erős negatív korrelációt mutatott a relatív páratartalommal. Valószínűsíthető, hogy a részecskék mozgását akadályozza a magasabb relatív páratartalom, mely így a részecskék lerakódását idézheti elő a talajon. Ennek következtében a relatív páratartalom növekedésével a légszennyező anyagok koncentrációja csökken (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022).

2.3.3. A szálló por és a szél összefüggései

A szél és a szálló por koncentráció kapcsolatát tárták fel Yin és munkatársai (Yin et al., 2016) 2008 és 2014 közötti pekingi meteorológiai viszonyok adatai segítségével. A vizsgálat során U-alakú kapcsolatot találtak a napi maximális szélesség és a szálló por között a legtöbb szélirányban. Az eredményekből kiderül, hogy alacsony és magas szélesség esetén

a PM koncentrációja magasabb, míg mérsékelt szél esetén alacsonyabb. Ez azt jelzi, hogy a szélesebbesség és a PM közötti kapcsolat nem lineáris, hanem összetett hatású.

Egy Athén környékén - 2003 júniusától 2008 decemberéig -, 53 hónapon keresztül végzett kísérleti tanulmány is elemezte a PM_{10} , $PM_{2,5}$ és PM_{durva} frakciók és a szélesebbesség, valamint szélirány kapcsolatát (Pateraki et al., 2012). A kutatómunka során megfigyelték, hogy a szélesebbesség növekedésével a részecskék koncentrációja csökken, de ez a tendencia csak 3,19 m/s-ig volt észlelhető. A legmagasabb Európai Unió szálló por határérték átlépések a 3,81 m/s és 4,43 m/s közötti szélesebbesség-tartományban jelentkeztek. A területre jellemző szélirány nem egyezett meg a maximális részecske értékekért „felelős” széliránnyal.

Európa öt országában, hét városi és vidéki háttérállomáson is vizsgálták a PM_{10} és $PM_{2,5}$ koncentrációt 1998 és 2010 között (Barmpadimos et al., 2012). Az eredményekből kiderül, hogy az alacsony szélesebbesség kedvezett a hígulás folyamatnak, azaz PM és a szélesebbesség között negatív kapcsolat figyelhető meg. Ez az eredmény Yin megállapításaival ellentétes eredményre hívja fel a figyelmet (Yin et al., 2016). Barmpadimos és munkatársai megállapították még, hogy a magas szélesebbesség esetén a talaj újra szuszpendálása és tengeri aeroszolok képződése vált dominánssá. Így ez pozitív kapcsolatot eredményez, különösen a durva szálló por és a szélesebbesség között (Barmpadimos et al., 2012). Ez utóbbi megállapítás már összhangban van az athéni és a pekingi vizsgálatokkal (Yin et al., 2016; Pateraki et al., 2012). Ezzel ellentétben viszont Sirithian és Thanatrakolsri az előzőekben említett tanulmányokkal (Pateraki et al., 2012; Yin et al., 2016; Barmpadimos et al., 2012) szemben, arra a következtetésre jutott, hogy a szélesebbesség nem befolyásolja a $PM_{2,5}$ és PM_{10} koncentrációját a városi és vidéki területeken, Észak-Thaiföldön a párás időszakokban (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022).

Összegezve a szélesebbesség, szélirány és szálló por kapcsolatáról több különböző összefüggést és megállapítást is olvashatunk. Pekingben U-alakú kapcsolatot (Yin et al., 2016) találtak. Athénban a szélesebbesség növekedésével a részecskék koncentrációjának csökkenését, de 3,19 m/s sebességig utána a 3,81 m/s és 4,43 m/s közötti szélesebbesség mellett a legmagasabb EU-túllépések voltak megfigyelhetőek (Pateraki et al., 2012). Európa öt országára kiterjedő tanulmány pedig alacsony szélesebbesség mellett negatív, míg magas szélesebbesség esetén pozitív kapcsolatra lett figyelmes (Barmpadimos et al., 2012). Végül Észak-Thaiföldön pedig a kapcsolat hiányáról számoltak be (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022).

2.3.4. A szálló por szezonális változásai

Periodikus változásokra lehetünk figyelmesek a szálló por értékek vizsgálata során. Vizsgálhatjuk egyrésről több éves időintervallumon, ekkor az évszakok mutatnak ismétlődést. A meteorológiai viszonyok alakulásán túl a fűtési szezon módosító hatása egyaránt okozója lehet ennek a periodikusságnak. Tao és Harley a San Francisco-öbölben és a San Joaquin-völgyben készített tanulmánya szerint a $PM_{2,5}$ koncentrációja általában télen magasabb, mint nyáron (nyárhoz képest $80 \pm 25\%$ -os, illetve $123 \pm 28\%$ -os növekedés figyelhető meg a két városban) (Tao és Harley, 2014). Hasonlóan a téli időszakra estek a lengyelországi legmagasabb szezonális átlagos $PM_{2,5}$ koncentráció értékek Rogula és munkatársai elemzése szerint (Rogula-Kozłowska et al., 2014). Ezzel szemben az előbb említett amerikai tanulmány (Tao és Harley, 2014) vizsgálta Dél-Kalifornia szárazföldi területét is, ahol télen átlagosan $46 \pm 12\%$ -kal alacsonyabb koncentrációt figyeltek meg. Kantonban, Csengtuban és Shenyangban végzett 5 éven keresztüli mérésekből kiderül, hogy a szezonális változékonyság a legnagyobb télen és a legalacsonyabb nyáron volt a $PM_{2,5}$ koncentrációban (Javed et al., 2021).

Az évszakok közötti különbségekhez képest a hétköznapok-hétvégék eltérése kisebb arányú a vizsgálatok szerint. A San Francisco-öbölben $8,9 \pm 5,9\%$ -os, a San Joaquin-völgyben pedig $8,0 \pm 3,0\%$ -os volt a hétköznaphoz képesti hétvégi csökkenés. A déli parton átlagosan nem mutatkozik szignifikáns különbség hétköznap és hétvége között ($-1,2 \pm 4,2\%$) (Tao és Harley, 2014).

A napi periódus alakulását a talajszinti hőmérsékleti inverzió (hőmérséklet magassággal való emelkedése) jelentősen meghatározza. A talajinverziók gyakran este és éjszakánként alakulnak ki stabil hideg körülmények között (Olofson et al., 2009). Ekkor a szennyezőanyagok feldúsulnak a talaj közelében. Ezen felül a PM értékek napi alakulását a napi tevékenységek (pl. reggeli és délutáni közlekedési csúcspontok) befolyásolják. Javed és munkatársai (Javed et al., 2021) elemzése szerint Pekingben, Kantonban, Chengduban, Shenyangban és Sanghajban a $PM_{2,5}$ koncentráció éjszaka éri el egyik lokális maximum értéket, ami Peking, Guangzhou és Shanghai esetében az abszolút maximumot is jelenti. Shenyangban és Chengduban a napi maximális $PM_{2,5}$ koncentrációt délelőtt, 8:00 és 11:00 óra között mérik, a reggeli csúcsforgalom idején, vagy azt követően. Egy másik, északi európai városban végzett tanulmány is beszámol arról, hogy a reggeli hőmérsékleti inverzió és a közlekedésből származó szennyező anyagok magasabb PM_{10} koncentrációt eredményeznek az inverzió nélküli napokhoz képest (Janhäll et al., 2006).

Találhatóak tehát olyan tanulmányok, melyek a téli (Tao és Harley, 2014; Rogula-Kozłowska et al., 2014) és amelyek a nyári időszakot jellemzik magasabb szálló por koncentrációval. Hétvége és hétköznapi PM koncentráció eltérések kapcsán pedig van, ahol egyértelműen kirajzolódnak a különbségek, de ez nem minden esetben számottevő (Tao és Harley, 2014). A napi periódusban meghatározó, hogy reggelre kialakul-e talajszinti hőmérsékleti inverzió és a terület közlekedési emisszióinak mennyire van kitéve (Janhäll et al., 2006; Javed et al., 2021).

2.4. Építkezésből származó légszennyező anyagok

Az épület életciklusának egyes szakaszaiban más és más típusú forrásként működik. Általánosságban megállapítható, hogy az építőipar kültéri és beltéri légszennyezést egyaránt okoz. A kültéri források közé tartoznak például az építőanyagok gyártási folyamatai, az építőipari gépek használata a telephelyeken, az építési helyszínén történő szállítás (üzemanyag égetés és gumikopás) és az élettartam végi elbontási tevékenységek. A beltéri forrásokból származó szennyező anyagokra példa a belső térben használt ragasztók és festékek kibocsátása (Wieser et al., 2021).

A továbbiakban a különböző munkálatok hatását tekintem át a szálló por értékekre, valamint más építkezési levegőszennyező anyagokra. Az elmúlt években egyre több tanulmány foglalkozik az építőipar kibocsátásainak elemzésével (Ekinci et al., 2020; Böhm et al., 2012; Wieser et al., 2021; Rajarathnam et al., 2014). Megfigyelhető, hogy nem csak a levegő minőségének romlásáért, hanem az üvegházhatású gázok kibocsátásának közel 40%-áért is felelős az építőipar (Wieser et al., 2021).

Wieser és munkatársai az építőipar emissziójával kapcsolatos tudományos publikációk szisztematikus áttekintésével foglalkozott 2021-es tanulmányukban (Wieser et al., 2021). Négy szakaszra osztották az építőiparhoz kapcsolódó tevékenységeket, és elemezték az adott területen megjelent publikációkat. E négy szakasz az építőanyagok előállítása, az építkezés folyamata, a használati szakasz, és az épület életvégi szakasza. A dolgozatomban én is ezt a négy területet mutatom be különböző tudományos munkák segítségével.

2.4.1. Az építőanyagok előállítása

Az építkezéshez szükséges termékek előállítása az első szakasz. Ehez a szakaszhoz tartozik a szállítás, a gyártás, a kitermelés során használt gépek kibocsátása is. Wieser és munkatársai

tanulmányából kiderül, hogy az építőanyagok témájában a legtöbb tudományos cikk a $PM_{2,5}$ és a PM_{10} elemzésével foglalkozik, ezt követi a VOC, a CO, a SO_2 , a NO_2 , és az O_3 kibocsátás elemzése (Wieser et al., 2021). Kevés publikációt lehet találni ólom és ammónia emissziót okozó építőanyagokkal kapcsolatban.

Zhang és munkatársai épület életciklus-értékelést végeztek légszennyezés szempontjából. Az építőanyagok (beton, cement, acél, alumínium, üveg, homok, fűrészáru) gyártási szakaszában a következő szennyezőanyagok kibocsátását vizsgálták: CO_2 , CH_4 , N_2O , SO_2 , CO, NO_x , NMVOC és PM (X. Zhang et al., 2013). A legnagyobb mennyiségű szennyezőanyag a szén-dioxidból kerül ki, a legnagyobb mértékű szennyezőanyag kibocsátást pedig az alumínium gyártás okozza. Az alumínium esetében a szén-dioxidon túl a kén-dioxid, a szén-monoxid és PM szennyezés is magas értéket mutatott.

A cement előállításának veszélyes gáz kibocsátását vizsgálták Ekinci és munkatársai is (Ekinci et al., 2020). Kiderült, hogy a cement előállítása során szén-monoxid, kén-dioxid, nitrogén-oxidok és szálló por kerül a levegőbe. Ezen felül a cement előállítása során felhasznált energia szintén emisszióval jár.

Rajarithnam és munkatársai öt téglagyártási technológia értékelését mutatták be publikációjukban, amely keretében megmérték a PM, SO_2 , CO és CO_2 kibocsátásokat (Rajarithnam et al., 2014). Arra a következtetésre jutottak, hogy az Indiában elterjedt technológiák közül az úgynevezett cikk-cakk és a függőleges tengelyű téglakemencék jobb teljesítményt mutattak, mint a hagyományos, rögzített kéményes Bull's árokkemencék.

2.4.2. Az építkezés folyamata

Az építési folyamatok szakasza esetén az építkezési munkálatokon túl nem szabad megfeledkeznünk az azokhoz kapcsolódó forgalmi szennyezésekről, és az építkezések üzemeltetésének energiaigényéről sem. Alvanchi és munkatársai az építkezések városi légszennyezésére gyakorolt negatív hatásáról írnak, amely megfelelő építésmenedzsmenttel és jobb építési ütemtervek létrehozásával csökkenthető volna (Alvanchi et al., 2020). Nem szabad megfeledkeznünk arról sem, hogy a közlekedés európai viszonylatban az egyik legjelentősebb kibocsátónak számít. A szállítások optimálisabb megtervezésével elkerülhetők a közlekedési dugók, csökkentve ezzel az emissziót. Ezen felül a jól átgondolt anyagmozgatás és a gépek optimális használata - a teherautók, munkagépek burkolatlan vagy burkolt utakon felesleges közlekedésének mellőzése - csökkenthetik a kibocsátást. Alvanchi és munkatársai kidolgoztak egy menedzsment-keretrendszert (Alvanchi et al., 2020), melynek betartásával a

CO₂ esetében 7,8%-os, a NO_x esetében 8,2%-os, a PM₁₀ esetében pedig 3,8%-os potenciális kibocsátás-csökkenés érhető el. Ha ezt a módszertant általánosságban több helyen tudnák alkalmazni, az összkibocsátásokra nézve igen kedvező lenne. Ezzel összhangban van Cheriyan és munkatársai állítása, miszerint a szálló por többsége az építőiparból származik (Cheriyan et al., 2020). A kutatásukban a PM₁₀, PM_{2,5} és PM₁ részecskék terjedését vizsgálták építkezési forrásoktól való távolság függvényében. A méréseket optikai részecskeszámlálókkal végezték. Az eredményeik szerint a PM₁ részecskék gyorsabban (exponenciálisan) és magasabbra terjednek, mint a PM₁₀ és PM_{2,5}. Megfigyelték, hogy a PM₁₀ rövidebb idő alatt (6-8 perc) süllyed vissza a talaj közelébe, míg a PM_{2,5} hosszabb ideig lebeg és terjed magasabb légrétegekbe. Érdeemes tehát figyelembe venni a különböző frakciók jellemző terjedését a vizsgálatok során.

Yan és munkatársi tanulmányukban szintén az építési projektek során keletkező részecske emissziót és azok csökkentését vizsgálták, mérettartomány szerint (Yan et al., 2023). Megállapították, hogy földmunka és az alapozás szakasza (pl. a kalapácsos cölöpözés, a hulladékrakás és az anyagszállítás) nagy mértékben felelős a szálló por koncentrációjának növekedéséért. Ennek lehetséges csökkentésére elsőnek a különböző időjárási tényezőket tanulmányozták, ugyanis ezek nagy mértékben befolyásolják a szálló por értékeket (2.3. alfejezet). Eredményeikből kiderült, hogy a TSP és a PM₁₀ kibocsátások mérsékelten korreláltak a páratartalommal és a szélesebséggel, míg a hőmérséklet és a légköri nyomás nem mutattak szignifikáns korrelációt a PM kibocsátással. Arra jutottak, hogy a páratartalommal talált összefüggés figyelembevételével és az időjárási előrejelzések alapján az építkezésvezetőknek lehetősége nyílik időben alkalmazni a megfelelő PM csökkentési intézkedéseket. Vizsgálatukból kiderül, hogy a lehetséges intézkedések közül a vízpermetezés hatékonyan tudta csökkenteni a TSP és a PM₁₀ kibocsátását, míg a ködögyű a PM_{2,5} csökkentésében jeleskedett.

Jung és munkatársai tanulmányukban megvizsgálták, illetve javaslatot is tettek arra, hogy hogyan lehet felmérni egy építkezés során a PM₁₀ egészségügyi kockázatát lakóterületek közelében (Jung et al., 2019). Egy olyan módszert dolgoztak ki, amellyel az építőipari döntéshozók egy eszközt kaphatnak a kezükbe civil panaszok elkerülésére. A kétlépéses módszer első szakaszában figyelembe veszik a légáramlást, ami a földrajzi adottságoknak és a légkör állapotának függvénye. A meghatározott légáramlási viszonyokból és a PM₁₀ kibocsátásból következtetnek a PM₁₀ várható eloszlására a lakott területen. Javaslatukban a PM₁₀ diszperzió szimulációját az Amerikai Meteorológiai Társaság Környezetvédelmi Ügynökség szabályozási modelljének (AERMOD) segítségével végezték. A második lépésben az építkezés közelében lakókra vonatkozóan egészségügyi kockázatértékelést végezték el.

Ezt a DALYs (Disability Adjust Life Years) mérőszámmal végezték. A DALYs mérőszáma rokkantság miatt elvesztett életévek és a korai halálozások miatt elvesztett életévek összege. Egy DALYs megfelel egy teljesen egészséges életév elvesztésének. Segítségével jól összehasonlítható az idő előtti halált, de rokkantságot nem okozó betegségek (pl. kanyaró) és a halált nem, de rokkantságot okozó (pl. vakságot okozó szürkehályog) betegségek (http12). Arra következtetésre jutottak az esettanulmány során, hogy a vizsgált iskolában 35,3%-kal magasabb volt az egészségügyi kockázat, mint a társasházakban. Ezzel szemben, ha a társasházak nagyobb lélekszámúak lennének, mint az iskolák (ahol az elemzést végezték), az összlakossági egészségügyi kockázat 63,2%-kal magasabb lenne.

2.4.3. Az épületek használati szakasza

Az épületek használati szakaszában releváns a beltéri levegő vizsgálata, mely függ a kültéri levegő minőségétől, a beltéri emissziós forrásoktól, az épület fizikai tulajdonságaitól és a beltéri légáramlási viszonyaitól, így a szellőzés sebességétől is. A szakirodalomban legtöbbször az illékony szerves vegyületekkel (VOC) valamint az ózonnal és a $PM_{2,5}$ értékekkel foglalkoznak (Wieser et al., 2021). Järnström és munkatársai lakóépületek beltéri levegő VOC koncentrációját vizsgálták, de ezen felül ammóniát és formaldehidet is mértek (Järnström et al., 2006). Vizsgálatuk során kiderül, hogy az ammónia és a formaldehid koncentrációja nyáron a legmagasabb. Az illékony szerves vegyületekkel kapcsolatban azt a megállapítást tették, hogy általában az első hat hónapban csökkent a legerőteljesebben a koncentráció, ezt követően lassan új VOC fajtákra cserélődtek, végül pedig az átlagos koncentráció $15 \mu g/m^3$ alatti szintre állt be. Általában a szerkezeti anyagként (pl.: építőanyag, lágyító) vagy lakberendezési elemként (pl.: bútor, padló, dekoráció) felhasznált anyagok okozzák a formaldehid- és a VOC-kibocsátását (Šenitková és Kraus, 2016). Fontos figyelembe venni a használati szakasz vizsgálatakor az épületek fűtés, szellőztető és a légkondicionáló rendszerek energia igényét és azok kibocsátását. Meglepő módon a beltéri levegő minőségét javító gépiesített szellőzőrendszerek több energiát igényelnek, így bizonyos szempontból ellentmondanak a kibocsátás csökkentési célkitűzésnek. A klímaberendezésekkel kapcsolatosan érdemes megemlíteni, hogy télen nagyobb mennyiségű lebegő részecskék juttathatnak be az épületekbe (Azuma et al., 2018). Tokióban, Oszakában és Fukuokában 17 légkondicionáló rendszert vizsgáltak meg. A többváltozós elemzések kimutatták, hogy a felső légúti tünetek (télen 107, nyáron pedig 207 irodai dolgozó esetében) szignifikáns korrelációt mutattak a kisebb ($0,3 \mu m$ -nél kisebb) részecskék koncentrációjával. Ezek a részecskék a környezeti levegőből a

légh Kondicionáló rendszerek szűrőanyagán keresztül jutottak be az irodákba. Ezért Azuma és munkatársai javasolták a nagy hatásfokú részecske-levegőszűrők alkalmazását és azok rendszeres karbantartását.

A kültéri levegőszennyezés - az O_3 , a NO_2 , a PM_{10} és a SO_2 - csökkentésére (Yang et al., 2008) és a CO_2 megkötésre (Shafique et al., 2020). Yang és munkatársai az intenzív zöldtető építését javasolja (Yang et al., 2008). Vizsgálatukban száraz lerakódási modell segítségével mérték a légszennyező anyagok eltávolítását Chicagóban. Kiderült, hogy évente 85 kg/ha szennyezőanyagot volt képes eltávolítani egy intenzív zöldtető. Összehasonlították a zöldtető és egy fa ültetését azok költsége és a szennyezőanyagok eltávolítási hatékonysága alapján. Egy közepes méretű fa ugyanannyi szennyezőanyagot tud eltávolítani egy év alatt, mint 19 m^2 extenzív zöldtető. A telepítési költség egy fa esetén azonban jóval alacsonyabb. A nagyobb költségek ellenére mégis van létjogosultsága a zöldtetőknek: szerepe van a csapadékvíz elfolyásának csökkentésében, az épület energiamegtakarításában, a városi hőszigetek csökkentésében és a tetők élettartamának meghosszabbításában. Somoskői és Leczovics kiemelik még a zajártalmak csökkentését és a pszichológiai jótékony hatásokat is (Somoskői és Leczovics, 2020).

2.4.4. Az épület életvégi szakasza

Az épületek életvégi szakasza során a bontási folyamatok és az építkezési hulladék elszállítása okoznak főleg levegő minőségterhelést. Azarmi és munkatársai a bontási munkálatok során keletkező részecskeszennyezést vizsgálták (Farhad Azarmi, 2016). A mért adatok alapján a durva részecskék jelentősen domináltak a bontás alatt, míg a finom részecskék aránya alacsonyabb volt. A vizsgálatukból kiderült az is, hogy a helyszínen mért szálló por értékekhez képest a kotrógép kabinjában és az ideiglenesen elhelyezett irodában lényegesen magasabb volt a szálló por koncentrációja. Más tanulmányban megfigyelték, hogy a megfelelő bontáskezeléssel csökkenthető a légszennyezés (Wieser et al., 2021). A bontást követően az építkezési hulladék elszállítása is jelentős kibocsátással jár. Zhang és munkatársai tanulmánya szerint a vizsgált pekingi épület egész életciklusa alatt történt kibocsátásból a PM 23,8%-a, a CH_4 0,18% és a NO_x 0,14%-a ekkor kerül kibocsátásra (X. Zhang et al., 2013).

2.4.5. Egy fenntarthatóbb alternatíva

A fejezet végén szeretnék bemutatni egy fenntarthatóbb építkezési alternatívát. A 2.4.1. alfejezetből kiderül, hogy az építőanyagok gyártása (például a cement, a beton, az acél, a tégl),

szállítása jelentős energia igénnyel így levegőterheléssel jár. Az alternatív építőanyagok, mint a mész, vályog, tehéntrágya használata általában helyben hozzáférhető és az előállításuk is kevésbé terheli a környezetet. Az égetett téglagyártásához közel 2 kWh energiát használnak fel, míg a napon szárított vályogtégla csak megújuló energia befektetést igényel. Egy indiai kutatómunka szerint az égetett téglából, betonból és cementből épült hagyományos ház (100 m^2) megépítésére 720 GJ energia szükséges, míg a vályogház csupán 475 GJ energia befektetéssel építhető meg (Shukla et al., 2009). Az alacsony energiaigényű anyagok előnyben részesítésével a környezetbe jutó CO_2 mennyiségét évente 101 tonnával lehetne csökkenteni. Az épület karbantartásához szükséges energia 59 GJ a hasznos élettartam során, összességében viszont 1,54 év alatt megtérül a befektetett energia egy vályogház esetén Shukla és munkatársai szerint.

Khoshnava és munkatársai szerint a hagyományos építőanyagok a beltéri levegő szennyezésének a fő forrásai (Khoshnava et al., 2020). A zöld építőanyagok ezzel szemben a környezetre és az emberi egészségre is kisebb negatív hatást gyakorolnak. Vizsgálatukban a teljesen kőolaj alapú kompozitot hibrid bioalapú biokompozitra cserélték. Kiderült, hogy a biokompozit több mint 50%-kal csökkentheti az emberi egészségre gyakorolt negatív hatásokat bel- és kültéren.

2.5. Az építkezéshez köthető szálló por emisszió egészségügyi vonatkozása

Chen és Hoek állítása szerint a $\text{PM}_{2,5}$ és a PM_{10} összefüggésben van a megnövekedett mortalitással, a szív- és érrendszeri betegségekkel, a légúti betegségekkel és a tüdőrákkal (J. Chen és Hoek, 2020). Az IARC (International Agency for Research on Cancer, azaz Nemzetközi Rákkutató Ügynökség) a kültéri levegőszennyezést és a szilárd részecskékből származó levegőszennyezést az 1. csoportba tartozó humán rákkeltő anyagok közé sorolta (http13). Mivel a tüdőrák az egyik leggyakoribb rákfajta, ráadásul rosszul prognosztizálható, több kutatómunka is foglalkozik vele (Hamra et al., 2014; Pun et al., 2017). Chen és Hoek áttekintő tanulmányából szintén kiderül, hogy a magas $\text{PM}_{2,5}$ és PM_{10} szint szignifikánsan megnöveli a tüdőrák okozta halál kockázatát (J. Chen és Hoek, 2020).

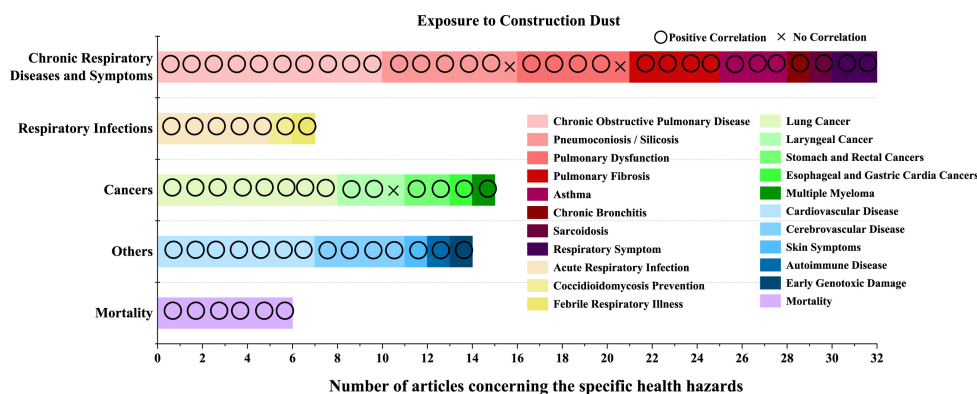
Megfigyelték, hogy a betegségek $\text{PM}_{2,5}$ -lél való összefüggései szilárdabbak voltak, mint a PM_{10} -zel, különösen a kardiovaszkuláris kimenetelek tekintetében. Például a stroke miatti halálozás kockázata szignifikánsan megnövekedett $\text{PM}_{2,5}$ -nek való kitettség következtében,

PM₁₀-zel azonban nem mindig találtak ilyen összefüggést. Minél kisebb a PM aerodinamikai átmérője, annál nagyobb egészségügyi kockázatot jelent (Khamraev et al., 2021). A PM₁₀ az orrüregben keresztül már a tüdőig is el tud jutni. Az 5 μm -nél kisebb részecskék már lerakódhatnak a légúti hörgőkben és a légúti ágcsókban, ezzel befolyásolva a tüdő gázcseréjét. A PM₁ tartományba eső por képes a véráramba kerülni, és továbbjutni a keringési rendszerbe majd a sejtszövetbe (Wang et al., 2023).

Wang és munkatársa az építési tevékenységek során keletkező részecskék (építési por) témájában megjelent publikációkat elemezték. A tanulmányukból származó 2.4. ábrán jól látszik, hogy több egészségügyi probléma forrása is lehet az építési por. A kutatómunkából kiderül az is, hogy az építési porral leginkább összefüggő egészségügyi veszély a COPD (Chronicus Obstruktív Pulmonary Disease) (Wang et al., 2023). A COPD egy tüdőbetegség, mely az alsóbb légutak szűkületével, krónikus elzáródással jár együtt, melynek következményeként légzési nehézséget okoz. Ezzel a tüdőbetegséggel foglalkozott Torén és Järnholm: vizsgálatuk 354 718 férfi építőmunkásra terjedt ki, melyet Svédországban végeztek 1971 és 2011 között (Torén és Järnholm, 2014). Kimutatták, hogy a szálló pornak való kitettség 32%-kal növelte meg a COPD miatti halálozás kockázatát. A nem dohányzók körében a COPD miatti halálozási kockázata különösen magas (53%-os), több mint kétszer akkora, mint a dohányzók esetében (24%).

A COPD-en kívül más megbetegedéseket és tüneteket is okoz a szálló pornak való kitettség (Wang et al., 2023). A már bemutatott 2.4. ábra is ezt szemlélteti. A szálló por hozzájárulhat a tüdőfibrózis (tüdőhegyesedés), tüdő diszfunkció, asztma, krónikus bronchitis (krónikus hörghurut), szarkoidózis, pneumoconiosis, szilikózis és egyéb légzőszervi tünetek

2.4. ábra. Az építési por expozíciója és a különböző egészségügyi veszélyek közötti összefüggésekkel foglalkozó cikkek száma. A „o” pozitív korreláció, az „x” korreláció hiányát jelenti az építési pornak való kitettség és az egészségügyi veszély között. (Forrás: Wang et al., 2023)



kialakulásához. A szilikózis kialakulásában szerepet játszik továbbá a szilícium-dioxid is, melynek kapcsán Wang és munkatársai megállapították, hogy az építési porok közül a ez a leggyakoribb veszélyes összetevő. A szilícium-dioxid a földkéregben leggyakrabban előforduló anyag, melynek egyik szerkezeti változata a kvarc (Gunter, 1999). Por formában belélegzve az IARC humán rákkeltők közé sorolta, ugyanis a tüdőrák kialakulásában nagy szerepe van. Rokni és munkatársai, Chen és munkatársai, illetve Normohammadi és munkatársai munkahelyi levegőben található kristályos szilícium-dioxid koncentrációját és annak kockázatait vizsgálták (X. Chen et al., 2019; Rokni et al., 2016; Normohammadi et al., 2016). A homokfűvés, a kerámiagyártás, a homok- és kavicsmunkák, a téglagyártás, az aszfaltgyártás, az öntödei tevékenység, az üvegyártás és a kövágás munkakörében dolgozókat vizsgálták Rokni és munkatársai (Rokni et al., 2016). A kristályos szilícium-dioxidnak való kitettségéből eredő tüdőrák élethosszig tartó többletkockázata ezer főre vetítve hetvenhárom fő volt. Normohammadi és munkatársai az épületbontásban dolgozók egészségügyi kockázatait mérte fel (Normohammadi et al., 2016). A szilikózis okozta halálozási kockázat egy fő a legalacsonyabb és 22,64 fő az ezer főből a legmagasabb kristályos szilícium-dioxid-por expozíciónál. A tüdőrák okozta halálozás kockázata 32 és 60 között mozgott 1000 kitett emberre nézve. Nij és munkatársai a kvarcot tartalmazó belélegezhető por hatásának radiológiai jeleit vizsgálta 1339 építőmunkásnál (Tjoe Nij et al., 2003). A munkások főként csiszolással, kalapálással, fűrással és vágással foglalkoztak. Az eredmények szerint a munkások 10,2%-ánál mutattak ki a pneumoconiosisra utaló radiológiai eltéréseket. Később a szerzők egy újabb tanulmányban megállapították, hogy a kvarcnak kitett építőmunkásoknál jelentősen megnő a szilikózis és a tüdőrák kockázata (Nij és Heederik, 2005). Az eredményeik szerint a szilikózis korai jelei a munkások 0,8%-ánál volt jelen, de ez az arány a nyomon követés során (4,5 év alatt) 12%-ra nőtt. Chen és munkatársai alagútépítés során vizsgálta a szilícium-dioxid pornak való kitettséget a kínai Chongqingben (X. Chen et al., 2019). Az eredményeik szerint a védőmaszkok tökéletes használat esetén 82%-kal, átlagos használat mellett pedig 26%-kal csökkentették az egészségügyi kockázatot.

A 2.4. ábrából kiderül, hogy akut légzőszervi megbetegedések és tünetek is kapcsolódnak az építési pornak való kitettséghez. Ilyen a lázas, a légúti betegségek és a Coccidioidomycosis (egy gomba spóra okozta megbetegedés influenzaszerű tünetekkel) is. A leggyakrabban vizsgált rákfajta a tüdőrák: nyolc publikáció egyértelmű korrelációt talált a szálló pornak való kitettséggel. A gégerák kialakulását vizsgáló tanulmányoknak azonban csak kétharmada fedezett fel hasonló korrelációt. A további rákfajtákra (nyelőcső, gyomorrák, Myeloma multiplex) is találtak összefüggéseket. Hét tudományos publikáció vizsgálta és talált

kapcsolatot szív- és érrendszeri betegségek kialakulás és a szálló pornak való kitettség között, további négy az agyi érrendszeri betegségekkel. Eredményezhet bőrtüneteket, autoimmun betegséget, valamint végső soron a halál okozója is lehet az építési por.

3. Alkalmazott módszerek

Munkám célkitűzése a szálló por értékek mérése és vizsgálata lakóhelyemen, melynek közelében építkezési munkálatok zajlanak. A méréseket egy PM szenzorral végeztem. A szenzor a lakóhelyem (1239 Budapest Szirmos utca, kertesház) kertjében lett felszerelve.

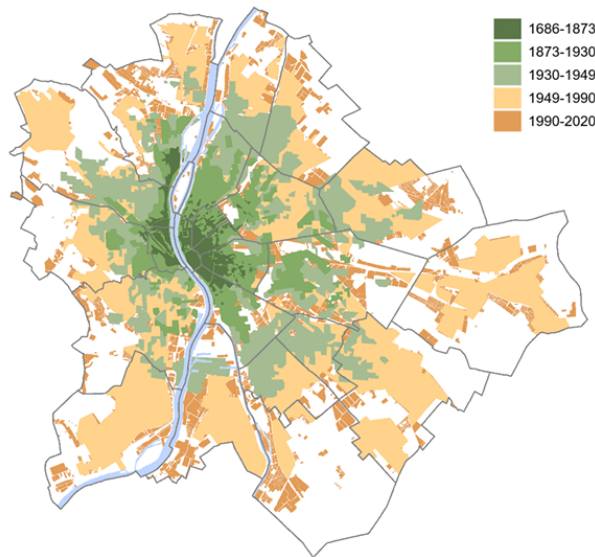
3.1. A mért terület jellemzése

Az ikerház, amiben élünk, Budapest 23. kerületéhez (Soroksár) tartozik, 2018-ban a Virág völgy lakópark részeként építették. Ez a $100\,000\text{ m}^2$ -en elterülő lakópark közel száz házával, azaz kétszáz lakásával nyújt otthont a családoknak. Az építkezést több mint hat éve kezdték, és továbbra is folyamatosan zajlanak a munkálatok, épülnek az újabb és újabb lakóhelyek. Az utak még nincsenek mindenhol leburkolva, melyből adódóan a munkagépek és a személygépkocsik jellemzően felverik és felkeverik a földút porát. Az építkezéshez megvalósuló különböző műszaki, építészeti és gépészeti kivitelezésekről a <https://www.viragvolgylakopark.hu/> weboldalon olvashatunk bővebben.

Lakóhelyemtől hozzávetőlegesen 150-200 méterre helyezkedik el a vasúti sín töltése, ahol szintén felújítási munkálatokat végeznek (Soroksár-Kelebia vasútvonal). A vonatok Soroksáron keresztül 2022. május 1-étől nem közlekednek. Azóta folyamatosan zajlanak munkálatok ezen a területen, amelyek várhatóan 2025-ben fognak lezárulni.

Soroksár sík területtel rendelkezik, amelyet homoktalajok és lösziszap különböző foltjai jellemzik. A területet főként keleti-délkeleti és nyugati-északnyugati szélirányok határozzák meg. Az éves átlaghőmérséklet 11 °C körüli, az éves csapadékmennyiség pedig 400-600 mm közé tehető (http14). Fontos említést tennünk arról is, hogy Budapest legritkábban lakott kerületéről beszélünk. Ahogyan Budapest, így Soroksár lakossága is növekedést mutatott az utóbbi években: a lakosság alakulását a 3.1. ábrán láthatjuk. A 2022-es népszámlálási eredmények alapján Soroksáron 13%-os lakottnövekedés történt 2001-hez viszonyítva. A nem lakott lakások aránya is csökkent a lakott lakásokhoz képest. A statisztikai adatok alapján az is kiderül, hogy a lakóépületek 8%-a az elmúlt tizenkét évben épült (http15).

3.1. ábra. Beépített területek alakulása 1686-2020 között Budapesten
(Forrás: <http14>)



3.2. A mérőműszer

A műszer elhelyezése 2024 december elején történt. A kertünkben, a kerítés közelében egy 3,5 méter magas oszlopra került felszerelésre a PM₁₀ és PM_{2,5} mérésére alkalmas műszer. A felszerelt szenzorról a 3.2. ábrán láthatunk fényképet.

A mérő szenzorok egy Raspberry Pi mikrokontrollhoz kapcsolódnak, amely képes a mért adatok tárolására is. A szenzorok por (Plantower PMS7003 szenzor) valamint hőmérséklet, páratartalom és nyomás (BME680 I2C) mérésére is alkalmasak. A Plantower PMS7003 szenzor az alacsony költségű érzékelők csoportjába tartozik. Működési elve szerint a lézerszórású szálló por szenzorok közé sorolják. A PM₁₀ és PM_{2,5} koncentrációk mérésére alkalmas. A mérési tartomány 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ között van. A mikrokontrollon és a szenzorokon kívül még egy GSM modul is került a lamellás burkolatba, mely segítségével leolvashatóak és számítógépre továbbíthatóak az adatelemzéshez szükséges adatok (Báthory et al., 2022). A védő funkciót ellátó burkolat időjárásálló, glikollal módosított polietilén-tereftalát felhasználásával készült. A műszer sematikus felépítését és kinézetét a 3.3. ábra szemlélteti.

3.3. A mért adatok feldolgozása

Az elemzéshez az adatok percenként álltak rendelkezésre. A mérést 2024. január másodikán kezdtem el, az utolsó mért nap pedig 2024.09.15. volt. A mért értékeket többféle feldolgozásban

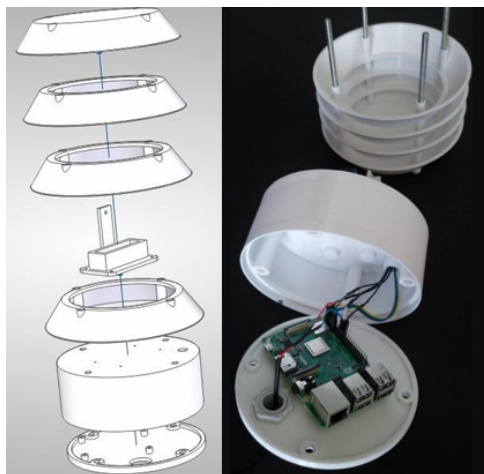
3.2. ábra. A kertünkbe elhelyezett műszer a 3,5 méteres oszlop tetején
(Forrás: Saját készítésű kép)



koordinátarendszeren szemléltetem, melyek elkészítéséhez a *matplotlib* Python csomagot használok. A nyers adatok beolvasást követően rendelkezésre álló összes mért adatból kiszámítottam az egész időszakra vonatkozó átlagokat és a szórásértékeket. Ezt követően elkészítettem a mért adatok órákra, illetve napokra vonatkozó átlagolását is. A mért és átlagolt értékeket az idő függvényében ábrázoltam.

A hőmérséklet, páratartalom és nyomás értékeket is feldolgoztam: a $PM_{2,5}$ és PM_{10} értékeket

3.3. ábra. Az alkalmazott műszer sematikus felépítése (balra) és egy valós megjelenés (jobbra)
(Forrás: Csongor Báthory, 2019)



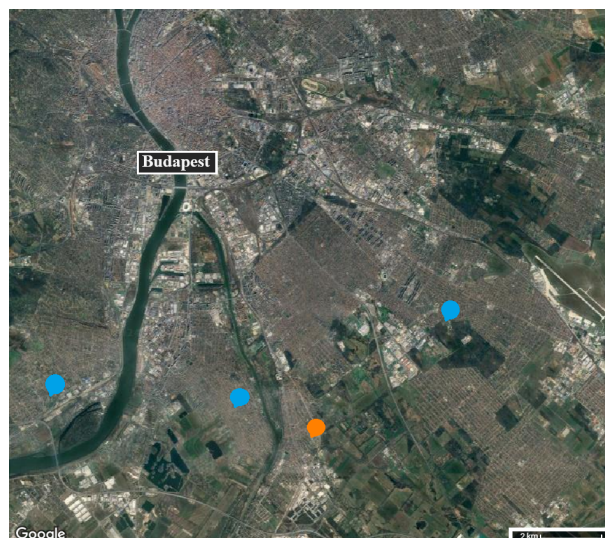
e meteorológiai tényezők értékeinek függvényében is ábrázoltam. A mögöttes összefüggések fellelérésére lineáris regresszió segítségével egyenest illesztettem az adatokra.

Megvizsgáltam a PM értékek órára levetített és átlagolt értékét is. Ezzel a célom a PM értékek alakulásának megfigyelése volt egy átlagos nap leforgása során. A hét napjaira is levetítettem a mért adatokat. Így lehetőségem nyílt megvizsgálni azt is, hogy miként alakulnak a PM értékek egy hét leforgása alatt - különös tekintettel a hétköznapi és hétvégi napokra.

Az általam végzett mérési adatok összehasonlításához az OLM automata mérőállomások adatait használtam fel. A legközelebbi három állomás adatait vettem figyelembe: Budapest, Gilice tér (városi háttér); Budapest, Csepel (külvárosi háttér) és Budapest, Budatétény (külvárosi háttér). A 3.4. ábra szemlélteti az OLM állomások és a saját mérés helyszínét. A csepeli állomáson nem történik $PM_{2,5}$ mérés, míg a többi állomás mind a PM_{10} , mind a $PM_{2,5}$ tartományban mér. A hivatalos honlapról (<http16>) letöltöttem az adatokat ugyanarra az időszakra vonatkozóan, amikor Soroksáron a méréseket végeztem. Az így megszerzett adatokat többféleképpen is összevettem az általam végzett mérésekkel: ábrázoltam azokat közös ábrán, illetve hivatalos és saját adatok különbségét is megvizsgáltam.

Céljaim között szerepelt az, hogy megvizsgáljam a PM értékek alakulását egy csapadékos, illetve egy nem csapadékos napon. A csapadékos és csapadék nélküli nap kiválasztásához a *HungaroMet Időjárási Napijelentés* kiadványa (<http17>) nyújtott segítséget. Az *Időjárási Napijelentés*ben egy-egy naphoz tartozó adatok nem az aznapi 0:00-tól 23:59-ig mért értékeket

3.4. ábra. A térképen narancssárgával a Budapest, 23. kerület Szirmos utcában elhelyezett saját műszer, kékkel balról jobbra a Budapest, 22. kerület Budatétény, Tűzliliom u. 12., Budapest 21. kerület Csepel, Szent István út 217-219. és a Budapest 18. kerület Gilice tér 39. alatt található OLM automata mérőállomások elhelyezkedése Google térképen bemutatva. (Forrás: Saját szerkesztés az OLM automata állomás címei alapján)



tartalmazzák, hanem a megelőző nap 7:00-tól aznap 7:00-ig mért 24 órás időintervallum értékeit. Olyan időszakokat kerestem a Napijelentésben, amikor a csapadékösszeg a legközelebbi - Budapest-Lőrinc -mérőállomáson meghaladta a 0 mm-t, illetve egy olyat, ahol ez az érték pontosan 0 mm volt. Előnyben részesítettem, még az olyan napokat, amikor nem csak erre az egy állomásra, hanem országszerte jellemző volt a csapadék megléte, illetve hiánya. Ezen túl ügyeltem, hogy maximum- és minimum hőmérsékletek, valamint a maximális szélsebesség adatai ne nagy mértékben térjenek el egymástól. Ezekre a napokra ábrázoltam a mért PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeket. Ennek az volt célja, hogy megvizsgáljam a két szállópor frakció mértékét és egymáshoz képesti arányát a két napon, valamint a csapadék kimosódását tudjam jellemezni.

4. Eredmények és értékelésük

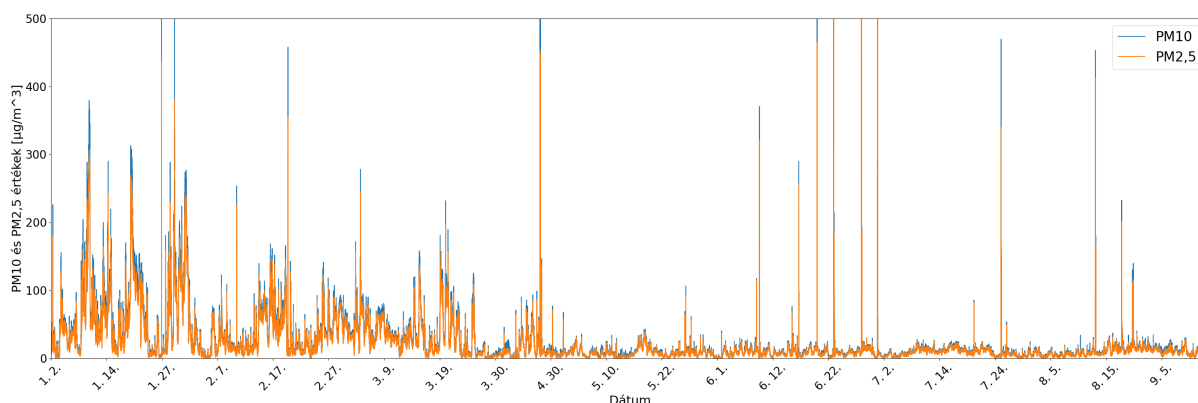
Célkitűzésem az volt, hogy megvizsgáljam a lakóhelyem területén a szálló por koncentrációját. Az adatok gyűjtéséhez az építkezési munkálatok közelében elhelyezett műszer percenként végzett mérést. Ennek megfelelően januártól kezdve különböző mért adatok állnak rendelkezésemre. Ezek közül elsősorban a $PM_{2,5}$, a PM_{10} értékeket, valamint a hőmérsékletet, a nyomást és a páratartalmat vizsgáltam. Terveim között szerepelt az is, hogy feltárjam a szálló por és az időjárási tényezők közötti kapcsolatot. A szálló por koncentrációjának értékelését többek között a 2.2. táblázatban feltüntetett WHO által javasolt határértékek, valamint a 2.3. táblázatról leolvasható 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben (http2) megkövetelt határértékek fényében értékelem.

A vizsgált időszak során mért összes $PM_{2,5}$ és PM_{10} mért értéket a 4.1. ábra szemlélteti. Ezen az ábrán jól látható, hogy a $PM_{2,5}$ értékei minden esetben a PM_{10} értékek alatt helyezkednek el. Ez összhangban van a 2.2 alfejezetben leírtakkal, miszerint a $PM_{2,5}$ részhalmaz a PM_{10} -nek. A $PM_{2,5}$ PM_{10} -hez viszonyított aránya az egész időszakra tekintve ($PM_{2,5} : PM_{10}$) 0,88. A mért adatokat további két ábrán szemléltetem: a 4.2. ábrán az óránkénti átlagokat, míg a 4.3. ábrán a naponkénti átlagokat mutatom be. Egyértelműen látszik, hogy az első négy hónapban mért értékek (átlagosan PM_{10} : $37,4 \mu g/m^3$; $PM_{2,5}$: $32,7 \mu g/m^3$) magasabbak a későbbi méréseknél (átlagosan PM_{10} : $9,3 \mu g/m^3$; $PM_{2,5}$: $8,3 \mu g/m^3$). Mindkét PM érték esetén 75%-os csökkenést figyelhetünk meg az első négy hónaphoz képest. Valószínűsíthető, hogy a fűtési szezon okozta a magasabb szennyezettséget.

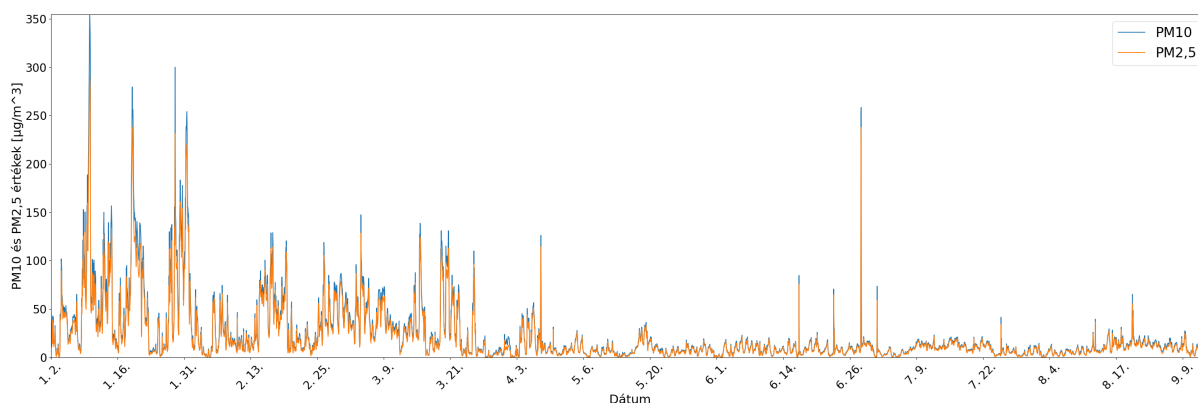
4.1. A mért értékek összevetése a HungaroMet Nonprofit Zrt. hivatalos adataival

Érdemes a mérőműszer által mért értékeket összevetni a HungaroMet Nonprofit Zrt. által mért hivatalos adatokkal. Ennek az összevetésnek elsősorban az a motivációja, hogy kiderüljön, hogyan viszonyul az általam vizsgált terület szennyezettsége a környékbeli állapothoz. Az összehasonlításhoz azon három mérőállomás adatait vettem figyelembe,

4.1. ábra. A PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékei
(Forrás: Saját munka)

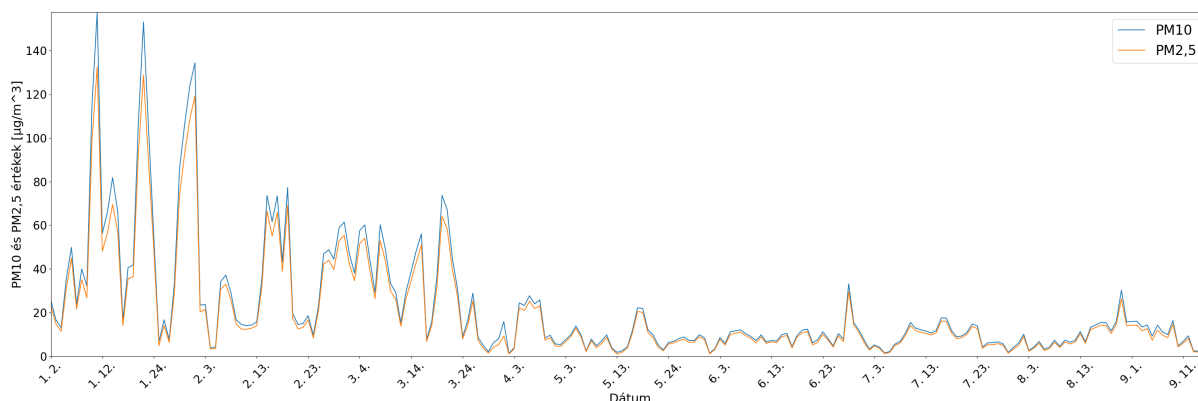


4.2. ábra. A PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek óránkénti átlagértékei
(Forrás: Saját munka)



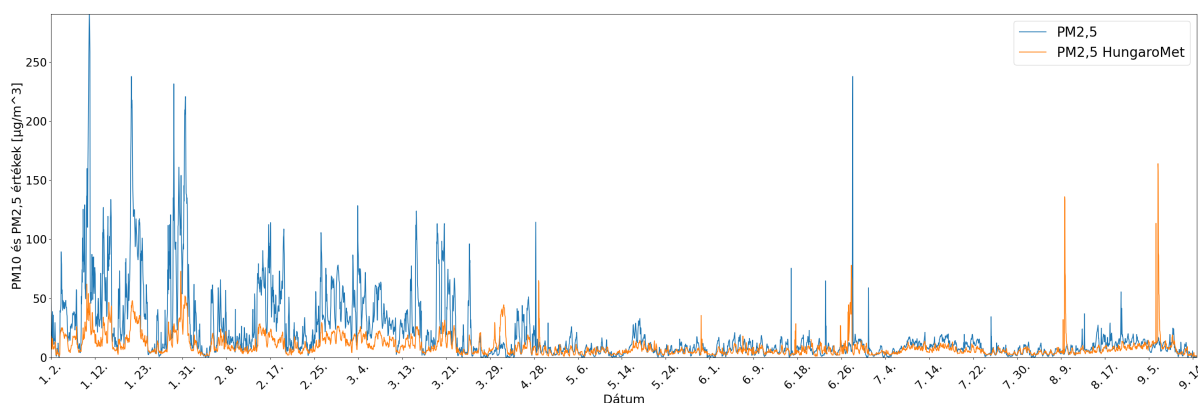
amelyek a vizsgált területhez a legközelebb helyezkednek el: Budapest, Gilice tér; Budapest, Csepel és Budapest, Budatétény. A hivatalos adatok óránkénti bontásban állnak rendelkezésre, így ezeket az általam mért adatok óránkénti átlagaival (4.2. ábra) érdemes összevetni. A három *HungaroMet* mérőállomásról származó adatokat átlagoltam, és két ábrán vizualizáltam: a $PM_{2,5}$ értékek alakulását a 4.4. ábrán, a PM_{10} értékek alakulását pedig a 4.5. ábrán. Ezeken az ábrákon egyértelműen látszik, hogy a hivatalos adatok hasonlóan mozognak az általam mért adatokhoz képest. Általánosságban az általam mért értékek magasabbak mind a PM_{10} , mind a $PM_{2,5}$ esetében. Ezzel összhangban a *HungaroMet* hivatalos $PM_{2,5}$ értékeinek átlaga $9,3 \mu g/m^3$, míg az általam mért átlag $20,1 \mu g/m^3$ volt. A PM_{10} értékeket illetően a *HungaroMet* hivatalos méréseinek átlaga $20,4 \mu g/m^3$, míg a vizsgált területen a PM_{10} értékek átlaga $22,8 \mu g/m^3$. Az átlagértékek összehasonlításából kiderül, hogy a vizsgált terület porszennyezettsége magas, különösképpen a $PM_{2,5}$ értékeket figyelembe véve. Ez egyértelműen alátámasztja

4.3. ábra. A PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek naponkénti átlagértékei
(Forrás: Saját munka)



4.4. ábra. A $PM_{2,5}$ mért értékeinek óránkénti átlagai és a HungaroMet Nonprofit Zrt. által mért hivatalos adatok

(Forrás: Saját munka OLM és saját adatok alapján)

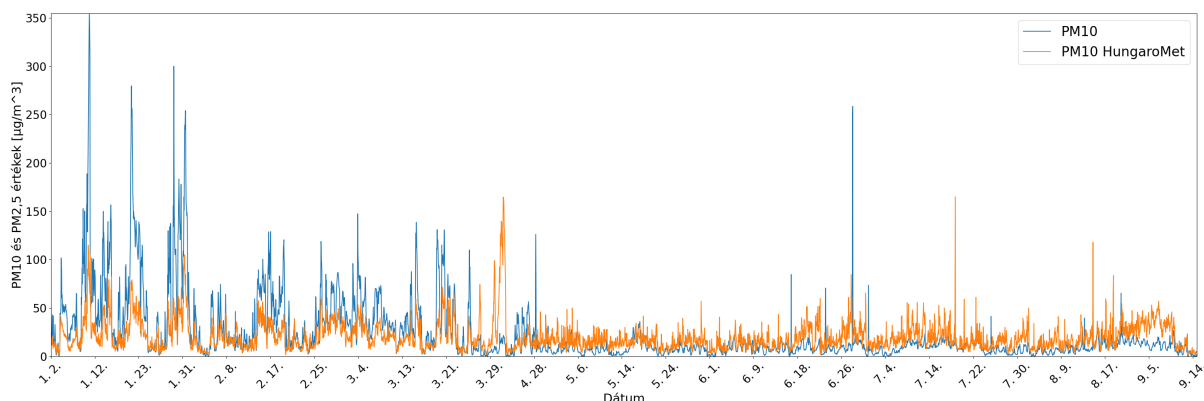


azt az alapfeltételezést, miszerint a közelben zajló építkezés jelentős mértékben szennyezi a környezetét.

A pontosabb értékelés végett a két-két adatsort kivontam egymásból és így kapott különbségeket is ábrázoltam az idő függvényében (4.6. ábra). A pozitív értékek a magasabb virágvízgyi értékeket, a negatív pedig a *HungaroMet* adatainak magasabb értékét jelentik. Ebben a megközelítésben látható az, hogy a március végéig a virágvízgyi mérések nagyrészt magasabbak, márciust követően viszont a virágvízgyi PM_{10} koncentráció általában kicsivel alacsonyabb értéket vesz fel a *HungaroMet* adataihoz képest. A $PM_{2,5}$ érték is kisebb differenciát mutatnak áprilistól, azonban átlagosan felülmúlják a *HungaroMet* adatait.

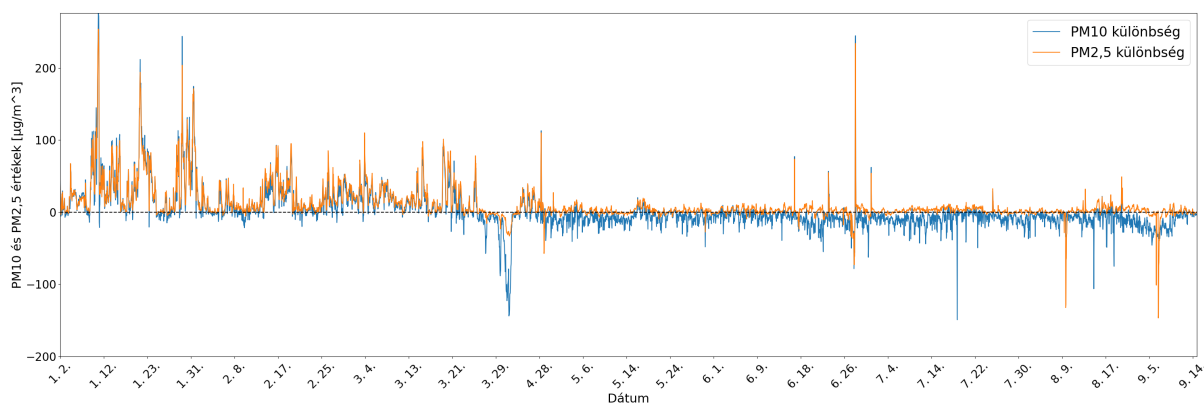
4.5. ábra. A PM_{10} mért értékeinek óránkénti átlaga, és a HungaroMet Nonprofit Zrt. által mért hivatalos adatok

(Forrás: Saját munka OLM és saját adatok alapján)



4.6. ábra. A saját mért PM_{10} és $PM_{2,5}$ adatok és az OLM három állomásán egy órás időközönként mért adatok átlagának különbsége

(Forrás: Saját munka OLM és saját adatok alapján)



4.2. Rendeleti határértékek, és azok átlépése

Az adatok vizsgálatát a határértékekkel való összehasonlításával folytattam. A 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben (<http2>) szabályozásokat találhatunk a levegőterheltségi szint határértékeiről. A PM_{10} határértéke egy évre vonatkozóan $40 \mu g/m^3$. Ez az érték összevethető az általam mért PM_{10} értékek átlagával¹, mely $22,8 \mu g/m^3$, ami nem csupán megfelel a rendeletben előírtaknak, hanem jó értékelést kapna az OLM Légszennyezettségi Index besorolása szerint. Az OLM Légszennyezettségi Indexelése a 2.1. ábra alapján osztályozható. A $PM_{2,5}$ értékek egészségügyi határértéke egy naptári évre vonatkozóan $25 \mu g/m^3$. A mérések

¹Az átlag összevetésénél fontos figyelembe vennünk, hogy a mérések nem egy teljes éven át zajlottak, így ezt az összehasonlítást némi fenntartással érdemes kezelünk.

20,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ átlagos értéket adnak, ami szintén megfelel az egy évre vonatkozó rendeleti határértéknek. A *Légszennyezettségi Indexelés* alapján a terület a *megfelelő* kategóriába sorolható.

A 4/2011. (I. 14.) VM (http2) rendeletben a PM_{10} 24 órára vonatkozó határértéke is meghatározásra került: 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ez motivált arra, hogy az adatok elemzése során a napi átlagértékek vizsgálatával is foglalkozzak. Ezek az értékek a 4.2. ábrán kerültek feltüntetésre. A PM_{10} értékek 24 órás átlaga a 225 mért napból 26 napon haladta meg a napi határértéket. Ez az esetek 11,6%-át, jelenti. A rendelet szerint a napi határérték egy naptári év alatt legfeljebb 35-ször léphető túl, azaz az év napjainak legfeljebb 9,5%-ában. A vizsgált terület ebből a szempontból nem felel meg a rendeletben megfogalmazott irányelveknek.

4.3. Adatok összevetése a WHO javaslatával

A WHO szigorúbb határértéket javasol (2.2. táblázat), mint az itthoni jogalkotásban meghatározott (2.3. táblázat). Az Európai Unió célkitűzéseiben szerepel, hogy a rendeleti határértékek közelítsenek ezekhez a határértékekhez. Az egy évre vonatkozó WHO által javasolt határértéket mind a két PM koncentráció átlépte ($\text{PM}_{2,5}$: 20,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} : 22,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A napi WHO határértékeket a 225 napból PM_{10} esetében 32 napon, $\text{PM}_{2,5}$ esetében pedig 73 napon haladta meg. Ez az esetek 14,2%-át illetve 32,4%-át jelenti.

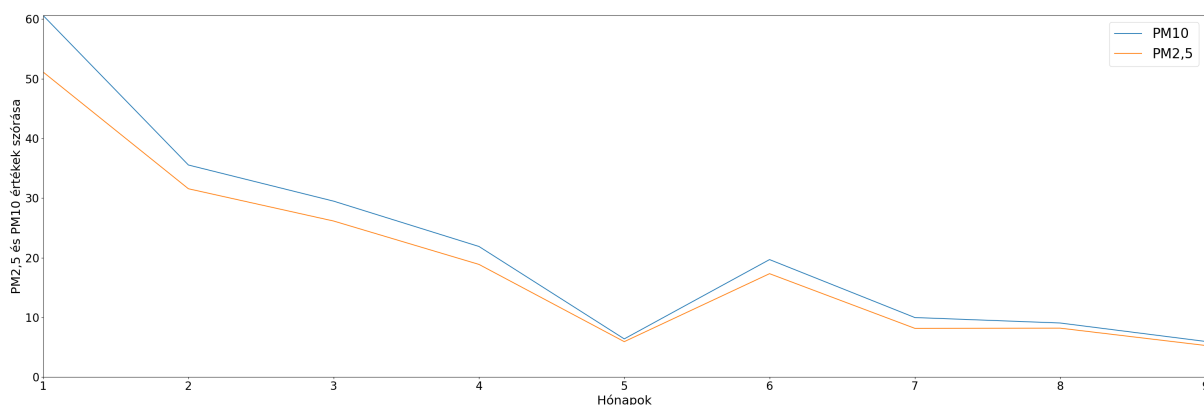
4.4. A mért adatok szórása és szélsőértékei

A mért adatokat megfigyelve a szálló por koncentrációja az idő függvényében igencsak ingadozónak mondható. Ahhoz, hogy az ingadozás mértéke megfigyelhető legyen, érdemes a mért adatok szórását kiszámolni. A PM_{10} értékek szórása 34,1, a $\text{PM}_{2,5}$ adatoké pedig 29,4. Ezek a szórásértékek igen nagy mértékű ingadozást sejtetnek, ha például az előbbieken tárgyalt határértékekhez hasonlítjuk ezeket az értékeket.

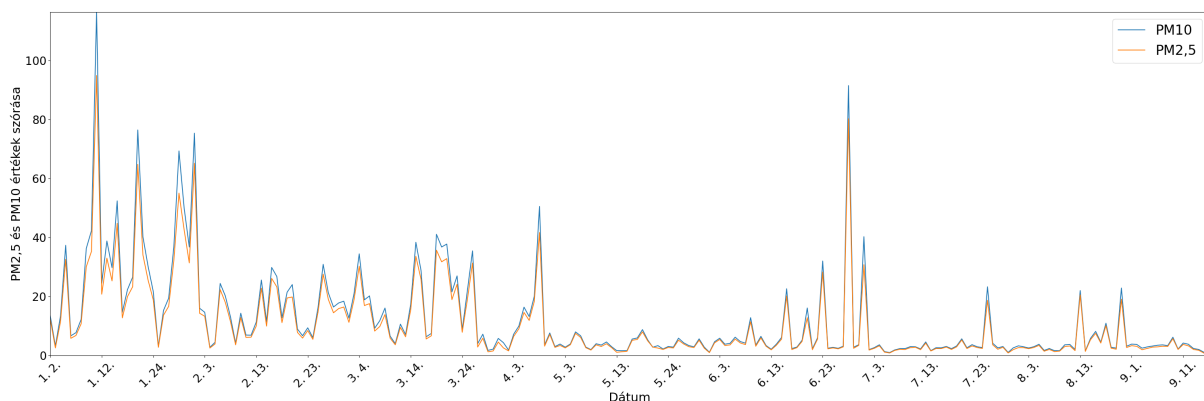
Az egyes hónapok szálló por alakulásának szórásait a 4.7. ábrán mutatom be. Ezen az ábrán alapvetően a szórás fokozatos csökkenése figyelhető meg. Az első négy hónap átlagos szórása (PM_{10} : 36,9; $\text{PM}_{2,5}$: 31,9) magasabb volt, mint a májustól szeptemberig tartó időszakban (PM_{10} : 10,2; $\text{PM}_{2,5}$: 9,0).

Megvizsgáltam az egyes napokhoz tartozó PM értékek szórásait is, melyeket a 4.8. ábrán vizualizálok. A mért időszak második felében megfigyelhető az alacsonyabb szórás, amely arra enged következtetni, hogy egy-egy napon a mért PM értékek közt nincs jelentős ingadozás.

4.7. ábra. Havi szórásértékek alakulása PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeire
(Forrás: Saját munka)



4.8. ábra. Naponkénti szórás alakulása PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeire
(Forrás: Saját munka)



Ezzel szemben a mért időszak első felében sokkal változatosabb szórásértékeket figyelhetünk meg: sok napon meglehetősen széles skálán oszlottak el a PM értékek, ugyanakkor szintén számos napon találkozunk a nyárihoz hasonló alacsony szórásértékkel.

A mérések között kifejezetten magas szélsőértékekre is figyelmesek lehetünk. A 4.1. táblázat foglalja össze a különböző maximumokat. A hónapokra átlagolt mérési adatok alapján a leginkább porszenyezett időszak január volt. A napi átlagértékek maximuma január 11. napjára esett. Erre a napra esett az óránkénti átlagok maximuma is, méghozzá reggel 5 órára. Az nyers mérési adatokat tekintve a legmagasabb érték az előbbiektől eltérően nem januárra esett: a mérések globális maximumát június 28-án 14:49-kor rögzítette a műszer.

4.1. táblázat. A percenként mért PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékek maximuma, illetve az óránkénti-, a naponkénti- és a hónaponkénti mérésátlagok maximuma
(Forrás: Saját munka)

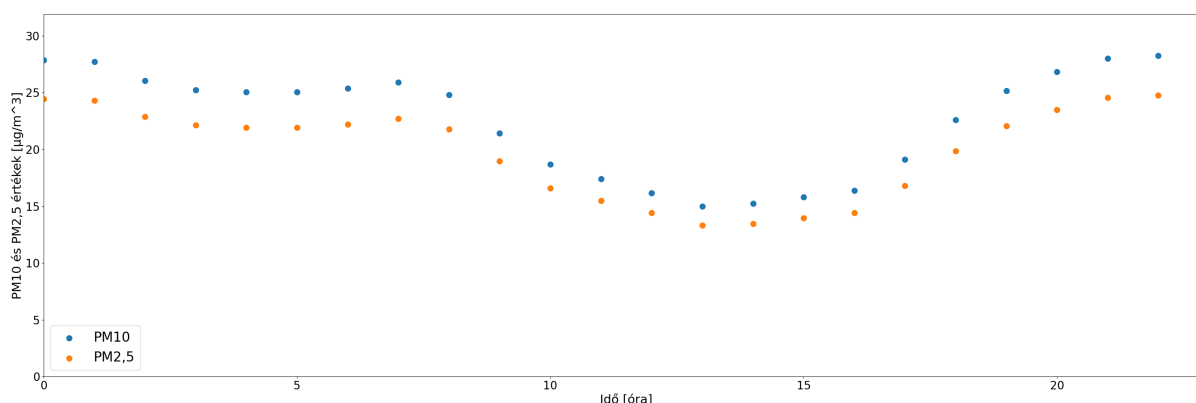
	Percenkénti mérés	Óránkénti mérésátlag	Naponkénti mérésátlag	Hónaponkénti mérésátlag
Dátum	jún. 28. 14:49	jan. 11. 5 óra	jan. 11.	január
PM_{10}	$930 \mu g/m^3$	$355 \mu g/m^3$	$158 \mu g/m^3$	$64 \mu g/m^3$
$PM_{2,5}$	$732 \mu g/m^3$	$291 \mu g/m^3$	$133 \mu g/m^3$	$55 \mu g/m^3$

4.5. Órákra és a hét napjaira vetített mérések

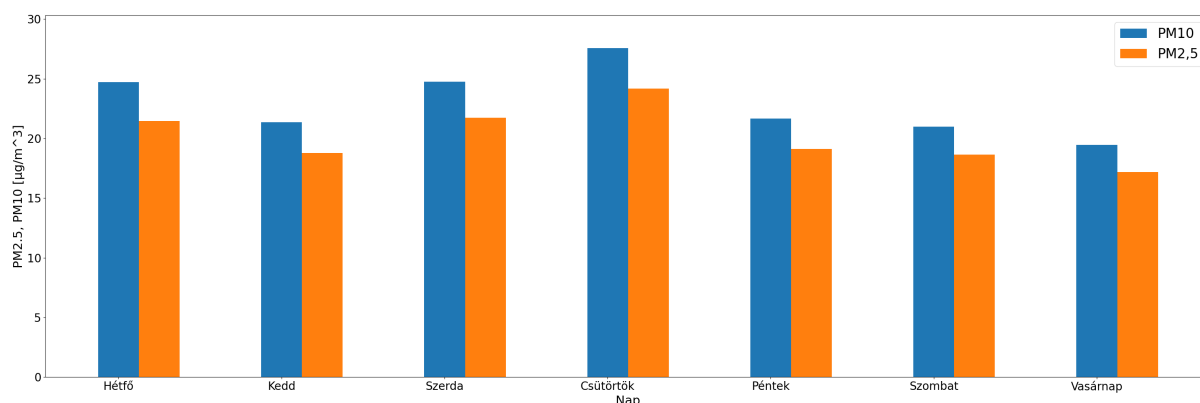
A megfigyeléseimet azzal folytattam, hogy megvizsgáltam a szálló por órákra vetített átlagos értékeit. Ezzel részben az volt a célom, hogy felderítsem, melyik órában a legmagasabb és melyik órában a legkisebb a szálló por értéke egy átlagos napon. Az ilyen módon levetített adatokat a 4.9. ábrán figyelhetjük meg. Az óránkénti átlagok értelmezéséből kiderül, hogy a szálló por értéke általában délután 1 óra környékén a legalacsonyabb (PM_{10} - $15,0 \mu g/m^3$ és $PM_{2,5}$ - $13,3 \mu g/m^3$). A legmagasabb adatokat az esti órákban, 23 órakor figyelhetjük meg (PM_{10} - $29,0 \mu g/m^3$ és $PM_{2,5}$ - $25,4 \mu g/m^3$). A reggeli órákban - 7 óra környékén - megfigyelhető egy további lokális maximuma az óránkénti értékeknek.

Megvizsgáltam azt is, hogy egy átlagos hét leforgása alatt hogyan alakulnak a PM-értékek. Ehhez elkészítettem a 4.10. ábrát, amelyen a hét napjaira levetítve oszlopdiagram segítségével ábrázolom a $PM_{2,5}$ és PM_{10} értékeket. A legmagasabb heti PM átlag a csütörtököt, míg a legtisztább levegő vasárnapokat jellemzi. Az ábrán még megfigyelhetőek a hétvégi alacsonyabb értékek. Virágölgyben a hétvégi porszennyezettség átlagosan 15,0%-os és 15,8%-os csökkenést mutat a hétköznapihoz képest (a $PM_{2,5}$ és PM_{10} értékekre vonatkozóan).

4.9. ábra. Egy átlagos nap PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékei
(Forrás: Saját munka)



4.10. ábra. A PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékek alakulása a hét napjain
(Forrás: Saját munka)



4.6. Időjárási tényezőkkel való kapcsolat feltárása

Megfigyeltem továbbá a szálló por kapcsolatát az időjárási tényezőkkel. A célom az volt, hogy felleljem, milyen összefüggések írhatók fel a hőmérséklet, légnyomás és páratartalom kapcsán. Az összefüggéseket lineáris regresszió segítségével approximáltam. Az így kapott függvényeket a 4.2. ábráról olvashatjuk le.

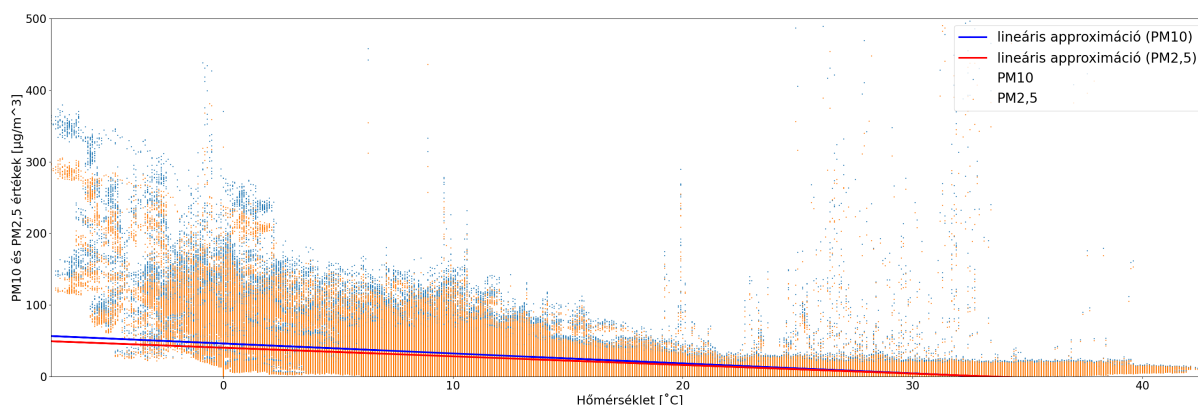
A szálló por koncentrációja a hőmérséklet függvényében a 4.11. ábrán figyelhető meg. A két tényező között könnyen észrevehető a fordított arányosság. Ez ellentétben áll a szakirodalomban taglaltakkal (2.3. alfejezet). A hidegebb időszakra még jellemző a magasabb PM_{10} koncentráció, melyet feltehetően a fűtés okoz. Láthatunk elszórtan kiugróan magas értékeket melegebb időjárás esetén is: ezt valószínűleg egyrészt a kedvezőbb időjárásban elvégzett hatékonyabb munka, másrészt a közelében zajló kerti sütögetések okozta. A legmagasabb PM értékekhez érdekes módon nem csupán alacsony értékek (legszenyezettebb óra: $-6^\circ C$, legszenyezettebb nap: $-1^\circ C$), hanem magas hőmérséklet is kapcsolódik (legszenyezettebb perc: $32,7^\circ C$).

A szálló por koncentráció légnyomással való viszonyát a 4.12. ábrán vizualizálom.

4.2. táblázat. A mért PM adatok időjárási tényezőkkel való összefüggéseit leíró függvények
(Forrás: Saját munka)

$PM_{2,5}$ a páratartalom függvényében (1.)	$f(x) = 0,48x + -5,72$
PM_{10} a páratartalom függvényében (2.)	$f(x) = 0,55x + -6,61$
$PM_{2,5}$ a nyomás függvényében (3.)	$f(x) = 0,01x + 7,66$
PM_{10} a nyomás függvényében (4.)	$f(x) = 0,02x + 8,42$
$PM_{2,5}$ a hőmérséklet függvényében (5.)	$f(x) = -1,20x + 40,33$
PM_{10} a hőmérséklet függvényében (6.)	$f(x) = -1,39x + 46,22$

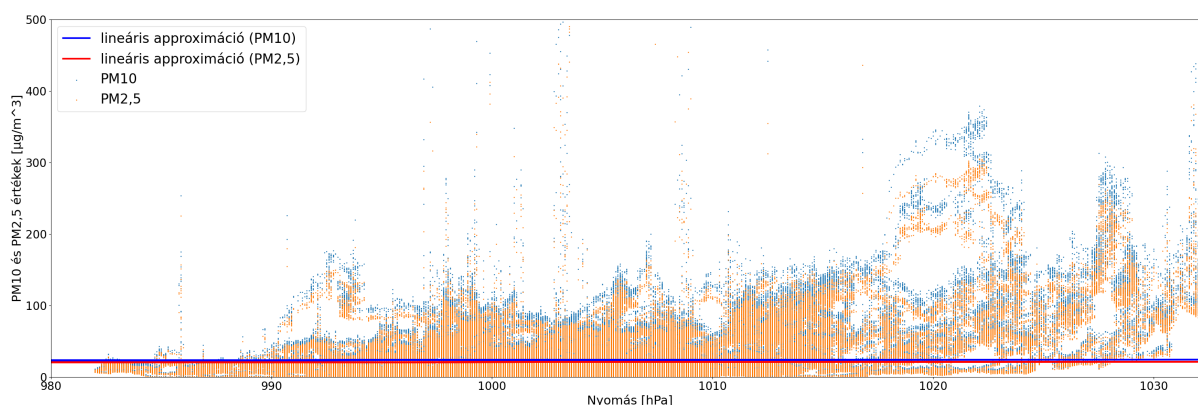
4.11. ábra. PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek a hőmérséklet függvényében
(Forrás: Saját munka)



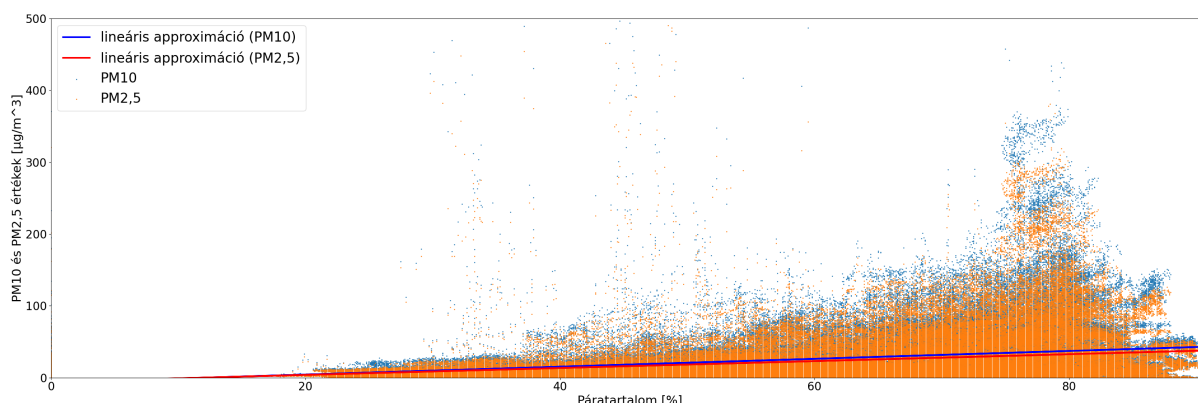
Látszólag nincs erős összefüggés a nyomás és a szálló por között, elhanyagolható meredekségű az adatokra approximált lineáris kapcsolat a két tényező között.

A relatív páratartalommal való kapcsolatot az 4.13. ábra mutatja be. Ezesetben egy olyan összefüggésre lehetünk figyelmesek, melyet nehéz lineáris regresszióval approximálni: 75% körüli páratartalomig egyenes arányosság figyelhető meg, mely 75% felett látszólag fordított arányosságra vált. Magas páratartalom esetén valószínűsíthető a kimosódás folyamata, vagyis a nedves kiülepedés. Az összefüggés 75% páratartalom körüli maximumát igazolni látszik a legszennyezettebb órához köthető átlagos páratartalom: 77,5%. A legszennyezettebb nap páratartalma is ehhez közeli értéket, 65,4%-ot mutat.

4.12. ábra. PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek a légnyomás függvényében
(Forrás: Saját munka)



4.13. ábra. PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek a páratartalom függvényében
(Forrás: Saját munka)



4.7. Egy csapadékos és egy csapadékmentes nap szálló por értékeinek elemzése

Az egyik célom az volt, hogy elemezzem az eső nedves ülepítő hatását, valamint a PM_{10} és $PM_{2,5}$ viszonyát egy csapadékos és egy csapadék nélküli napon. Kiválasztottam egy-egy napot az *Időjárási Napijelentés kiadvány* adatai alapján:

- Csapadékos nap: 2024.02.11. 7.00 - 2024.09.12. 7.00
- Száraz nap: 2024.02.29. 7.00 - 2024.03.01. 7.00

A dátum kiválasztás során figyelembe vettem az adott napra vonatkozó meteorológiai paramétereket, melyeket a vizsgált területhez legközelebbi (Budapest-Lőrinc) meteorológiai mérőállomáson mértek. Ennek ismertetésére szolgál a 4.3. táblázat. Szempont volt, hogy a csapadékösszeg kívül a két napon az időjárási változók (maximum és minimum hőmérséklet, maximális szélsebesség) között ne legyen nagy különbség. A szemléltetés érdekében a vizsgálat során a két nap PM értékeit egy grafikonon ábrázoltam (4.14. ábra), a nyers adatok helyett a tíz percenkénti átlagok feltüntetésével.

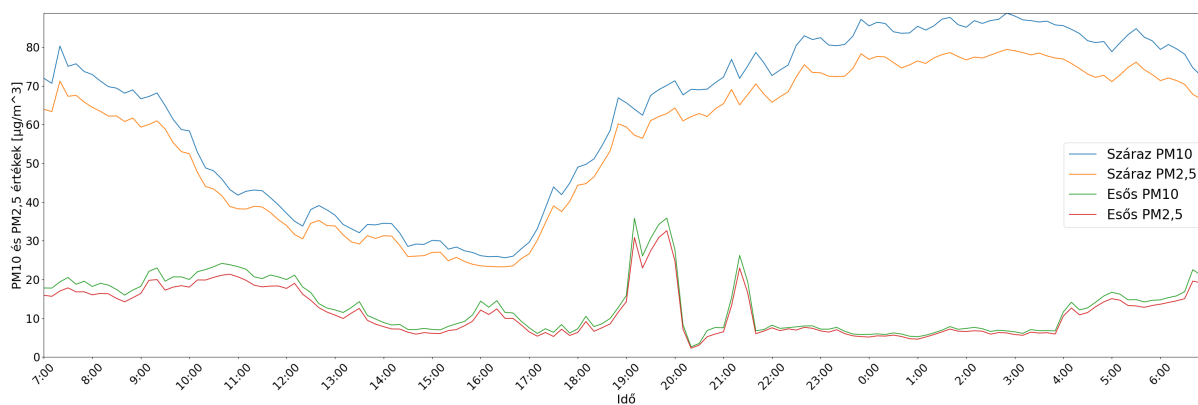
A száraz nap grafikonja végig magasabb értékeket fut be, mint az esős napé. A száraz nap görbáját összevetve az órákra vetített PM értékekkel (4.9. ábra) a PM maximum értékek itt is az esti órára esnek, bár 23 óránál valamivel későbbre. A reggel 7 óra környéki további lokális maximum erre a napra is jellemző. A legalacsonyabb értékeket azonban a kiválasztott száraz napon 16 óra környékén rögzítette a műszer. Megfigyelhető, hogy a száraz napon a PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeket leíró görbék egymáshoz viszonyítva távolabb helyezkednek el mint

4.3. táblázat. Egyesítő táblázat a száraz és csapadékos nap Budapest, Lőrinci mérőállomás különböző meteorológiai paramétereire, valamint saját PM értékek átlagára
(Forrás: Saját szerkesztés a Napijelentés kiadvány adatai ([http17](http://17)) és a saját adatok alapján.)

	Száraz nap	Csapadékos nap
Csapadékösszeg [mm]	0,0	14,8
Maximális hőmérséklet [°C]	16,0	12,4
Minimális hőmérséklet [°C]	7,2	7,0
Maximális szélsebesség [m/s]	6,0	7,7
PM ₁₀ átlag [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	62,9	13,2
PM _{2,5} átlag [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	56,6	11,7
PM ₁₀ szórás	21,1	7,0
PM _{2,5} szórás	18,9	6,2

a csapadékos napon. A száraz napon a PM_{2,5} és PM₁₀ arány valamelyest nagyobb, mint a csapadékoson. A száraz és csapadékos nap szórása is eltérő: a csapadékos napot kisebb szórás jellemzi, amely kiderül a 4.3. táblázatból. A csapadékos napon mért PM értékek alakulása igencsak eltér az átlagostól. Ez alapján is látható, hogy a csapadék nagy mértékben befolyásolja a szálló por alakulását.

4.14. ábra. A vizsgált csapadékos és száraz napon mért PM_{2,5} és PM₁₀ értékek
(Forrás: Saját munka)



5. Következtetések és javaslatok

E fejezet célkitűzése a 23. kerületi Virágölgy lakóparkban elvégzett vizsgálatok alapján a következtetések levonása és javaslatok megfogalmazása. A 2024.01.02. és 2024.09.15. között elvégzett mérések alapján egyértelműen látszik a lakópark átlagon felüli szennyezettsége, melyet feltehetően a folyamatos építkezési emisszió okoz. A mért adatokat érdemes a 2. fejezetben áttekintett szakirodalom fényében értelmeznünk.

5.1. A $PM_{2,5}$ PM_{10} -hez viszonyított aránya

Az egész időszakra vonatkozóan a $PM_{2,5} : PM_{10}$ arány 0,88. Sirithian és Thanatrakolsri összefoglaló tanulmánya alapján ez magas értéknek mondható (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022).

A magas $PM_{2,5}$ értékek egészségügyi szempontból rendkívül kedvezőtlenek: lerakódhatnak a légúti hörgőkben és a légólyagocskákban, ezzel befolyásolva a tüdő gázcseréjét (Khamraev et al., 2021). Fontos volna az építkezési munkálatok során felmérni a $PM_{2,5}$ kibocsátások fő okozóit, illetve ezek ismeretében megtenni a $PM_{2,5}$ értékének csökkentéséhez szükséges lépéseket.

5.2. Környékbeli mérőállomások adataival való összevetés

A legközelebbi három mérőállomás (Budapest Gilice tér, Csepel és Budatétény) adataival összevetve az általam mért értékek jellemzően magasabbak mind PM_{10} , mind $PM_{2,5}$ koncentrációját tekintve. Ez különösen is igaz a januártól március végéig tartó időszakra vonatkozóan.

A mérőállomások $PM_{2,5}$ értékeinek átlaga $9,3 \mu g/m^3$, míg az általam mért átlag $20,1 \mu g/m^3$. Ebből látszik, hogy a lakóparkban átlagosan több, mint kétszeres a $PM_{2,5}$ értékekre vonatkozó porszennyezettség, amely kiemelt fontosságú, és fokozott figyelmet igényelne.

A PM_{10} értékeket illetően a mérőállomások méréseinek átlaga $20,4 \mu g/m^3$, míg a vizsgált területen a PM_{10} értékek átlaga $22,8 \mu g/m^3$.

A lakóparkban mért értékek legszignifikánsabban a március végével bezárólagos időszakban vettek fel kritikusan magas értékeket. Javasolt volna így erre az időszakra fókuszálva az építkezés során a szálló por (főleg a $PM_{2,5}$) értékeket csökkentése, például ködágýúval (Yan et al., 2023). Ezen túl a beltéri levegő minőségének javítása érdekében érdemes a legkondicionáló rendszereket ez idő alatt karbantartani, illetve nagy hatásfokú részecske-levegőszűrőkkel ellátni (Azuma et al., 2018).

5.3. Rendeleti határértékekkel való összevetés

A PM_{10} és $PM_{2,5}$ megfelelt az egy évre vonatkozó 4/2011. (I. 14.) VM rendeletbe foglalt határértéknek.

A PM_{10} 24 órára vonatkozó 4/2011. (I. 14.) VM rendeletbe foglalt határértéke $50 \mu g/m^3$, ez 35-ször léphető túl egy év alatt (az év napjainak 9,5%-a). A Virágvölgyben mért 225 napból 26 napon lépték át ezt a határértéket a PM_{10} értékek, amely a mért időszak napjainak 11,6%-át jelenti.

Javasolt a magas PM_{10} kibocsátást okozó tevékenységek beazonosítása és jobb menedzselése (Alvanchi et al., 2020). A vízpermetezés alkalmazása is feltétlen javallott (Yan et al., 2023).

5.4. WHO által javasolt határértékekkel való összevetés

A lakóparkban mért PM_{10} és a $PM_{2,5}$ értékek egyaránt meghaladták az egy évre vonatkozó WHO által javasolt határértéket. A PM_{10} és $PM_{2,5}$ 225 napból rendre 32 és 73 napon lépték át a WHO által javasolt napi határértékeket.

Érdemes törekedni a WHO által ajánlott határértékek betartására, mivel a hamarosan (2030-ra) az Európai Unió Tanácsa a WHO javaslatához szorosabban igazodó PM határértékeket fog meghatározni (<http11>). A lakóterületen történő légszennyezés csökkentése történhet akár zöldtetők építésével vagy a fák ültetésével (Yang et al., 2008; Somoskői és Leczovics, 2020). Megfontolandó az építkezéshez fenntarthatóbb alternatív építőanyagok, például a vályog alkalmazása is (Shukla et al., 2009).

5.5. Mért PM értékek szórása

A mért PM₁₀ és PM_{2,5} értékek egész időszakra vonatkozó szórása 34,1 és 29,4. Ez nagy kilengésekre enged következtetni, melyek az 4. fejezetben található ábrák is jól láthatóak.

Az első négy hónap átlagos szórása (PM₁₀ esetén 36,9, PM_{2,5} esetén 31,9) lényegesen magasabb, mint májustól szeptemberig tartó időszak szórása (PM₁₀ esetén 10,2, PM_{2,5} esetén 9,0). Ez összhangban van Javed és munkatársai megállapításával (Javed et al., 2021), miszerint a szezonális változékonyság télen volt a legnagyobb a PM értékekben és nyáron a legalacsonyabb.

5.6. A szállópor óránkénti átlagainak értelmezése

A legalacsonyabb értékek általában délután 1 óra környékén fordulnak elő (PM₁₀ - 15,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ és PM_{2,5} - 13,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Javasolt ekkor szellőztetni a megfigyelt területen.

A legmagasabb értékek általában esti órákban, 23 órakor figyelhetjük meg (PM₁₀ - 29,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ és PM_{2,5} - 25,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Javasolt ekkor kerülni az levegő beengedését. Javed és munkatársai a napi ingadozás vizsgálatokor szintén figyelmesek lettek az éjszakai (lokális) maximumra (Javed et al., 2021).

Reggel 7 óra környékén megfigyelhető egy további lokális maximuma a mért adatok átlagának. Javed és munkatársai több városban is megfigyeltek egy második lokális maximumot a reggeli órák környékén (Javed et al., 2021). Janhall és munkatársai a reggeli közlekedést nevezték meg a reggeli lokális maximum kialakulásának egyik okaként (Janhall et al., 2006). Virág völgyben is feltételezhető, hogy a lakosok munkába indulva a burkolatlan utakról felverődő porral jobban terhelik a levegőt. Ezen túl a reggeli lokális maximum további okozója lehet a nap reggelén elkezdődő építkezési munka is. Szerepet játszhat továbbá a reggeli hőmérsékleti inverzió is, mely megnövelheti a szálló por koncentrációt. (Janhall et al., 2006)

Összevetve a Peking-Tianjin-Hebei régióban végzett vizsgálatokkal (Zhao et al., 2020) a virág völgyi adatokat, hasonló napi trenddel találkozunk (a csapadék nélküli napokat tekintve).

5.7. A hétvégi alacsonyabb szállópor értékek

A hétvégi porszennyezettség átlagosan 15,0%-os és 15,8%-os csökkenést mutat a hétköznapi napokhoz képest (rendre a PM_{2,5} és PM₁₀ értékekre vonatkozóan).

Ezek az eredmények összhangban vannak Tao és Harley által San Francisco-öbölben és San Joaquin-völgyben végzett mérésekkel (Tao és Harley, 2014). Érdekes megjegyezni, hogy a virág völgyi csökkenés nagyobb mértékű. Tao és Harley más várost is vizsgáltak, ahol nem detektáltak csökkenést, vagy csupán elhanyagolható különbséget találtak.

5.8. A szálló por és a meteorológia változók összefüggése

A szálló por koncentrációja a hőmérséklet függvényében a fordított arányosságú. Ez egy egyedi jelenség, ugyanis több publikációba ezzel ellentétes eredményekről számolnak be (Pateraki et al., 2012; Sirithian és Thanatrakolsri, 2022; Barmpadimos et al., 2012). Ugyanakkor találunk olyan tanulmányt is, ahol nem találtak egyértelmű kapcsolatot a hőmérséklet és a szálló por koncentrációja között (Yan et al., 2023).

A szálló port légnyomás függvényében approximáló egyenes elhanyagolható meredekségű. Ez összhangban van Yan és munkatársai megállapításával (Yan et al., 2023).

A szálló por koncentrációt a páratartalom függvényében vizsgálva 75% körüli páratartalomig egyenes arányosság figyelhető meg. Ez 75% felett láthatóan fordított arányosságra vált. Magas páratartalom esetén valószínű a részecskék talajra történő lerakódása (Sirithian és Thanatrakolsri, 2022).

Javasolt a hőmérséklet és páratartalom várható alakulásával összhangban tervezni az építkezési tevékenységeket, valamint PM csökkentési intézkedéseket (Yan et al., 2023), ezekkel óva a közelben lakók egészségét.

5.9. Egy száraz és csapadékos nap összehasonlítása

Egy tüzetesen megvizsgált csapadékos napon kisebb szálló por értékeket mért a műszer, mint a száraz napon. Ezen a csapadékos napon a PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeket leíró görbék egymáshoz viszonyítva közelebb helyezkednek el. Ez megfelel Zhang és munkatársai észrevételének, miszerint a csapadék általában könnyebben kimossa a nagyobb aerodinamikai átmérőjű részecskéket, mint a kisebbeket (B. Zhang et al., 2018).

Ennek tudatában érdemes az építkezés során a várható időjárás figyelembevételével alkalmazni porcsökkentésre alkalmas eszközöket, mint ahogy azt Yan és munkatársai is javasolják (Yan et al., 2023).

6. Összefoglalás

A diplomadolgozat célkitűzése az építkezési munkálatok okozta légszennyezés vizsgálata. A légszennyező anyagok közül a dolgozat elsősorban a szálló por (PM_{10} és $PM_{2,5}$) koncentrációjával foglalkozik. A szálló por magas koncentrációja számos betegség kialakulásához hozzájárulhat, köztük a krónikus légúti megbetegedésekhez, a szív- és érrendszeri problémákhoz, valamint fokozott veszélyt jelenthet a gyermekek és várandós nők számára. A veszélyek minimalizálására irányuló javaslatokkal és rendeletekkel találkozhatunk nemzeti és nemzetközi szinten egyaránt. A kutatómunka során a pillanatnyilag bővülő Virágvölgy lakópark (Budapest 23. kerület) egyik kertjébe elhelyezett műszer segítségével adatokat gyűjtöttem a levegő minőségéről: a mérőeszköz 2024 januárjától kezdődően percenként méri a PM_{10} és $PM_{2,5}$ koncentrációját. A dolgozat célja adatok gyűjtésén túl azok elemzése és illetve következtetések levonása volt.

A dolgozat részletesen vizsgálja a PM értékek alakulását: számos ábra segíti a mérések értelmezését. A PM értékek szórását különböző időintervallumokban elemeztem, amelyből megfigyelhetőek az adott időszakokra jellemző változások. A méréseket levetítve egy napra kirajzolódik a trend, amelyet a szálló por értékek egy átlagos nap leforgása során követnek: kiderül többek között az is, hogy a szálló por koncentrációja általában délután 1 óra körül a legalacsonyabb. A hét napjaira vonatkozó átlagok kiszámításával nyomon követhetővé vált a PM értékek alakulása egy átlagos hét során.

A szálló por koncentrációjára vitathatatlanul hatnak a különböző időjárási tényezők. Mivel a felhelyezett műszer képes a páratartalom, hőmérséklet és légnyomás mérésére, lehetőségem nyílt megvizsgálni a szálló por kapcsolatát ezekkel a tényezőkkel. Ábrázoltam a PM értékeket e tényezők függvényében, majd lineáris regresszió segítségével egyeneseket approximáltam az adatokra. A dolgozat szemügyre vesz továbbá egy csapadékos (02.11. 7:00 - 02.12. 7:00) és egy csapadékmentes (02.29. 7:00 - 03.01. 7:00) 24 órás időintervallumot: az összehasonlításból nem csupán a csapadékos nap alacsonyabb PM értékeit figyelhetjük meg, hanem a magasabb $PM_{2,5}:PM_{10}$ arányra is felfigyelhetünk a csapadékos napon.

Az értékelés során nyilvánvalóvá vált, hogy az építési munkálatok nagy mértékben rontják

a levegő minőségét. A saját méréseket és a *HungaroMet Nonprofit Zrt.* által hivatalossá tett méréseket összevetve kiderül, hogy a lakópark átlagon felül szennyezett, különös tekintettel a $PM_{2,5}$ értékekre: $9,3 \mu g/m^3$ helyett $20,1 \mu g/m^3$. A PM_{10} -re vonatkozó rendeletben meghatározott napi határértéket a mért napi PM_{10} átlagértékek 26 napon lépték át. Ez a mért napok 11,6%-át teszi ki, amely több a rendeletben meghatározott maximális értéknél (9,5%). A WHO javaslatait figyelembe véve a lakóparkban mért $PM_{2,5}$ értékek 73 napon lépték át, míg a PM_{10} értékek 32 napon lépték át javasolt határértéket.

A diplomadolgozat rávilágít a szálló por koncentrációjának kockázataira, mely különösen az építkezési tevékenységek közelében élő lakosokat érintheti. A mérések kapcsán készült elemzések alapján látszik a PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékek magas volta, melyek meghaladják a környéki átlagot. A kutatómunka felhívja a figyelmet az építkezési munkákkal kapcsolatos szabályozásokra szigorítására és a folyamatos levegőminőség-ellenőrzésre.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni köszönetemet és hálámat témavezetőmnek, Géczi Gábornak, aki nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre. Szakértelme, türelme és útmutatása meghatározó szerepet játszott a dolgozatban bemutatott kutatómunka elvégzése során. Az általa biztosított szálló por koncentrációját mérni képes műszer nélkül a munkát nem tudtam volna elvégezni. A tőle kapott tanácsok és visszajelzések nagy mértékben segítettek a diplomadolgozat megírása során.

Köszönet illeti továbbá férjemet, szüleimet, testvéreimet és barátaimat, akik támogatásukkal és folyamatos biztatásukkal segítettek abban, hogy a dolgozatot elkészíthessem.

Irodalomjegyzék

- M. L. Adatközpont (2023). Az OLM 2022. évi szálló por PM₁₀ és PM_{2.5} mintavételi programjának összesítő értékelése. URL: <https://legszenyezettseg.met.hu/levegominoseg/ertekelesek/olm-ertekelesek>.
- A. Alvanchi, M. Rahimi, M. Mousavi és H. Alikhani (2020). „Construction schedule, an influential factor on air pollution in urban infrastructure projects”. *Journal of Cleaner Production* 255, 120222. old.
- Z. Angyal, G. Ballabás, G. Csüllög, L. Kardos, B. Munkácsy, R. Pongrácz és M. Szabó (2012). „A környezetvédelem alapjai”.
- F. Azarmi, P. Kumar, D. Marsh és G. Fuller (2016). „Assessment of the long-term impacts of PM 10 and PM 2.5 particles from construction works on surrounding areas”. *Environmental Science: Processes & Impacts* 18.2, 208–221. old.
- K. Azuma, K. Ikeda, N. Kagi, U. Yanagi és H. Osawa (2018). „Physicochemical risk factors for building-related symptoms in air-conditioned office buildings: Ambient particles and combined exposure to indoor air pollutants”. *Science of The Total Environment* 616-617, 1649–1655. old. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.147>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717328577>.
- I. Barmpadimos, J. Keller, D. Oderbolz, C. Hueglin és A. S. H. Prévôt (2012). „One decade of parallel fine (PM_{2.5}) and coarse (PM₁₀–PM_{2.5}) particulate matter measurements in Europe: trends and variability”. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12.7, 3189–3203. old. DOI: 10.5194/acp-12-3189-2012. URL: <https://acp.copernicus.org/articles/12/3189/2012/>.
- C. Báthory, Z. Dobó, A. Garami, Á. Palotás és P. Tóth (2022). „Low-cost monitoring of atmospheric PM—development and testing”. *Journal of Environmental Management* 304, 114158. old. ISSN: 0301-4797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114158>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721022209>.
- M. Böhm, M. Z. Salem és J. Srba (2012). „Formaldehyde emission monitoring from a variety of solid wood, plywood, blockboard and flooring products manufactured for building and furnishing materials”. *Journal of hazardous materials* 221, 68–79. old.
- B. Bowe, Y. Xie, Y. Yan és Z. Al-Aly (2019). „Burden of cause-specific mortality associated with PM_{2.5} air pollution in the United States”. *JAMA network open* 2.11, e1915834–e1915834.

- A. Chaloulakou, P. Kassomenos, N. Spyrellis, P. Demokritou és P. Koutrakis (2003). „Measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} particle concentrations in Athens, Greece”. *Atmospheric Environment* 37.5, 649–660. old. ISSN: 1352-2310. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00898-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00898-1). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231002008981>.
- J. Chen és G. Hoek (2020). „Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis”. *Environment International* 143, 105974. old. ISSN: 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020319292>.
- X. Chen, C. Guo, J. Song, X. Wang és J. Cheng (2019). „Occupational health risk assessment based on actual dust exposure in a tunnel construction adopting roadheader in Chongqing, China”. *Building and Environment* 165, 106415. old. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106415>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319306250>.
- D. Cheriyan, K. Y. Hyun, H. Jaegoo és J.-h. Choi (2020). „Assessing the distributional characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ exposure profile produced and propagated from a construction activity”. *Journal of Cleaner Production* 276, 124335. old. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124335>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620343808>.
- Z. D. Csongor Báthory (2019). „Improving air quality at eight Hungarian regions through the implementation of air quality plan measures”. *The LIFE IP HUNGAIKY project*.
- E. Ekinici, Y. Kazancoglu és S. K. Mangla (2020). „Using system dynamics to assess the environmental management of cement industry in streaming data context”. *Science of the total environment* 715, 136948. old.
- P. K. Farhad Azarmi (2016). „Ambient exposure to coarse and fine particle emissions from building demolition”. *Atmospheric Environment* 137, 62–79. old. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.029>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016303120>.
- U. Gehring, A. H. Wijga, M. Brauer, P. Fischer, J. C. de Jongste, M. Kerkhof, M. Oldenwening, H. A. Smit és B. Brunekreef (2010). „Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life”. *American journal of respiratory and critical care medicine* 181.6, 596–603. old.
- M. E. Gunter (1999). „Quartz–The Most Abundant Mineral Species in the Earth’s Crust and a Human Carcinogen?”: *Journal of Geoscience Education* 47.4, 341–349. old.

- B. Halász (2021. máj.). *Miért szennyezhet egy új ház többet, mint egy régi? Szén-dioxid kibocsátás az építőiparban*. URL: <https://masfelfok.hu/2021/05/14/miert-szennyezhet-egy-uj-haz-tobbet-mint-egy-regi-szen-dioxid-kibocsatas-az-epitoiparban/>.
- G. B. Hamra, N. Guha, A. Cohen, F. Laden, O. Raaschou-Nielsen, J. M. Samet, P. Vineis, F. Forastiere, P. Saldiva, T. Yorifuji et al., (2014). „Outdoor particulate matter exposure and lung cancer: a systematic review and meta-analysis”. *Environmental health perspectives*.
- http1 (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, xxi., 273 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
- http10 (2021. máj.). *A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, a Tanácsnak, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának: Bolygónk egészségessé tétele mindenki számára – Uniós cselekvési terv: „Út a szennyezőanyag-mentes levegő, víz és talaj felé”*. Brüsszel. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400>.
- http11 (2023). *Levegőminőség: a Tanács véglegesen jóváhagyta az uniós előírások szigorítását*. URL: <https://www.consilium.europa.eu/hu/press/press-releases/2024/10/14/air-quality-council-gives-final-green-light-to-strengthen-standards-in-the-eu/>.
- http12 (2023). *The Global Health Observatory: DALYs*. URL: <https://www.who.int/data/gho/indicator-metadata-registry/imr-details/158>.
- http13 (2024. szept.). *List of Classifications*. URL: <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>.
- http14 (2015. aug.). *Budapest Főváros XXIII. kerület, Soroksár; Önkormányzata; Integrált Településfejlesztési Stratégia; Helyzetfeltáró és helyzetértékelő munkarész*. URL: <https://soroksar.hu/tajekoztato-a-keruleti-integralt-telepulesfejlesztesi-strategia-jovahagyasarol-912/>.
- http15 (2024). *Népszámlálási adatbázis*. URL: <https://nepszamlalas2022.ksh.hu/adatbazis/>.
- http16 (2024. szept.). URL: <https://legszenyezettseg.met.hu/levegominoseg/meresi-adatok/automata-merohalozat>.
- http17 (2024. okt.). *HungaroMet Napijelentés kiadvány*. URL: https://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/.
- http2 (2024. okt.). 4/2011. (I. 14.) VM rendelet. URL: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1100004.VM#lbj35id7b68>.
- http3 (2021. máj.). *A Bizottság Közleménye az Európai Parlamentnek, a Tanácsnak, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának: Bolygónk egészségessé tétele*

- mindenki számára - Uniós cselekvési terv: „Út a szennyezőanyag-mentes levegő, víz és talaj felé”*. Brüsszel. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400>.
- http4 (1979). *Jegyzőkönyv a nagy távolságra jutó, országhatárokon áttérjedő levegőszennyezésről szóló 1979. évi egyezményhez kapcsolódóan a környezetben tartósan megmaradó szerves szennyező anyagokról*. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:22004A0319\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:22004A0319(01)).
- http5 (2024). *Kibocsátás*. Letöltés:2024.10.03. URL: <https://legszenneyezettseg.met.hu/kibocsatas>.
- http6 (2001. máj.). *A vegyi anyagok jelentette veszélyek kezelése (Stockholmi Egyezmény)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/HU/legal-content/summary/tackling-threats-posed-by-chemicals-stockholm-convention.html>.
- http7 (2001. máj.). *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs)*. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>.
- http8 (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- http9 (2020). *Air quality, energy and health*. URL: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/about>.
- S. Janháll, K. F. G. Olofson, P. U. Andersson, J. B. Pettersson és M. Hallquist (2006). „Evolution of the urban aerosol during winter temperature inversion episodes”. *Atmospheric Environment* 40.28, 5355–5366. old.
- H. Järnström, K. Saarela, P. e. a. Kalliokoski és A.-L. Pasanen (2006). „Reference values for indoor air pollutant concentrations in new, residential buildings in Finland”. *Atmospheric Environment* 40.37, 7178–7191. old.
- M. Javed, M. Bashir és S. Zaineb (2021). „Analysis of daily and seasonal variation of fine particulate matter (PM 2.5) for five cities of China”. *Environment, Development and Sustainability* 23, 12095–12123. old.
- S. Jung, H. Kang, S. Sung és T. Hong (2019). „Health risk assessment for occupants as a decision-making tool to quantify the environmental effects of particulate matter in construction projects”. *Building and Environment* 161, 106267. old. ISSN: 0360-1323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106267>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132319304779>.
- K. Khamraev, D. Cheriyan és J.-h. Choi (2021). „A review on health risk assessment of PM in the construction industry – Current situation and future directions”. *Science of The Total*

- Environment* 758, 143716. old. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143716>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720372478>.
- S. M. Khoshnava, R. Rostami, R. Mohamad Zin, D. Štreimikienė, A. Mardani és M. Ismail (2020). „The role of green building materials in reducing environmental and human health impacts”. *International journal of environmental research and public health* 17.7, 2589. old.
- G. Kis-Kovács (2015). „PM EMISSZIÓ A KIBOCSÁTÁSI LETÁR TÜKRÉBEN EMISSIONS OF PARTICULATE MATTER AS REFLECTED IN THE EMISSION INVENTORY”. *Legkor*.
- I. Lagzi, R. Mészáros, G. Gelybo és A. Leelossy (2013). *Atmospheric chemistry*. Eötvös Loránd University.
- K. Luo, W. Li, R. Zhang, R. Li, Q. Xu és Y. Cao (2016). „Ambient fine particulate matter exposure and risk of cardiovascular mortality: adjustment of the meteorological factors”. *International journal of environmental research and public health* 13.11, 1082. old.
- E. T. Nij és D. Heederik (2005). „Risk assessment of silicosis and lung cancer among construction workers exposed to respirable quartz”. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 31, 49–56. old. ISSN: 03553140, 1795990X. URL: <http://www.jstor.org/stable/40967464> (elérés dátuma 2024. 09. 04.).
- M. Normohammadi, H. Kakooei, L. Omid, S. Yari és R. Alimi (2016). „Risk Assessment of Exposure to Silica Dust in Building Demolition Sites”. *Safety and Health at Work* 7.3, 251–255. old. ISSN: 2093-7911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2015.12.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791115001183>.
- C.-M. Nzotungicimpaye és K. Zickfeld (2017). „The contribution from methane to the permafrost carbon feedback”. *Current Climate Change Reports* 3, 58–68. old.
- K. F. G. Olofson, P. U. Andersson, M. Hallquist, E. Ljungström, L. Tang, D. Chen és J. B. Pettersson (2009). „Urban aerosol evolution and particle formation during wintertime temperature inversions”. *Atmospheric Environment* 43.2, 340–346. old. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.080>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008008376>.
- L. Pan, J. Xu, X. Tie, X. Mao, W. Gao és L. Chang (2019). „Long-term measurements of planetary boundary layer height and interactions with PM_{2.5} in Shanghai, China”. *Atmospheric Pollution Research* 10.3, 989–996. old. ISSN: 1309-1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104218305051>.
- E. I. Papp (2024). „Aeroszol-szennyezés jellemzése Magyarország nagyvárosaiban”.
- S. Pateraki, D. Asimakopoulou, H. Flocas, T. Maggos és C. Vasilakos (2012). „The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5–10})”. *Science of The*

- Total Environment* 419, 124–135. old. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.064>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969711015300>.
- N. Pérez, J. Pey, X. Querol, A. Alastuey, J. López és M. Viana (2008). „Partitioning of major and trace components in PM₁₀–PM_{2.5}–PM₁ at an urban site in Southern Europe”. *Atmospheric Environment* 42.8, 1677–1691. old. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.034>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007010874>.
- M. Perrone, S. Vratolis, E. Georgieva, S. Török, K. Šega, B. Veleva, J. Osán, I. Bešlić, Z. Kertész, D. Pernigotti, K. Eleftheriadis és C. Belis (2018). „Sources and geographic origin of particulate matter in urban areas of the Danube macro-region: The cases of Zagreb (Croatia), Budapest (Hungary) and Sofia (Bulgaria)”. *Science of The Total Environment* 619-620, 1515–1529. old. ISSN: 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.092>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717331492>.
- V. C. Pun, F. Kazemiparkouhi, J. Manjourides és H. H. Suh (2017). „Long-term PM_{2.5} exposure and respiratory, cancer, and cardiovascular mortality in older US adults”. *American journal of epidemiology* 186.8, 961–969. old.
- U. Rajarathnam, V. Athalye, S. Ragavan, S. Maithel, D. Lalchandani, S. Kumar, E. Baum, C. Weyant és T. Bond (2014). „Assessment of air pollutant emissions from brick kilns”. *Atmospheric Environment* 98, 549–553. old. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.075>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014006888>.
- W. Rogula-Kozłowska, K. Klejnowski, P. Rogula-Kopiec, L. Ośródk, E. Krajny, B. Błaszczak és B. Mathews (2014). „Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Poland”. *Air Quality, Atmosphere & Health* 7, 41–58. old.
- M. Rokni, M. Mohammadyan, S. T. Hashemi, S. M. Asadi, P. J. Boogaard, B. Heibati, K. Yetilmezsoy és S. A. Abdul-Wahab (2016). „Risk assessment of workers exposed to crystalline silica aerosols”. *ABC* 22.8, 1678–1686. old. DOI: 10.1080/10807039.2016.1217391. eprint: <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1217391>. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1217391>.
- I. J. Šenitková és M. Kraus (2016). „Assessment of selected interior flooring materials on indoor air quality”. *Procedia engineering* 161, 1527–1531. old.
- M. Shafique, X. Xue és X. Luo (2020). „An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas”. *Urban Forestry & Urban Greening* 47, 126515. old. ISSN: 1618-8667. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866719303668>.
- S. Sharma, M. Chandra és S. H. Kota (2020). „Health effects associated with PM 2.5: A systematic review”. *Current Pollution Reports* 6, 345–367. old.
- A. Shukla, G. Tiwari és M. Sodha (2009). „Embodied energy analysis of adobe house”. *Renewable Energy* 34.3, 755–761. old. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108001729>.
- D. Sirithian és P. Thanatrakolsri (2022). „Relationships between Meteorological and Particulate Matter Concentrations (PM2.5 and PM10) during the Haze Period in Urban and Rural Areas, Northern Thailand”. *Air, Soil and Water Research* 15, 11786221221117264. old. DOI: 10.1177/11786221221117264. eprint: <https://doi.org/10.1177/11786221221117264>. URL: <https://doi.org/10.1177/11786221221117264>.
- L. Somoskői és P. Leczovics (2020). „A zöldtetők előnyei az építőipari gyakorlatban: Benefits of green roofs in construction practice”. *Nemzetközi Építéstudományi Konferencia–ÉPKO*, 148–153. old.
- L. Tao és R. A. Harley (2014). „Changes in fine particulate matter measurement methods and ambient concentrations in California”. *Atmospheric Environment* 98, 676–684. old. ISSN: 1352-2310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.044>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014007377>.
- Á. Timár (2017). „A keveredési réteg magasságának meghatározása felhőalap-mérők visszaszóródási idősoraiból”. 59. old. URL: https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2017_2/Timar_Agnes_2017.pdf.
- E. Tjoe Nij, A. Burdorf, J. Parker, M. Attfield, C. van Duivenbooden és D. Heederik (2003). „Radiographic abnormalities among construction workers exposed to quartz containing dust”. *Occupational and Environmental Medicine* 60.6, 410–417. old. ISSN: 1351-0711. DOI: 10.1136/oem.60.6.410. eprint: <https://oem.bmj.com/content/60/6/410.full.pdf>. URL: <https://oem.bmj.com/content/60/6/410>.
- K. Torén és B. Järholm (2014). „Effect of Occupational Exposure to Vapors, Gases, Dusts, and Fumes on COPD Mortality Risk Among Swedish Construction Workers: A Longitudinal Cohort Study”. *Chest* 145.5, 992–997. old. ISSN: 0012-3692. DOI: <https://doi.org/10.1378/chest.13-1429>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012369215345906>.
- A. Tóth és Z. Ferenczi (2024). „Saharan Dust Contributions to PM10 Levels in Hungary”. *Air* 2.3, 325–336. old.

- G. Varga (2020). „Changing nature of Saharan dust deposition in the Carpathian Basin (Central Europe): 40 years of identified North African dust events (1979–2018)”. *Environment International* 139, 105712. old. ISSN: 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105712>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412019349955>.
- P. Vigh (2024. jan.). *Égig erő beton, téglá és térkő. Továbbra is nagy kedvvel építjük be az országot.* URL: <https://masfelfok.hu/2024/01/09/beton-tegla-terko-terulethasznalet-beepitettseg-telepulesrendezes-magyarorszag/>.
- M. Wang, G. Yao, Y. Sun, Y. Yang és R. Deng (2023). „Exposure to construction dust and health impacts – A review”. *Chemosphere* 311, 136990. old. ISSN: 0045-6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136990>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004565352203483X>.
- A. A. Wieser, M. Scherz, A. Passer és H. Kreiner (2021). „Challenges of a Healthy Built Environment: Air Pollution in Construction Industry”. *Sustainability* 13.18. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su131810469. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10469>.
- W. Xu, Y. Kuang, W. Xu, Z. Zhang, B. Luo, X. Zhang, J. Tao, H. Qiao, L. Liu és Y. Sun (2024). „Hygroscopic growth and activation changed submicron aerosol composition and properties in the North China Plain”. *Atmospheric Chemistry and Physics* 24.16, 9387–9399. old. DOI: 10.5194/acp-24-9387-2024. URL: <https://acp.copernicus.org/articles/24/9387/2024/>.
- H. Yan, Q. Li, K. Feng és L. Zhang (2023). „The characteristics of PM emissions from construction sites during the earthwork and foundation stages: an empirical study evidence”. *Environmental Science and Pollution Research* 30.22, 62716–62732. old.
- J. Yang, Q. Yu és P. Gong (2008). „Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago”. *Atmospheric environment* 42.31, 7266–7273. old.
- Q. Yin, J. Wang, M. Hu és H. Wong (2016). „Estimation of daily PM_{2.5} concentration and its relationship with meteorological conditions in Beijing”. *Journal of Environmental Sciences* 48, 161–168. old. ISSN: 1001-0742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.024>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074216301371>.
- B. Zhang, L. Jiao, G. Xu, S. Zhao, X. Tang, Y. Zhou és C. Gong (2018). „Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5–10})”. *Meteorology and Atmospheric Physics* 130, 383–392. old.
- X. Zhang, L. Shen és L. Zhang (2013). „Life cycle assessment of the air emissions during building construction process: A case study in Hong Kong”. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews* 17, 160–169. old. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.024>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005254>.
- X. Zhao, Y. Sun, C. Zhao és H. Jiang (2020). „Impact of Precipitation with Different Intensity on PM_{2.5} over Typical Regions of China”. *Atmosphere* 11.9. ISSN: 2073-4433. DOI: 10.3390/atmos11090906. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/9/906>.
- X. Zhu, Y. Liu, Y. Chen, C. Yao, Z. Che és J. Cao (2015). „Maternal exposure to fine particulate matter (PM_{2.5}) and pregnancy outcomes: a meta-analysis”. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 3383–3396. old.

Ábrák jegyzéke

2.1. Részecskék mérettartomány eloszlása aerodinamikai átmérő és relatív koncentráció szerint lognormális összefüggésben (Forrás: Papp, 2024)	9
2.2. Planetáris határreteg alakulása egy átlagos napon, nyugodt időjárási helyzet mellett (Forrás: Timár, 2017)	12
2.3. PM _{2,5} tömegkoncentráció egy nap alatti változása csapadékos és csapadék nélküli esetekre átlagolva a 2015–2017 közötti időszakban Peking-Tianjin-Hebei régióban (Forrás: Saját szerkesztés Zhao et al., 2020 alapján)	13
2.4. Az építési por expozíciója és a különböző egészségügyi veszélyek közötti összefüggésekkel foglalkozó cikkek száma. A „o” pozitív korreláció, az „x” korreláció hiányát jelenti az építési pornak való kitettség és az egészségügyi veszély között. (Forrás: Wang et al., 2023)	22
3.1. Beépített területek alakulása 1686-2020 között Budapesten (Forrás: http14) . . .	26
3.2. A kertünkbe elhelyezett műszer a 3,5 méteres oszlop tetején (Forrás: Saját készítésű kép)	27
3.3. Az alkalmazott műszer sematikus felépítése (balra) és egy valós megjelenés (jobbra) (Forrás: Csongor Báthory, 2019)	27
3.4. A térképen narancssárgával a Budapest, 23. kerület Szirmos utcában elhelyezett saját műszer, késsel balról jobbra a Budapest, 22. kerület Budatétény, Tűzliliom u. 12., Budapest 21. kerület Csepel, Szent István út 217-219. és a Budapest 18. kerület Gilice tér 39. alatt található OLM automata mérőállomások elhelyezkedése Google térképen bemutatva. (Forrás: Saját szerkesztés az OLM automata állomás címei alapján)	28
4.1. A PM ₁₀ és PM _{2,5} mért értékei (Forrás: Saját munka)	31
4.2. A PM ₁₀ és PM _{2,5} mért értékek óránkénti átlagértékei (Forrás: Saját munka) . .	31
4.3. A PM ₁₀ és PM _{2,5} mért értékek naponkénti átlagértékei (Forrás: Saját munka) .	32

4.4.	A $PM_{2,5}$ mért értékeinek óránkénti átlagai és a HungaroMet Nonprofit Zrt. által mért hivatalos adatok (Forrás: Saját munka OLM és saját adatok alapján)	32
4.5.	A PM_{10} mért értékeinek óránkénti átlaga, és a HungaroMet Nonprofit Zrt. által mért hivatalos adatok (Forrás: Saját munka OLM és saját adatok alapján)	33
4.6.	A saját mért PM_{10} és $PM_{2,5}$ adatok és az OLM három állomásán egy óras időközönként mért adatok átlagának különbsége (Forrás: Saját munka OLM és saját adatok alapján)	33
4.7.	Havi szórásértékek alakulása PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeire (Forrás: Saját munka) . .	35
4.8.	Naponkénti szórás alakulása PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékeire (Forrás: Saját munka) . .	35
4.9.	Egy átlagos nap PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékei (Forrás: Saját munka)	36
4.10.	A PM_{10} és $PM_{2,5}$ értékek alakulása a hét napjain (Forrás: Saját munka)	37
4.11.	PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek a hőmérséklet függvényében (Forrás: Saját munka)	38
4.12.	PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek a légnyomás függvényében (Forrás: Saját munka) .	38
4.13.	PM_{10} és $PM_{2,5}$ mért értékek a páratartalom függvényében (Forrás: Saját munka)	39
4.14.	A vizsgált csapadékos és száraz napon mért $PM_{2,5}$ és PM_{10} értékek (Forrás: Saját munka)	40

Táblázatok jegyzéke

2.1.	<i>Légszennyezettségi Index</i> a szálló por éves átlagokra az OLM összesítő értékelésében használtak szerint (Forrás: Adatközpont, 2023)	6
2.2.	WHO ajánlása rövid és hosszú távú PM _{2,5} és PM ₁₀ határértékekre (Forrás: WHO adatok)	7
2.3.	4/2011. (I. 14.) VM rendeletben meghatározott PM _{2,5} és PM ₁₀ határértékek (Forrás: 4/2011. (I. 14.) VM rendelet)	8
4.1.	A percenként mért PM ₁₀ és PM _{2,5} értékek maximuma, illetve az óránkénti-, a naponkénti- és a hónaponkénti mérésátlagok maximuma (Forrás: Saját munka)	36
4.2.	A mért PM adatok időjárási tényezőkkel való összefüggéseit leíró függvények (Forrás: Saját munka)	37
4.3.	Egyesítő táblázat a száraz és csapadékos nap Budapest, Lőrinci mérőállomás különböző meteorológiai paramétereire, valamint saját PM értékek átlagára (Forrás: Saját szerkesztés a Napijelentés kiadvány adatai (http17) és a saját adatok alapján.)	40

NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Szalontainé Gáspár Natália Eszter
A Hallgató Neptun kódja: 04BADG
A dolgozat címe: Építési technológiák hatása a légszennyezésre
A megjelenés éve: 2024
A konzulens intézetének neve: Környezettudományi Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Környezetanalitikai és Technológiai Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat 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 állítottnak 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 szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. 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 MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: 2024. év november hó 3. nap



Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Szalontainé Gáspár Natália Eszter (hallgató Neptun azonosítója: O4BADG)
konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az
irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól
tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem

Kelt: 2024 év november hó 4. nap



belső konzulens