

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA 2024

SAPIENTIA EMTE - CSÍKSZEREDAI KAR

A kültéri levegő aeroszol koncentrációnak vizsgálata Csíkszeredában

Hallgatók: *Geréd Boglárka* – Génsebész szak, II. év

Szép Levente – Génsebész szak, IV. év

Témavezetők:

dr. Bodor Katalin – Vadászati és Hegyvidéki Erőforrások Kutató és Fejlesztő
Intézet, Csíkszereda, Élelmiszer tudományi Tanszék

dr. Bodor Zsolt egyetemi docens – Sapientia Erdélyi Magyar
Tudományegyetem, Csíkszeredai Kar, Biomérnöki Tanszék, Vadászati és
Hegyvidéki Erőforrások Kutató és Fejlesztő Intézet

Csíkszereda

2024. május 7.

Tartalomjegyzék

Kivonat	4
1. Bevezető.....	5
1.1 Az aeroszolok osztályozása	6
1.2 Az aeroszolok egészségügyi hatásai	8
1.3 Az aeroszolokra vonatkoztatott megengedett határértékek.....	10
2. Kutatás célkitűzése	11
3. A kutatás módszertana	12
3.1 Mintavételi helyszínek jellemzése	12
3.2 Mintavételezési pontok	13
2.3 Aeroszol koncentráció meghatározása	15
2.4 Klimatológiai paraméterek vizsgálata	17
2.4.1 Emelkedési kondenzációs szint számítása	17
2.4.2 A csapadék légkörtisztító hatásának tanulmányozása	17
2.5 Alkalmazott statisztikai módszerek	17
2.6 Az aeroszolok egészségkárosító hatásainak tanulmányozása.....	18
3.6.1 A PM ₁₀ rövid távú kitettségének egészségügyi kockázatértékelése.....	18
3.6.2 A PM _{2,5} rövid távú kitettségének egészségügyi kockázatértékelése	19
3. Kutatási eredmények bemutatása és tárgyalása	19
4.1 Az aeroszolok eloszlása	19
4.2 A vizsgálati helyszínek aeroszol koncentrációi közötti különbségek bemutatása ..	20
4.3 Az aeroszol koncentráció alakulása a klimatológiai paraméterek függvényében	22
4.3.1 Emelkedési kondenzációs szint alakulása	22
4.3.2 A csapadék légkörtisztító hatásának tanulmányozása	24
4.4 A kora reggeli aeroszol koncentráció alakulása a forgalom intenzitásának függvényében	25
4.5 A mért és a mérőállomás által szolgáltatott PM ₁₀ adatok összehasonlítása.....	27
4.6 Adatok eloszlásának meghatározása	27
4.7 Spearman korreláció eredményei	29
4.8 Az aeroszolok egészségügyi hatásainak tanulmányozása	29
9. Eredmények értékelése	30
10. Következtetések	32
11. Limitációk	33
12. Köszönetnyilvánítás	33
13. Felhasznált irodalom.....	34

14.	Melléklet.....	38
------------	-----------------------	-----------

Kivonat

A légszennyezés problémája egyidős az emberiséggel, viszont a gazdasági-, ipari fejlődésnek és a népesség növekedésnek köszönhetően napjainkban globális méreteket ölt. A légszennyezés káros hatása számos területen meg tapasztalható, káros hatással van az emberi egészségre, a növényzetre és az épített örökségre.

Dolgozatunk során a légszennyező anyagok közül a PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_4 , PM_{10} és összes aeroszol (TSP) koncentrációit követtük nyomon. Csíkszereda öt különböző pontjában végeztünk pontszerű és folyamatos aeroszol koncentráció méréseket. A légszennyező paraméterek alakulásán túl nyomon követtük a közúti forgalom intenzitásának változását a napszakok (délelőtt, délután) függvényében, valamint összefüggéseket kerestünk az aeroszokok és a meteorológiai paraméterek változása között.

A mérési eredményeink jelentős különbségeket mutattak a város különböző pontjain mért aeroszol koncentrációk között. A hétköznapi-délelőtti aeroszol koncentrációk lényegesen magasabbak voltak a hétköznapi-délutáni mérések eredményeihez viszonyítva, minden egyes mérési pontban. A hétvégi aeroszokok koncentrációi lényegesen alacsonyabbak voltak, a hétköznapi rögzített értékekéhez viszonyítva. A hétvégi délelőtti és délutáni koncentrációk közötti különbségek mérsékeltebbek voltak, mint a hétköznapi mérések eredményi. A mintavételezés második fázisában, a kora reggeli órákban (6-9 óra között), folyamatos aeroszol koncentráció méréseket valósítottunk meg. Az eredmények szoros összefüggést mutattak a kora reggeli csúcsforgalom alakulásával. A csapadékos periódusban az aeroszokok koncentrációja megközelíti az alapértékeket. A csapadék kimosó hatása érvényesült, alacsonyabb koncentrációkat tapasztaltunk esős napokon, míg csapadékmentes napokon magasabb aeroszol koncentrációt mértünk.

A városközpontban mért folyamatos PM_{10} koncentrációt összehasonlítva a Környezetvédelmi Ügynökség által mért órás PM_{10} adatokkal, az esetek többségében (93,16%) a városközpontban volt magasabb a PM_{10} koncentrációja (átlagosan 3,27-szer nagyobb volt a városközpontban, mint a HR₀₂ mérőállomáson mért koncentrációk).

1. Bevezető

A légszennyezés problémája a XXI. század egyik legnagyobb globális kihívásává vált. A gyorsan fejlődő ipari és gazdasági szektoroknak köszönhetően a levegőben található aeroszolok mennyisége és diverzitása megnövekedett. A légszennyezés problémája eleinte csak helyi vagy regionális méretekben volt a probléma forrása az ipari forradalom kezdetével. Az 1800-as évektől eltelt idő alatt az ipar folyamatos fejlődése és fokozatos növekedésének köszönhetően a légszennyezés egy globális problémává vált az emberiség számára. Az iparosodás a népesség robbanásszerű növekedését is eredményezte, valamint a fogyasztói társadalom kezdetét is [1].

A föld lakossága 1800 környékén 907millió körül alakult, míg napjainkra ez a szám eléri a 8 milliárdot, ami közel 9-szeres növekedést jelent. A népességnövekedéséből adódóan egyre több antropogén tevékenység (pl. iparosodás, energiatermelés, szállítás stb.) hozzájárul a környezetszennyezés magas szintjéhez [1]. Forrásuk alapján az aeroszolok lehetnek természetes eredetűek (pl. vulkánkitörések, pollen, szálló por, korom, tengervizek párolgása és CH_4) és antropogén eredetűek (pl. CO , CO_2 , NO_x , szálló porok és korom), az eredetük mellett halmazállapotukat figyelembe véve osztályozhatóak, szilárd, cseppfolyós vagy gázhalmazállapot szerint [2].

A levegőben található aeroszolok általában szerves és szervetlen elemekből tevődnek össze, amelyek különböző mechanizmusok során alakulnak ki. Ezeket a belélegezhető frakciókat, amelyek átmérője $\leq 10 \mu\text{m}$, a szakirodalom PM_{10} néven jelöli. A PM aeroszolok levegőbe jutásának okát általában a szélnek tulajdonítják, amely a talaj felszínéről, tengeri só permetből, valamint az ipari tevékenységekből, a biomassza elégetéséből és az autós forgalomból származó kisebb részecskéket szuszpendálja [3].

A környezetre gyakorolt negatív hatása mellett a PM az emberi egészségre is hatással van, hozzájárulva számos légzőszervi, szív- és érrendszeri betegségek kialakulásához [4,5]. Számtalan tudományos kutatás támasztja alá, hogy a PM_{10} összetételének mennyisége és minősége negatív hatással van az emberi egészségre. Ezen eredmények alapján a PM-nek való hosszabb kitettség drasztikusan megnövelheti a tüdőrák kockázatát, és rövid távon hörghurutot eredményezhet [6].

1.1 Az aeroszolok osztályozása

A belélegzett levegő egy összetett keverék, mely tartalmaz különböző vegyületeket, halmazállapotukat tekintve a szennyező anyagok lehetnek gáz, cseppfolyós és szilárd halmazállapotúak, illetve többfázisúak: porok, ködök, füstök.

Megkülönböztethetünk elsődleges és másodlagos légszennyező anyagokat: az elsődleges, vagyis közvetlenül kibocsátott szennyező anyagok pl. SO_2 , CO , NO_x , továbbá a másodlagos szennyező anyagokat, amelyek az elsődleges szennyező anyagok kölcsönhatásából, fotokémiai reakciójából származnak pl. O_3 [7].

A levegőben szuszpendált finom cseppeket aeroszoknak nevezik, a „bioaeroszolok” pedig a biológiai eredetüket jelöli. A dohányfüst és a köd $0,2\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjű részecskéket tartalmaznak, melyek felülete tökéletes szállítási alternatívát biztosítanak a vírusoknak és baktériumoknak levegő útján. Ezeket alaposan tanulmányozták a közegészségügyre és a természetes ökoszisztémákra gyakorolt negatív hatásaik miatt [8].

Az aeroszokat aerodinamikai átmérőjük és típusuk alapján osztályozhatjuk (**1. táblázat**). A szakirodalom durva frakciónak (PM_{10}) nevezi, ha a gömb alakúnak tekintett aeroszol átmérője $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$, finom frakcióról ($\text{PM}_{2,5}$) beszélünk, ha az aeroszol átmérője $\leq 2,5\text{ }\mu\text{m}$. Továbbá a nagyon kis mérettartományba ($\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) tartozó aeroszokat ultrafinom ($\text{PM}_{0,1}$) aeroszollokként említik [9].

Különbőféle eredete és a folyamatosan változó levegőminőség miatt a PM-nek változatos kémiai és biológiai jellemzői lehetnek, ezért nagyon fontos a légköri aeroszolok kémiai és elemi összetételének tanulmányozása. A légköri PM_{10} elemi összetétele és jellemzése fontos információkkal szolgálhat a légszennyezés eredetéről. A koncentrációkat és a diszperziós tartományokat hasonlóképpen fizikai-kémiai tényezők határozzák meg (pl. méret és koncentráció) és meteorológiai (pl. szélesebbesség, relatív páratartalom, hőmérséklet és napsugárzás) körülmények [10].

Az aeroszolok általában szerves és szervetlen elemekből tevődnek össze, amelyek különböző mechanizmusok során alakulnak ki. Ezeknek a belélegezhető frakcióknak a durvább részecskéi általában $\leq 10\text{ }\mu\text{m}$ átmérőjűek, ezeket a részecskéket a szakirodalom PM_{10} néven jelöli. Ezeknek a részecskéknak a belélegzése allergiás reakciókat válthat ki, de annak az esélye, hogy fertőző betegség következik-e be vagy sem, részben a belélegzett mikrobák életképességétől és fertőzőképességétől függ [11].

1. táblázat: A levegőben található aeroszolok osztályozása [4]

Típus		PM átmérő (µm)
Szennyező aeroszol	szmog	0,01–1
	korom	0,01–0,8
	dohányfüst	0,01–1
	szálló hamu	1–100
	cementpor	8–100
Biológiai szennyező anyagok	baktériumok és baktériumspórák	0,7–10
	vírusok	0,01–1
	gombák, penészgombák	2–12
	allergének (háztartási por, pollenek)	0,1–100
Portípusok	atmoszférikus por	0,01–1
	nehéz porok	100–1000
	üledő por	1–100
Gázok	különböző gáznemű szennyező anyagok	0,0001–0,01

A levegőben szuszpendált aeroszolok eredetük szerint általában szerves és szervetlen elemek összessége, tehát ezek forrásai lehetnek egyaránt antropogén vagy természetes eredetűek.

A természetes aeroszolok lehetnek:

- **Talaj eredetűek:** a földkéreg mállása, felaprózódása útján jönnek létre, többnyire ásványi anyagokat (Al, Si, Sc, Mn, Fe) tartalmaznak.
- **Tengeri aeroszolok:** a tengervíz párolgása során nagy mennyiségű sót tartalmazó aeroszol jut a légkörbe, ezek összetétele megegyezik a tengeri sót alkotó elemekkel: Na, Ca, Mg, K, Cl.
- **Vulkáni por és gáz:** egy vulkánkitörés során a légkörbe jutó nagy mennyiségű por és különböző gázok keveréke a magasabb légrétegekbe is eljut (sztratoszféra), ahol hosszabb ideig, akár évekig is jelen lehet.
- **Biológiai eredetűek – „bioaeroszolok”:** lehetnek vírusok, baktériumok, gombák, pollenek, de akár más élő szervezetek által is létrejöhetnek, növények párologtatása, anyagcseréje útján is keletkeznek aeroszolok [12].

Antropogén eredetű aeroszolok:

- **Közlekedés:** aeroszolok keletkezhetnek az üzemanyagok nem teljes égésének útján, a gépjárművek alkotórészeinek kopásával, valamint az úttestre már kiülepedett por reszuszpenziója során.
- **Energiatermelés, ipar:** hőerőművek, biomassza égése, valamint a háztartási tüzelés során jelentős mennyiségű füst, korom kerül a levegőbe, ugyanakkor szervesetlen gázok (NO_x , SO_x) is szabadulnak fel.
- **Mezőgazdaság:** a mezői munkálatok során is jelentős mennyiségű por jut a légkörbe [13].

Az aeroszolok, mint légszennyező anyagok forrását tekintve három lehetséges módot különböztethetünk meg:

- (1) az **imisszió** a levegő szennyező anyag jelenlétét jelenti.
- (2) az **emisszió** a szennyező anyag kibocsájtásra vonatkozik.
- (3) a **transzmisszió** a kibocsájtás helyétől történő szétterjedést írja le.

1.2 Az aeroszolok egészségügyi hatásai

Számos kutatási eredmény alátámasztja, hogy az aeroszoloknak káros hatása van az emberi szervezetre nézve. A kisebb aerodinamikai átmérővel rendelkező $\text{PM}_{2,5}$ fokozottabb egészségkárosító hatással rendelkezik. A $\text{PM}_{2,5}$ részecskék egy csoportjára jellemző, hogy ugyan kis átmérőjük ellenére nagy felülettel rendelkeznek, képesek lehetnek akár különböző toxikus anyagok szállítására [14]. A levegőminőségi mutató (AQI - Air Quality Index) számításakor is a $\text{PM}_{2,5}$ -koncentrációt veszik figyelembe. Az aeroszolok méretükből adódóan az emberi szervezet különböző szintjeire (szöveteihez) jutnak el (**2. táblázat**). A legkisebbek az orr szűrőin áthaladva az alveolusokban halmozódnak fel és a tüdőben végbemenő folyamatok révén a szervezet összes fontos szervét károsíthatják, kémiai és fizikai tulajdonságaikból adódóan toxikus hatást fejthetnek és fejtenek ki.

2. táblázat: A PM részecskék méretei és szervezetben való mozgékonyaságuk [15]

Bejutási szint	Méret	
orrüreg	$>11\ \mu\text{m}$	
gége	$7-11\ \mu\text{m}$	
légcső	$4,7-7\ \mu\text{m}$	
hörgők	$2,1-3,3\ \mu\text{m}$	
alveólusok	$0,43-0,65\ \mu\text{m}$	

Az aeroszolok egészségre gyakorolt hatásairól (**1. ábra**) már számos tanulmány értekezett, és a kutatások rávilágítottak, hogy a légzőszervi megbetegedések és az immunrendszer károsodása jellemző leginkább [16]. A figyelem legtöbbször a PM koncentrációk csúcserőveire irányul, de fontos kihangsúlyozni, hogy a kisebb dózisoknak való hosszú távú kitettség nagyobb veszéllyel jár az emberi egészségre nézve. Kutatások során összefüggést találtak a $\text{PM}_{2,5}$ rövid illetve hosszú távú expozíciója és a kialakuló orrgaratgyulladás, korai szülés, fejlődési elmaradottság és a kialakuló ADHD között [17]. Ugyanakkor megemlíthető, hogy a cukorbetegségben, légzőszervi, szív- és érrendszeri betegségben szenvedők különösen érzékenyek a szálló porok által okozott hatásokkal szemben [18].



1. ábra: A PM, az NO_2 , az SO_2 és az O_3 fő egészségügyi hatásai [19].

A 1980-as évek óta eltelt időszakban a légszennyező részecskék fizikai és kémiai jellemzésében jelentős változásokat figyeltek meg és határoztak meg mennyiségileg. Néhány közelmúltban publikált epidemiológiai tanulmány, valamint állattoxikológiai és in vitro kísérletek eredményei alátámasztják azt a hipotézist, hogy az egyes aeroszolok fizikai és kémiai tulajdonságai szerepet játszanak a belélegzett aeroszolok toxikus, genotoxikus és karcinogén egészségügyi hatásmechanizmusában. A szemcseméret, az alak és az elektromos töltés, a szemcsék felülete és oldhatósága a legfontosabb [20,21].

1.3 Az aeroszolokra vonatkoztatott megengedett határértékek

Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) adatai alapján évente körülbelül 7 millió haláleset hozható összefüggésbe a légszennyezéssel [22,23]. A légszennyező anyagok közé tartoznak a gáznemű (ammónia, nitrogénoxidok, szénmonoxid, kénoxidok, troposzférikus ózon) anyagok és a különböző méretű, szilárd fázisban lévő részecskék (PM-ek).

A WHO által közzétett AQG (air quality guidelines-levegőminőségi irányelvek) határozzák meg a légszennyező anyagok koncentráció szintjeinek határértékét. Ezen értékeket folyamatosan frissítik, hogy biztosítsák azok aktualitását. A legutóbbi adatok 2021-es frissítése a 3. táblázatban van összefoglalva, összehasonlítva a 2005-ben meghatározott értékekkel.

3. táblázat: A WHO által meghatározott határértékek 2021–2005 értékek összehasonlítása [24]

Szennyező anyag	Átlagolt idő	2005-ben megengedett határérték ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2021-ben megengedett határérték ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM_{2,5}	éves	10	5
	24 óra	25	15
PM₁₀	éves	20	15
	24 óra	50	45
NO₂	éves	40	10
	24 óra	-	25
SO₂	24 óra	20	40
CO	24 óra	-	4

Romániában a 104/2011-es törvény alapján a megengedett aeroszol koncentráció határértékeit a **4. táblázat** szemlélteti.

4. táblázat: Romániában megengedett PM koncentrációk [25]

Szennyező anyag	24 órás megengedett határérték ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Éves megengedett határérték ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM_{2.5}	-	20
PM₁₀	50	40

2. Kutatás célkitűzése

Kutatásunk során vizsgáltuk a kültéri levegő aeroszol koncentrációjának tér és időbeli alakulását Csíkszeredában. A többlépcsős kutatás célkitűzései a következők:

1. A város különböző pontjaiban meghatároztuk az aeroszolok koncentrációinak alakulását (1. Szabadság tér, 2. Kaufland, 3. Nest bevásárlóközpont, 4. Igazságügyi palota, 5. Vasútállomás) hétköznapi és hétvégén a délelőtti és a délutáni órákban.
2. A kiválasztott mintavételi pontok esetében vizsgáltuk a kora reggeli aeroszol koncentráció alakulását a forgalom intenzitásának függvényében.
3. A városközpontban (Sapientia EMTE) követtük az aeroszolok alakulását két heti folyamatos méréssel a nappali órákban a késő őszi időszakban.
4. A meteorológiai paramétereket figyelembe véve meghatároztuk az eső kimosó hatást esőzések után.
5. Összehasonlítottuk a méréseinket az Országos Környezetvédelmi Ügynökség által mért aeroszol koncentrációkkal.
6. Összefoglaló táblázatot készítettünk arra vonatkozóan, hogy az aeroszolok éves változásának alakulása milyen mértékű relatív kockázatot jelent az emberi egészségre.

A kutatás fontosabb mozzanatait a **2. ábra** szemlélteti, ahol a fontosabb célkitűzések is bemutatásra kerültek.



2. ábra: A kutatás célkitűzéseinek ábrázolása.

3. A kutatás módszertana

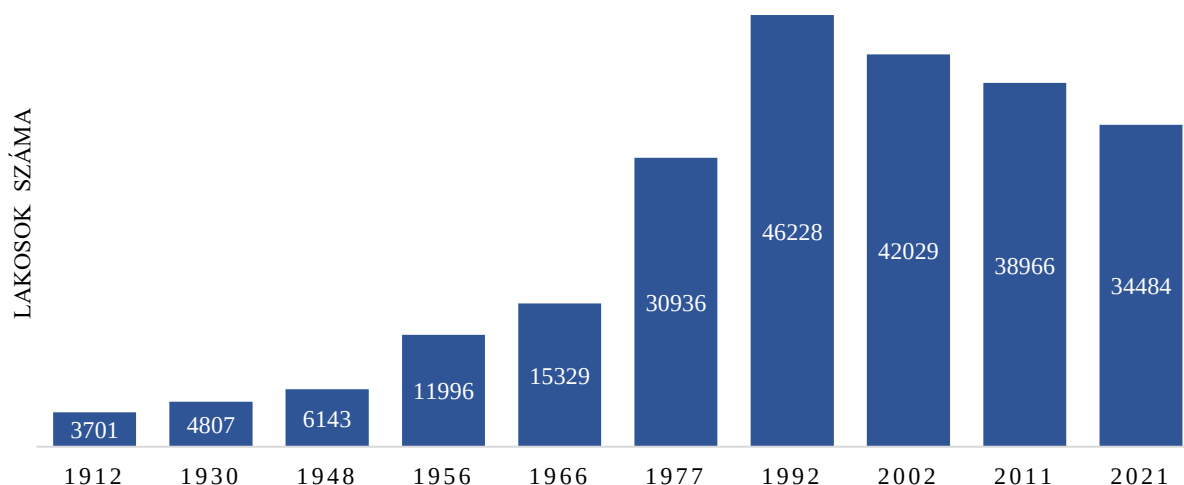
3.1 Mintavételi helyszínek jellemzése

Csíkszereda, Hargita megye székhelye, a Csíki-medence központi részén helyezkedik el. Az Olt-folyó bal partján fekszik, keleten a Keleti-Kárpátok, nyugaton a Hargita-hegység vulkáni vonulatai határolják. Földrajzi elhelyezkedése a 46°21' északi szélesség és 25°48' keleti hosszúság földrajzi koordinátákkal írható le és az átlagos tengerszint feletti magassága 730 m. A minden oldalról zárt, hegyközi Csíki-medencére jellemző a légköri-, hőmérsékleti inverzió, ami a térség egyik sajátosságát, a sűrű köd megjelenését eredményezi. A medence másik jellemzője a szélcsend, a medencét körül ölelő hegyvonulatok akadályozzák a légáramlást, mely további kedvező hatással van a levegő medencében való pangására, ezzel stabil légkört eredményezve, főleg a hidegebb időszakokban.

A város nyugati részén áthalad a Brassó-Madéfalva vasútvonal, valamint több nagyvárossal is közvetlen vasúti és úthálózati kapcsolatban áll.

A városon áthalad Hargita megye egyetlen európai útja: az E578. Ez az útszakasz a város legforgalmasabb pontjának is tekinthető, a megnövekedett forgalomnak köszönhetően. Az áru és személyszállításnak helyet adó európai út a városon áthaladva, a környező falvakat átszelve összeköttetést létesít Brassó és Gyergyó között. Csíkszereda más forgalmasabb pontjai közé tartozik a Kossuth Lajos utca, amely a város központján halad hosszan, a Hunyadi János utca, ami a város keleti részén halad, ahol a Nest bevásárlóközpont is található és a Testvériség sugárúttal folytatódik (a város déli részén), és a és a Nagyrét utca, ami az európai útból leágazva a város szélén végig haladva több bevásárlóközpontot összekötve a környező falvak fele vezet [26]. A 2021-es adatok alapján a népesség változását az **3. ábra** szemlélteti, mely szerint az 1990-es évek óta egy csökkenő tendencia figyelhető meg.

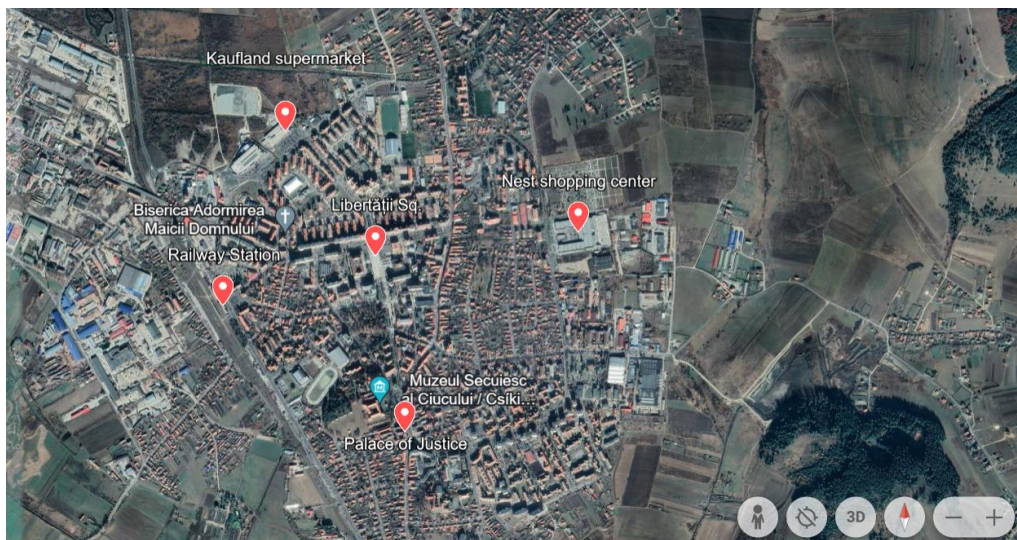
A NÉPESSÉG ALAKULÁSA 1912 ÉS 2021 KÖZÖTT



3. ábra: Csíkszereda lakossága és változása 1912 és 2021 között [27].

3.2 Mintavételezési pontok

A mintavételezés során olyan helyszíneket választottunk, amelyek a nap folyamán magas jármű és gyalogos forgalommal rendelkeznek. Ezeknek a kritériumoknak megfelelő helyszíneken a gyűjtött adatok egy reális képet adnak, hogy milyen mértékű szennyezésnek jellemzőek a forgalmasabb helyszíneken. Ezeknek a kritériumoknak megfelelően öt helyszínt választottunk ki, melyek a következők: 1. Szabadság tér, 2. Kaufland, 3. Nest bevásárlóközpont, 4. Igazságügyi palota, 5. Vasútállomás (**4. ábra**).



4. ábra: Vizsgálati pontok Csíkszereda térképén

A Szabadság tér esetében a mérési pont a tér egy adott pontján történt mindig, ahol jelentős gyalogosforgalom jellemző, mivel a városközpontokhoz hasonlóan sok iroda, közintézmény, kávézó, bankok és taxiállomás is található. Ezek mellett a forgalmasabb bevásárló központokhoz is ezt a mérési pontot érintve tudnak eljutni az emberek. A járműforgalom szempontjából egy élénk helyszínről beszélhetünk, a reggeli és délutáni csúcsokban akadályozott, torlódott forgalom jellemzi.

A Kaufland esetében egy állandóan forgalmas helyszínről beszélünk, gyalogos- és járműforgalom esetében is. A mérési pont a bevásárlóközpont előtt található körforgalomnál volt, ez az útszakasz a Nagyrét utca, ami a várost átszelő európai utat köti össze több kisebb utca segítségével a városközponttal és egyúttal a környező falvak fele haladó forgalomnak is helyet ad. A mérési pont közelében található egy buszmegálló, egy üzemanyagtöltő állomás, egy építkezési lerakat és három nagyobb bevásárlóközpont, ezek mind olyan helyszínek, amelyeket magas gyalogos és járműforgalom jellemez. A Nagyrét utca is egy fontos pontnak mondható a járműforgalom szempontjából, szokásosan a reggeli és délutáni csúcsokban feltorlaszolt autósorok alakulnak ki.

A Nest bevásárlóközpont volt az általunk választott harmadik mérési helyszín, a mellette elhaladó Hunyadi János utca ugyanis a város felső felén hosszan nyúlva több tömbházat, egy iskolát és egy óvodát is összeköt a város több pontjaival és az ipari részével is. Az itt elhaladó reggeli és délutáni forgalom az iskola, az óvoda és az ipari városrész miatt szintén jelentős.

Az Igazságügyi palota szintén a város központjában elhelyezkedő csomópont mellett van. Az épület mellett található körforgalom összeköti a Testvériség sugárutat a várost átszelő

európai úttal, a városközpontot és Zsögödfürdőt. A Testvériség sugárút egy lényeges útszakasz a város szempontjából, mivel ez az út számtalan lakóövezetet köt össze, könnyebb útvonalat biztosít a városközpont és a megyei kórház között, valamint összeköti a város felső felében hosszan húzódó Hunyadi János utcát a városközponttal és az európai úttal.

Az ötödik mintavételi pontnak a vasútállomás környékét választottuk, itt halad át Hargita megye egyetlen európai útja az E578, valamint szintén itt található a városi buszmegálló, amely nagymértékű gyalogos, autós forgalmat bonyolít le.

2.3 Aeroszol koncentráció meghatározása

A pontszerű mérések kivitelezése során minimum háromszoros ismétlést alkalmaztunk. A folyamatos mérés esetében (Sapientia EMTE), a mérések gyakorisága percenként történt. A további adatfeldolgozáshoz órás átlagokkal számoltunk.

Az aeroszlok koncentrációinak alakulását Csíkszeredában 2023. október és november folyamán követtük nyomon. A mérések kivitelezését a Temtop PMD 351-es (5. ábra) típusú rendszerrel valósítottuk meg.



5. ábra: A mérések során alkalmazott berendezés (Temtop PMD 351).

A mérések során követtük a $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, $PM_{4,0}$, PM_{10} , és TSP aeroszol frakciók alakulását. Megjegyzendő, hogy ködös időben nem lehetséges a mérés, a mérések során egy perces intervallumokkal dolgoztunk. A berendezés részletes leírását az **M1. táblázat** tartalmazza.

A mérések kivitelezését a városi forgalomhoz közel az autós forgalom sávjától max. 4-6 m távolságban valósítottuk meg. A méréseket a földfelszíntől 1,5 m távolságra végeztük, hogy a mérések minél jobban szimulálják a járókelők kitettséget a belégzés, lenyelés szintjén.

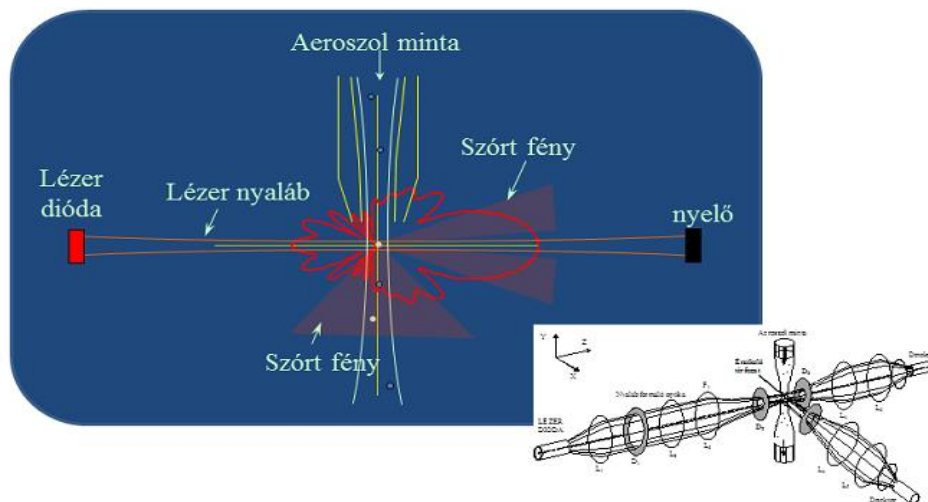
A műszer percenként mérte a levegő aeroszol koncentrációját minden frakcióban. Ezeket a percenkénti méréseket helyszínenként ötszörös ismételtsben végeztük délelőtti és délutáni időpontokban, valamint két és fél órás időtartamban (**6. táblázat**).

A reggeli mintavételezést 06:30 és 09:00 óra között végeztük, lefedve a kora reggeli csúcsforgalom időtartamát, beleértve ennek kezdeti fokozódását és utólagos elcsendesedését.

A mérés elve

A berendezés a mérések során fényszórási technikát használva állapítja meg a légszennyezést és a légszennyezők méretbeli megoszlását. A fényszórási technika felhasználásával meghatározható a mintában található aeroszolok koncentrációja egy adott térfogatban, valamint lehetőség van a méret szerinti osztályozásra is.

Az aeroszol minta keresztül halad a lézerfényrel megvilágított érzékelő térfogaton, ahol a nyalábon áthaladva a részecskék fényszórást produkálnak. Különböző geometriai elrendezésekben mérhető a szórt fény intenzitása, amiből a részecskék mérete meghatározható. A lézerfény részleges eltérülése jellegzetes gyűrű alakú intenzitáseloszlást hoz létre a minta mögött, amelyet egy speciálisan kialakított detektor mér (**6. ábra**).



6. ábra: A fényszórás sematikus ábrázolása [28].

Összehasonlításként használtuk a Nemzeti Környezetvédelmi Ügynökség által működtetett levegőminőség monitoring hálózat eredményeit, a fontosabb légszennyezőkre vonatkozó adatokat és a klimatológiai paramétereket a www.calitateaer.ro adatbázisból töltöttük le. Csíkszereda esetében két mérőállomás szolgáltat adatokat: HR01 és HR02. A regionális HR01 megfigyelőállomás Zsögödfürdőn található, földrajzi koordinátái: szélesség:

46,33, hosszúság: 25,81, valamint 697m tengerszint feletti magasságban található. A HR02 koordinátái: szélesség: 46,35, hosszúság: 25,81, és 687 m tengerszint feletti magasságban van elhelyezve (8. ábra) [29].

2.4 Klimatológiai paraméterek vizsgálata

2.4.1 Emelkedési kondenzációs szint számítása

A meteorológiai paraméterek közül az órás levegő hőmérsékletét, a csapadék mennyiséget, a relatív páratartalmat és az emelkedési kondenzációs szintet (LCL) követtük nyomon. Az emelési kondenzációs szintet a harmatponton mért hőmérséklet és a hőmérséklet közötti különbség alapján határoztuk meg, figyelembe véve $z^0 = 2 \text{ m}$ magasságot (egyenlet 1-2) [30].

$$LCL = z^0 + 125 * (T - T_d) \quad (1)$$

$$T_d = T - (100 - RH)/5 \quad (2)$$

ahol: LCL - emelkedési kondenzációs szint, T - levegő hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), RH - relatív páratartalom (%), z^0 - magasság (2m), T_d - harmatpont hőmérséklet.

2.4.2 A csapadék légkörtisztító hatásának tanulmányozása

Az esőzések légkörtisztító hatásának meghatározása érdekében a napi átlag PM_{10} -koncentrációt összehasonlítottuk csapadékos és csapadékmentes időszakok esetén. A légkör nedves kiülepedéssel történő tisztításának mélyreható értékeléséhez különböző feltételeket határoztunk meg:

- három különböző esőintenzitási szintet elemeztünk: alacsony: 0,2-0,4 mm/h, mérsékelt: 0,4-3,9 mm/h, és heves esőzések: > 3,9 mm/h.

2.5 Alkalmazott statisztikai módszerek

A statisztikai elemzéshez felhasznált adatok eloszlást hisztogram alkalmazásával ellenőriztük, felhasználva a Microsoft Excel Data Analysis bővítményét. Az óras aeroszol és a klimatológiai paraméterek (csapadék mennyiség, relatív páratartalom, levegő hőmérséklet, emelkedési kondenzációs szint) között nem lineáris tartományban alkalmazható Spearman korrelációs együtthatókat számoltunk. A HR₀₂ mérőállomás esetében 336 óras adatot, míg a városközpontban 161 óras adatot vizsgáltunk meg.

A statisztikai adatfeldolgozás során a leíró statisztikához átlagokat számítottunk. Az értékek átlagolását követően szórást és arányokat is meghatároztunk.

Átlag:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

ahol: $\sum_{i=1}^n x_i$ = az i- minták összege, n =a minta száma

Szórás:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x}) + (x_2 - \bar{x}) + (x_3 - \bar{x}) + (x_n - \bar{x})}{n}} \quad (6)$$

ahol: x_1 = a minta egy eleme, n = a minták száma, $\bar{x}$ = átlag érték

Az adatok jobb szemléltetése érdekében doboz diagramot használtunk. A diagramok szemléltetik a vizsgált paramétereink eloszlását, (minimum, maximum, medián, interkvartilis rész (25P-75P)).

A Spearman korreláció megmutatja két változó közti összefüggés erősségét és irányát, ahol a korrelációs együttható értéke -1 és 1 között változhat (6. egyenlet). A pozitív előjel utal a kapcsolat azonos irányú arányosságára, a negatív előjel fordított arányt, ellentétes irányú összefüggést mutat. A Spearman korrelációs együttható mátrix elkészítését az R 4.3.3 programmal valósítottuk meg [32].

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (6)$$

ahol: d - értékpárra kiszámított rangok, n - értékpárok száma

2.6 Az aeroszokok egészségkárosító hatásainak tanulmányozása

3.6.1 A PM₁₀ rövid távú kitettségének egészségügyi kockázatértékelése

A PM₁₀-nek való rövid távú expozíció értékeléséhez Ostro alapján meghatároztuk a relatív kockázatot (RR) az összes okból bekövetkezett halálozásra a (3. egyenlet) alapján [31]. Az összes okból bekövetkező halálozás relatív kockázatát akkor tudjuk kiszámítani, ha a PM₁₀ átlagos éves koncentráció magasabb volt, mint a háttérszint (PM₁₀-10 µg/m³). Az alkalmazott kockázati függvény együtthatójaként 0,008-at használtunk (95% CI: 0,0006–0,0010).

$$RR = \exp[\beta(X - X_0)] \quad (3)$$

ahol: X_0 - a háttér-PM₁₀-koncentrációt (10 µg/m³), X - az éves átlagos PM₁₀-koncentrációt (µg/m³) és a β kockázati függvény együtthatóját jelenti [31].

3.6.2 A PM_{2,5} rövid távú kitettségének egészségügyi kockázatértékelése

A finom szálló por egészségkárosító hatásának becslésére a szakirodalomban használatos relatív kockázatelemzést használtuk a (4. egyenletnek) megfelelően. Ez a megközelítés széles körben használatos, hiszen a szakirodalomban rendelkezésre állnak egyes betegségekhez társított kockázati együtthatók értékei. Jelen esetben a tüdőrák és a szív- és tüdőbetegségek miatti halálozás relatív kockázatát határoztuk meg a 30 év feletti kitett lakosok esetében.

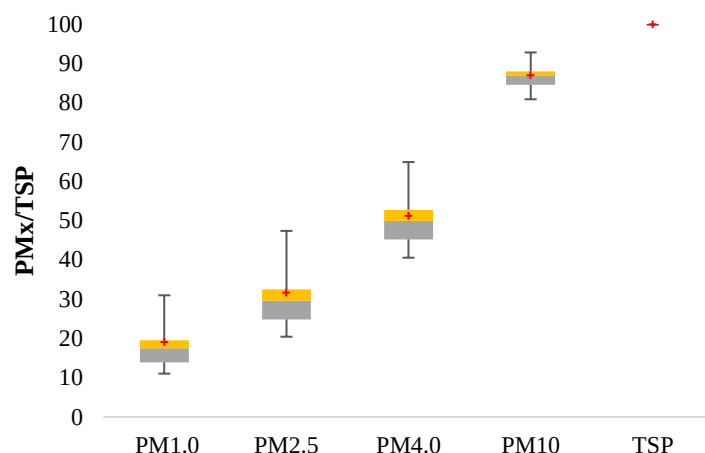
$$RR = [(X + 1)/(X_0 + 1)]\beta \quad (4)$$

ahol: X - a PM_{2,5} éves átlagos koncentrációja (µg/m³), X_0 - a PM_{2,5} háttérkoncentrációja (3 µg/m³), β pedig a kockázati függvény együtthatója. A szív- és érrendszeri megbetegedések β koefficiense 0,15515 (95% CI: 0,0562–0,2541), míg a tüdőrákban alkalmazott β koefficiens 0,23218 (95% CI: 0,08563–0,37873) [31].

3. Kutatási eredmények bemutatása és tárgyalása

4.1 Az aeroszolok eloszlása

A városközpontban mért aeroszolok eloszlását figyelembe véve látható, hogy átlagosan az összes aeroszol 87%-át a PM₁₀ és annál kisebb átmérőjű szálló porok adják. A 2,5 µm és annál kisebb aeroszolok képviselik az összes aeroszol 31,6%-át. A fennmaradt 13%-ot a 10 µm-nél nagyobb aeroszol részecskék teszik ki (7. ábra).



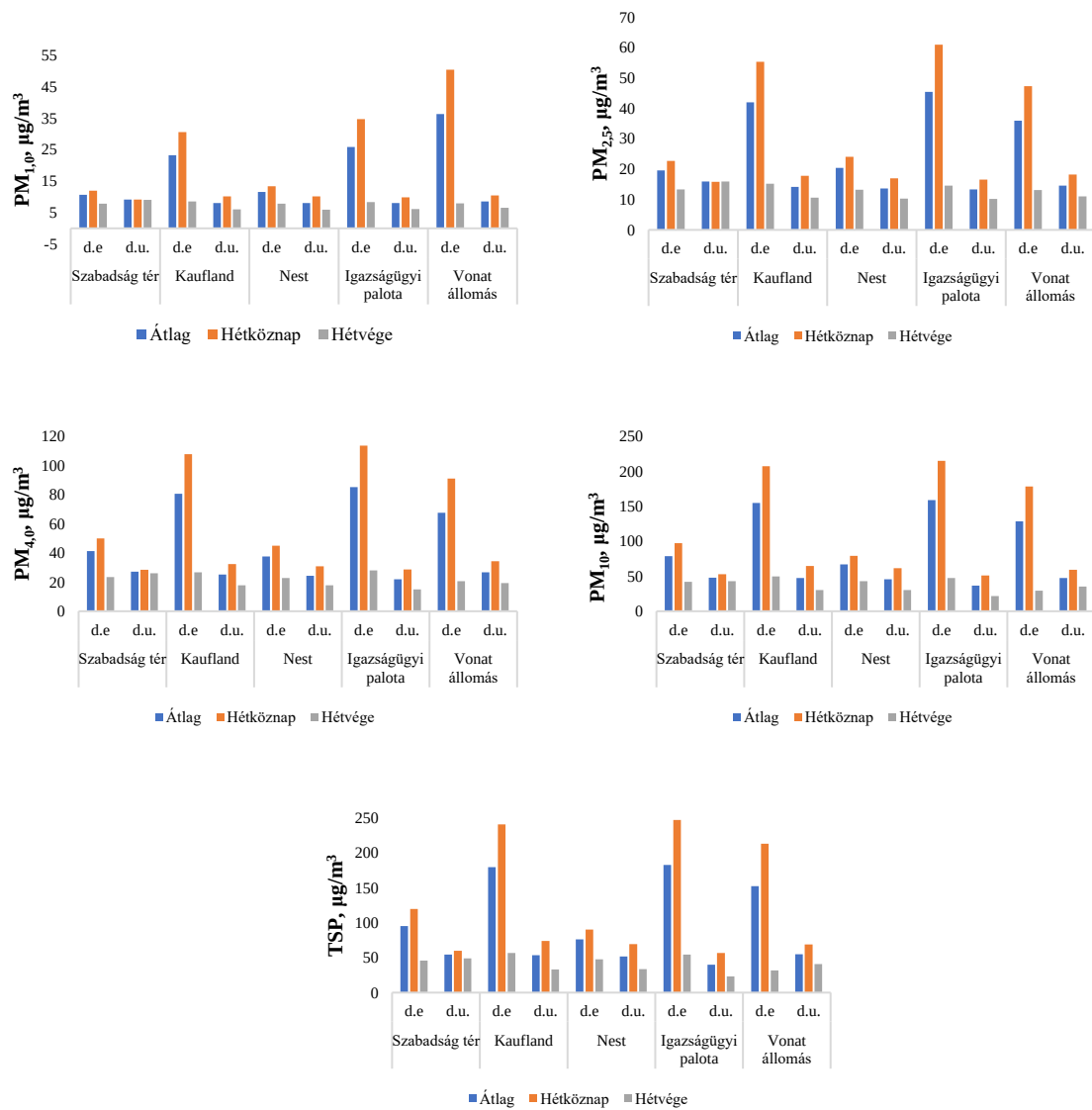
7. ábra: Aeroszol frakciók TSP-hez viszonyított eloszlása százalékban kifejezve.

4.2 A vizsgálati helyszínek aeroszol koncentrációi közötti különbségek bemutatása

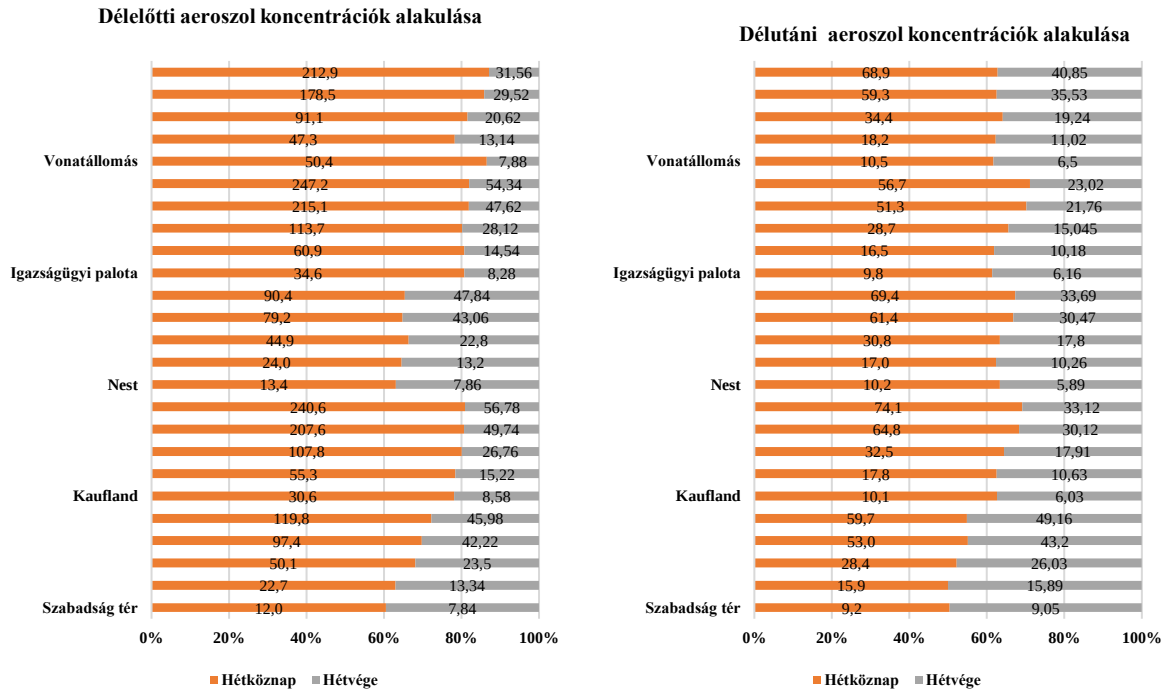
Az **8. ábra** összefoglalja a mintavételezési helyek közötti különbségeket úgy a délelőtti/délutáni, mint a hétköznapi/hétfégi koncentrációkat. Kielemezve az összes aeroszol koncentrációt a legmagasabb koncentráció az Igazságügyi palota és a Kaufland bevásárlóközpontnál volt kimutatható, ahol a mért PM_{10} érték $183 \mu\text{g}/\text{m}^3$ valamint $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ volt. Ezt követte a vonatállomás $152 \mu\text{g}/\text{m}^3$ koncentrációval. A Szabadság téren és a Nest bevásárlóközpont körül mért átlagos összes aeroszol koncentráció $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valamint $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ volt.

Mind az öt vizsgálati helyszínen mért aeroszol koncentráció a délelőtti órákban magasabb volt, mint a délutáni mérések esetében tapasztalt értékek. Hétköznapi mért napszakos (délelőtt/délután) eltérés legnagyobb mértékben a Kaufland, Igazságügyi palota és a Vonatállomásnál volt kimutatható. A PM_1 -koncentráció esetében látható, hogy a Kaufland közelében mért délelőtti koncentráció 3,02-szerese a délután mért koncentrációnak, míg az Igazságügyi palotánál mért különbségek 3,53-szorosak.

Továbbá a vonatállomásnál mért délelőtti és délutáni különbségek voltak a legmagasabbak 4,8-szoros különbséggel. A hétfégen mért délelőtti és délutáni koncentrációk már közelebbi értékeket vesznek fel, a különbség kevésbé markáns. Nyomon követve mind az öt vizsgált paramétert ($PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, $PM_{4,0}$, PM_{10} , TSP), hasonló, közel azonos eloszlás tapasztalható (**8. ábra**).



8. ábra: Az aeroszolok koncentrációjának alakulása az általunk vizsgált különböző helyszíneken.



9. ábra: A délelőtti és délutáni aeroszolok koncentrációinak (TSP) alakulása hétköznap és hétvégen $\mu\text{g}/\text{m}^3$ kifejezve, helyszínenként ötszörös ismétléssel.

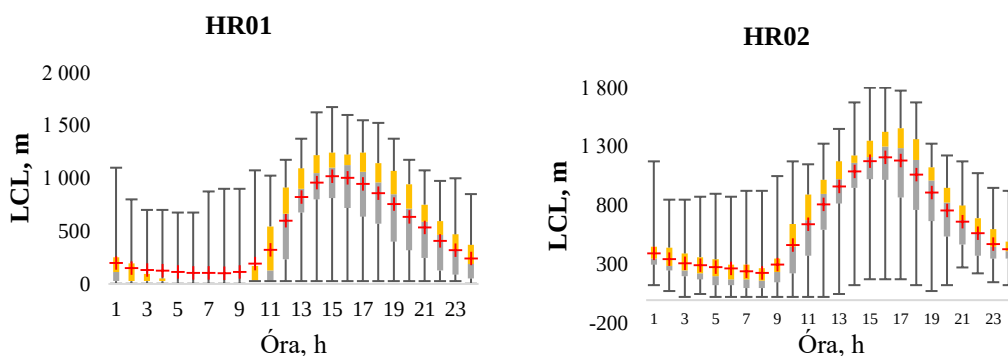
A (9. ábra) szemlélteti a hétközi és a hétközi aeroszol koncentrációkat, ahol jelentős különbség mutatható ki. A Vasútállomás, Kaufland és Igazságügyi palota esetében a százalékos eloszlás 80%/20% hétközi/hétféle, 4-szer nagyobb a hétközi koncentráció a hétféle koncentrációnál. A Nest bevásárlóközpont közelében a hétközi/hétféle százalékos arány 66%/34%, itt kétszeres különbség figyelhető meg, míg a Kaufland esetében 77%/23%, háromszoros csökkenés volt kimutatható hétféle.

4.3 Az aeroszol koncentráció alakulása a klimatológiai paraméterek függvényében

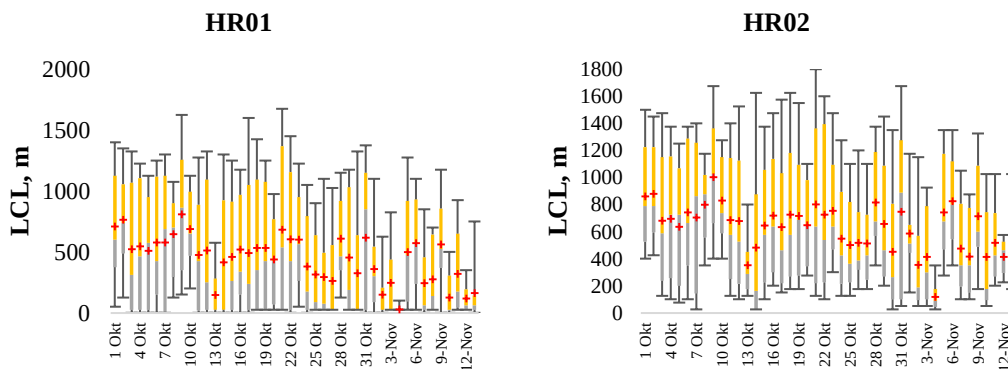
4.3.1 Emelkedési kondenzációs szint alakulása

Az (10. és a 11. ábra) az órási és a napos elmelkedési kondenzációs szint alakulást szemlélteti a két csíkszerdai mérőállomáson. Az (10. ábrán) látható, hogy a HR_{02} mérőállomás esetében reggel 9-10 óra között kezd látványosan emelkedni, átlagosan 400 m-ről 1000-1200 m-ig. Míg délután öt óra után folyamatosan csökken a hajnali értékekre.

A HR₀₁ mérőállomás esetében, amely Zsögödfürdön az erdő közvetlen szomszédságában található, alacsonyabb a határréteg magasság, reggel átlagosan 200 m-ről indul, 10-11 órától kezd emelkedni, és délután 5 órakor csökken vissza a hajnali magasságra. Az (11. ábra) mutatja be a napi változásokat, a csapadék mennyiségével párhuzamot vonultatva látható, hogy az esős napok esetén a határréteg magassága jóval alacsonyabb. A 44 vizsgált nap esetében 19 nap volt csapadék, ebből 4 nap (Okt.16, 27, Nov. 11,12) 2 mm/nap-nál nagyobb esőzés volt, 4 nap (Okt. 25, 28, Nov. 1, 4), 1 mm/nap volt kimutatható, a fennmaradó napok esetében a csapadék mennyisége 0,2–1 mm között változott (Okt. 13,15, 17,26, Nov. 2, 5, 6, 7, 8, 9, 12).



10. ábra: Az órás emelkedési kondenzációs szint változása.



11. ábra: A napi emelkedési kondenzációs szint alakulása.

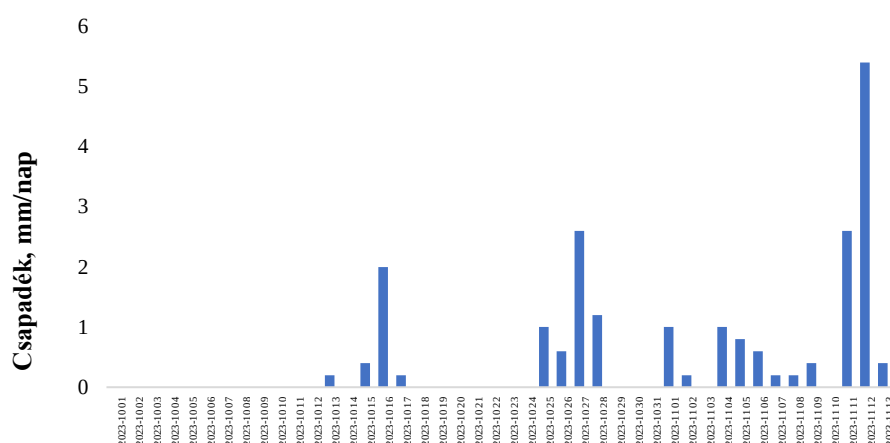
4.3.2 A csapadék légkörtisztító hatásának tanulmányozása

A városközpontban folyamatosan mért aeroszol koncentrációkat hasonlítottuk össze a csapadék mennyiségével. Az (5. táblázatból) jól látható, hogy az aeroszolkoncentrációjának alakulása nagyban függ a csapadék mennyiségétől. A legmagasabb aeroszol koncentrációt a csapadék nélküli napokon mértünk, átlagos TSP koncentrációra vonatkoztatva $98,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A legalacsonyabb TSP koncentrációt a heves esőzések esetében mértünk $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A köztes esetek arra is rávilágítottak, hogy különbség van az enyhe és mérsékelt esőintenzitás alatt és után mért aeroszol koncentrációk között. Ezek az eredmények alátámasztják az esőzések légköri tisztító hatását (12. ábra).

5. táblázat: Az aeroszol koncentrációk alakulása a csapadék függvényében

	ME: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM _{4,0}	PM ₁₀	TSP	Csap m.
	Átlag	17,79	29,39	49,38	85,84	98,07	0,00
Eső nélkül N=7	Szórás	5,1	8,0	12,9	22,6	26,1	
Alacsony eső (0,2–0,4 mm) N=1	Átlag	9,34	15,12	24,25	40,40	46,09	0,40
	Szórás	*	*	*	*	*	*
Mérsékelt eső (0,4–3,9 mm) N=3	Átlag	11,35	18,57	30,59	53,18	61,07	0,60
	Szórás	8,46	13,64	22,94	40,98	46,94	0,60
Heves eső (0,4– 3,9 mm) N=3	Átlag	9,43	14,07	19,64	30,39	35,01	6,67
	Szórás	11,49	16,08	20,69	29,91	34,31	4,11



12. ábra: Csapadékmennyiségek alakulása a vizsgált periódusban.

4.4 A kora reggeli aeroszol koncentráció alakulása a forgalom intenzitásának függvényében

A kora reggeli órákban tapasztalt forgalomintenzitás-növekedése szoros összefüggést mutat az aeroszolkoncentrációjának növekedésével. A legalacsonyabb TSP-koncentrációt minden mintavételi helyen a korai órákban (6:30) mértünk, a maximális TSP-koncentrációt pedig 7:30 és 8:30 között találták meg, amikor a forgalom intenzitása kétszer-háromszor magasabb volt, mint a kezdeti forgalmi intenzitás. A Szabadság téren a TSP-koncentrációja a maximális forgalmi intenzitásnál (7:45-8:30) 2,13-szor haladta meg a 6:30-kor mért koncentrációt (6. táblázat, 13. ábra).

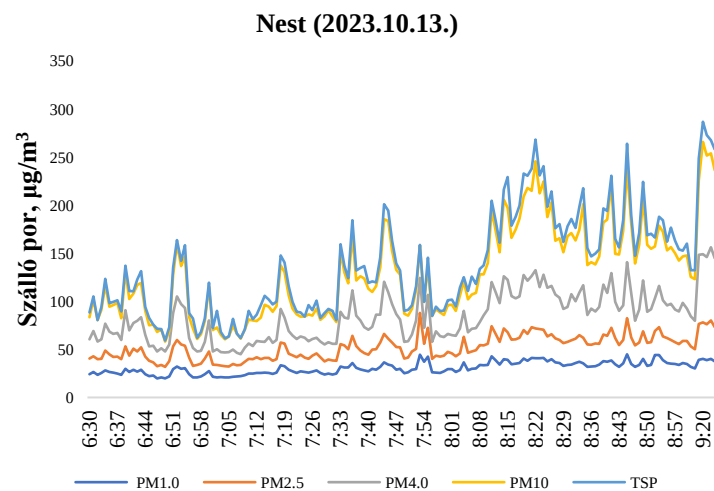
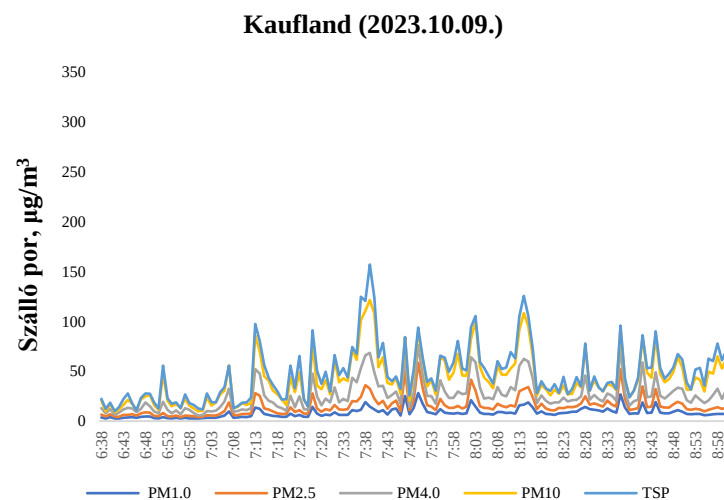
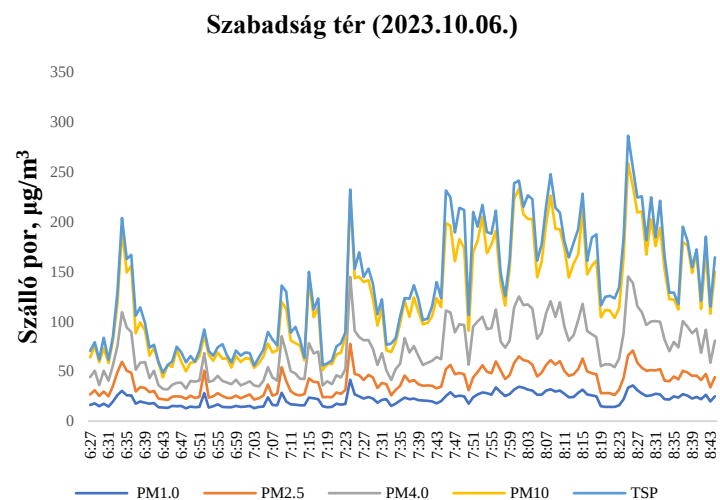
A Kaufland bevásárlóközpont környékén a legalacsonyabb ($17,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$) és a legmagasabb ($75,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$) koncentráció aránya 4,2 volt, a maximális forgalmi intenzitás 7:15-8:00 között alakult. A maximális TSP-koncentrációt ($75,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 7:30-7:45 között mértünk. A legmagasabb és legalacsonyabb forgalmi intenzitás közötti különbség 3-szoros volt.

A Nest bevásárlóközpont közelében a maximális TSP-koncentráció és a forgalom intenzitása 8:15-9:00 között volt tapasztalható (6. táblázat, 13. ábra).

A mérések során a Vasútállomás és az Igazságügyi palota esetében gyűjtött adatokat a ködös reggelek miatt nem tudtuk feldolgozni, mivel a páracseppek ellehetetlenítették a műszer pontos méréseit, ezáltal irreleváns értékeket adva.

6. táblázat: Az aeroszolkoncentrációinak alakulása a forgalom intenzitásának függvényében.

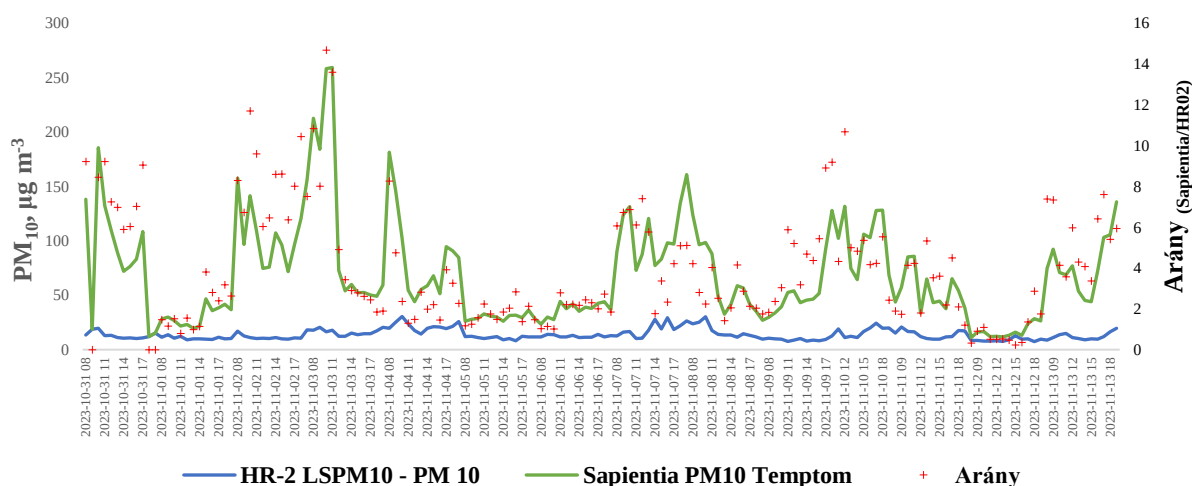
	Szabadság tér (2023.10.06.)						Kaufland (2023.10.09.)						Nest (2023.10.13.)					
	Forgalom, pcs/min	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM _{4,0}	PM ₁₀	TSP	Forgalom, pcs/min	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM _{4,0}	PM ₁₀	TSP	Forgalom, pcs/min	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM _{4,0}	PM ₁₀	TSP
6:30-6:45	6	18,9	3,5	56,1	89,0	96,5	7	3,30	5,75	10,65	15,36	17,98	15	26,28	44,76	70,24	100,88	105,82
6:45-7:00	5	15,4	26,2	41,2	63,1	68,9	13	3,36	5,99	11,52	19,59	22,09	16	24,12	41,09	63,95	89,93	94,41
7:00-7:15	6	17,0	29,2	46,6	73,8	82,4	17	5,41	9,96	17,51	28,47	31,67	22	23,16	37,09	53,11	76,07	81,07
7:15-7:30	7	21,6	38,8	68,3	111,0	119,5	22	6,18	11,11	20,11	34,98	41,94	25	27,15	43,89	64,69	95,35	101,48
7:30-7:45	7	20,2	35,9	61,4	101,6	110,6	19	9,95	19,00	36,79	65,20	75,54	29	29,77	50,39	80,67	123,61	131,87
7:45-8:00	9	26,3	48,5	92,7	166,7	188,2	18	11,77	21,72	33,13	50,64	55,11	26	31,02	52,60	79,55	114,49	118,99
8:00-8:15	10	29,4	54,9	104,8	188,4	205,7	16	10,37	19,41	36,55	60,17	68,51	22	33,02	54,86	85,21	129,92	138,81
8:15-8:30	12	23,8	46,1	90,5	164,2	182,6	17	10,12	16,67	26,61	40,44	44,36	27	38,01	65,38	114,67	194,71	211,31
8:30-8:45	12	24,3	45,2	85,3	153,0	163,9	11	12,03	20,39	30,49	46,58	49,18	24	34,87	60,40	102,05	166,86	179,35
8:45-9:00							13	9,02	15,81	28,38	50,39	57,25	31	36,96	62,58	101,13	166,34	178,93



13. ábra: A kora reggeli aeroszolok koncentrációinak alakulása.

4.5 A mért és a mérőállomás által szolgáltatott PM₁₀ adatok összehasonlítása

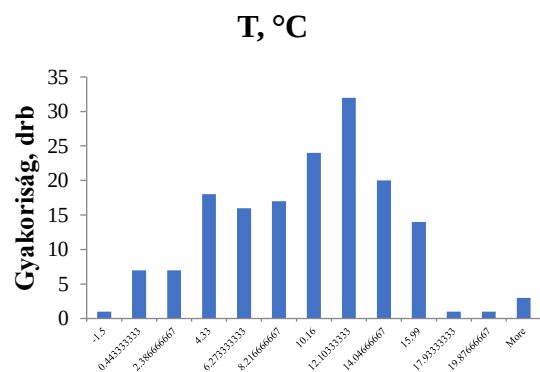
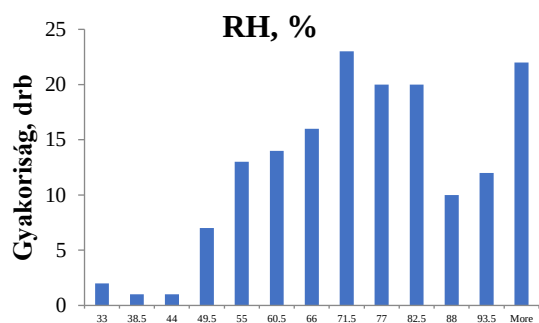
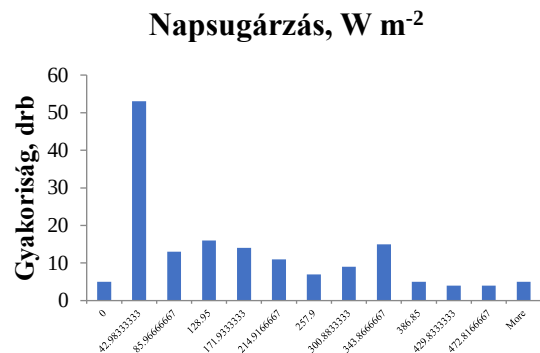
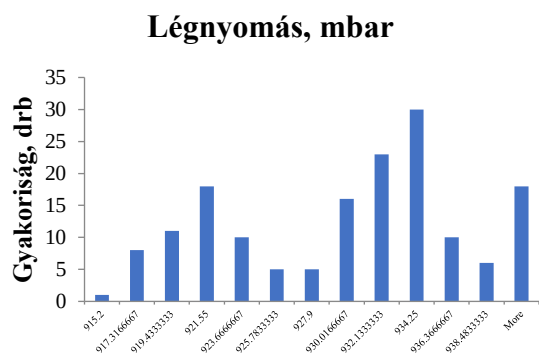
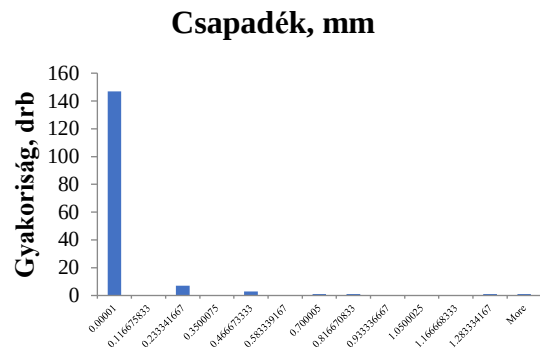
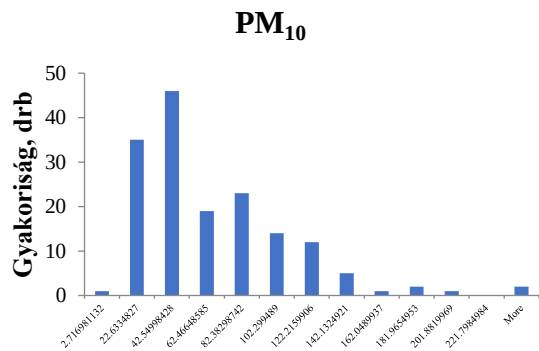
2023.10.31.–2023.11.13. közötti nappali (7-19) PM₁₀ mérési eredményeinket hasonlítottuk össze a HR₀₂ LSPM₁₀ órás adataival (**14. ábra**). Lényeges eltérés mutatkozik a városközpont és a város DK peremén elhelyezett mérőállomás adatai között. Összesen 161 órást elemeztünk, amely során 150 esetben a városközpontban magasabb volt az aeroszol koncentrációja, mint a HR₀₂-es mérőállomáson. Ellenkező esetben, amikor a városközpontban volt alacsonyabb, az eltérés a két mintavételezés között 0,43 volt. Az esetek többségében (93,16%) a városközpontban volt magasabb a légszennyezés mértéke szálló por tekintetben, átlagosan 3,27-szer nagyobb volt a városközpontban mint a HR₀₂ mérőállomáson.



14. ábra: A városközpont és a HR₀₂ mérőállomás PM₁₀ aeroszol koncentrációja.

4.6 Adatok eloszlásának meghatározása

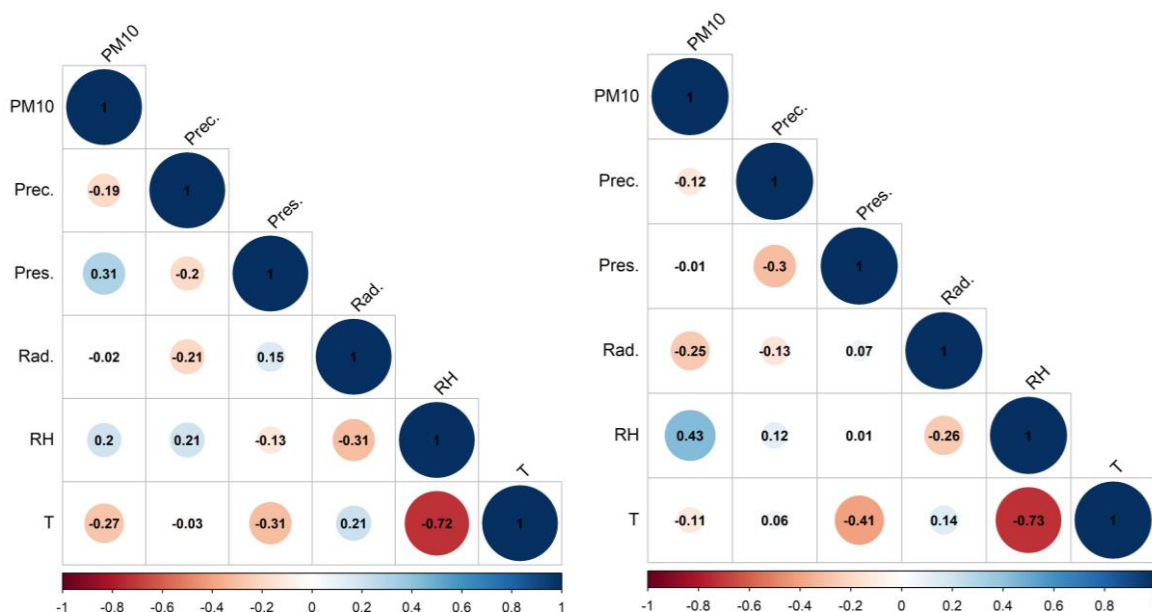
A (**15. ábra**) szemlélteti, hogy a feldolgozott adatok egyenlőtlen eloszlást mutatnak, ezért a következőkben az aeroszol koncentrációk és a környezeti paraméterek közötti összefüggések vizsgálatára a Spearman korrelációs elemzést használtuk a R 4.3.3 programot alkalmazva.



15. ábra: PM₁₀ és a környezeti paraméterek eloszlásának.

4.7 Spearman korreláció eredményei

A mért aeroszol koncentrációk és a meteorológiai paraméterek közötti korrelációs együtthatókat szemlélteti a **(16. ábra)**. A városközpontban 161 órás adatot vizsgáltunk, míg a HR02-es mérőállomás esetében 336 db órás adat volt elérhető a vizsgált periódusban. A legnagyobb Spearman korrelációs együttható a relatív páratartalom és a levegő hőmérséklete között volt kimutatható, $r=-0,72$.



16. ábra: Korrelációs elemzés a városközpontban (bal) és a HR02 mérőállomás (jobb) esetében.

Ahol: PM_{10} - 10 μ m nél kisebb aeroszol, *Prec.*- csapadék mennyiség, *Pres.*- légnyomás, *Rad.*- Napsugárzás, *RH*-relatív páratartalom, *T*- levegő hőmérséklete.

4.8 Az aeroszokok egészségügyi hatásainak tanulmányozása

Elemézve a Környezetvédelmi Ügynökség 2023-as adatait, a $PM_{2,5}$ éves koncentrációja (21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) volt a HR₀₂ mérőállomáson, ami több mint kétszerese az éves megengedett határértéknek (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Hasonlóan a PM_{10} -es aeroszol koncentráció (27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) is a megengedett határérték fölött volt (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A **(7. táblázat)** alapján az össz elhalálozás 14,6%-ért felelősnek tudható be a PM_{10} -szállópor. Tekintettel a városközpontban tapasztalható magasabb légszennyezettségi szintre, ez a becsült kockázat jóval meghaladja a valós kockázatot.

7. táblázat: Összefoglaló táblázat az aeroszolok rövid távú hatásairól

Összefoglaló táblázat: az aeroszolok rövid távú hatásainak relatív kockázatértékelése												
Éves koncentráció, $\mu\text{g m}^{-3}$ (X)	PM ₁₀ relatív kockázat a teljes halálához viszonyítva				PM _{2,5} - A szív- és érrendszeri betegségek okozta halálzás relatív kockázata				PM _{2,5} - A tüdőrák okozta halálzás relatív kockázata			
	PM ₁₀	RR	PM ₁₀	RR	PM _{2,5}	RR	PM _{2,5}	RR	PM _{2,5}	RR	PM _{2,5}	RR
5			28	1,155	5	1,065	28	1,360	5	1,099	28	1,584
6			29	1,164	6	1,091	29	1,367	6	1,139	29	1,597
7			30	1,174	7	1,114	30	1,374	7	1,175	30	1,609
8			31	1,183	8	1,134	31	1,381	8	1,207	31	1,621
9			32	1,192	9	1,153	32	1,387	9	1,237	32	1,632
10			33	1,202	10	1,17	33	1,394	10	1,265	33	1,644
11	1,008		34	1,212	11	1,186	34	1,400	11	1,291	34	1,655
12	1,016		35	1,221	12	1,201	35	1,406	12	1,315	35	1,666
13	1,024		36	1,231	13	1,215	36	1,412	13	1,338	36	1,676
14	1,033		37	1,241	14	1,228	37	1,418	14	1,359	37	1,687
15	1,041		38	1,251	15	1,240	38	1,424	15	1,380	38	1,697
16	1,049		39	1,261	16	1,252	39	1,429	16	1,399	39	1,707
17	1,058		40	1,271	17	1,263	40	1,435	17	1,418	40	1,717
18	1,066		41	1,281	18	1,273	41	1,44	18	1,436	41	1,726
19	1,075		42	1,292	19	1,284	42	1,446	19	1,453	42	1,736
20	1,083		43	1,302	20	1,293	43	1,451	20	1,470	43	1,745
21	1,092		44	1,313	21	1,303	44	1,456	21	1,486	44	1,754
22	1,101		45	1,323	22	1,312	45	1,461	22	1,501	45	1,763
23	1,110		46	1,334	23	1,320	46	1,466	23	1,516	46	1,772
24	1,119		47	1,344	24	1,329	47	1,470	24	1,530	47	1,781
25	1,127		48	1,355	25	1,337	48	1,475	25	1,544	48	1,789
26	1,137		49	1,366	26	1,345	49	1,480	26	1,558	49	1,798
27	1,146		50	1,377	27	1,352	50	1,484	27	1,571	50	1,806

A PM_{2,5} aeroszol koncentrációhoz tartozó relatív kockázat értéke RR=1,303 és RR=1,486 volt a szív- és az érrendszeri, valamint a tüdőrák okozta elhalálzás esetében.

9. Eredmények értékelése

Előző kutatási eredmények arról számoltak be, hogy hogyan változott a Csíki-medence aeroszolok koncentrációja, összetétele és azok lehetséges forrásai. A forráselemzést követően az aeroszolok öt lehetséges forrását különböztették meg: antropogén források, földkérget alkotó anyagok re-szuszpenziója által, vulkáni tevékenység utóhatása, tengeri só, talajpor. Az aeroszolok összetételét tekintve O, C és Si fordult elő a legnagyobb mennyiségben (85%) [33]. A lehetséges forrás beazonosítás során arra a következtetésre jutottak, hogy a Csíki-medence aeroszoljaiban található Si a növényzetből, a vulkáni kőzetekből, a dízel, illetve a benzinmotorok égéstermékeiből keletkező füstből származhat.

Az aeroszolk szén tartalma átlagosan 27,83% volt, amelyek legjelentősebb forrásai a járműforgalom és a biomassza égetése. A fűtési szezon kezdetével párhuzamosan az aeroszol koncentráció is növekedett [33]. Továbbá a teljes forgalomból származó kibocsájtás százalékos eloszlását tekintve, a nehéz járművek 43,5%-ban felelősek a szennyezésért, a személygépkocsik 31,5%-al, a kisteherautók 19,9%-al, a motorkerékpárok 0,55%-al és a vasúti közlekedés 4,62%-ban járulnak hozzá a levegő minőségének romlásához [33].

A kutató munkánk során betekintést nyertünk a vizsgált aeroszol koncentráció változásának dinamikájában, valamint a változások mögött meghúzódó meteorológiai, kibocsájtási tényezőket kölcsönhatásába.

Megfigyeléseink nagyfokú tér és időbeli eltéréseket tártak fel az aeroszolk koncentrációjában a város különböző pontjain. Különösen a PM-koncentrációk jelentős emelkedését figyeltük meg hétköznapi reggelenként a hétköznapi délutánokhoz képest, utalva a reggeli csúcsforgalom hatására a városi levegő minőségére. Az időbeli (órás, napi) különbségek összhangban vannak az egyenlőtlen meteorológiai paraméterek változásával és az forgalom intenzitással [34,35]. Emellett a PM-koncentrációk hétvégén észlelhető csökkenése jelzi, hogy a csökkent járműforgalom hatással van a levegőminőség dinamikájára [36]. A hétköznapiokon szignifikánsabb eltérések voltak megfigyelhetők a reggeli és délutáni koncentrációk között, a hétvégeken viszonylag enyhébb eltérések mutatkoztak, ami a csökkent forgalomnak tudható be [37].

A kora reggeli csúcsforgalom és a PM növekedése között azonosított szoros összefüggés alátámasztja a járművek emissziójának kulcsfontosságú szerepét a városi légszennyezés előidőzésében. Ez rávilágít a célzott forgalomirányítási stratégiák végrehajtásának fontosságára a PM-kibocsátások csökkentése érdekében az ingázási csúcsidőszakokban és a levegőminőséggel kapcsolatos aggályok enyhítése érdekében [38].

Ezenkívül a klimatológiai paraméterek hatásának vizsgálata érdekes tendenciákat tárt fel. Pontosabban, esős időszakokban az aeroszol koncentrációk megközelítették az alapértékeket a csapadék tisztító hatásának köszönhetően, míg a csapadékmentes napok magasabb mutattak. Ez a megfigyelés hangsúlyozza az időjárási viszonyok és a PM-koncentrációk közötti összetett kölcsönhatást, ami a levegőminőség-kezelés holisztikus megközelítését teszi szükségessé [39].

Végül a városközpontban mért folyamatos PM₁₀-koncentrációk és a Környezetvédelmi Ügynökség (HR₀₂) által ellenőrzött órás PM₁₀-koncentrációk összehasonlítása jelentős különbségeket tárt fel, mivel a városközpont következetesen magasabb PM₁₀-koncentrációkat mutatott.

Összefoglalva, a kutatás eredményei hozzájárulnak az aeroszolkok térbeli dinamikájának megértéséhez a városi környezetben, kiemelve a közlekedési minták, az éghajlati tényezők, valamint a térbeli és időbeli heterogenitás sokrétű hatásait. Ezeknek az összefüggéseknek a megvilágításával kutatásunk felhívja a figyelmet a városi légszennyezés szintjének folyamatos nyomon követésének és ennek kezelésének fontosságára a közegészség védelmének érdekében.

10. Következtetések

A kutatás során a $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, $PM_{4,0}$, PM_{10} és össz aeroszol (TSP) koncentrációit határoztuk meg Csíkszereda különböző pontjaiban. Az aeroszolkok koncentrációjának alakulása mellett a közúti forgalom intenzitását és az klimatológiai paramétereket is elemeztük. A lehetséges egészségügyi hatások egyszerűbb szemléltetésére egy összefoglaló táblázatot készítettünk, amelyből kiolvasható az aeroszolkok okozta relatív kockázat az éves aeroszol koncentrációk ismeretében.

A város különböző pontjain jelentős különbségeket mértünk az aeroszol koncentrációkban. A hétköznap délelőtti aeroszol koncentráció minden mérési ponton szignifikánsan magasabb volt, mint a délutáni mérések értékei hétköznapokon. A hétvégi aeroszol koncentrációja jelentősen alacsonyabb volt, mint a hétköznapokon. A hétvégén mérsékeltébbek voltak a reggeli és délutáni koncentrációk közötti különbségek, mint a hétköznap mérések között. A folyamatos aeroszol koncentráció eredmények szoros összefüggést mutattak ki a kora reggeli csúcsforgalom és az aeroszol koncentráció növekedése között.

A csapadékos időszakban az aeroszolkok koncentrációja megközelíti az alapértékeket. A csapadék kimosó hatása miatt a csapadékos napokon szignifikánsan alacsonyabb, míg a csapadékmentes napokon magasabb aeroszol koncentrációt tapasztaltunk. Összehasonlítva a belvárosban mért folyamatos PM_{10} -koncentrációt a Környezetvédelmi Ügynökség által mért PM_{10} -koncentrációval (HR_{02}), a legtöbb esetben (93,16%) a belvárosban volt magasabb a PM_{10} -koncentráció (átlagosan 3,27-szer magasabb).

11. Limitációk

A Temtop PMD berendezés kizárólag tiszta ködmentes időben használható. A városközpontban mért aeroszol koncentrációk összehasonlító elemzése a regionális mérőállomás mérési eredményeivel csak a PM₁₀ aeroszokok esetében volt kivitelezhető, mert a PM_{2,5} aeroszokok órás mérési eredmények nem álltak rendelkezésre a mérőállomásokon a vizsgált periódusban. A város különböző pontjain mért aeroszol koncentrációkat ugyanazzal a mérőkészülékkel mértük ± 1 óra időeltéréssel.

12. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk vezető tanárainknak, **Dr. Bodor Katalin** óraadó oktatónak, illetve **Dr. Bodor Zsolt** egyetemi docensnek a kutatás és a dolgozat kivitelezésében nyújtott segítségért. Továbbá köszönettel tartozunk a mérések kivitelezésében nyújtott segítségért **Gál Mátyásnak, Simó Leventének**, akik közreműködtek a mintavételezések lebonyolításában.

13. Felhasznált irodalom

- [1] B. Katalin, A szálló porok (PM_{2,5}, PM₁₀) nyomelem-koncentrációjának (As, Cd, Ni, Pb) tér- és időbeli eloszlása valamint az emberi egészségre gyakorolt hatása Romániában, 2023.
- [2] C. Tomasi, A. Lupi, Primary and Secondary Sources of Atmospheric Aerosol, *Atmos. Aerosols*. (2017) 1–86. <https://doi.org/10.1002/9783527336449.ch1>.
- [3] P. Di Girolamo, Assessment of the potential role of atmospheric particulate pollution and airborne transmission in intensifying the first wave pandemic impact of SARS-CoV-2/COVID-19 in Northern Italy, *Bull. Atmos. Sci. Technol.* 1 (2020) 515–550. <https://doi.org/10.1007/s42865-020-00024-3>.
- [4] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, E. Bezirtzoglou, Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review, *Front. Public Heal.* 8 (2020) 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
- [5] K. Bodor, M.M. Micheu, Á. Keresztesi, M.V. Birsan, I.A. Nita, Z. Bodor, S. Petres, A. Korodi, R. Szép, Effects of PM₁₀ and weather on respiratory and cardiovascular diseases in the Ciuc basin (Romanian carpathians), *Atmosphere (Basel)*. 12 (2021). <https://doi.org/10.3390/atmos12020289>.
- [6] H.W. Lee, S.C. Kang, S.Y. Kim, Y.J. Cho, S. Hwang, Long-term Exposure to PM₁₀ Increases Lung Cancer Risks: A Cohort Analysis, *Cancer Res. Treat.* 54 (2022) 1030–1037. <https://doi.org/10.4143/crt.2021.1030>.
- [7] I.E. Sitaras, P.A. Siskos, The role of primary and secondary air pollutants in atmospheric pollution: Athens urban area as a case study, *Environ. Chem. Lett.* 6 (2008) 59–69. <https://doi.org/10.1007/s10311-007-0123-0>.
- [8] K.H. Kim, E. Kabir, S. Kabir, A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environ. Int.* 74 (2015) 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>.
- [9] M. Diociaiuti, M. Balduzzi, B. De Berardis, G. Cattani, G. Stacchini, G. Ziemacki, A. Marconi, L. Paoletti, The two PM_{2.5} (Fine) and PM_{2.5-10} (Coarse) fractions: Evidence of different biological activity, *Environ. Res.* 86 (2001) 254–262. <https://doi.org/10.1006/enrs.2001.4275>.

- [10] T. Ruiz-Gil, J.J. Acuña, S. Fujiyoshi, D. Tanaka, J. Noda, F. Maruyama, M.A. Jorquera, Airborne bacterial communities of outdoor environments and their associated influencing factors, *Environ. Int.* 145 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106156>.
- [11] R.L. Górný, Microbial aerosols: Sources, properties, health effects, exposure assessment—A review, *KONA Powder Part. J.* 37 (2020) 64–84. <https://doi.org/10.14356/kona.2020005>.
- [12] D.S. Hamilton, Natural aerosols and climate: Understanding the unpolluted atmosphere to better understand the impacts of pollution, *Weather.* 70 (2015) 264–268. <https://doi.org/10.1002/wea.2540>.
- [13] S. Wang, J. Yan, Q. Lin, S. Zhao, S. Xu, L. Li, M. Zhang, L. Chen, Non-ignorable contribution of anthropogenic source to aerosols in Arctic Ocean, *Environ. Res.* 201 (2021) 111538. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111538>.
- [14] P. Thangavel, D. Park, Y.C. Lee, Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview, *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 19 (2022). <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>.
- [15] R.M. Harrison, D.C.S. Beddows, D. Bousiotis, Z. Shi, L.R. Crilley, W. Bloss, J. Brean, I. Khanna, R. Verma, Measurement Report : Interpretation of Wide Range Particulate Matter Size Distributions in Delhi Measurement Report : Interpretation of Wide Range Particulate Matter Size Distributions in Delhi National Centre for Atmospheric Science, (2021) 1–41.
- [16] L.T. Molina, B.R. Gurjar, Regional and global environmental issues of air pollution, 2010. <https://doi.org/10.1201/EBK1439809624>.
- [17] J.D. Eyre, J.F. Hart, J.G. Maddox, E.E. Liebhafsky, V.W. Henderson, H.M. Hamlin, Long-term exposure to PM_{2.5} major components and mortality in the southeastern United States, *Geogr. Rev.* 58 (1968) 678. <https://doi.org/10.2307/212693>.
- [18] M.S. O'Neill, A. Veves, A. Zanobetti, J.A. Sarnat, D.R. Gold, P.A. Economides, E.S. Horton, J. Schwartz, Diabetes enhances vulnerability to particulate air pollution-associated impairment in vascular reactivity and endothelial function, *Circulation.* 111 (2005) 2913–2920. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.104.517110>.

- [19] Európai Számvevőszék, Légszennyezés: egészségünk védelme még mindig nem elégséges, 2018.
https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_23/SR_AIR_QUALITY_HU.pdf.
- [20] O. Schmid, W. Möller, M. Semmler-Behnke, G. A. Ferron, E. Karg, J. Lipka, H. Schulz, W.G. Kreyling, T. Stoeger, Dosimetry and toxicology of inhaled ultrafine particles, *Biomarkers*. 14 (2009) 67–73. <https://doi.org/10.1080/13547500902965617>.
- [21] S.C. Faber, S.D. McCullough, Through the Looking Glass: In Vitro Models for Inhalation Toxicology and Interindividual Variability in the Airway, *Appl. Vitro. Toxicol.* 4 (2018) 115–128. <https://doi.org/10.1089/aivt.2018.0002>.
- [22] Geneva: World Health Organization, WHO global air quality guidelines, 2021.
- [23] <https://www.who.int/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution>, (2024).
- [24] <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>, (2024).
- [25] Parlamentul Romaniei, Legea 104/2011, *Monit. Of.* (2011).
- [26] S. Erd, L.Y.I.M. Tudom, K.K.A.R. Biom, K.I. Tansz, Sapientia erdélyi magyar tudományegyetem, kolozsvár csíkszeredai kar biomérnöki tanszék, (2023).
- [27] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Cs%C3%ADkszereda>, (2024).
- [28] [https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/HU%20-%20Optikai%20alapok%20az%20ELI-ALPS%20t%C3%BCkr%C3%A9ben%20I.%20-%20Msc%20\(e-learning\)/a_fnyszrs_alkalmazsi_terletei.html](https://titan.physx.u-szeged.hu/tamop411c/public_html/HU%20-%20Optikai%20alapok%20az%20ELI-ALPS%20t%C3%BCkr%C3%A9ben%20I.%20-%20Msc%20(e-learning)/a_fnyszrs_alkalmazsi_terletei.html), (2024).
- [29] www.calitateaer.ro, (2023).
- [30] M.G. Lawrence, The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 86 (2005) 225–233. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>.
- [31] B. Ostro, Outdoor air pollution, Assessing the environmental burden of disease at national and local levels, 2004.

- [32] spssabc, Kétváltozós elemzés Spearman Korreláció, (2024). <https://spssabc.hu/ketvaltozos-elemzes/spearman-korrelacio/>.
- [33] R. Boga, Á. Keresztesi, Z. Bodor, S. Tonk, R. Szép, M.M. Micheu, Source identification and exposure assessment to PM10 in the Eastern Carpathians, Romania, *J. Atmos. Chem.* 78 (2021) 77–97. <https://doi.org/10.1007/s10874-021-09421-0>.
- [34] G. Palladino, P. Morozzi, E. Biagi, E. Brattich, S. Turrone, S. Rampelli, L. Tositti, M. Candela, Particulate matter emission sources and meteorological parameters combine to shape the airborne bacteria communities in the Ligurian coast, Italy, *Sci. Rep.* 11 (2021) 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80642-1>.
- [35] P. Pant, R.M. Harrison, Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review, *Atmos. Environ.* 77 (2013) 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.028>.
- [36] Y. Du, S. You, W. Liu, T. xiao Basang, M. Zhang, Spatiotemporal evolution characteristics and prediction analysis of urban air quality in China, *Sci. Rep.* 13 (2023) 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36086-4>.
- [37] M.I. Khoder, S.K. Hassan, Weekday/weekend differences in ambient aerosol level and chemical characteristics of water-soluble components in the city centre, *Atmos. Environ.* 42 (2008) 7483–7493. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.05.068>.
- [38] S.K. Gupta, S.P. Elumalai, Dependence of urban air pollutants on morning/evening peak hours and seasons, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 76 (2019) 572–590. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00616-x>.
- [39] P.L. Kinney, Air pollution, Climate Change and Human Health Lectures, *Clim. Chang. Heal.* 5 (2018) 179–186. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0188-x>.
- [40] T. Tao, Y. Shi, K.M. Gilbert, X. Liu, Spatiotemporal variations of air pollutants based on ground observation and emission sources over 19 Chinese urban agglomerations during 2015–2019, *Sci. Rep.* 12 (2022) 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08377-9>.
- [41] B. Bera, S. Chinta, D.A. Mahajan, A. Sailaja, R. Mahajan, A. Professor, Urbanization and Its Impact on Environmental Sustainability: A Comprehensive Review, (2023).

14. Melléklet

M1. táblázat: A Temptom PMD 351 készülék jellemzői

Megnevezés	Változó
Mért frakciók	PM _{1,0} , PM _{2,5} , PM _{4,0} , PM ₁₀ , TSP
Mérési tartomány	0~1000 µg m ⁻³
Pontosság	±10%
Felbontás	0,1 µg m ⁻³
Mérési elv	Fényszórási technika
Fényforrás	50 mW, 780 nm
Mintavételi idő	1 min
Térfogat áram	2,83 L min ⁻¹
Kijelző	4,0" TFT LCD
Kommunikáció	USB /RS-232
Memória	2,000,000 mérés
Akkumulátor	Újratölthető lítium akkumulátor
Töltési idő	3,5 óra
Üzemelési idő	8 óra
Üzemi hőmérséklet	0~50 °C
Tárolási hőmérséklet	-20~60 °C
Monitor dimenzió	170×110×48 mm
Tömege	850 g