



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Távközlési és MédiaInformatikai Tanszék

# Nagy területi felbontású levegőminőség monitorozó rendszer

**TDK dolgozat**

Készítette:

Vida Imre

Konzulensek:

Dr. Varga Pál

Dr. Újvári Balázs

2021

# Tartalomjegyzék

<b>Kivonat</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
<b>2. Problémafelvetés</b>	<b>3</b>
2.1. A légszennyezés . . . . .	3
2.2. A szennyezőanyagok csoportosítása . . . . .	3
2.3. A finomrészecskés szennyezőanyagok egészségügyi hatásai . . . . .	5
2.4. Megelőzés és szabályozások . . . . .	6
2.4.1. Technikai jellegű intézkedések . . . . .	7
2.4.2. Aktuális jogi szabályozások . . . . .	7
2.5. Jelenlegi kutatások hiányosságai . . . . .	8
<b>3. Létező megoldások, a tudomány jelenlegi állása</b>	<b>12</b>
<b>4. Modellezési módszertan</b>	<b>15</b>
<b>5. Telepített szenzorok és mérési eredményeik</b>	<b>17</b>
5.1. Hardver . . . . .	17
5.2. Szoftver . . . . .	21
<b>6. Virtuális szenzorok</b>	<b>23</b>
6.1. Elhelyezkedésük . . . . .	23
6.2. Becsült mérési eredmények . . . . .	24
6.2.1. Becslési módszerek és modellek . . . . .	24
6.2.2. Verifikáció, adatok ellenőrzése . . . . .	24
<b>7. Nagy térbeli felbontású becslés</b>	<b>25</b>
7.1. Becslési módszerek és modellek . . . . .	25
7.1.1. SzélcSATornás mérések . . . . .	25
7.2. Verifikáció, ellenőrző mérések . . . . .	26
7.2.1. Valós mérések . . . . .	27
<b>8. Eredmények összegzése</b>	<b>31</b>

<b>9. Várható hasznosulás és továbbfejlesztés</b>	<b>33</b>
<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>34</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>35</b>

# Kivonat

A levegőben lévő finomrészecskés szennyező anyagok valós idejű monitorozása jelenleg nem teljesen megoldott, hiszen az életminőségünk szempontjából fontos méréseket általában hosszabb idő alatt végzik, a jelenleg működő automata mérőállomások 1 perc alatt, de óránként, a manuális mérőállomások pedig több mint 24 óra alatt végzik el méréseiket, melyek negyedévente kerülnek publikálásra [14]. Az egészségünk megőrzése az egyén és a munkaadók szempontjából is értéket jelent, ezért nagy szükség van e rendszerek fejlesztésére, és kiegészítésére. Nagy problémát jelent továbbá, hogy az adatok gyűjtése csak városi szinten történik, az élettani hatások közvetlen vizsgálatához azonban, ennél nagyobb felbontású térképekre lenne szükség.

Ezt a problémát a dolgozatban tárgyalt módszerek segítségével csökkentem úgy, hogy saját szenzor hálózattal növelem a már meglévő mérések térbeli és időbeli felbontását is. Munkám során a város jellemző részeinek szennyezettségére különböző módszerekkel modelleket alkotok, melyek felhasználásával a szükséges szenzorok számát eddigi eredményeimmel is optimalizálni tudtam. A modellalkotás lehetővé tette, hogy a szenzorok közötti területen a finomrészecskés szennyezőanyag koncentrációt közelíteni tudjam a valóságoshoz, valamint ezek eloszlását tanulmányozhassam.

A modellezett terület mentén viszonylag nagyszámú érzékelő került elhelyezésre, melyek adatait felhasználtam különböző többdimenziós adatelemzések során. Korábbi tapasztalataim szerint a szennyező anyagok eloszlása nem lineáris a keletkezési hely közvetlen környezetében, és nagyban függ az adott terület paramétereitől, de adott feltételek mellett jól használhatók egyszerű modellek és közelítések. Célom kezdetben egy olyan területre modellt alkotni, ahol egy sétáló utca köt össze két forgalmasabb útszakaszt. Hasonló modelleket integrálva a teljes levegőminőség monitorozó rendszerbe, várakozásaim szerint jelentősen csökkenthető lesz az egységnyi területen szükséges szenzorok száma, miközben a pontosság és megbízhatóság nem változik számottevően. A megvalósítás során házi készítésű és professzionális szélcsatornákat is használtam az adatok kontrollált körülmények közötti begyűjtésére, valamint valós körülmények között is végeztem méréseket. Munkám és eredményeim a teljes rendszer fontos részét képezik, hosszútávon a költség- és energiahatékonyság javításában van számottevő jelentősége.

Eredményeim városi és ritkán lakott területek légszennyezettségi vizsgálatainál is széles körben felhasználhatók lehetnek, és gépi tanulási módszerekkel ötvözve jelentősen javíthatják a lakosság életminőségét, csökkentve a megbetegedések számát.

# Abstract

Real-time monitoring of fine particulate pollutants (PM) in the air is currently not fully resolved, as measurements important to our quality of life are usually made over a longer period of time, with automatic measuring stations currently measuring for 1 minute every hour and manual stations measuring for 24 hours, which are then published quarterly [14]. Maintaining our health is valuable for both individuals and employers, so there is a great need to develop and complement these systems. It is also a big problem that data is only collected at the city level, but higher resolution maps would be needed to directly study the physiological effects of this pollution.

I attempt to contribute to improving this situation with the help of the methods discussed in this dissertation. I achieve this by increasing the spatial and temporal resolution of the already existing measurements with my own sensor network. In the course of my work, I create models for the characteristic parts of the city with different methods, using which I was able to optimize the number of necessary sensors using my previous results. The modeling allowed me to approximate the concentration of fine particulate matter in the area between the sensors and to study their distribution.

A relatively large number of sensors were placed along the modelled area. After collecting the necessary data, I performed multidimensional data analysis to uncover potentially useful patterns from the data. In my previous experience, the distribution of contaminants is not linear near the site of origin and is highly dependent on the parameters of the site, but simple models and approximations can be used well under given conditions. My goal initially is to model an area where a pedestrian street connects two busier road sections. By integrating similar models into the overall air quality monitoring system, I expect the number of sensors required per unit area to be significantly reduced, while accuracy and reliability will not change significantly. During the implementation, I also used home-made and professional wind tunnels to collect the data under controlled conditions, and I also performed measurements under real conditions. My work and results are an important part of the whole system, and in the long run, it is of considerable importance in improving cost and energy efficiency.

My results can be widely used, and combined with artificial intelligence can significantly improve the quality of life of the population as well as reduce the number of diseases.

# 1. fejezet

## Bevezetés

A levegőben lévő szennyező anyagok hatalmas egészségügyi kockázatot jelentenek számunkra. Az EEA (European Environmental Agency) – Európai Környezetvédelmi Ügynökség legfrissebb 2020-as jelentése alapján a 28 európai tagállamban évente 379 000 (!) ember veszíti életét idő előtt és feltételezhetően az állatvilág is hasonló veszélyeknek van kitéve a 2.5 mikrométeres méretű szennyezőanyagok jelenlétének közvetlen vagy közvetett hatásai miatt [2]. Ez a probléma annyira jelentős, hogy a „4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről” rendeletet [1] betartva a települések kötelesek a károsanyag kibocsátásukat és a levegőben lévő szállópor (PM10) koncentrációját úgy szabályozni és nyomon követni, hogy azok a megfelelő határértékek alatt maradjanak, ellenkező esetben súlyos büntetések elé kell nézniük.

Az ilyen mérésekre kidolgozott jelenlegi módszerek és mérőállomások, bár céljukat ellátják, alacsony számuk és magas felszerelési és üzemeltetési költségük miatt alkalmatlanok arra, hogy az egyes emberekre vonatkozóan személyre szabottan akár orvosi célokra is felhasználható adatokat szolgáltatassanak, hiszen az információ túlságosan aggregált formában jelenik meg. A széles körben használható, egészségügyi és városfejlesztési célokból is jelentős információtartalommal rendelkező térkép nem feltétlenül igényli a jelenleg használt mérőberendezések pontosságát, sokkal inkább a területi felbontás finomítására van szükség.

A nagyobb térbeli felbontás hiánya jelenleg az egész városra nézve jelenthet kockázatot és adhat okot aggodalomra, vagy esetleg hamis biztonságérzetre, hiszen jellemzően az egész városra általánosítva láthatjuk a levegő minőségét, de ez valójában nem elég további következtetésekhez.

A légszennyező anyagok keletkezési helyének pontos lokalizálása is kiemelten fontos lehet, hiszen a szennyezés csökkentésére tett beavatkozás hatékonysága és költséghatékonysága is drasztikusan javítható, amennyiben az, a forrás közvetlen környezetében történik meg.

Munkám egyedisége abban áll, hogy alacsony költségű, de mégis a célnak megfelelő pontosságú szenzor hálózattal egyszerre nagy térbeli, és időbeli felbontású mérést valósítok

meg, miközben a szükséges szenzorok számának minimalizálására törekszem, különböző modellek alkalmazásával.

Munkám során a nemzetközi kutatási eredményeket is megismerve – és ahol ildomos, alkalmazva – kidolgoztam a kutatás módszertanát, mely alapján további kísérleteket végeztem.

Ehhez többféle szenzort felhasználva valós városi környezetben végeztem méréseket, majd ezen fix szenzorok közötti terület légszennyezettségét igyekeztem becsülni szoftveresen; virtuálisan elhelyezett szenzorok várható adatainak vizsgálatával, pontosításával. A felbontás növelése érdekében kontrollált labor-körülményeket hoztam létre saját szélcsatorna építésével. Ennek a környezetnek a segítségével és kültéri, városi mérések végzésével tovább finomítottam a modellt annak érdekében, hogy minél nagyobb térbeli felbontással lehessen becsülni a légszennyezettségi adatokat – a pontosság szinten tartása mellett.

## 2. fejezet

# Problémafelvetés

### 2.1. A légszennyezés

A légszennyezés sajnos mostanra életünk részévé vált. Különböző tevékenységeink során, céljaink hatékony eléréséhez olyan technológiákat használunk, melyek mellékhatásokkal is rendelkeznek. Ilyen mellékhatás lehet például a különböző szennyezőanyagok létrehozása. Ez még akkor is igaz, ha nem közvetlenül az alkalmazott technológia hoz létre szennyezőanyagokat, vagy nem kívánt mellékterméket, hanem annak előállítása, vagy a működtetéséhez szükséges energia megtermelése.

### 2.2. A szennyezőanyagok csoportosítása

A levegőben lévő szennyezőanyagokat különböző jellemzőik alapján szokás csoportosítani. A leggyakoribb eset, amikor a csoportosítás halmazállapot és összetétel alapján történik. Megkülönböztethetünk gáznemű és szilárd, azon belül pedig szerves valamint szervetlen szennyezőanyagokat.

A gáznemű szennyezőanyagok közül talán a  $CO_2$  a leggyakoribb, hiszen ez megfelelő koncentrációban természeti folyamatoknak köszönhetően része a tiszta levegőnek, de a szennyezőanyagok között gyakran van jelen  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$  valamint különböző szénhidrogének ( $CH$ ) is. Ezen anyagok jellemző forrásai többek között a közlekedés, kohók és hőerőművek, lakossági fűtőrendszerek, vegyipari és mezőgazdasági folyamatok.

A szilárd szennyezőanyagokat jellemző méretük alapján is érdemes megvizsgálunk. A későbbiekben tárgyalt megfontolásokból érdemes ezeket két csoportra bontani. A két csoport közötti határt  $10\mu m$ -nél húzhatjuk meg. Keletkezési helyüket tekintve döntő többségben a lakossági és erőművi fosszilis tüzelés, valamint a közlekedés és a mezőgazdaság miatt keletkeznek, rendszerint gáznemű szennyezőanyagok kíséretében.

A  $10\mu m$  alatti részecskéket rendszerint az aeroszokok csoportjába sorolhatjuk, melyek keletkezési módjaik szerint elkülöníthetünk két fő csoportot:

- Dezintegrációs eredetű porok  
Jellemzően valamilyen mechanikai hatás, fémmegmunkálás, bányászat, porcelán és textilipar, valamint malomipari tevékenységek közben keletkeznek.



- Kondenzációs eredetű porok  
Változó összetételűek, kondenzációs folyamatok hozzák létre őket.

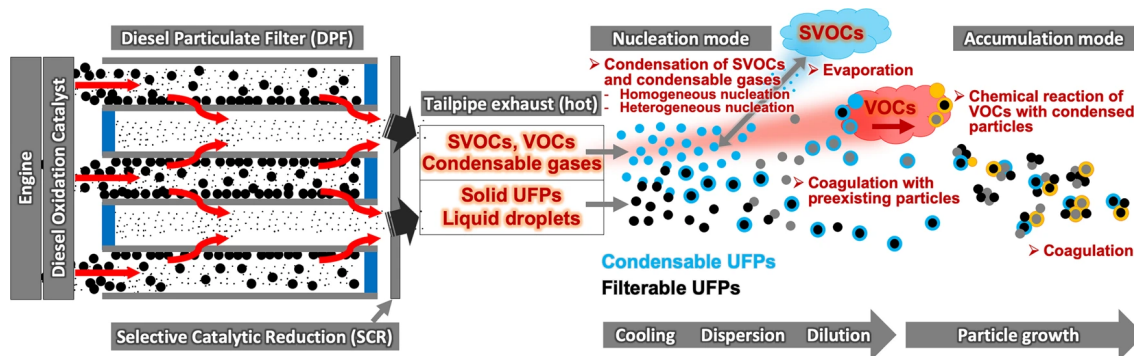
További csoportosítási szempont lehet a különböző anyagok káros hatása, mely alapján vizsgálva sokszor jelentős átfedéseket tartalmazó csoportokat kaphatunk.

- Gazdasági szempontok alapján
  - Technológiai folyamatokat vagy eszközöket negatívan befolyásoló
  - Technológiai szempontból semleges
- Környezetvédelmi szempontok alapján
  - Üvegházhatást okozó
  - Ózonpajzsot károsító
  - Korrozív
- Élettani hatásai szerint
  - Toxikus
  - Irritatív
  - Maró
  - Karcinogén
  - Mutagén
  - Egyéb

Az elsőre bonyolultnak tűnő csoportosítások helyett alkalmazhatunk más megközelítéseket is. A jelen dolgozatban tárgyalt probléma megértéséhez elegendő egy egyszerű csoportosítási módot választani, mely alapján a szennyezőanyagok mindegyike besorolható az alábbi csoportokba:

- Könnyen érzékelhető  
Ebbe a csoportba tartoznak a legtöbbször fosszilis fűtőanyagok égetésekor, bontásokkor és egyéb építkezési és felújítási munkálatokkor keletkező, régebbi járművek által kibocsátott, vizuálisan is jól érzékelhető, kellemetlen, gyakran fojtó szagú szennyezőanyagok. Ezek könnyű érzékelhetőségüknek köszönhetően gyakran az expozíció előtt, vagy rövid expozíciót követően is felismerhetők, így elkerülésükre számtalan intézkedés tehető meg.
- Nagyon nehezen, vagy egyáltalán nem érzékelhető  
Ebbe a csoportba sokféle szennyezőanyag tartozhat. Közös jellemzőjük, hogy önmagukban nem érzékelhetők, viszont keletkezésüket tekintve gyakran valamilyen könnyen érzékelhető szennyezőanyag kíséretében keletkeznek, de egy csoportjuk (UFP) nagy százalékban (34%) dízel belsőégésű motorral rendelkező járművek miatt keletkezik [10] a 2.1. ábrán látható módon.

Ezen az ábrán megfigyelhető, hogy a dízel járművek esetén a kibocsátott szennyezőanyagok szűrve vannak, de a szűrő különböző illékony szerves vegyületeket, valamint az ultrafinom részecskés szennyezőanyagokat (UFP) nem képes eltávolítani az égéstermékéből. A kipufogócsőből környezetbe jutva eleinte még nagy koncentrációban fordulnak elő az ultrafinom részecskés szennyezőanyagok, de később a kondenzáció, különböző kémiai reakciók és fizikai hatások következtében előfordulási arányuk csökken.



2.1. ábra. Egy átlagos dízel belsőégésű motorból kibocsátott szennyezőanyagok [7].

Ebbe a csoportba tartoznak például a szilárd,  $10\mu\text{m}$ -nél kisebb részecskeméretű finomrészecskés szennyezőanyagok is, melyekkel a továbbiakban foglalkozok.

A finomrészecskés szennyezőanyagok egyik különlegessége, hogy bár gyakran jól érzékelhető szennyezőanyagokkal együtt keletkeznek, önmagukban is létrejöhetnek bizonyos feltételek mellett, valamint kutatások szerint jellemzően jelen vannak a szennyezett levegőben [13]. Egészségügyi hatásuk jelentős, és még akkor sem feltétlenül vesszük észre, ha koncentrációjuk környezetünkben jelentősen az egészségügyi határérték fölé emelkedik.

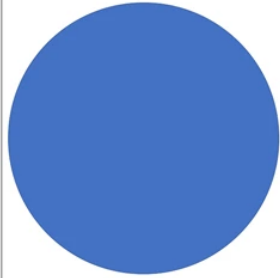
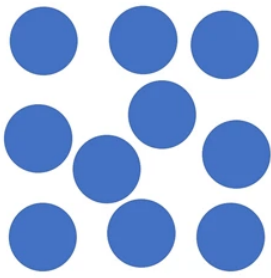
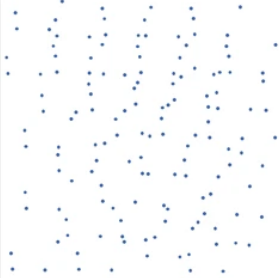
### 2.3. A finomrészecskés szennyezőanyagok egészségügyi hatásai

Az egészségügyi hatások vizsgálatával számos helyen foglalkoznak. A dolgozat megírásakor a tudomány jelenlegi állása szerint úgy tűnik, hogy minél több kutatási eredmény jelenik meg, annál nagyobb kockázati tényezőként értékeljük őket, valamint az átlagos részecskeméret csökkenésével nő az általuk jelentett egészségügyi kockázat. Ezt bizonyítja hogy már a '90-es években és azt megelőzően is foglalkoztak a problémával, mára viszont már komoly szabályozások is vonatkoznak az egyes szennyezőanyagokra. Ezen szennyezőanyagok jelenléte nem csak néhány nappal csökkenti a várható élettartamot, de akár hosszú évekkel is tovább élhetnek azok, akik tisztább levegőt lélegeznek be. A megemelkedett koncentrációnak való kitettség a már rövidtávon is komoly, akár halálos szövődményekhez vezethet.[8] Friss kutatások összefüggéseket találtak a koronavírus halálozási mutatók, és a finomrészecskés szennyezőanyagoknak való kitettség között [16] [20] [21].

Azt találták, hogy hosszú távon  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ -rel magasabb szennyezőanyag koncentrációhoz, 11%-kal magasabb halálozási arány tartozik.

Aggasztó eredményeket mutat több, korábbi kutatás is, melyekben különböző  $10\mu\text{m}$ -nél kisebb méretű szennyezőanyagok élettani hatásait vizsgálták. Egy rövid összefoglalást a 2.2. ábra tartalmaz.

Az UFP (Ultra Fine Particles) szennyezőanyagok esetében a legrosszabb a helyzet, melyből 2008-as adatok alapján Európa területén egy év alatt 271 kilotonna keletkezett [10], és veszélyességük, még 2019-es kutatások alapján is alá van becsülve [18]. Ez a csoport azért kiemelten veszélyes, mert képes bejutni a vérkeringésbe és komoly szövődményekhez vezethet, ráadásul a 2008-as mennyiség 34%-át közúti közlekedés tette ki, így a keletkezés helye is a lakosság közvetlen közelében volt.

	<b>10 <math>\mu\text{m}</math> (Coarse)</b>	<b>2.5 <math>\mu\text{m}</math> (Fine)</b>	<b>0.1 <math>\mu\text{m}</math> (Ultrafine)</b>
			
<b>Total mass</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Particle number</b>	<b>1</b>	<b>64</b>	<b>1,000,000</b>
<b>Surface area per particle</b>	<b>1</b>	<b>0.0625</b>	<b>0.0001</b>
<b>Total surface area per mass</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>100</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtered in proximal airway</li> <li>• May irritate skin, mucosa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaches peripheral airway</li> <li>• Cannot enter systemic circulation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Higher adsorbed toxic material on surface</li> <li>• May enter systemic circulation</li> </ul>

**2.2. ábra.** A  $10\mu\text{m}$ -nél kisebb méretű szennyezőanyagok paramétereinek összehasonlítása, és potenciális egészségügyi hatásai [6].

## 2.4. Megelőzés és szabályozások

Az egészségmegőrzés módszereit két fő kategóriába sorolhatjuk. A technikai jellegű intézkedésekben található a megelőzésre irányuló védőeszközök és egyéb fizikai eszközök áttekintése, míg a másik csoportba a jogi intézkedéseket sorolhatjuk.

### 2.4.1. Technikai jellegű intézkedések

A szennyezett levegő, és a füst ellen sokféleképpen próbálhatunk védekezni, azonban nem mindig a legegységesebbnek tűnő módszerek a leghatékonyabbak. A finomrészecskés szennyezőanyagok esetén ez különösen nehéz, hiszen hatékony szűrésük drága berendezésekkel vagy technológiailag bonyolult folyamatokkal lehetséges csak [11].

Gyakori levegőszűrők		
Típus	Tipikus szűrési tartomány	Elterjedtség
Pollenszűrő	$\geq 25 \mu m$	főleg gépjárművekben, régebbi klíma berendezésekben széles körben elterjedt, a $PM_{10}$ -es szennyezőanyagokra vonatkozó ellenőrző mérést a 2.3. ábra mutatja. A mérések igazolták hogy a szűrőberendezések hatása elhanyagolható ebben a méret-tartományban.
Sebészi maszk	oldalt jelentősen szellőzik, elsődleges célja nem a kis részecskés szennyezőanyagok elleni védekezés	A koronavírus miatt elterjedt a használata.
HEPA szűrők		Drágább légtisztító berendezések, modern épület szellőztető rendszerek, bizonyos járművekben megtalálható bekapcsolható funkcióként, például: Tesla Bioweapon Defense Mode [17] Ennek a módnak a működését és előnyeit a 2.4. ábra tartalmazza.

**2.1. táblázat.** Elterjedt légtisztító szűrők és maszkok összehasonlítása

### 2.4.2. Aktuális jogi szabályozások

Mivel a probléma jelentős és igen sokrétű, számos szabályozás létezik arra, hogy egy adott területen milyen szint alatt kell tartani a különböző szennyezőanyagok koncentrációját. Magyarországon az Országos Légszennyezettség Mérés Hálózat végez méréseket. Az ország területén jelenleg 54 darab automata mérőállomás működik, melyek mérési eredményeiket óránként hozzák nyilvánosságra. Az ezt kiegészítő manuális mérőhálózat jelenleg 178 darab mérőállomásból áll, melyek esetén az időigényes laboratóriumi elemzések miatt az adatközlés negyedévente történik [14].



**2.3. ábra.** Jármű légtisztító berendezéseinek ellenőrzése

Hazánkban jelenleg a  $PM_{10}$  és  $PM_{2.5}$  szennyezőanyagok a III. veszélyességi kategóriába ("veszélyes") vannak besorolva, de gyakran társulnak I. ("különösen veszélyes") és II. ("fokozottan veszélyes") szennyezőanyagokkal is.

A hatályos jogszabály szerint [1] a  $PM_{10}$  szállópor egészségügyi határértéke 24 órás átlagra vonatkoztatva  $50\mu g/m^3$  mely egy naptári év alatt 35-nél többször nem léphető át. Az éves egészségügyi határérték ebből a szennyezőanyagból  $40\mu g/m^3$ , melynek számítására a módszer is elő van írva.

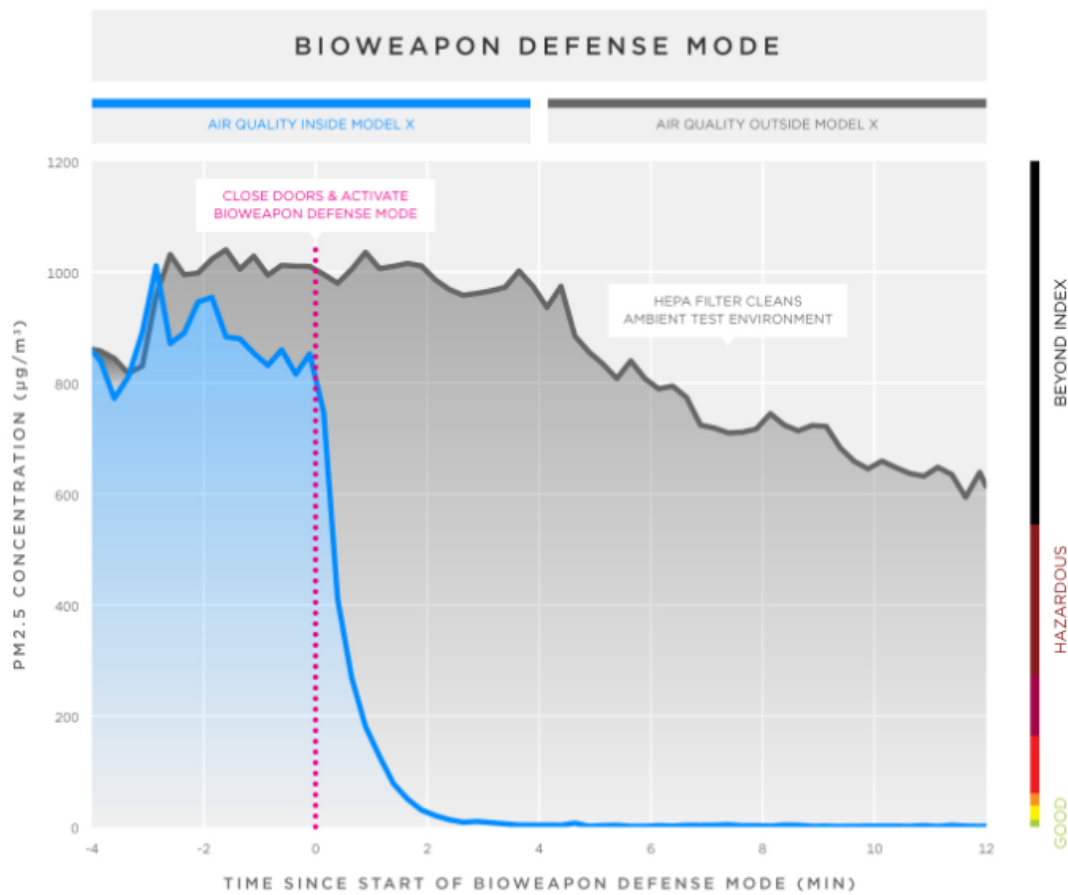
A  $PM_{2.5}$ -es anyagokra vonatkoztatva pedig még ennél is szigorúbb megköötések vannak, valamint egy nemzeti expozíciócsökkentési cél is definiálva van. Az egészségügyi határérték ebben az esetben (naptári évre vonatkoztatott átlag koncentráció)  $20\mu g/m^3$

Egészségügyi határértékek számos más szennyezőanyagra is adottak, ezek a hivatkozott jogszabályban érhetőek el.

## 2.5. Jelenlegi kutatások hiányosságai

A kapcsolódó irodalmakat és az alkalmazott rendszerek működését tanulmányozva világossá vált, hogy ezek célja a globálisan, valamint nagyobb területi egységenkénti elmezések lehetővé tétele, valamilyen jellemzően hosszútávú, általános statisztikai adatok kinyerése céljából. Egy ilyen térkép látható az Európai Környezetvédelmi Ügynökség 2020-as jelentésében is, mely a 2.5. ábrán látható.

Az ilyen jellegű jelentéseknél nem egyértelmű, hogy hogyan lehet a lakosságra nézve következtetéseket levonni, hiszen az adatokat szolgáltató mérőállomások elhelyezésének célja az, hogy az adott tájegységnek és domborzati viszonyoknak megfelelően, nagy területre általánosítható mérési adatokat szolgáltatassanak. Ez a megközelítés kisebb települések esetén feltételezhetően közel helyes adatokhoz vezet, de egy városban, vagy nagyobb



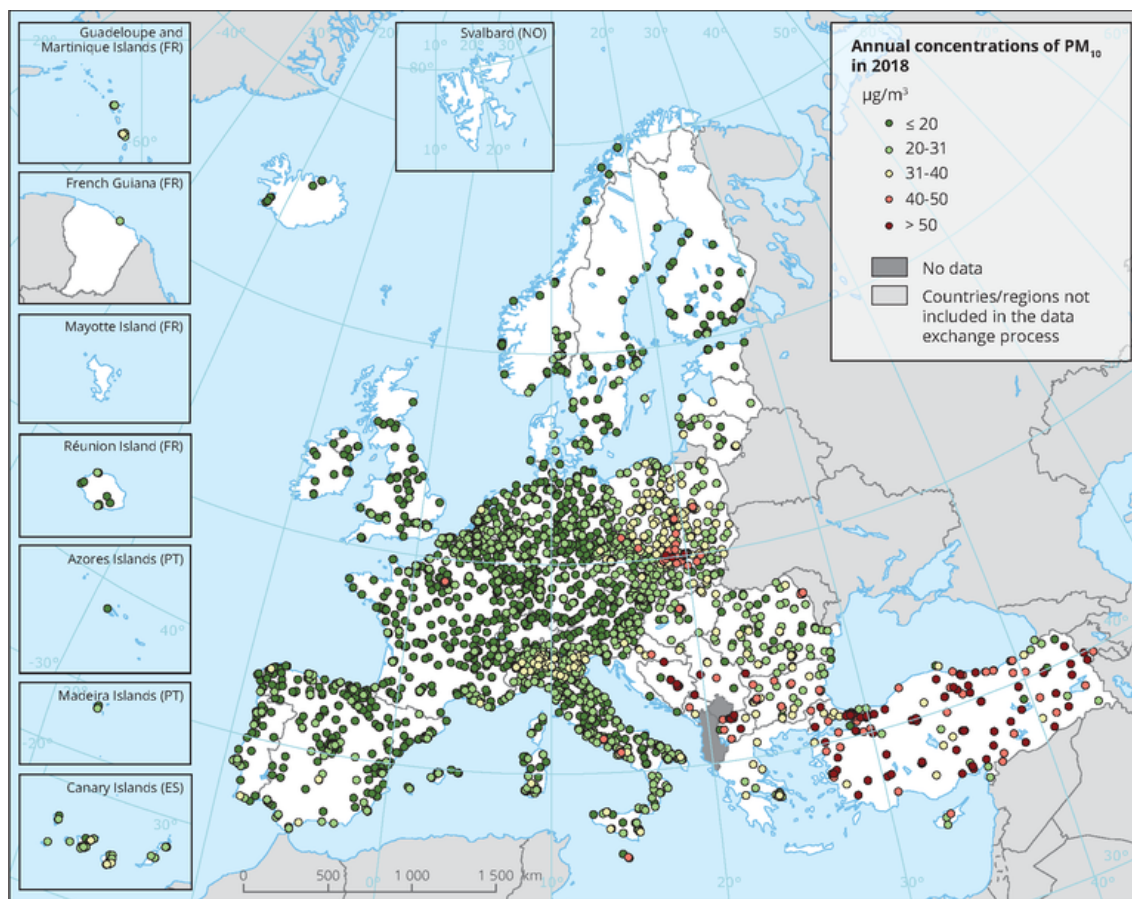
**2.4. ábra.** Tesla légtisztító berendezéseinek hatása[17]

A függőleges tengelyen a  $PM_{2,5}$  koncentrációja látható, a vízszintes tengely pedig a légszűrő rendszer bekapcsolása óta eltelt idő látható, percekben kifejezve.

lélekszámú településen a forgalom, és a rengeteg, dinamikusan változó intenzitású és elhelyezkedésű pontszerűnek tekinthető szennyezőanyag forrás miatt, egy időben folyamatosan változó és erősen nemlineáris szennyezőanyag eloszlás tapasztalható a településeken belül.

Ezeket a szempontokat is figyelembe véve belátható, hogy az egyénekre vonatkoztatott egészségügyi hatások pontos vizsgálatához mind a térbeli, mind az időbeli felbontást drasztikusan javítani kell a jelenleg alkalmazott rendszerekhez képest.

Az olyan emberek egészségének megőrzését tűztem ki célomként, akik a levegő minőségére fokozottabban érzékenyek, vagy kíváncsiak arra, hogy milyen minőségű levegőt szívnak. Ebbe a csoportba nem csak a légúti megbetegedésekkel küzdők tartoznak, hanem a szabadtéri sportokat űzők, túrázók, kisgyermekes családok, idős emberek, és még sokan mások. A jelenleg használatban lévő levegőminőség monitorozó rendszerek a gyalogosokhoz képest nagy magasságban mérnek (a szegedi mérőállomáson például 3 méter magasan történik a mintavételezés. Így az általuk mért értékek nem feltétlenül tükrözik a gyalogosok által belélegzett levegő minőségét. Ráadásul az ilyen mérőállomásból egy városnyi

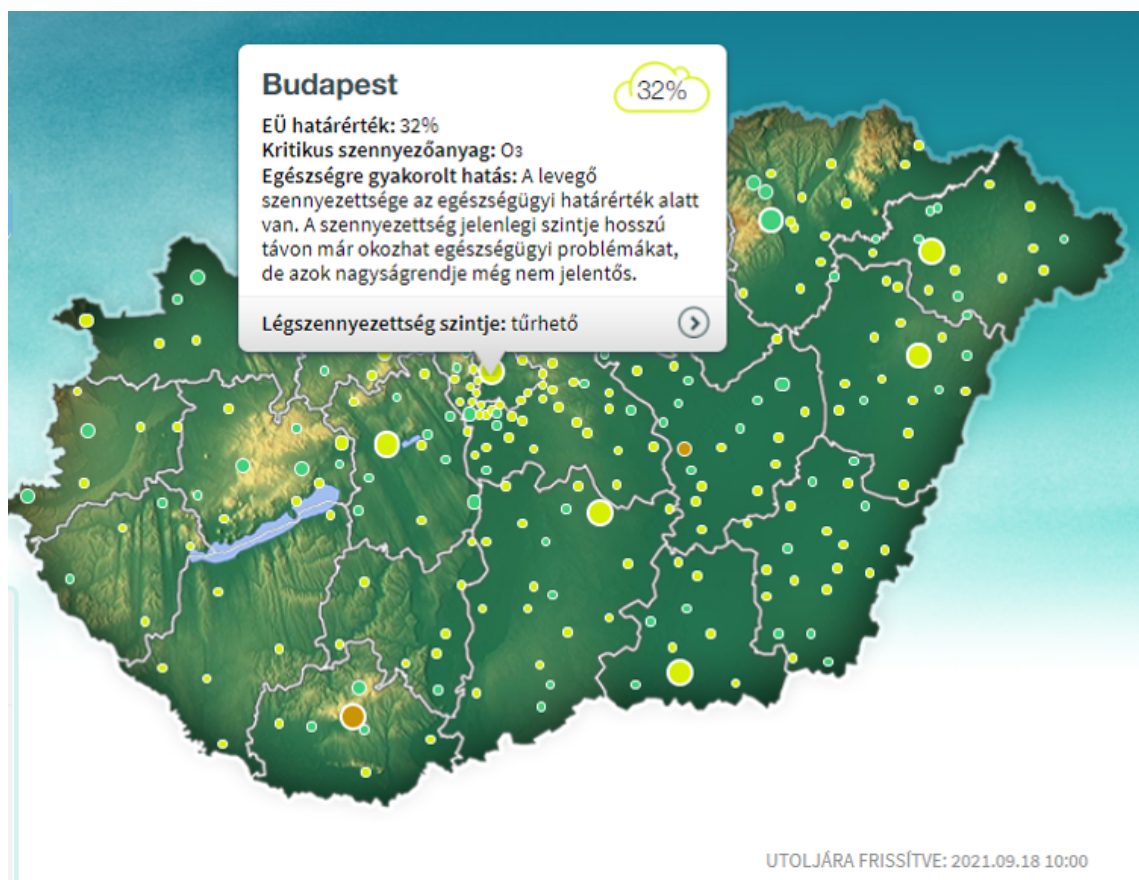


**2.5. ábra.** 2008-as éves, átlagos  $PM_{10}$  szennyezőanyagkoncentráció az EEA (Európai Környezetvédelmi Ügynökség) jelentésében [3].

területen csak kevés található és nem rendelkezik vele minden település [12], ahogy azt a 2.6. ábra is mutatja.

Jelenleg is vannak cégek, akik hasonló méréseket végeznek, viszont a méréseik célja és eszközeik nem fedik le mindazt, amit elvárhatnánk egy hasonló rendszertől. Az általuk végzett mérések túl nagy, vagy túl kis területre fókuszáltak, emiatt ezekből nehezen állapítható meg a légszennyezettség egyénre kifejtett hatása.





2.6. ábra. Az ország területén lévő szenzorok elhelyezkedése [12].



## 3. fejezet

# Létező megoldások, a tudomány jelenlegi állása

Különböző cégek, önkormányzatok és szervezetek sokféleképpen közelítik meg a levegőminőség kezelésének lehetőségét. Az első és legfontosabb lépés a probléma felismerése, mely talán a legnehezebb lépés sok esetben. Ezután valamilyen módon méréseket kell végezni, számszerűsíteni kell a szennyezettség mértékét, hogy a probléma kezelésére és a megelőzésre megfelelő intézkedéseket lehessen hozni.

- Műholdas érzékelés (Remote Sensing)

A módszer előnye, hogy általa egy adott területen további infrastruktúra kiépítése nélkül lehetőség van a légszennyezettség közelítőleges meghatározására. A módszer azonban jelentős limitációkkal is rendelkezik, alkalmazása csak ideális időjárási viszonyok mellett lehetséges, valamint csak a nagyobb szennyezőanyag koncentráció különbségek érzékelésére alkalmas jellemzően több mint néhány száz méteres felbontással és nem képes érzékelni a finomrészecskés szennyezőanyagokat sem [19].

- Kémiai terjedési modellek (Chemical Transport Models)

Ezek hátránya, hogy a műholdas érzékeléshez hasonlóan túl alacsony felbontással képesek jó becsléseket szolgáltatni, valamint nem adnak helyes eredményt nem várt szennyezőanyag források megjelenése esetén.

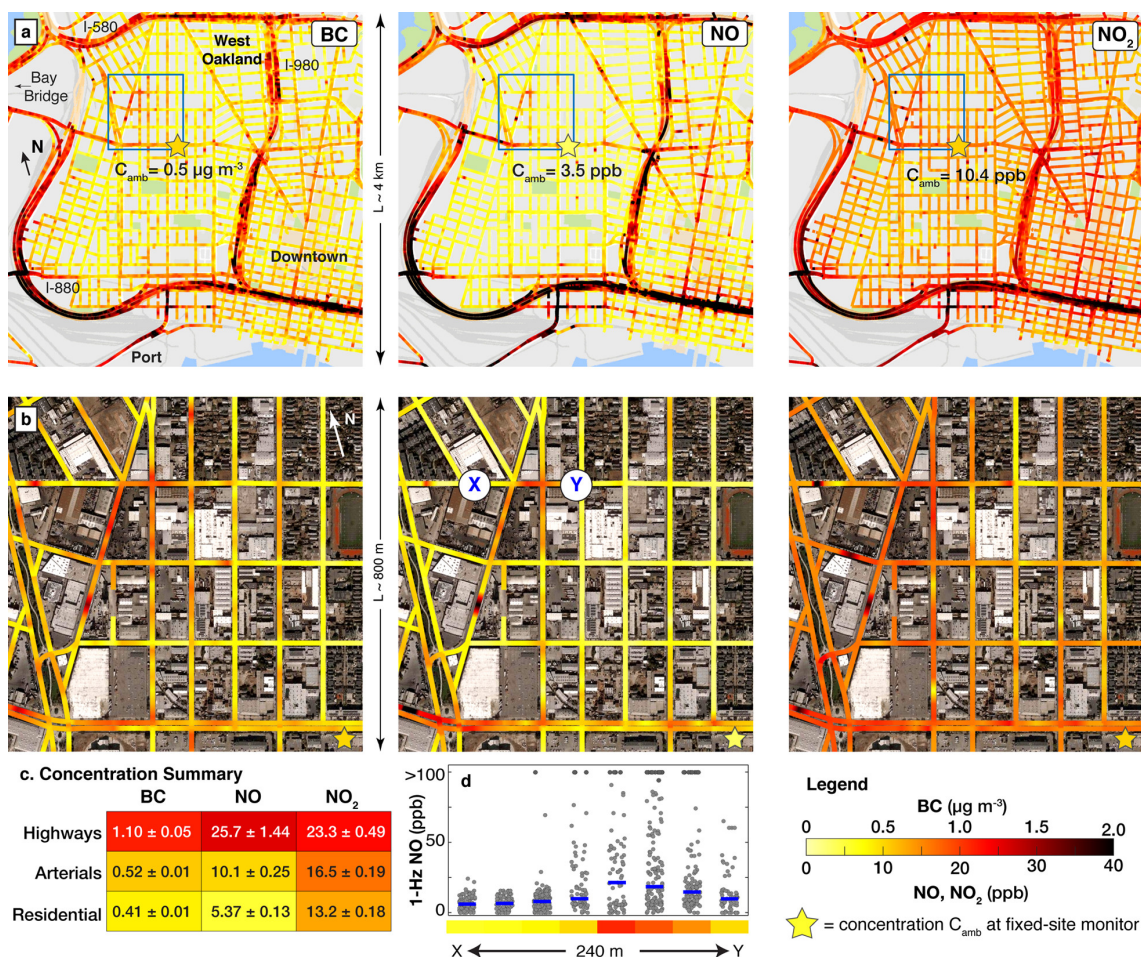
- Direkt, személyes mérések

Ezzel a módszerrel, a vizsgált személy közvetlen környezetében, egy hordozható levegőminőség monitorozó mérő és adatgyűjtő rendszert elhelyezve pontos képet kaphatunk, az adott személyt ért hatásokról. Hátránya, hogy csak esetenként alkalmazható, a módszer alkalmazása nehézkes, és költséges lenne sok emberre kiterjeszteni a vizsgálatot.

Fejlesztéseinket 2018-ban kezdtük meg a Debreceni Egyetemen; a modellalkotással és a rendszer hatékonyabbá tételéhez szükséges jelen dolgozatban is tárgyalt eljárásokon 2021 óta dolgozom.

A dolgozatban tárgyalthoz hasonló rendszer fejlesztésébe kezdett 2019-ben a Herman Ottó Intézet Nonprofit Kft. akik a Országos Légszennyezettségi Mérőhálózathoz hasonlóan, diszkrét pontokból álló térképet készítenek [15] de jobban egy város határain belülre koncentrálván. Rendszerük a dolgozat megírásakor a nyilvánosságra hozott adatok és elérhető felületek alapján nem alkalmaz a dolgozatomban tárgyalthoz hasonló modellezést, továbbá óránként mintavételeznek, és csak az utolsó 24 mérési eredmény érhető el. Ezáltal ezek az eredmények sem tekinthetők alkalmasnak arra, hogy az egyénekre vonatkoztatva lehessen egészségügyi szempontok és kockázatok vizsgálatába kezdeni.

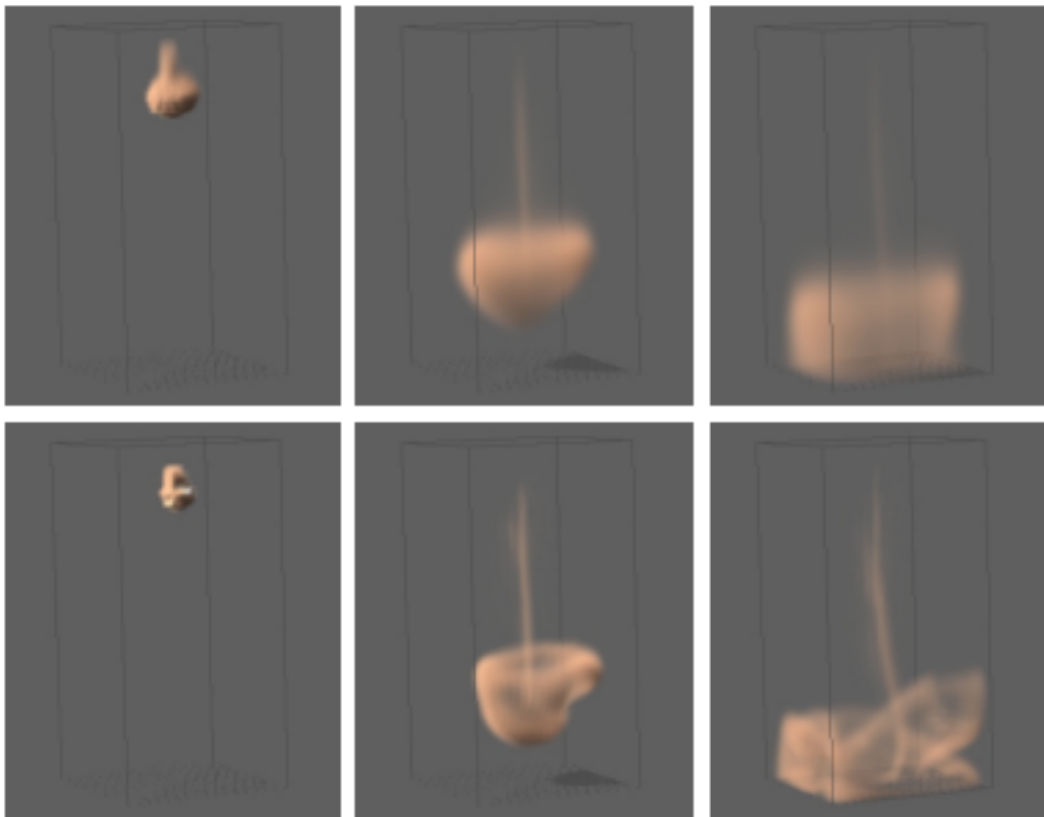
A Google is végzett hasonló jellegű pilot kutatást, mely során Street View kamerákkal felszerelt járművekre szereltek Aclima Ei levegőminőség mérő és adatgyűjtő berendezéseket[9]. Ezekkel mozgás közben feltérképezték a várost, majd az adatokból egy jellemző szennyezettségi térképet készítettek el néhány szennyezőanyagra vonatkoztatva. Eredményük a 3.1. ábrán látható.



**3.1. ábra.** A Google publikációjában szereplő ábra a szennyezőanyagok átlagos eloszlásáról [4].

Ebben az esetben a vizsgálataimtól való jelentős eltérést az adja, hogy az adatok nem valós idejűek, ráadásul nem is frissülnek, hiszen a cél az egyszeri feltérképezés volt, és a jellemzően szennyezett pontok megtalálása, napi méréseket átlagolva [4].

A füst terjedésének különböző matematikai leírásával sokan foglalkoztak számítógépes grafikai céllal is. A dolgozat szempontjából ezek közül egy publikáció kifejezetten érdekesnek bizonyult, melyben a különböző új módszerek eredményeit összevetik a legegyszerűbb, lineáris interpolációs módszerekkel, a szimulációs idő tekintetében [5]. Ezt a 3.2. ábra tartalmazza. Mivel a szimulációs idő arányos a számítási komplexitással, így egyértelműen látszik, hogy az új módszerek bár játék grafikai és filmes célokkal megfelelőek lehetnek, alkalmazásuk városi terjedési szimulációkhoz túl költséges műveletek lennének, ráadásul városi szinten, néhány egyszerűen modellezhető, vagy speciális karakterisztikákkal rendelkező területet leszámítva a lineáris interpoláció is kielégítő felbontást adhat megfelelő számú szenzor esetén.



**3.2. ábra.** Lineáris interpoláció (felső ábrarész) összehasonlítása a monoton négyzetes interpolációval (alsó ábrarész). A szimulációs idő egy  $20 \times 20 \times 40$ -es térháló esetén nagyjából  $0.1$  másodperc/képkocka volt (lineáris esetben) és  $1.8$  másodperc/képkocka (harmadrendű esetben) [5].

## 4. fejezet

# Modellezési módszertan

A korábban részletezett dinamikusan változó szennyezőanyag eloszlás megismeréséhez és nyomkövetéséhez nagyon nagyszámú szenzorra lenne szükség. A modellalkotás célja, hogy a szükséges szenzorok számát minimalizálja, anélkül, hogy a térbeli vagy időbeli felbontás a teljes rendszerre nézve jelentős eltéréseket mutatna.

A megfelelően megválasztott modellek nagy előnye, hogy alkalmazásukkal sokkal pontosabb és részletesebb képet kaphatunk egy adott terület szennyezettségi szintjéről és a szennyezőanyagok eloszlásáról, mint pusztán a szenzor-adatok lokációhoz kötött megjelenítésével. Az ellenőrző mérésekkel igazoltan helyes, és alkalmazható modellek kulcsfontosságúak akkor is, ha a diszkrét pontokon túllépve, folytonos térben szeretnénk ábrázolni az adatokat, ezzel egy könnyen értelmezhető, látványos, valós idejű térképet létrehozva.

A további egyszerűsítés és optimalizálás miatt a vizsgált települést jellemző területeire bontottam, így néhány egyszerű modell segítségével várakozásaim szerint bármilyen komplex felépítésű település nagy százalékban lefedhető lesz és a hiányzó területeken szükséges csak nagyobb számú szenzor alkalmazása a kezdeti időszakban, amíg ott is megtörténik egy modell megalkotása.

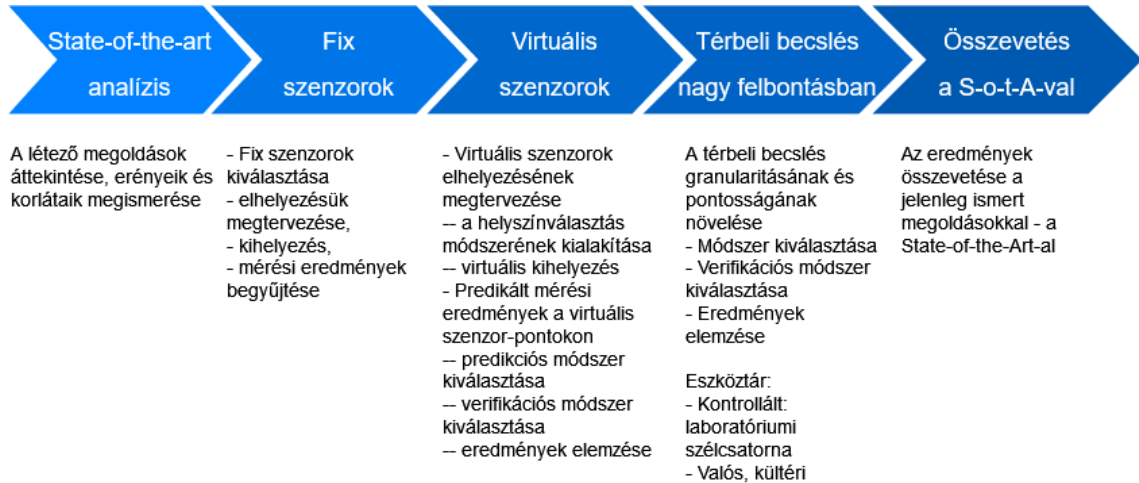
A jellemző területek olyan városrészeket jelentenek, mint például:

- Nagy forgalmú út
- Kis forgalmú út
- Tér
- Sétáló utca (a végén egy, vagy két forgalmas útszakasszal)
- Egyéb jól körülhatárolható, és a korábbiakba nem besorolható területek

A modellezés alkalmazása előkészítheti a várhatóan jó pontosságú predikció lehetőségét az adott területen, ezáltal újabb értékes funkciót adva a teljes rendszerhez.

Az általam alkalmazott modell-alkotási módszertan lépéseit a 4.1 ábra szemlélteti.

A követhetőség érdekében a módszer fő lépéseit a dolgozat egy-egy fejezete tárgyalja. A lépések főbb vonalai a 4.1 ábra segítségével könnyen áttekinthetők.



**4.1. ábra.** A légszennyezettségi adatok granularitásának és a predikció pontosságának növelésére kialakított módszertan áttekintése.

A módszertan a tudomány és az ismert megoldások jelenlegi állásának áttekintésével indul (state-of-the-art), és ezek, valamint a dolgozatban javasolt megoldás összehasonlításával zárul. A kitűzött cél az, hogy limitált számú fizikai szenzor kihelyezésével minél finomabb térbeli felbontásban minél pontosabb becslést lehessen adni a terület légszennyezettségéről. Ezen cél eléréséhez három fő lépés vezet: (i) a fix szenzorok elhelyezése és mérési adatainak begyűjtése; (ii) virtuális szenzorok elhelyezése és a várható virtuális mérési eredményeik becslése; (iii) a térbeli felbontás növelése a becslés pontosságának szinten tartásával.

## 5. fejezet

# Telepített szenzorok és mérési eredményeik

Egy településen a megfelelő mérőhálózat kiépítése elég összetett feladat. Szükség van bizonyos helyszínekre telepített szenzorokra, melyek elhelyezése alapos megfontolást igényel, ráadásul az energiafelhasználás és a megfelelő hálózati kapcsolat biztosítása is lényeges kérdés lehet.

### 5.1. Hardver

A rendszerhez olyan szenzorokat kerestem és vettem alá átfogó teszteknek, amelyek kisméretűek és ebből adódóan felhasználhatóak lehetnek akár hordozható eszközökben is. A méret és a megjelenés ilyen jellegű korlátozására azért van szükség, hogy egy városba telepítés esetén az eszközök ne legyenek feltűnőek és ne befolyásolják az utcaképet.

A kiolvasó elektronika is hosszú fejlesztés és kutatómunka eredménye. Több mikrokontrollert is kipróbáltam, például Atmega328, STM32, ESP32, ESP8266, melyeket több szempont szerint értékeltem. Ezek egy részének összehasonlítását a 5.1.táblázat tartalmazza. További elemzési szempontok voltak még az energiafogyasztás, valamint az elérhetőség is.

Kipróbált mikrokontrollerek		
Típus	Maximális órajel	integrált vezeték nélküli kommunikációs modulok
Atmega 328	16MHz	nincs integrált rádió
STM32	48MHz	nincs integrált rádió
ESP8266	80/160MHz	WiFi (802.11 b/g/n)
ESP 32	160/240MHz	WiFi (802.11 b/g/n) Bluetooth, BLE
Boardcom termékcsaládok	változó órajel	WiFi (802.11 b/g/n)
Onion Omega 2	580MHz	Beágyazott Linux, bármilyen kommunikáció gyors megvalósíthatósága

**5.1. táblázat.** Mikrokontrollerek összehasonlítása

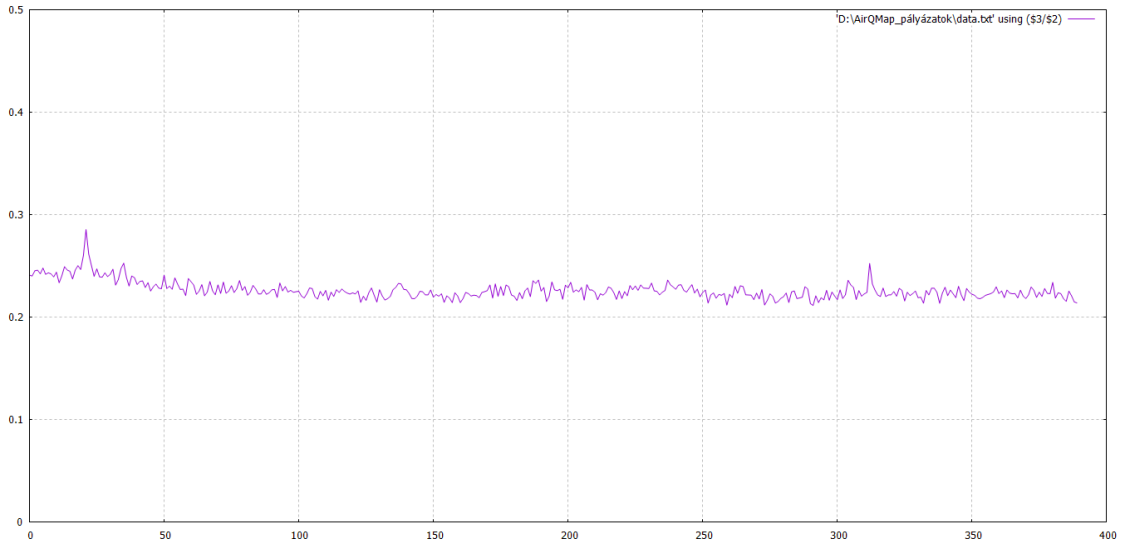
A  $10\mu\text{m}$ -nél kisebb részecskeméretű szennyezőanyagok érzékelésére is több szenzort próbáltam ki, melyek egy része ilyen célra kifejlesztett eszköz volt, másokról pedig kísérletekkel megállapítottam hogy alkamasak a vizsgált anyagok detektálására.

Ehhez először egy nagy pontosságú, kalibrált, lézeres elven működő szenzor segítségével megbizonyosodtam arról, hogy létre tudok hozni mesterségesen a vizsgált tartományba eső részecskemérettel szennyezőanyagokat. A kísérletezés során lehetőségem volt méréseket végezni, egy a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézete (jelenleg Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Atommagkutató Intézet) által használt, frissen kalibrált nagy pontosságú és felbontású lézeres szállópor érzékelő berendezéssel (Optical Particle Sizer). Miután a műszer segítségével megállapítottam, hogy bizonyos papírzsebkendők égetése során nagy koncentrációjú  $10\mu\text{m}$  és  $2.5\mu\text{m}$ -es szennyezőanyagok keletkeznek, egy zárt térbe elhelyeztem egy füstölő forrást, egy lézeres elven működő szenzort, valamint több gázérzékelő szenzort is. Ezek közül az MQ2-es típusú által (egy Atmega328 beépített, 10 bites szukcesszív approximációs analóg/digitális konverterének segítségével) mért értékek görbéje jellegét tekintve a körülbelül 8 órás vizsgálat során nagy pontossággal követte a lézeres elven történő mérés eredményeit.

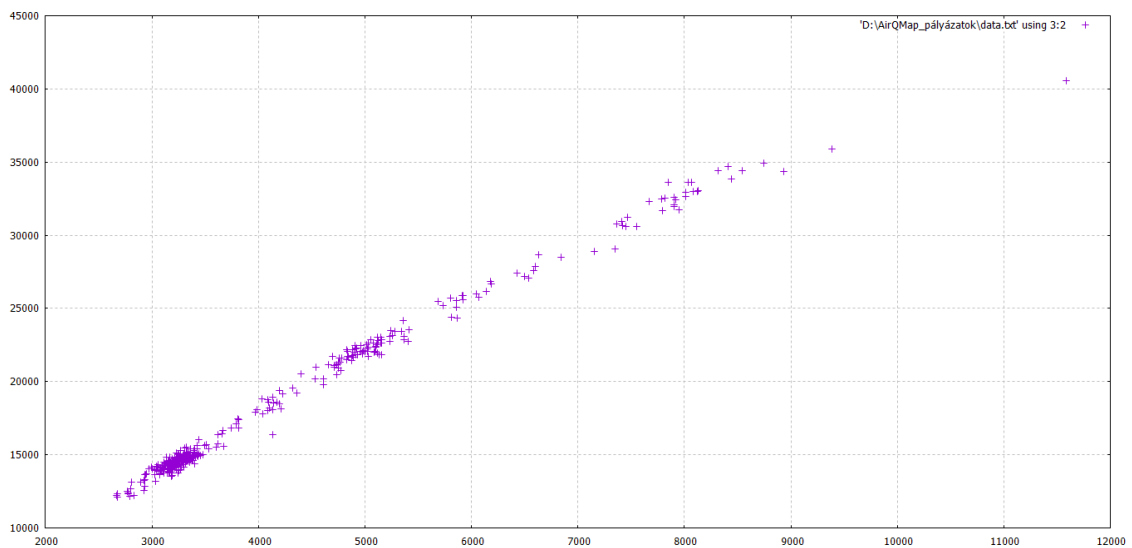
Mindemellett megvizsgáltam a nagy pontosságú, kalibrált, és egy kisebb pontosságú, gyártó által kalibrált lézeres szenzor mérési eredményei közötti kapcsolatot is, melyet az 5.2. ábra mutat be. A mérési eredmények hányadosa a mérési hibából eredő zajosságtól eltekintve konstans, mint azt az 5.1. ábra is szemlélteti, ezért meghatározható egy konstans szorzó, mellyel a két mérési eredmény egy rendszerbe illeszthető és összevethető.

A mérési eredmények ismeretében a prototípus is jelentős fejlődésen esett át. Az első három fő verzió a 5.4 ábrán tekinthető meg.

Az 1-es jelű egy STM32 termékcsaládhoz tartozó mikrokontrollert használt, és különböző környezeti paraméterek mérésére volt alkalmas egy hozzá csatlakoztatott mobil alkalmazás segítségével. A mobiltelefonra azért volt szükség, mert az látta el a mérési eredményeket GPS információkkal, illetve az adatok feltöltéséről is az gondoskodott. A 2-es jelű prototípus belsejében az előzőhöz hasonló, STM32 alapú áramkör kapott helyet,



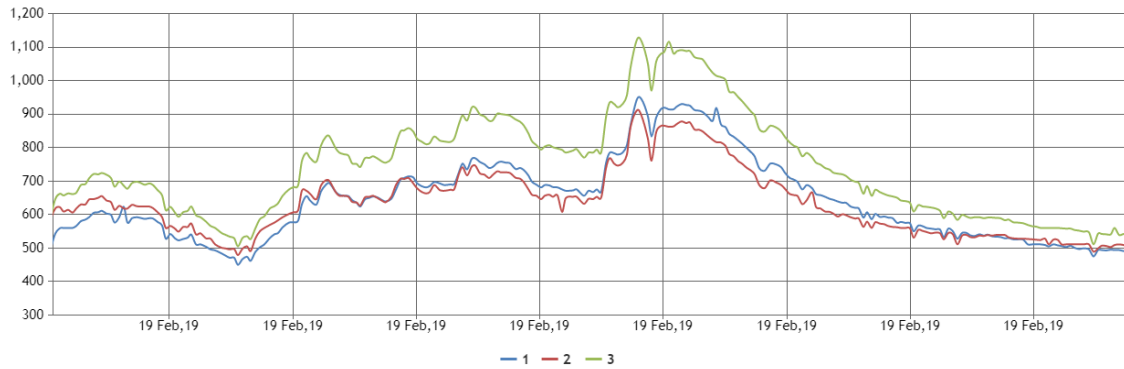
**5.1. ábra.** Az ábrán egy hivatalosan, rendszeresen kalibrált műszer (Optical Particle Sizer) által mért eredmények  $PM_{0.374}$ -re vonatkoztatva, valamint egy gyártó által kalibrált olcsóbb szenzor méréseinek hányadosa látható (a függőleges tengelyen), utóbbi  $PM_{0.3}$ -ra vonatkoztatva. A vízszintes tengely az így előállított adatpontok sorszámát tartalmazza, tehát arányos az idővel.



**5.2. ábra.** Hivatalosan, rendszeresen kalibrált műszer által mért eredmények  $PM_{0.374}$ -re vonatkoztatva, valamint egy gyártó által kalibrált szenzor méréseinek kapcsolata, utóbbi  $PM_{0.3}$ -ra vonatkoztatva. A függőleges tengely tartalmazza a nagy pontosságú szenzor mérési eredményeit, a vízszintes tengely pedig az olcsóbb szenzor által mért eredményeket tartalmazza.

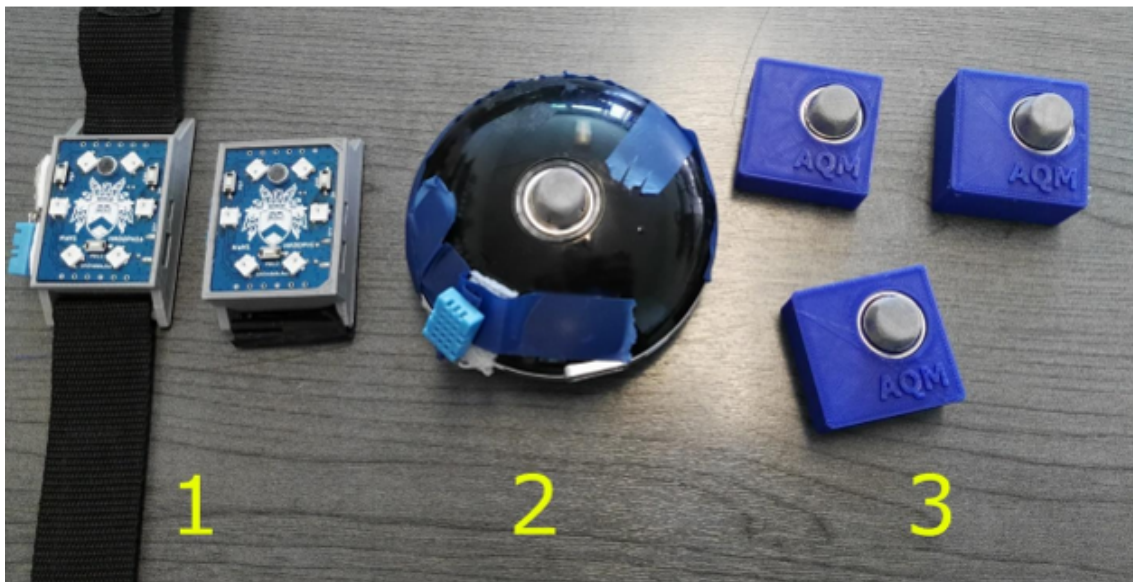
itt a nagyobb fogyasztású alapvetően gázérzékelésre alkalmas szenzor fűtése indokolta a jelentősen nagyobb akkumulátort, és ezzel a nagyobb készülékházat is. A 3-as jelölésű pro-





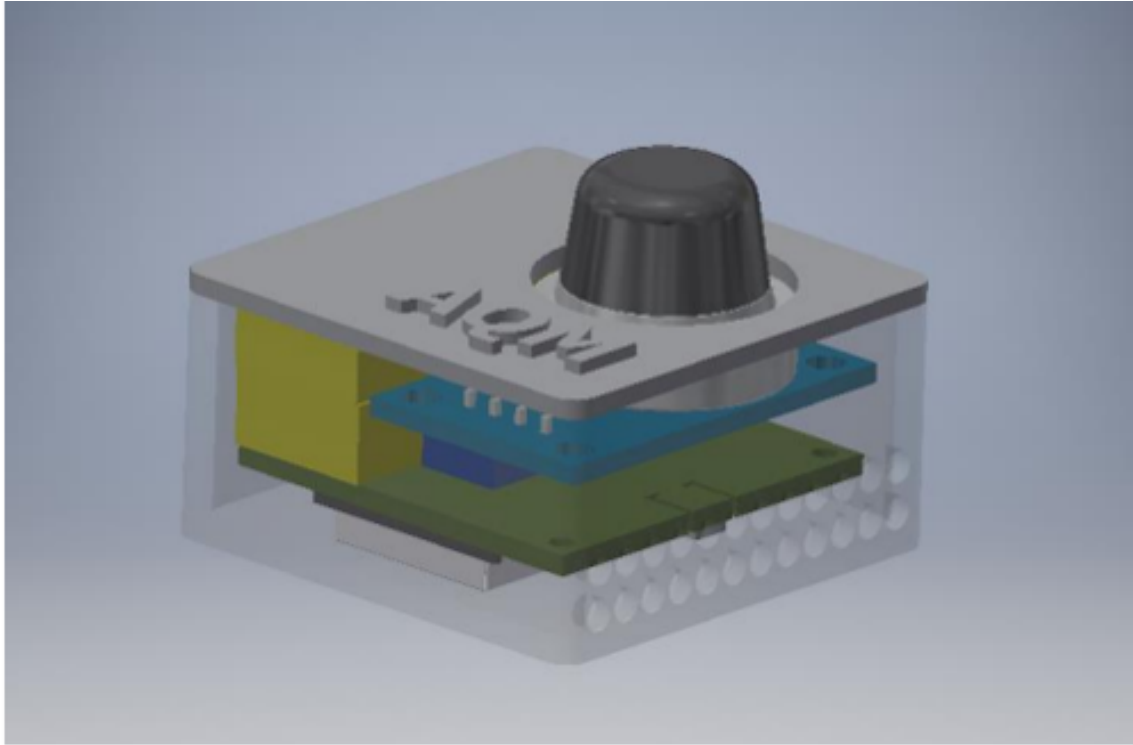
**5.3. ábra.** Az '1' és '2' jelű görbék mq2-es szenzorokhoz, a '3' jelű görbe pedig egy kalibrált, Nova Pm SDS011 szenzorhoz tartoznak. A függőleges tengely a  $PM_{2.5}$  koncentrációval arányos mérőszámot tartalmaz, míg a vízszintes tengelyen az idő került ábrázolásra.

totípus egy alaposan átgondolt eszköz volt, mely először ESP8266-ot, majd később ESP32 mikrokontroller alapú áramkört tartalmazott, 3D nyomtatott külső burkolattal a lehető legoptimálisabb formai tényezőkért. Ennek felépítésébe nyújt betekintést a 5.5. ábra. A különböző elkészített eszközök a probléma külön-külön területeire fókuszáltak, volt amelyik közösségi adatgyűjtésen alapuló rendszerhez lenne ideális, de a fejlesztése a koncepció hatékonyságának megkérdőjelezhetősége miatt más irányba indult. Ekkor fixen telepíthető, minél kisebb karbantartás-igényű berendezések kerültek kifejlesztésre.



**5.4. ábra.** A vizsgálatokhoz alkalmazott IoT mérőeszköz prototípusok

A vizsgálatok után nyilvánvalóvá vált, hogy a lézeres elven működő, ilyen célra kifejlesztett szenzorok magasabb árak ellenében sokkal jobb élettartamot, pontosabb eredményeket és alacsonyabb fogyasztást biztosítanak, ráadásul ezek már eredetileg a megfelelő formátumú mérési eredményeket szolgáltatják, nincs szükség bonyolult, időigényes számí-



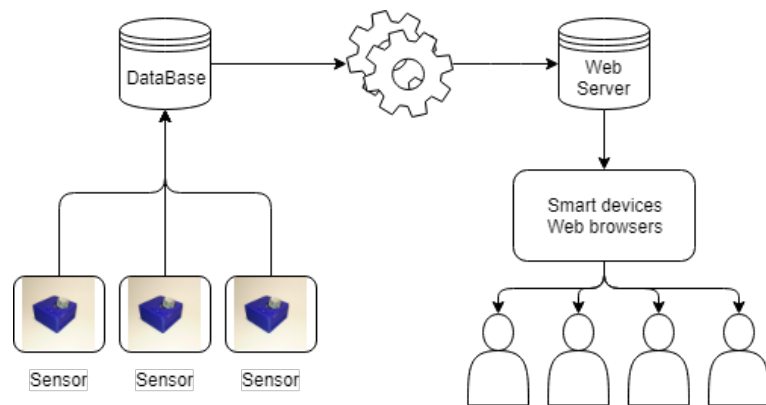
**5.5. ábra.** A harmadik prototípus felépítése

tások végrehajtására a vezérlőegységen az adatok átalakításához maximum egy konstans szorzóra, mely a nyers adatokat a megfelelő mértékegységűre skálázza át.

Fontos fejlesztési cél volt a bővíthetőség, valamint az igény esetén új kommunikációs protokollokra való áttérés gyors biztosítása is, hiszen a rendszer várható alkalmazási területei között olyan külvárosi részek is szerepelnek, ahol nem biztosított, és nehezen lenne kiépíthető vezetékes, vagy más területeken könnyen alkalmazható vezeték nélküli adatátvitel (például WiFi). Alternatív adatátviteli módszerként szóba jöhet a LoRa, ZigBee, 4G és 5G mobilhálózatok, valamint további rádiófrekvenciás módszerek.

## 5.2. Szoftver

A telepített szenzoroknál fontos volt, hogy az adatokat gyorsan és egyszerűen juttassák el valamilyen központi adatbázisba, ahonnan a lehető legrövidebb idő alatt elérhetővé váljanak. A rendszer egyszerűsített vázlata, mely az információ útját mutatja be a szenzoroktól a felhasználókig, az 5.6. ábrán látható. Ez az ábra még a szenzorok egy korábbi prototípusát tartalmazza, közös tulajdonságuk, hogy beágyazott, C nyelven írt vezérlőprogramot futtatnak, funkcióikat tekintve csak a legszükségesebb kommunikációs függvények és eljárások szerepelnek a memóriájukban, ezáltal csökkentve az esetleges sérülékenységek számát. A Proof of Concept megvalósításkor az elérhető adatbázisok több fajtáját kipróbáltam, és az első méréseknél egy php szerver várta a szenzorokból érkező adatokat, majd mentette őket az adatbázisba. Az adatok megjelenítéséhez használt térkép az OpenStreetMaps volt.



**5.6. ábra.** Az általam készített mérő és adatfeldolgozó rendszer vázlatja

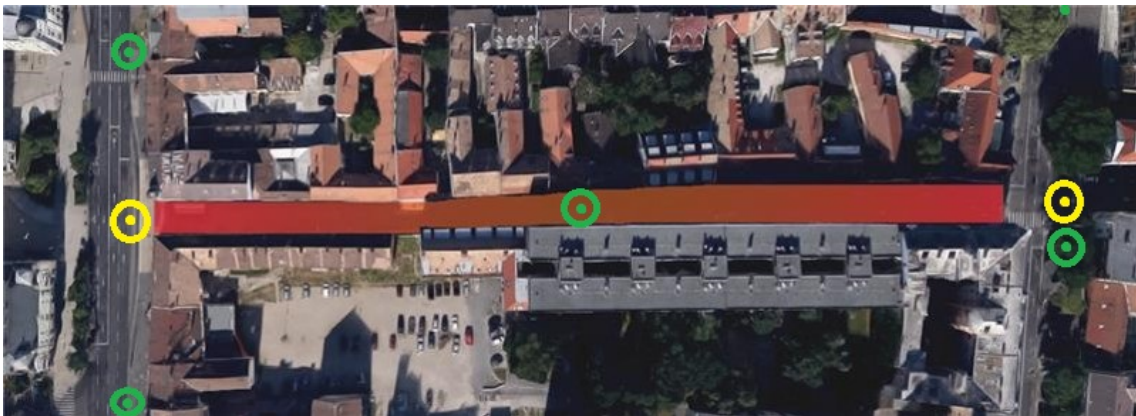
## 6. fejezet

# Virtuális szenzorok

Az egyszerű ábrázolás és számítások érdekében szükség lehet olyan pozíciójú szenzorokra, melyeket fizikailag nem lehetne a megfelelő helyen elhelyezni, vagy nincs rá szükség, mert a szomszédos szenzorok mérési eredményeiből az adott terület paramétereit figyelembevéve becsülhetők az ottani értékek. Ilyen virtuális szenzorok elhelyezésével, vagy fizikai szenzorok ilyen módon történő kiváltásával, nagy mértékben javítható a költséghatékonyság.

### 6.1. Elhelyezkedésük

Ilyen virtuális adatpontok elhelyezésére azért van szükség, mert ezek értékeit például utcákra illesztett modellek könnyen felhasználhatják, kiindulási pontként. Ez alapján az alap koncepció az, hogy minden olyan kereszteződésben helyet kap egy virtuális szenzor, mely nem tartalmaz megfelelő pozícióban lévő valódi eszközt.



**6.1. ábra.** Virtuális szenzorok, egy modellel becsült utca illesztési pontjainál. (Valódi szenzorok közelítőleges helye zölddel jelölve, a virtuális szenzorok sárgával jelölve.)

Ezzel a módszerrel a rendelkezésre álló adatok megsokszorozódnak, és nagy mértékben csökkenhet a szükséges számítási kapacitás, ha egy adott, kis területegységre szeretnénk meghatározni a pillanatnyi értéket, feltéve hogy lineáris interpoláció alkalmazható, illetve hatékonyabbá válhat a számításhoz szükséges kiindulási adatok kiválasztása.

## 6.2. Becsült mérési eredmények

### 6.2.1. Becslési módszerek és modellek

Amennyiben viszonylag kis távolságban vannak szomszédos szenzorok, úgy jól alkalmazható egy lineáris közelítés a szomszédos szenzorokkal. A szenzorokat egy derékszögű koordináta-rendszer pontjainak tekintve a távolsággal arányos módon lehet a két legközelebbi szomszédos szenzor mérési eredményei alapján lineárisan közelíteni a keresett síkbeli pont értékét, feltéve, hogy a két szomszédos pontra illeszthető egyenesre illeszkedik a keresett pont is. Ekkor lineáris interpolációval jól közelíthető a köztes pont szennyezettsége. Amennyiben ezek nem illeszkednek egy egyenesre, úgy további szenzorok mérési eredményeire is szükség van a számításokhoz. A mérési eredmények csak a legszélső pontok által határolt területen belül közelíthetők az elvárt pontossággal, azon kívüli értékekhez további szenzorok elhelyezése szükséges.

Nagy távolságban pedig exponenciálisan lecsengő görbét lehet illeszteni a mérési eredményekre, ha a mérési pontok távolodnak a forrástól. Ezt mérésekkel állapítottam meg, és az általam levont következtetések nem tűnnek a valóságtól elrugaszkodottnak, hiszen a természetben sok más folyamat is erősen közelít valamilyen exponenciális görbét.

### 6.2.2. Verifikáció, adatok ellenőrzése

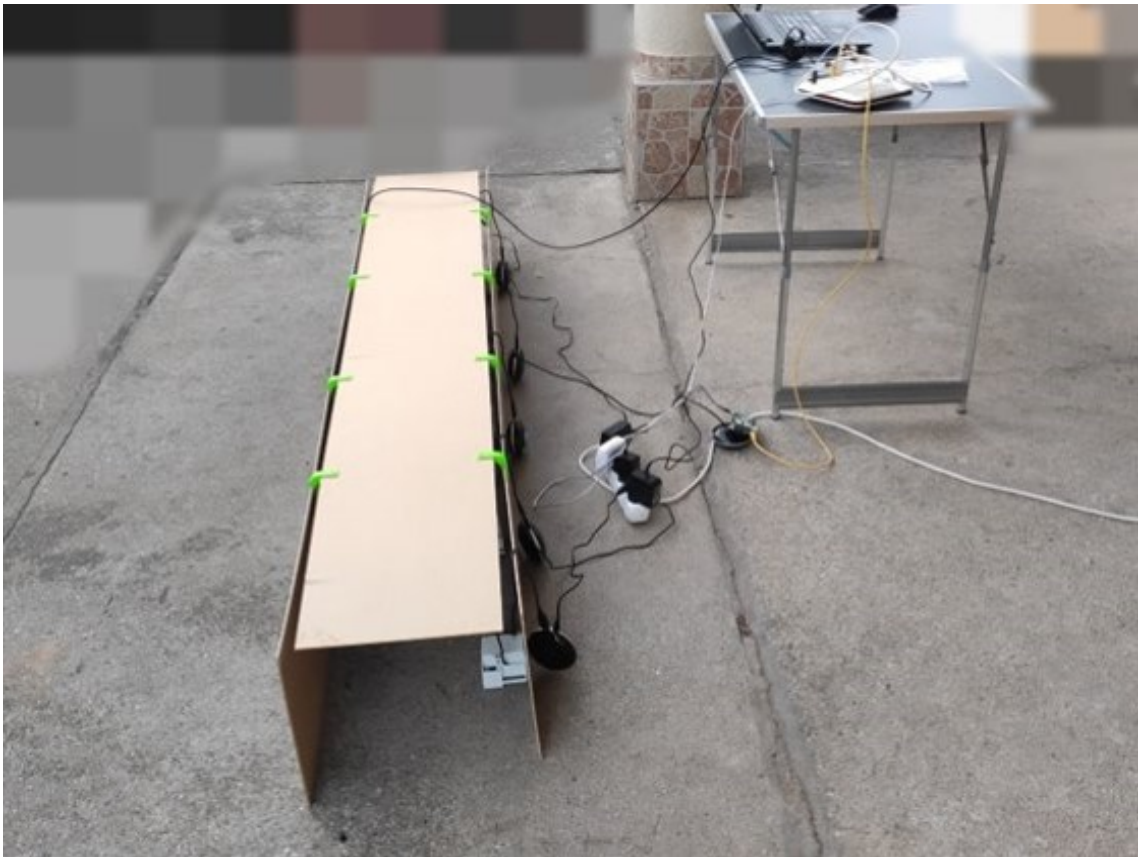
A virtuális szenzorok adatainak ellenőrzését ellenőrző mérésekkel végeztem. Ehhez a virtuális szenzor helyén valójában volt valós szenzor is, mely egy külön adatbázisba töltött fel adatokat a kísérlet alatt. Ezen kívül néhány helyen "Leave One Out" módszerrel is ellenőriztem az adatokat, az adott szenzor értékét megpróbáltam a szomszédos értékekből előállítani, és amennyiben az eltérés 25% alatt volt, akkor elfogadtam a mérést. A becsült és a valós adatokat összevetve számos paraméter finomhangolható volt, és ezek a beállítások a későbbiekben is helyesnek bizonyultak.

## 7. fejezet

# Nagy térbeli felbontású becslés

### 7.1. Becslési módszerek és modellek

#### 7.1.1. Szélcsatornás mérések



**7.1. ábra.** Speciális szélcsatornás vizsgálat

A sétáló utca modellezésre az első kísérleteket, egy különleges szélcsatornában kezdem meg, melynek különlegessége, hogy a felső élénél nyitott, ezáltal lehetőséget biztosítva a szennyezőanyagok ebbe az irányba történő távozására is. Erre azért volt szükség, hiszen a valóságban is kis százalékban felfelé távozhatnak a légszennyező anyagok, illetve onnan friss levegő kerülhet az utcába. A mérések során, kalibrált, lézeres elven működő levegő-





**7.2. ábra.** Szélcatornás terjedési kísérlet a Debreceni Egyetem szélcatornájában.

minőség monitorozó szenzorokat használtam, valamint egy raspberry pi 4B segítségével gyűjtöttem a mérési eredményeket. A kísérleti elrendezést a 7.1.ábra mutatja.

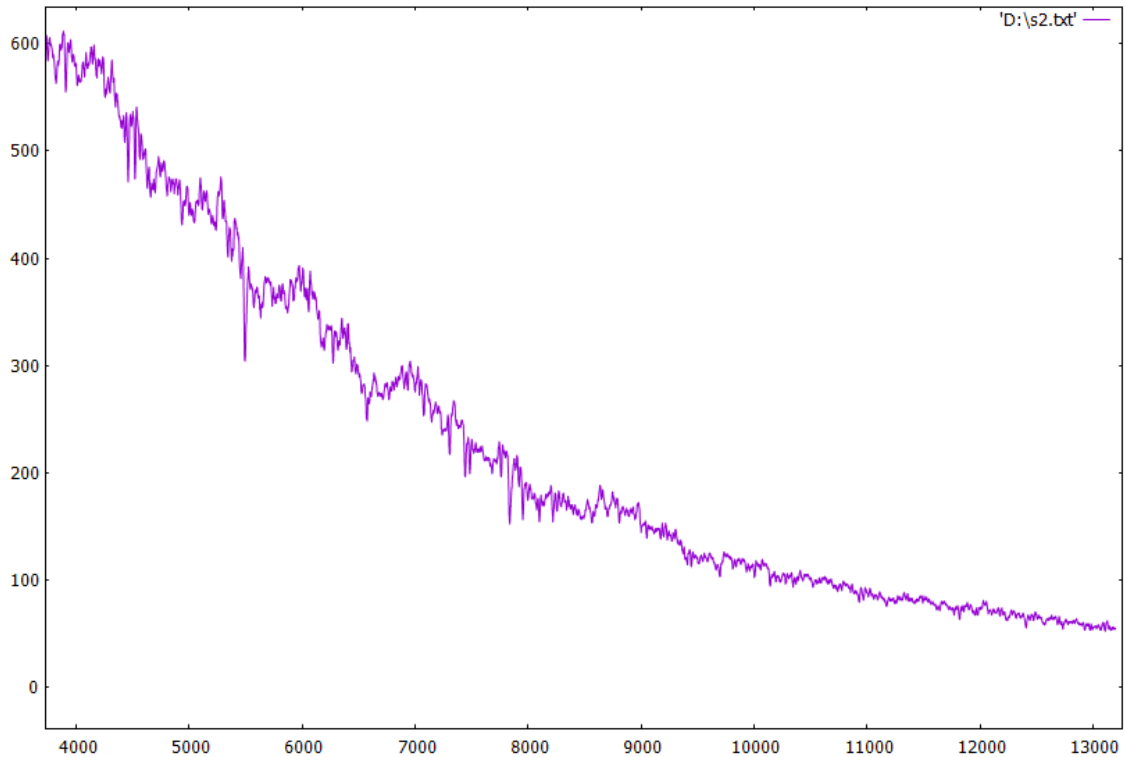
A méréseket valódi, zárt szélcatornában is hasonló eredményekkel ismételt meg, így bebizonyosodott, hogy a speciális szélcatorna felül nyitott tulajdonsága nem befolyásolja a méréseket számottevően, a várakozásoknak megfelelően a szennyezőanyagok terjedése jól modellezhető volt teljesen zárt szélcatornában is. A szélcatornás kísérleti elrendezésről egy szemléltető képet a 7.2. ábra tartalmaz. A vizsgálatok során az adatgyűjtő eszközök egymástól 55cm távolságra helyezkedtek el.

A kísérletek elején hatalmas szennyezőanyagkoncentrációjú levegőt állítottak elő a szélcatornában, így lehetőségem nyílt a különböző részecskeméretű szemcsék ülepedésének vizsgálatára. Az exponenciálisan lecsengő grafikonok rajzolnak ki. Ez a 7.3. ábrán tekinthető meg.

A mért adatokat többdimenziós adatelemzéseknek vettem alá, melyek igazolták a korábbi várakozásaimat, melyek szerint kis távolságban a szenzorok értékei helyettesíthetők lehetnek a szomszédok lineáris függvénykapcsolatával is. Az elemzés eredményét a 7.4. ábra tartalmazza. Az ábra dimenziói: a szenzor fizikai azonosítója az X tengely mentén, az idő az Y tengely mentén, és a szennyezőanyagkoncentráció a függőleges Z tengely mentén. Itt megfigyelhető, hogy az időben változó szennyezőanyag forrás intenzitás esetén is, nagy százalékban fentmarad a szomszédos szenzorok közötti lineáris kapcsolat.

## 7.2. Verifikáció, ellenőrző mérések

A mérések ellenőrzése többféleképpen is megtörtént. Néhány szenzort a hivatalos mérőállomáshoz közel (egy szomszédos épületen) hasonló magasságban rögzítettünk, és



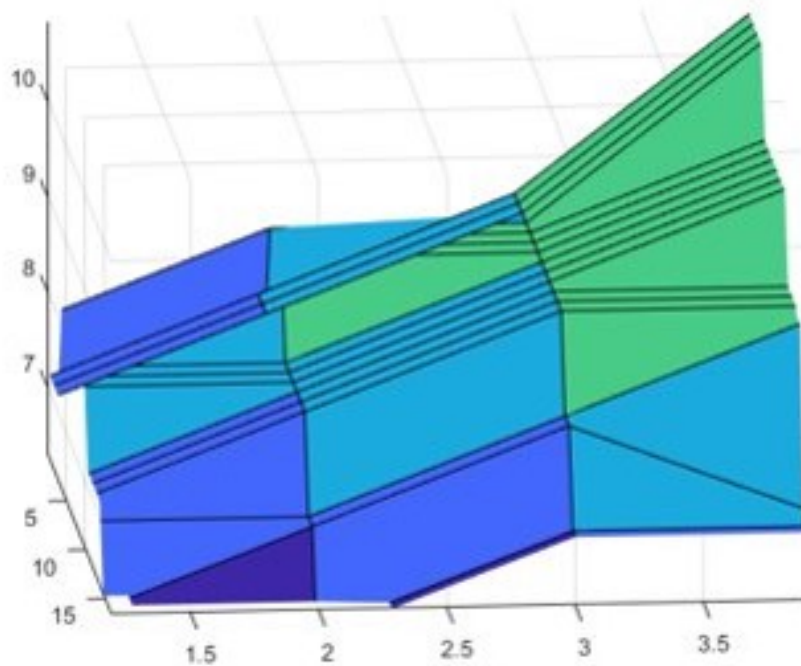
**7.3. ábra.** A 10 mikrométernél kisebb szennyezőanyagok ülepedése. A függőleges tengelyen  $PM_{10}$  szennyezőanyag koncentrációval arányos mérőszám áll, a vízszintes tengelyen pedig az adatpontok sorszáma látható, mely az idővel arányos mennyiség. A vízszintes tengely elejéről lett távolítva az első néhány ezer adatpont, itt az érzékelő telítésben volt.

hosszú időn keresztül gyűjtöttünk velük adatokat. Az épületre rögzített szenzort az 7.7. ábra mutatja. Ezeknek az adatoknak a 24 órás átlagát össze tudtuk hasonlítani a hivatalos, 24 órás átlag adatokkal. A tapasztalt eltérések alapján megállapítottuk, hogy a mért eredmények nagyságrendileg helyes értékeket mutatnak, az eltérések okát tovább nem vizsgáltuk, hiszen az épületek távolsága, a magasságbeli különbségek, a szélviszonyok, és a szenzorunkat az eső ellen védő műanyag cső, mind hatással lehetnek ezekre a mérésekre. Egy konkrét ellenőrző mérés eredményei megtekinthetők a 7.5. ábrán, ahol a szenzorból származó adatok láthatók 24 órára vonatkoztatva, ezek átlaga  $35.385 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A hivatalos mérési eredmények erre az időszakra a 7.6. ábrán látható módon kerültek nyilvánosságra. A  $PM_{10}$  szennyezőanyagokra vonatkoztatva a mérés 6.74% eltérést mutatott a hivatalos értékektől.

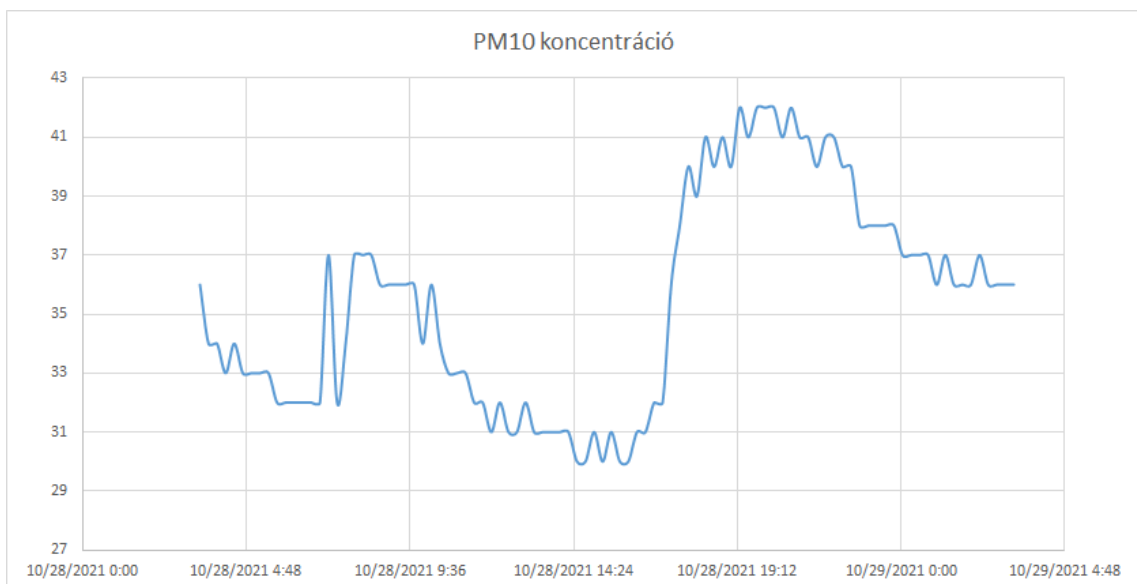
### 7.2.1. Valós mérések

Valós méréseket is végeztem, melyet még a modellezés nélküli adatfeldolgozás után vizualizáltam. Az így generált valós idejű térkép egy részletét a 7.8. ábra mutatja be.





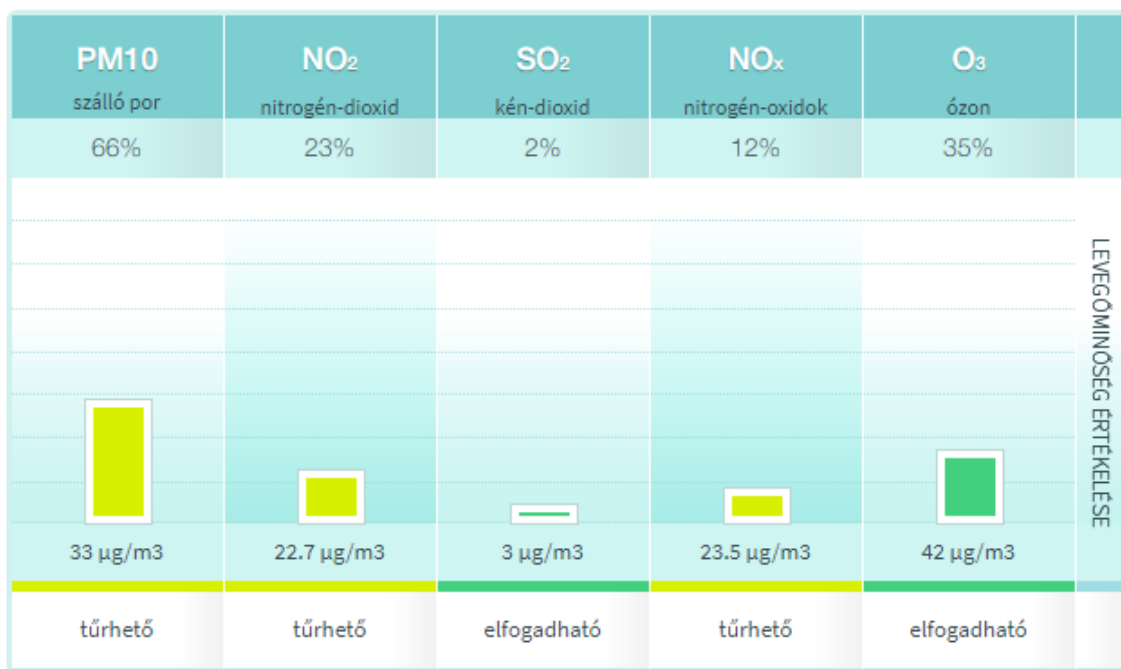
**7.4. ábra.** Kis távolságban lévő szenzorok méréseinek többdimenziós vizsgálata. Az ábra dimenziói: a szenzor fizikai azonosítója az X tengely mentén, az idő az Y tengely mentén, és a szennyezőanyagkoncentráció a függőleges Z tengely mentén.



**7.5. ábra.** 24 óra mérési eredményei a hivatalos mérőállomás közelében lévő szenzor által mérve. (A függőleges tengelyen a  $PM_{10}$  koncentráció látható, a vízszintes tengely az időt tartalmazza.)

## Pillanatnyi légszennyezettség - Debrecen

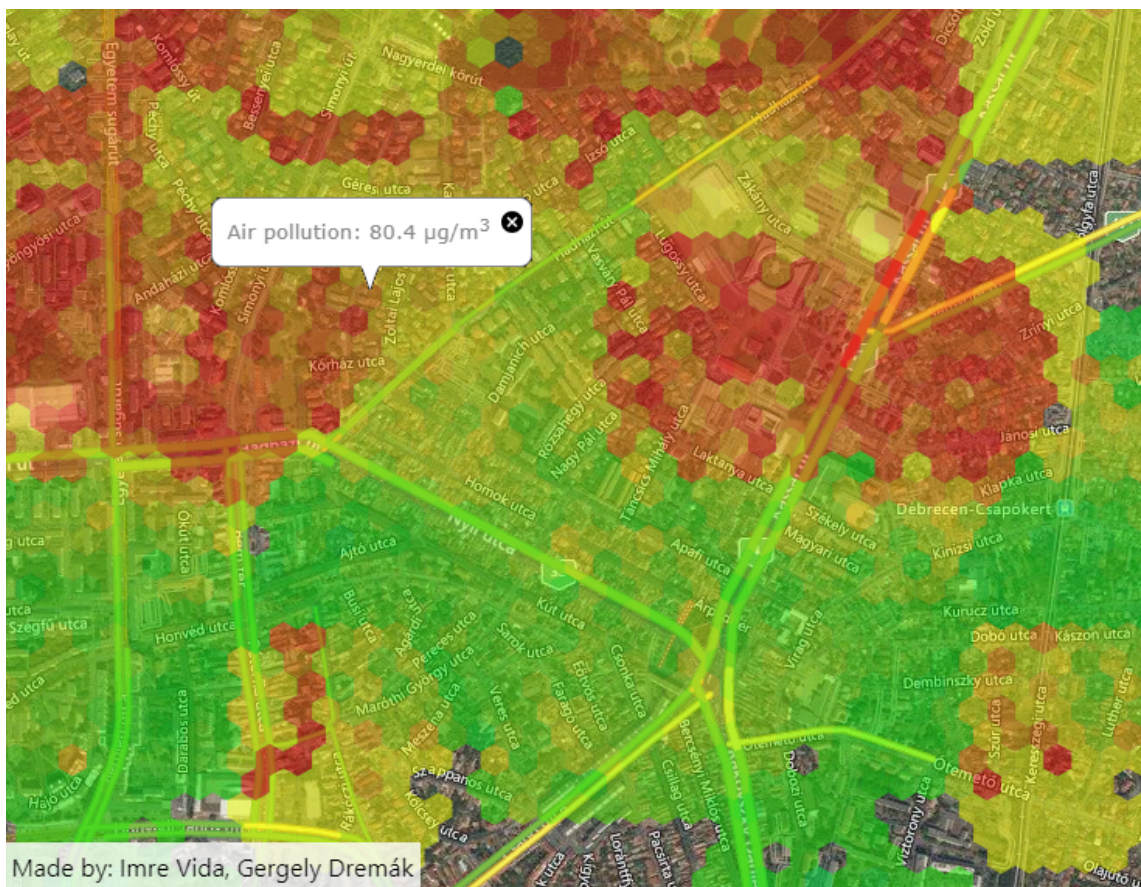
DEBRECEN SZMOG INFORMÁCIÓK. ADATOK IDŐPONTJA: 2021.10.29 02:00



7.6. ábra. A 7.5. ábrán látható időszakra vonatkozó hivatalos légszennyezettségi mérőszámok.



7.7. ábra. Ellenőrző mérésekhez használt szenzor egy épület ablakában.



7.8. ábra. Nagy térbeli felbontású adatmegjelenítéssel ábrázolt  $PM_{10}$  eloszlás.

## 8. fejezet

# Eredmények összegzése

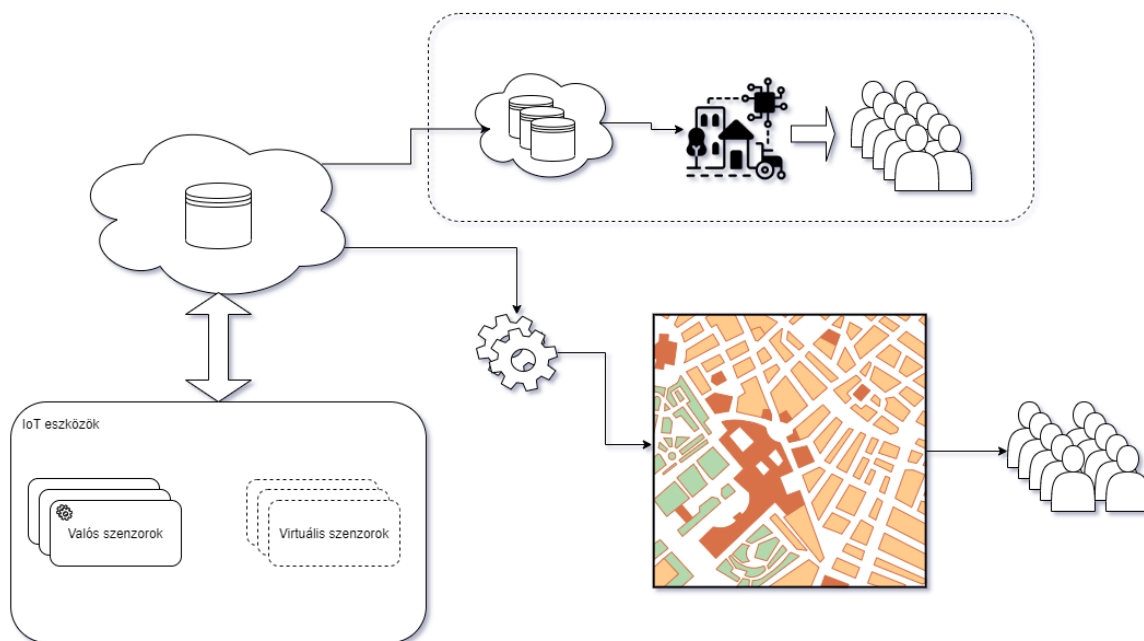
Munkám egyik fő motivációja, hogy a levegőben lévő 10 mikrométernél kisebb szennyezőanyagok hatalmas egészségügyi kockázatot jelentenek. Pontos nyomonkövetésük, kielégítő térbeli és időbeli felbontással jelenleg nem megoldott. Kísérleteim során megvizsgáltam, hogy ezek az anyagok egy sétálóutcában milyen módon viselkednek, és a dolgozatomban bemutattam, hogyan modellezhetjük őket kevés szenzor mérési eredményeiből.

Irodalomkutatási és kísérleti munkám után egy olyan rendszer megvalósítását tekintem indokoltnak, mely valós időben, minimális számú szenzorral képes nyomon követni a szennyezőanyag koncentráció alakulását a városi levegőben. A minimális számú szenzor eléréséhez a jellemző területek modellezése szükséges, ezek után pedig a modellek predikciós célokkal is felhasználhatóak lehetnek.

Fontos továbbá, hogy a valós méréseket virtuális szenzorok is kiegészítsék, melyek a modellekkel történő számításokat képesek gyorsítani, amennyiben nincs megfelelő helyen lévő valódi levegőminőségmérő eszköz. A gyűjtött adatok egy központi adatbázisban kerülnek eltárolásra a felhőben.

Egy ilyen rendszer blokkvázlata tekinthető meg a 8.1. ábrán. Az ábra bal oldalán a valódi, telepített, IoT-támogatású mérőeszközök találhatóak. Ezeket logikailag két csoportba soroltam: valós, és virtuális szenzorok csoportjába. A valós szenzorok léteznek, és azokon futtat egy egyszerű feldolgozó szoftvert, ami a szomszédos eszközök adataiból, valamint saját mérési eredményükből meghatározzák néhány virtuális szenzor értékét is, majd ezeket is továbbítják a felhőbe, egy központi adatbázisba. Innen két irányba indulhat el az adat.

Az ábra a felső ágában tartalmazza a rendszer bevezetésének közvetett hatásait jelképező újabb felhőt és adatbázisokat, mely a már létező közigazgatási és egészségügyi rendszerekkel történő összekapcsolást szimbolizálja, hiszen ha a rendszer a város részévé válik, akkor is mindannyian profitálhatunk belőle. Az alsó ág pedig a széles körben alkalmazható klasszikus térképes megjelenítést tartalmazza, itt az adatvizualizáció majdnem tetszőlegesen történhet. Proof of Concept rendszer készült a szerver oldali számításokat használó, valamint a kliens oldalon kiértékelődő változatban is, a rendelkezésre álló számítási kapacitás függvényében a szükséges erőforrások a végleges rendszer megvalósításkor jól tervezhetőek.



**8.1. ábra.** Levegőminőség-monitorozó rendszer javasolt felépítése

A kísérletek során alátámasztottam, hogy a kis távolságban elhelyezett szenzorok helyettesíthetők két szomszédos szenzor értékeinek átlagaként. Nagyobb távolságból vizsgálva a szennyezőanyagok koncentrációja exponenciálisan lecsengő jelleget mutat; sétáloutca esetén, melynek két végén egy egy pontforrásként modellezhető forgalmas útszakasz áll, statikus terjedést feltételezve U alakú eloszlás figyelhető meg. A szélesebbesség változtatásával a modell átalakul, széles időben egyoldali pontforrást kell feltételezni, és onnan indítva exponenciálisan lecsengő szennyezőanyagkoncentráció figyelhető meg.

Munkám során sikerült egy olyan rendszer működő prototípusát elkészíteni, mely a jelenleg elérhetőknél jelentősen jobb térbeli, és időbeli felbontással (7.8. ábra) képes érzékelni és megjeleníteni a különböző szennyezőanyag típusok koncentrációját. A megvalósítás során alkalmazott lézeres szállópor érzékelők  $PM_{10}$  valamint  $PM_{2.5}$  elkülönítésére képesek.

Jelenleg folyamatban van újabb érzékelő típusok tesztelése, melyek a megvalósított rendszerbe gyorsan beépíthetőek, köszönhetően a berendezések modularitásának.

Az első mérések igazolták, hogy a modellezés segítségével a virtuális szenzorok értékeiből kiszámolt szennyezőanyag eloszlás (a 6.1. ábrán látható módon) is nagymértékben megfelel a valóságnak. A további fejlesztések megvalósíthatóságának ellenőrzése érdekében elkészült egy Android-alapú alkalmazás is, mely a felhasználó GPS adatainak segítségével, továbbá az adott életkorhoz tartozó átlagos tüdő vitálkapacitás, átlagos percenkénti légzésszám és egyéb, finomhangolható paraméterek alapján képes követni a felhasználók által belélegzett szennyezőanyag dózist.

## 9. fejezet

# Várható hasznosulás és továbbfejlesztés

A dolgozatban bemutatott rendszer városi szintű bevezetése nagy hatással lehet számos területre.

Segítségével lehetőség nyílik a különböző szabályozások és előírások betartásának ellenőrzésére, ezáltal elősegítve a játszóterek, parkok és egyéb kültéri közösségi terek levegőjének tisztán tartását.

További cél, hogy a rendszer egy esetleges határérték túllépés esetén segíthessen beazonosítani a probléma gyökerét, azt hogy mi vezetett oda, városi és rendszer szinten milyen hibák lehetnek, és a későbbiekben hogyan kerülhetők el ezek.

A rendszer számos egészségügyi továbbfejlesztés lehetőségét is magában hordozza. Különböző egészségügyi adatbázisokkal kiegészítve és összekapcsolva lehetőség nyílik személyre szabott javaslatokat tenni, valamint célzott szűrővizsgálatokat ajánlani. Ráadásul ezek a nagy felbontású, modellezéssel támogatott térképek a kutatók kezébe is új eszközöket adnak, melyekkel még hatékonyabban találhatnak összefüggéseket a levegőminőség és a különböző megbetegedések között.

# Köszönetnyilvánítás

Köszönöm szépen a segítséget és az együttműködést:

- Prof. Dr. Szabó Szilárdnak, Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Földtudományi Intézet, Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék intézetigazgatójának, aki a náluk működő szélcsatornát bocsátotta rendelkezésemre, a kontrollált körülmények közti kísérletek megvalósításához.
- A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézetének (jelenleg Eötvös Lóránd Kutatási Hálózat, Atommagkutató Intézet) Örökségtudományi Laboratórium, Aeroszol csoportjának, akik rendelkezésemre bocsátottak egy frissen kalibrált, TSI által gyártott Optical Particle Sizer (OPS) berendezést.
- Dremák Gergelynek, a webszerveren történő adatvizualizációs programokban nyújtott segítségét.

A dolgozat megvalósítását támogatta továbbá:





# Irodalomjegyzék

- [1] 4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről - Hatályos Jogszabályok Gyűjteménye. URL <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100004.vm>.
- [2] Air quality in Europe - 2020 report — European Environment Agency. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>.
- [3] Annual concentrations of PM10 in 2018 — European Environment Agency. URL <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/annual-mean-pm10-concentrations-in-3>.
- [4] Joshua S. Apte–Kyle P. Messier–Shahzad Gani–Michael Brauer–Thomas W. Kirchstetter–Melissa M. Lunden–Julian D. Marshall–Christopher J. Portier–Roel C.H. Vermeulen–Steven P. Hamburg: High-Resolution Air Pollution Mapping with Google Street View Cars: Exploiting Big Data. *Environ. Sci. Technol.*, 51. évf. (2017. június) 12. sz., 6999–7008. p. ISSN 0013-936X. URL <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00891>. Publisher: American Chemical Society.
- [5] Ronald Fedkiw–Jos Stam–Henrik Wann Jensen: Visual simulation of smoke. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '01* (konferenciaanyag). Not Known, 2001, ACM Press, 15–22. p. ISBN 978-1-58113-374-5. URL <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=383259.383260>.
- [6] Fig. 1: Comparison of the surface area of particles with different diameters. | *Experimental & Molecular Medicine*. ISSN 2092-6413. URL <https://www.nature.com/articles/s12276-020-0405-1/figures/1>. Bandiera\_abtest: a Cg\_type: Nature Research Journals.
- [7] Fig. 4: The dynamics of ultrafine particles emitted from a typical diesel engine. | *Experimental & Molecular Medicine*. ISSN 2092-6413. URL <https://www.nature.com/articles/s12276-020-0405-1/figures/4>. Bandiera\_abtest: a Cg\_type: Nature Research Journals.
- [8] Health Impact of Pollution | State of the Air. URL <https://www.lung.org/research/sota/health-risks>.



- [9] Aclima Inc: Aclima. URL <https://www.aclima.io>.
- [10] Hyouk-Soo Kwon – Min Hyung Ryu – Christopher Carlsten: Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease. *Exp Mol Med*, 52. évf. (2020. március) 3. sz., 318–328. p. ISSN 2092-6413.  
URL <https://www.nature.com/articles/s12276-020-0405-1>. Bandiera\_abtest: a Cc\_license\_type: cc\_by Cg\_type: Nature Research Journals Number: 3 Primary\_atype: Reviews Publisher: Nature Publishing Group Subject\_term: Medical research;Pathogenesis Subject\_term\_id: medical-research;pathogenesis.
- [11] Scott D. Lowther – Wei Deng – Zheng Fang – Douglas Booker – Duncan J. Whyatt – Oliver Wild – Xinming Wang – Kevin C. Jones: How efficiently can HEPA purifiers remove priority fine and ultrafine particles from indoor air? *Environment International*, 144. évf. (2020. november), 106001. p. ISSN 0160-4120. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020319565>.
- [12] Légszennyezés.hu - aktuális szmoghelyzet az országban -.  
URL <http://www.legszenyezés.hu/>.
- [13] André Nel: Air Pollution-Related Illness: Effects of Particles. *Science*, 308. évf. (2005. május) 5723. sz., 804–806. p.  
URL <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1108752>. Publisher: American Association for the Advancement of Science.
- [14] OLM - Gyakran Ismételt Kérdések. URL [http://www.levegominoseg.hu/\(X\(1\)S\(mhixetxfuwwd1oa5yuzrrnz\)\)/gyik#olm](http://www.levegominoseg.hu/(X(1)S(mhixetxfuwwd1oa5yuzrrnz))/gyik#olm).
- [15] pmmonitoring.hu. URL <https://pmmonitoring.hu/>.
- [16] Andrea Pozzer – Francesca Dominici – Andy Haines – Christian Witt – Thomas Münzel – Jos Lelieveld: Regional and global contributions of air pollution to risk of death from COVID-19. *Cardiovascular Research*, 116. évf. (2020. december) 14. sz., 2247–2253. p. ISSN 0008-6363. URL <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa288>.
- [17] Putting the Tesla HEPA Filter and Bioweapon Defense Mode to the Test, 2016. május. URL <https://www.tesla.com/blog/putting-tesla-hepa-filter-and-bioweapon-defense-mode-to-the-test>.
- [18] Yara Saleh – Sébastien Antherieu – Romain Dusautoir – Laurent Y. Allemen – Jules Sotty – Corentin De Sousa – Anne Platel – Esperanza Perdrix – Véronique Riffault – Isabelle Fronval – Fabrice Nesslany – Ludivine Canivet – Guillaume Garçon – Jean-Marc Lo-Guidice: Exposure to Atmospheric Ultrafine Particles Induces Severe Lung Inflammatory Response and Tissue Remodeling in Mice. *Int J Environ Res Public Health*, 16. évf. (2019. április) 7. sz., 1210. p. ISSN 1661-7827. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6479904/>.

- [19] Nicolas Sifakis – Pierre-Yves Deschamps: Mapping of air pollution using SPOT satellite data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58. évf. (1992), 1433–1433. p. Publisher: ASPRS AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND.
- [20] Kimberly A. Terrell – Wesley James: Racial Disparities in Air Pollution Burden and COVID-19 Deaths in Louisiana, USA, in the Context of Long-Term Changes in Fine Particulate Pollution. *Environmental Justice*, 2020. szeptember. ISSN 1939-4071.  
URL <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/env.2020.0021>. Publisher: Mary Ann Liebert, Inc., publishers.
- [21] X. Wu – R. C. Nethery – M. B. Sabath – D. Braun – F. Dominici: Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. *Sci Adv*, 6. évf. (2020. november) 45. sz., eabd4049. p. ISSN 2375-2548.