

# **DOKTORI (Ph.D) ÉRTEKEZÉS**

NAGY GEORGINA

Pannon Egyetem

2015

# **Városi légszennyezettség vizsgálata térinformatikai és matematikai statisztikai módszerek alkalmazásával**

DOI:10.18136/PE.2016.606

Ph.D értekezés

**Nagy Georgina**

*Vegyésmérnöki és Anyagtudományok Doktori Iskola  
Környezetmérnöki Intézet  
Pannon Egyetem Mérnöki Kar*

*Témavezető:*

*Dr. Domokos Endre egyetemi docens*

Veszprém

2015

**Városi légszennyezettség vizsgálata térinformatikai és matematikai  
statisztikai módszerek alkalmazásával**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

a Pannon Egyetem Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

Doktori Iskolájához tartozóan\*.

Írta:

**Nagy Georgina**

Konzulensek: Dr. Domokos Endre

Elfogadásra javaslom            igen / nem            .....

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton .....%-ot ért el,

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom:

Bíráló neve: .....            igen /nem            .....

(aláírás)

Bíráló neve: .....            igen /nem            .....

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Veszprém,

.....

a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése .....

.....

Az EDHT elnöke

## EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott **Nagy Georgina** doktorjelölt büntetőjogi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy a jelen nyilatkozat keletkezését megelőző két éven belül sikertelenül lezárt doktori eljárásom nem volt.

A doktori dolgozatom – melynek címe: **Városi légszennyezettség vizsgálata térinformatikai és matematikai statisztikai módszerek alkalmazásával** - saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt. Tudomásul veszem, hogy plágiumnak számít szó szerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül; tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül; más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén doktori dolgozatom visszautasításra kerül. Kijelentem továbbá, hogy doktori dolgozatom nyomtatott és elektronikus példányai szövegükben, tartalmukban megegyeznek.

Veszprém, 2015.

.....  
aláírás

# A témában eddig megjelent vagy megjelenés alatt álló publikációk jegyzéke

---

## Cikk:

1. Vincze-Csom, Veronika, **Nagy Georgina**, Domokos Endre, Bui Pál, Rédey Ákos, 2012. Study on the impact of the traffic on air quality by using diffusive sampling method in Veszprém. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11, 11, 2083-2090.
2. **Nagy Georgina**, Domokos Endre, Merényi Anna, Ákos Rédey, Tatiana Yuzhakova, 2014. Monitoring of Air Pollution Spread on the Car-Free Day in the City of Veszprém. *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*, Vol.5, Issue 6, pp.679-684.
3. **Nagy Georgina**, Silvia Vilcekova, Domokos Endre, 2015. Modelling the prediction of the NO<sub>x</sub> concentration in the outdoor air applying dimensional analysis. *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 24, Issue 11.

## Idegen nyelven tartott előadás teljes szövegű megjelenéssel:

1. Vincze-Csom Veronika, **Nagy Georgina**, Domokos Endre, Bui Pál, , Rédey Ákos , (2013). Environmental air monitoring in city of Veszprém in cooperation with graduate students of School of Environmental Engineering, University of Pannonia. *In Global Conference on Environmental Studies (CENVISU-2013)*. Belek, Antalya, Törökország, Április 24-27. AWERProcedia Advances in Applied Sciences. Vol.1, pp.694-703.
2. Fráter Tamás, **Nagy Georgina**, Domokos Endre, (2014). Unmanned Aerial Vehicles in Airborne Environmental Monitoring of Natural Reserve Areas such as Wetlands. *In 4th International Conference on Solid Waste Management, IconSWM 2014* . Hyderabad , Andhra Pradesh, India , január 28-30. Waste Management & Resource Utilisation: Kolkata: Oxford Publishing House. pp.161-164.

## Idegen nyelven tartott előadás csak kivonatos megjelenéssel:

1. Vincze-Csom Veronika, **Nagy Georgina**, Domokos Endre, Bui Pál, Rédey Ákos , (2013). Monitoring nitrogen-dioxide and benzene in air in the Central Transdaniubien Region, in the City of Veszprém. *In 14th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment*. Barcelona, Spanyolország, Június 25 - 28. Book of abstracts. pp 64.

### **Magyar nyelven tartott előadás csak kivonatos megjelenéssel:**

1. Domokos Endre, **Nagy Georgina**, Fráter Tamás, (2013). Környezetvédelmi monitorozás pilóta nélküli repülőeszközzel. *In XIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia*. Románia, Nagybánya, november 21-24. Book of abstracts. pp 54.
2. **Nagy Georgina**, Domokos Endre, Bui Pál, Rédey Ákos, (2013). Dinamikus légszennyezettség mérés városi környezetben. *In XIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia*. Románia, Nagybánya, november 21-24. Book of abstracts. pp 44.
3. **Nagy Georgina**, Silvia Vilcekova, Domokos Endre, (2014). A közlekedésből származó légszennyezettség és a légúti megbetegedések kapcsolatának vizsgálata . *In XX. Nemzetközi Vegyészkonferencia*. Cluj-Napoca, Románia, november 6-9. Cluj-Napoca: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT). pp. 79.
4. Somogyi Viola, Merényi Anna, **Nagy Georgina**, Domokos Endre, Rédey Ákos, (2014). Veszélyes anyagok légkörben való terjedésének vizsgálata különböző modellek segítségével. *In X. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia* . Kolozsvár, Románia, március 27-29. Kolozsvár: Ábel Kiadó. pp. 249
5. Merényi Anna, **Nagy Georgina**, Domokos Endre, (2015). A Pannon Egyetem területén kialakuló légszennyezettség a tömegközlekedés függvényében. *In XI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia* . Pécs, Magyarország, május 6-9. Kiadó: Szentágothai János Szakkolégium . pp. 62
6. **Nagy Georgina**, Merényi Anna, Domokos Endre, (2015). Légszennyező anyagok és meteorológiai tényezők összefüggésének vizsgálata az idő függvényében Veszprémben. *In XI. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia* . Pécs, Magyarország, május 6-9. Kiadó: Szentágothai János Szakkolégium . pp. 63

### **Poszter magyar nyelven:**

1. Domokos Endre, **Nagy Georgina**, Rédey Ákos, Utsi Anett, (2013). Környezeti modellező rendszerek használata városi környezetben. *In XIX. Nemzetközi Vegyészkonferencia*. Románia, Nagybánya, november 21-24.

### **Poszter idegen nyelven:**

1. Merényi Anna, Domokos Endre, **Nagy Georgina**, (2015). Modelling of the influence of public transport on the urban air quality. *In International Conference on Chemical & Process Engineering*. Milánó, Olaszország, május 19-22.

## Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	10
2. Hipotézisek .....	12
3. Tudományos alapok .....	13
3.1. Légszennyezettség .....	13
3.1.1. Antropogén eredetű légszennyezettség forrásai, okai .....	15
3.1.2. A leggyakoribb szennyező anyagok és jellemzőik .....	16
3.1.3. A légszennyezettség hatása az emberi egészségre .....	19
3.2. Városi légszennyezettség .....	24
3.2.1. A városok szerepe, urbanizáció .....	24
3.2.2. A városi klímát befolyásoló tényezők .....	26
3.3. Városi közlekedés, mobilitás .....	28
3.3.1. Mobilitás .....	29
3.3.2. A közlekedési rendszer főbb jellemzői .....	29
3.3.3. A városi közlekedés fejlődésének tendenciái .....	31
3.4. Légszennyező anyagok monitorozása .....	33
3.4.1. Monitoring rendszerek céljai, fajtái és elemei .....	33
3.4.2. Levegő monitoring hálózatok .....	39
3.4.3. Szenzorok alkalmazása a levegő monitoring rendszerekben .....	41
3.4.4. Szenzorok a gyakorlatban .....	44
3.5. Légszennyezés modellezése .....	46
3.5.1. A modell és modellezés fogalma, modellek csoportosítása, modellezés folyamata .....	46
3.5.2. Matematikai modell és modellezés fogalma, modellek csoportosítása, modellalkotási eljárások .....	52
3.5.3. Dimenzióanalízis, dimenzionális homogenitás, folyamatok hasonlósága .....	55

4.	Adatbázis és módszer.....	64
4.1.	Klaszteranalízis.....	64
4.2.	Regresszió analízis .....	66
4.2.1.	A regressziós együtthatók becslése a legkisebb négyzetek módszerével .....	67
4.2.2.	Hipotézisvizsgálat .....	68
4.2.3.	Determinációs együttható.....	70
4.3.	Interpoláció és digitális domborzat/terepmodellezés .....	71
4.4.	Alapadatok forrásai.....	73
5.	Új tudományos eredmények .....	76
5.1.	Első hipotézis bizonyítása .....	76
5.1.1.	Városiasodás az EU-ban.....	76
5.1.2.	Személyszállítás alakulása .....	78
5.1.3.	Autóutak hossza, 1000 lakosra jutó személygépjárművek száma.....	79
5.1.4.	A városi lakosság veszélyeztetettsége.....	81
5.1.5.	Következtetés .....	83
5.2.	Második hipotézis bizonyítása.....	84
5.2.1.	Társadalmi mutatószám, légszennyezettség mértéke.....	84
5.2.2.	Számítások eredményei.....	85
5.2.3.	Következtetés .....	100
5.3.	Harmadik hipotézis bizonyítása.....	102
5.3.1.	Mérési helyszín .....	102
5.3.2.	Alkalmazott jogszabályok .....	105
5.3.3.	Mérőműszerek, mérés menete.....	105
5.3.4.	Meteorológiai paraméterek .....	107
5.3.5.	Statikus mérőpontok eredményei .....	107
5.3.6.	Dinamikus mérőpontok eredményei .....	111
5.3.7.	Következtetés .....	114



5.4.	Negyedik hipotézis bizonyítása .....	115
5.4.1.	Dimenzió analízis modell.....	115
5.4.2.	Modellhez szükséges adatok .....	119
5.4.3.	A modell érvényesítése .....	121
5.4.4.	A modell helyessége.....	123
5.4.5.	Következtetés .....	126
6.	Következtetések és javaslatok.....	127
6.1.	Következtetések.....	127
6.2.	Javaslatok.....	129
7.	Összefoglalás .....	131
7.1.	Új tudományos eredmények .....	132
7.2.	Az eredmények hasznosíthatósága .....	134
7.3.	Továbbfejlesztés lehetőségei .....	135
8.	Summary .....	136
9.	Zusammenfassung.....	138
10.	Köszönetnyilvánítás .....	140
	Mellékletek.....	141
1.	számú melléklet .....	142
2.	számú melléklet .....	143
3.	számú melléklet .....	144
4.	számú melléklet .....	149
	Rövidítések jegyzéke .....	154
	Táblázatok jegyzéke .....	156
	Ábrák jegyzéke .....	159
	Irodalomjegyzék .....	163

## 1. Bevezetés -

A környezet szennyezése egyidős az ember megjelenésével. A különböző emberi tevékenységek révén fizikai és kémiai hulladékok jutottak a levegőbe, a talajba, valamint a természetes vizekbe. A környezetszennyezés egyik első megnyilvánulása az volt, amikor az ember használatba vonta a tüzet, s a keletkezett füst beborította az egész barlangot majd később a barlang falain koromként rakódott le.

A korai társadalmakban az égetés és fűtés kulcsszerepet játszott a légszennyezés kialakulásában, ami elsősorban a belső terek szennyezésére korlátozódott. A környezeti levegő szennyezését főleg a kovácműhelyekből, sörfőzdékből, s az egyéb energiaigényes manufaktúrákból származó füst okozta. [1]

A környezetvédelem jelentősége a XXI. század küszöbére teljes mértékben felértékelődött. Napjainkban az urbanizáció következtében a városok számának és nagyságának növekedésével, a társadalmi átalakulások, valamint a tudomány és technika rohamos fejlődésével együtt és ezek együttes hatásával az egyik legfontosabb megoldandó probléma a légszennyezettség mérséklése lett.

Az UNFPA 2007-es „*A városi növekedés potenciáljának felszabadítása*” [2] című tanulmányában leírja, hogy 2008-ban a Föld lakosságának mintegy 50%-a megközelítőleg 3,3 milliárd ember élt kisebb vagy nagyobb városokban. Az egyre erősödő városiasodás főként a fejlődő országokban, ezen belül is Ázsiában elsősorban Kínában volt a legmeghatározóbb. A tanulmány szerint világ szinten 2030-ra várhatóan a városi lakosság száma meghaladja majd a 4,9 milliárd főt. A KSH adatai alapján, Magyarországon is megfigyelhető a városi népesség arányának folyamatos emelkedése. Míg az 1980-as években Magyarország összlakosságának megközelítőleg a 68%-a lakott kisebb vagy nagyobb városokban, addig 2013-ban ez a szám már elérte a 70-72%-ot. [3]

A folyamatos növekedés következtében a városokban a légkör összetételének megváltozása káros hatással van az emberi egészségre, az élő szervezetekre, a talajra, a vízre és a környezet más elemeire is. Ezért elengedhetetlen lépés, hogy pontosan ismerjük a javítandó levegő összetételét és a benne található szennyező komponensek mennyiségét. A pontos mérések segítségével meghatározhatóak a különböző légszennyező komponensek és azok koncentrációi. A folytonos méréseknek köszönhetően tisztább képet kaphatunk a levegő

állapotáról, valamint az eredmények kiértékelését követően segítséget nyújthatunk a további intézkedések meghozatalához.

A kutatási munkám fő célterülete éppen ezért a légszennyezettség problémaköre, azon belül is a városi levegő minőség változásának figyelemmel kísérése és okainak feltérképezése. Értekezésemben különös figyelmet fordítottam a városiasodás erősödésére és ennek következtében bekövetkező forgalom növekedésére, s a megerősödött forgalomból származó légszennyezésre és annak hatására a városi levegőminőségre és az emberi szervezetre.

Vizsgáltam továbbá a jelenlegi levegő monitoring rendszereket, melyek statikus mérőpontok adataira támaszkodnak, s összehasonlítottam őket egy általam tervezett dinamikus mérőpontok adataira támaszkodó monitoring rendszerrel. Továbbá egy matematikai modell segítségével előrejelzést készítettem a levegő nitrogén oxid szennyezettségének meghatározásához.

Ph.D dolgozatom célja, hogy komplex képet mutasson a városi légszennyezés jelenlegi helyzetéről, valamint a monitorozására alkalmazott jelenlegi rendszerekről és azok jobbá tételéről, esetleges felváltásáról. Ennek részeként:

- A dolgozatom 1. részében bemutatom a kutatásom alapját képező hazai és nemzetközi szakirodalomra épülő ismereteimet a légszennyezettségről annak, fajtáiról, okairól és hatásairól, valamint a mobilitásról és az urbanizációról, annak tendenciáiról továbbá a légszennyező anyagok monitorozásának a gyakorlatáról, különös figyelmet fordítva a levegő monitoring rendszerekre és hálózatokra továbbá a légszennyező anyagok terjedésére alkalmazott modellekről.
- A 2. részben ismertetem a dolgozat elkészítéshez felhasznált nemzetközi és hazai adatbázisokat és a kutatásom alapjául szolgáló módszereket, módszertani eljárásokat, valamint szoftvereket.
- A 3. részben igazolom különböző matematikai, statisztikai módszerekkel illetve mérésekkel és szimulációval a hipotéziseimben felállított téziseket.
- A 4. részben pedig összefoglalom az új, tudományos eredményeket, valamint javaslatokat teszek, illetve utalok a továbbfejlesztési lehetőségekre.

## 2. Hipotézisek

A kutatásom megalapozása céljából széleskörű hazai és nemzetközi irodalom feldolgozását végeztem el, amelyek alapján fogalmaztam meg kutatási hipotéziseimet, a bizonyításukhoz szükséges módszertani eljárásokat. A hazai és nemzetközi szakirodalom feldolgozása, valamint az általam végzett kísérletek során szerzett tapasztalataim alapján az alábbi hipotézisekből indultam ki:

H1: Matematikai módszerekkel bizonyítható, hogy a városiasodás növekedésével, valamint a közúti forgalom erősödésével a környezeti levegő szennyezettsége jelentős problémává vált a városokban.

H2: A közlekedésből származó légszennyezettség kapcsolata a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások számával statisztikai módszerek alkalmazásával alátámasztható.

H3: A közlekedésből származó légszennyezettség mértéke egy adott városrészben vagy az egész városban dinamikus mérések elvégzésével megfelelő pontossággal jellemezhető.

H4: A környezeti levegő légszennyezettségének mértéke meteorológiai és domborzati adatok ismeretében matematikailag modellezhető.

### 3. Tudományos alapok

Ebben a fejezetben bemutatom a dolgozat elméleti háttérét adó, a hipotéziseim alátámasztásául szolgáló hazai és nemzetközi szakirodalmat a légszennyezettség, a városi közlekedés, a légszennyező anyagok monitorzása, valamint a légszennyező anyagok modellezése témakörökben.

#### 3.1. Légszennyezettség

A földi élet kialakulásának és fejlődésének feltétele a Földet körülvevő légkör. A légkör, vagy atmoszféra az égitesteket, csillagokat körülvevő, a gravitáció által megtartott gázok keverékéből álló gázburok. A Föld légkörének tömege mintegy  $5,3 \cdot 10^{15}$  tonna [4]. Anyaga a levegő, amelynek fő állandó összetevői a nitrogén ( $N_2 = 78,084$  térfogat %), az oxigén ( $O_2 = 20,947$  térfogat %), az argon ( $Ar = 0,934$  térfogat %) és egyéb nemesgázok. Továbbá megtalálható még benne kisebb mennyiségben szén-dioxid ( $CO_2$ ), metán ( $CH_4$ ), dinitrogén-oxid ( $N_2O$ ), valamint nyomokban hidrogén ( $H_2$ ), ózon ( $O_3$ ), radon (Ra) és egyéb szilárd és cseppfolyós úgynevezett aeroszol részecskék [5].

Tiszta levegő alatt a természetes vagy emberi szennyező anyagok által nem befolyásolt levegőt kell érteni. Abban az esetben, viszont ha a levegőben található gázok koncentrációja meghaladja az elfogadható értéket, akkor szennyezett levegőről van szó. A 306/2010. (XII. 23.) „A levegő védelméről” szóló kormányrendelet 2. §-nak 18-as pontja a légszennyezettséget „a levegő légszennyezettségi határértéket meghaladó levegőterheltségi szintje” szerint értelmezi [6].

Megkülönböztetünk természetes forrásból származó, valamint antropogén eredetű légszennyező forrásokat. A természetes légszennyező források jellemzője, hogy nagy mennyiségű szennyezőanyagot juttatnak a levegőbe, ami nagy területen szétoszlik, így a koncentráció csak rövid időre emelkedik a káros szintre. Ilyen forrásnak tekintjük a vulkánokból, erdőtüzekből, óceánokból származó tengeri sókból, kozmikus porból, növényi pollenekből, mocsarokból és nedves, vizes területekről, valamint más olyan forrásokból származó szennyezéseket, amelyeket az emberiség nem befolyásol. Mesterséges eredetű légszennyező források azok, amelyek az emberi, vagyis antropogén tevékenység hatására következtek be. Az emberi tevékenységhez köthető légszennyező forrásokat négy nagy alcsoportra lehet felosztani: ipar, lakossági tüzelés, közlekedés és mezőgazdaság [7].

Az ipar bocsátja ki a légkörbe a legnagyobb mennyiségű és legkülönbözőbb típusú szennyező anyagokat. Lakossági tüzelés során a kéményeken keresztül a légkörbe juttatott

légszennyező anyagok az elégetett fosszilis energiahordozók (szén, kőolaj, földgáz) égéstermékein kívül más szilárd részecskéket (korom, pernye, koks, kátrány) is tartalmaznak a tüzelőanyag összetételének függvényében. Harmadik csoportba a közlekedés által okozott légszennyezés került. Napjainkban, a közlekedés légszennyezésben betöltött szerepe egyre jelentősebb. A közlekedéssel általában por, korom, szénhidrogének, szén-dioxid és szén-monoxid jut a levegőbe. A negyedik kategóriába a mezőgazdaság által okozott légszennyezést soroljuk, amely a legtöbb esetben a helytelen művelés hatására a levegőben kerülő por, a kedvezőtlen időjárási viszonyok között elvégzett permetezés, valamint a repülőgépről történő vegyszerezés okoz [7].

A légszennyező anyagoknál különbséget teszünk elsődleges és másodlagos légszennyező anyagok között. Elsődleges légszennyező anyagoknak tekintjük azokat a szennyező anyagokat, amelyek a légkörbe való kibocsátásuk után kémiai változáson nem mennek keresztül, és így változatlan formában ülepednek ki (pl. szén-monoxid, szén-dioxid, kén-dioxid, fluor). [8] Másodlagos légszennyező anyagok a légkörben a napsugárzás hatására átalakulnak (fotokémiai reakció), vagy más anyagokkal kémiai reakcióba lépnek, így általában az eredeténél károsabb hatású vegyületek vagy anyagok keletkeznek (pl. kén-trioxid, kénsav, nitrogén-dioxid, salétromsav, ózon) [8].

Halmazállapotuk szerint is differenciálhatóak a levegő minőségét hátrányosan befolyásoló anyagok. Így beszélhetünk szilárd, cseppfolyós, gáz- vagy gőz-halmazállapotú anyagokról. A szilárd halmazállapotú anyagok szemcse méreteit figyelembe véve, a csoportok a következők: por és a korom, aeroszolok, valamint gázok és gőzök. Az első csoport jellemzője, hogy olyan tetszőleges alakú és sűrűségű szilárd részecskékből álló, általában kétfázisú polidiszperz rendszerek, amelyek szemcsemérete  $10^3 \mu\text{m}$  és  $1 \mu\text{m}$  között változik. Eredetük szerint származhatnak természetes forrásokból (talaj mállása, erdőtüzek, vulkánkitörések, stb.) illetve emberi tevékenységből, elsősorban ipari tevékenységből (cementgyártás, ércfeldolgozás, kohászat, stb.), de helytelen mezőgazdasági tevékenységből is (defláció). A második csoportba tartoznak az aeroszolok, amelyek  $10 \mu\text{m}$ -nél kisebb szemcseméretű szennyezőanyagok. Halmazállapotuk szerint lehetnek finom porok, füstök, ködök. Méretük szerint két csoportra oszthatóak: a  $10\text{-}0,1 \mu\text{m}$  közötti, valamint a  $0,1\text{-}0,001 \mu\text{m}$  közötti tartományra. Keletkezésüket tekintve pedig lehetnek diszperziós aeroszolok, valamint kondenzációs aeroszolok. A harmadik csoportba tartoznak a gázok és gőzök, amelyek részben valódi gázok, részben olyan vegyületek gőzei, melyek forráspontja  $200^\circ\text{C}$ -nál kisebb. A leggyakrabban előfordulók, a szennyezés szempontjából legkárosabbak a

következők: kén-dioxid (SO<sub>2</sub>), nitrogén-oxidok (NO<sub>x</sub>), fluor (F), szén-monoxid (CO), kénhidrogén (H<sub>2</sub>S), aldehidek, ólomvegyületek, szénhidrogének, valamint a dioxinok és furánok (PCDD, PCDF) [9] [5].

Légszennyező források kiterjedésük alapján lehetnek helyhez kötött pont-, felületi (diffúz), vonal- és mozgó források. Pontforrásnak tekintjük azokat a kéményeket és a kürtöket, amelyeknél a légszennyező anyagok kibocsátási jellemzői (térfogatáram és koncentráció) mérésrel egyértelműen meghatározhatók. A felületi vagy ún. diffúz források a szabadban végzett műveletek, berendezések, takaratlan tárolók, melyeknél a környezetbe kerülő anyag mennyiségére csak közvetett mérések és számítások útján lehet következtetni. Vonalforrásnak tekintjük a nyomvonalas közlekedési létesítményt (közút, vasút) vagy annak vizsgált szakaszát, amelynél az elhaladó járművek jellemzői határozzák meg az egységnyi szakaszból származó légszennyező anyag kibocsátott mennyiségét [6].

A légszennyezési folyamat kiterjedése szerint szintén megkülönböztetünk három légszennyezési típust. A legkisebb területet érintő szennyezési forma a lokális szennyezés. Hatásterülete maximum néhányszor 10 km<sup>2</sup>, viszont a kibocsátott szennyezőanyag mennyisége itt a legnagyobb, s a legmagasabb koncentrációk itt mérhetők. A háttér vagy regionális szennyezést a legtöbbször több pontforrás, vagy több diffúz emisszió együttesen hozza létre. Horizontális kiterjedése 10 km-es mérettől maximum 1000 km-ig terjed. A harmadik csoport a globális szennyezések csoportja. Ide sorolandók többek között a CO<sub>2</sub>, a CH<sub>4</sub>, valamint a halogénezett szénhidrogének (freonok). Koncentrációjuk relatív alacsony, viszont kiterjedésük horizontálisan legalább hemiszférikus, ill. az egész Földet átölelő (3000 km-t meghaladó) is lehet [10].

A légszennyezés folyamatát három szakaszra szokás osztani. Az első az úgynevezett emisszió: a különböző típusú forrásokból időegység alatt a környezeti levegőbe bocsátott szennyező anyag mennyisége. A második szakasz a transzmisszió, amely során a levegőbe került szennyező anyagok hígulnak, ülepednek, fizikai és kémiai változásokon mennek át. A harmadik szakasz pedig az immisszió (vagy légszennyezettség), ami nem más, mint a kibocsátott szennyező anyagoknak a talajközeli levegőben kialakult koncentrációja.

### **3.1.1. Antropogén eredetű légszennyezettség forrásai, okai**

A városi területeken bekövetkező légszennyezés fő oka az antropogén eredetű veszélyes szennyező anyagok – mint például a szén-monoxid, kén-dioxid, nitrogén oxidok, az ózon és a

por – légkörbe kerülése a fosszilis energiahordozók erőművekben, egyedi és távfűtésben, valamint a gépjármű közlekedésben való elégetése során.

A XX. században bekövetkezett az ipar és a szolgáltatások dinamikus fejlődése, melynek következtében a lakosság, a gépjárművek, valamint az épületek száma jelentős növekedésnek indult. Megnövekedett a járműforgalom a városokban, ahol az utcák, utak sűrűsége sokkal nagyobb, mint a nem városi területeken. Számos fejlett ország városában a közlekedés a legfontosabb légszennyező forrássá vált [11] [12] [13].

A közlekedés mellett a háztartások fűtése, főleg a fosszilis tüzelőanyagok, valamint a tűzifa, pellet, fabrikett, faapríték, rőzse és gally égetése során keletkezik jelentős légszennyezés, mely esetben főleg porszennyezésről beszélhetünk [14] [15] [16].

Az antropogén eredetű légszennyezések harmadik fő okozói az ipari létesítmények és az ott folytatott tevékenységek. Az energiaipart tekintve a villamos erőművekben főleg a tüzelőanyag előkészítés, őrlés, anyagmozgatás, szállítás során keletkeznek szennyező anyagok, mint a por, korom,  $\text{NO}_x$  és CO. A vaskohászat vagy színesfém kohászat során szintén por, füst és különböző ércporok keletkeznek. Timföldgyártásnál por, pernye és  $\text{SO}_2$  szennyezés kerülhet a légkörbe. A különböző szervesetlen vegyipari tevékenységeknél – mint például kénsavgyártás, ammóniagyártás vagy műtrágyaüzem – többek között por, pirit,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , kénsavkőd,  $\text{NH}_3$  és  $\text{NO}_x$  a főbb szennyező anyagok [17].

### **3.1.2. A leggyakoribb szennyező anyagok és jellemzőik**

1970-ben fogadta el az Amerikai Egyesült Államok Kongresszusa a Tiszta Levegő Törvényt (Clean Air Act) melyben meghatározták a hat leggyakrabban előforduló légszennyező anyag egészségügyileg elfogadható szintjét. Ezeket a légszennyezőket kritérium légszennyezőknek (criteria pollutants) nevezzük. Közéjük tartozik a felszínközeli ózon, a szén-monoxid, a nitrogén oxidok, a kén-dioxid, valamint a por [18]. A következőkben e légszennyező anyagok kerülnek bemutatásra.

#### Felszínközeli ózon:

Az ózon története 1786-ban Martinus van Marum holland fizikussal kezdődik, aki mesterségesen képzett villámokkal végzett kísérletei alatt jelentkező sajátos szagról számolt be. 1840-ben Christian Friedrich Schönbein bázeli kémia professzor írta az első hivatalos közleményt az ózonnál. Kutatásaiban, kezdetben a klórhoz és a brómhoz hasonló aktivitása miatt halogénnek, majd a nitrogénnek egy hidrogénnel alkotott vegyületként gondolta. Végül



az ózont az oxigén egy különleges változataként értelmezte. 1850-ben fejlesztette ki az „ózonoszkópikus” papírt, ami egy a levegő ózonkoncentrációjának a kimutatását segítő káliumjodid-keményítős reagens papír. A papír elszíneződése alapján, 0 (fehér) és 10 (sötét ibolyakék) közötti „Schönbein szám”-mal jellemezte a levegő ózontartalmát [19] [20].

A talaj-közeli ózón főbb tulajdonságai, hogy standard hőmérsékleten és nyomáson (nagy tömegben) halványkék árnyalatú,  $-112\text{ °C}$  alatt sötétkék folyadék,  $-193\text{ °C}$  alatt sötétkék kristály. Az oxigén három izotópja közül ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) kettőt ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) tartalmaz. Jellemző szúrós szaga a foszforra és a kén-dioxidra emlékeztet. Nagyon instabil molekula, a légkör erősen változó összetevői közé tartozik. Bomlása során  $\text{O}_2$  molekulákra esik szét. Ha oxidálható anyagokkal érintkezik, akkor a bomlás már alacsony hőmérsékleten is robbanásszerű. Nagyon mérgező, toxikus hatású [21].

A talajközeli ózón másodlagos szennyező, mely elsődleges szennyezőanyagokból fotokémiai úton képződik. A kiindulási szennyezőanyagok közé tartoznak a gépjárművek kipufogógázaiból származó nitrogén-oxidok és illó szerves vegyületek, valamint az oldószerek. A nitrogén-oxidokból napsugárzás hatására ózón képződik, ami a fotokémiai szmog egyik indikátor paramétere [22].

### Nitrogén oxidok

A levegő vizsgálata vezetett el a nitrogén felfedezéséhez. 1710-ben Francis Hawksbee egyik kísérlete során sikerült a levegő oxigénjét kémiai úton lekötnie (a csövekbe zárt izzó fémen vezette át a levegőt), s megfigyelte, hogy a visszamaradó gáz a lángot kioltja, és nem lélegezhető be. 1772-ben Daniel Rutherford állított elő először nitrogént az állatok kilehelt levegőjéből, majd 1788-ban Antoine Francois de Fourcroy kimutatta a nitrogént a halak úszóhólyagjában, és mint alkotórészt minden állati anyagban. Henry Cavendish 1781-ben a levegőt kémiai vegyületnek nyilvánította, melynek négy térfogategység nitrogénből, egy térfogategység oxigénből áll [23].

A nitrogén a földön elsősorban elemi állapotban fordul elő. A levegő 78%-át alkotja. Az élő szervezetek nélkülözhetetlen eleme: a fehérjék aminosavakból épülnek fel, az aminosavakban pedig nitrogén található. Két természetes izotópja van:  $^{14}\text{N}$  és  $^{15}\text{N}$ , melyek közül a  $^{14}\text{N}$  izotóp van túlnyomó mennyiségben. Levegőkémiai szempontból elsősorban a dinitrogén-oxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), a nitrogén-oxid ( $\text{NO}$ ) és a nitrogéndioxid ( $\text{NO}_2$ ) jelentős, az utóbbi kettőt együttesen nitrogén oxidoknak nevezzük [24].

A nitrogén oxidok a légkörbe több úton is bekerülhetnek. Természetes módon jelentős mennyiség képződik a talaj és a felszín alatti vizek mikroorganizmusainak a tevékenysége következtében, valamint az atmoszférában villámlások során. Az emberi tevékenység következtében a fosszilis tüzelőanyagok elégetése, a közlekedés és az energiatermelés, a mű- és szerves-trágyák használata, valamint a nagy kiterjedésű erdők felégetése a legjelentősebb légköri nitrogénoxid forrás [25].

### Kén-dioxid

A kén már az ókorban is nagyon jól ismerték és felhasználták. Kínában és Indiában gyógyszerként alkalmazták. Ezen kívül használták fertőtlenítésre, boroshordók tisztítására, valamint hadi célokra is. A kén ipari jelentősége csak a 18. századtól nőtt meg, amikor a kénsavgyártásra használták fel, illetve a 19. században, amikor a kaucsuk vulkanizálását feltalálták. Magát a kén-dioxidot Joseph Priestley fedezte fel 1774-ben a gázok tanulmányozása során [26].

Előállítás mesterséges úton főként az ipari technológiák révén (műtrágyagyártás, alumínium ipar és acélgártás) a kén-tartalmú tüzelőanyagok (szén, olaj) égetéséből származik, de keletkezhet természetes úton is, ebben az esetben főként geotermikus folyamatok révén kerülhet a levegőbe [27].

### Szén-monoxid

A szén-monoxid színtelen, szagtalan, vízben kevésbé oldódó (viszont oldható etanolban és benzolban), a levegőnél kissé könnyebb, nehezen cseppfolyósítható gáz. Szobahőmérsékleten nehezen oxidálódik. Gyúlékony és erősen mérgező. Moláris tömege 28,01 g/mol. Sűrűsége 1,25 gdm<sup>-3</sup>. Mivel a molekula apoláris, ennek következtében a szén-monoxid olvadási- és forráspontja igen alacsony [28].

Természetes úton a vulkánok, erdő- és bozóttüzek, élőlények anyagcsereje miatt fordul elő. Mesterséges vagy emberi tevékenység következményeként pedig jelentős mennyiség keletkezik a fosszilis tüzelőanyagok tökéletlen égésénél, erőművekből, gépjármű közlekedésből, valamint a lakossági fűtésből. Iparilag a földgázból állítják elő a metán oxidációjával, a víz-gáz reakcióval. A laboratóriumban is előállítható metánsavból (hangyasav) koncentrált kénsavas vízelvonással [28] [27].

### Szemcsés anyag - Szálló por

A levegőben található összes lebegő tartalom (TSPM), vagyis a szálló szilárd por részecskéket három nagy csoportra szokás osztani méretük alapján. Az első csoportba

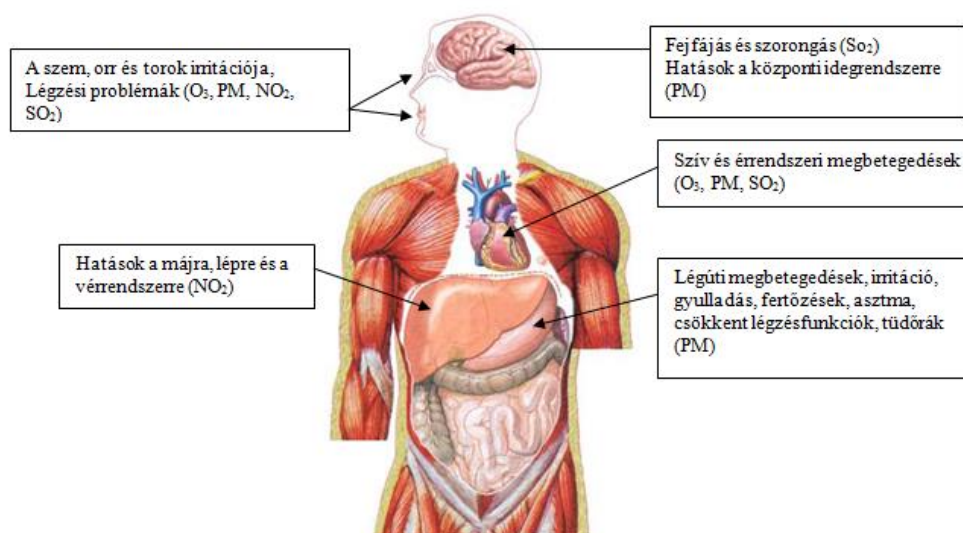
tartoznak a 2,5-10 $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) átmérőjű részecskék, a másodikba 2,5 $\mu\text{m}$  (PM<sub>2,5</sub>) átmérőnél kisebbek, a harmadikba pedig az 1 $\mu\text{m}$  (PM<sub>1,0</sub>) alatti ultra finom részecskék.

Keletkezésük részben antropogén, részben természetes forrásból származik. Városi környezetben mind a nagyobb, mind a kisebb átmérőjű részecskék egyformán jelen vannak, a nagyobb PM<sub>10</sub> szemcsék elsősorban mechanikus úton keletkeznek, építkezések során, az utak felületének kopásából, valamint szél által. A PM<sub>2,5</sub> szemcsék elsősorban gázokból, illetve égés során, dízelmotorok égéstermékeként keletkezhetnek.

### 3.1.3. A légszennyezettség hatása az emberi egészségre

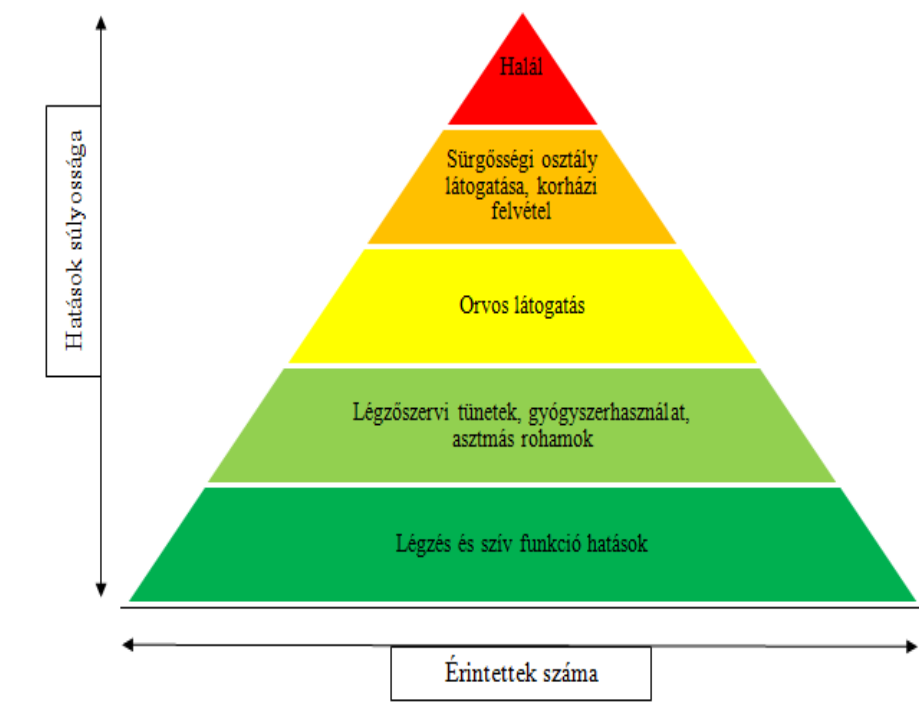
A WHO legfrissebb jelentése [29] alapján 2012-ben világszerte több mint 7 millió (arány 1:1000) embert halt meg a légszennyezés következtében, s ebből csaknem 600 ezer fő (arány 1:1350) a WHO Európai Régiójában. Pontosabban 482 ezer haláleset tulajdonítható a szennyezett környezeti levegőnek és 117 ezer pedig a háztartási légszennyezésnek. A 3.1.2-es fejezetben ismertettem a leggyakoribb légszennyező anyagokat a következőkben e légszennyező anyagok egészségre gyakorolt hatásai kerülnek bemutatásra.

A 1. ábra bemutatja a kulcsfontosságú egészségügyi hatásait a különböző légszennyező anyagoknak, nevezetesen a talajközeli ózonnak (O<sub>3</sub>), a szén monoxidnak (CO), a nitrogén-dioxidnak (NO<sub>2</sub>) továbbá a kén-dioxidnak (SO<sub>2</sub>), valamint szálló pornak (PM).



1. ábra: Légszennyező anyagok hatása az emberi szervezetre (Air quality in Europe, 2013 riport [30] alapján készített ábra)

Fontos megjegyezni, hogy a légszennyezés következtében bekövetkező kevésbé súlyos egészségügyi hatások sokkal nagyobb arányban érintik a lakosságot, mint a komolyabb, súlyosabb megbetegedések (lásd 2. ábra).



2. ábra: Egészségügyi hatások piramis (Air quality in Europe, 2013 riport [30] alapján készített ábra)

Az egészségügyi határértékeket a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet tartalmazza összhangban a 2008/50/EK irányelvvel.

1. táblázat: Légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 4/2011 VM rendelet I.sz. melléklete alapján [31]

Légszennyező anyag	Határérték [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] órás	Határérték [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] 24 órás	Határérték [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] éves
szén-monoxid	10 000	5000*	3000
kén-dioxid	250 (a naptári év alatt 24-nél többször nem léphető túl)	125 (a naptári év alatt 3-nál többször nem léphető túl)	50**
nitrogén-dioxid	100 (a naptári év alatt 18-nál többször nem léphető túl)	85	40*
ózon		120***	
szálló por ( $\text{PM}_{10}$ )		50 (a naptári év alatt 35-nél többször nem léphető túl)	40*

\* Napi 8 órás mozgó átlagkoncentrációk maximuma, amelyet az órás átlagok alapján készített 8 órás mozgó átlagértékekből kell kiválasztani. Például bármelyik nap első vizsgálati periódusa a megelőző nap 17 órától az adott nap 1 óráig tart. Bármelyik nap utolsó vizsgálati periódusa az adott napon 16 órától 24 óráig tart.

\*\*Meghatározására alkalmazott mérési program: folyamatos mérés vagy legalább heti egy-egy, véletlenszerűen kiválasztott 24 órás mérés, egyenletesen elosztva az év során; vagy az év során egyenletesen elosztott, legalább 8 héten keresztül végzett mérés.

\*\*\* Napi 8 órás mozgó átlagkoncentrációk maximuma. A maximum értéket az órás átlagok alapján képzett 8 órás mozgó átlagértékekből kell kiválasztani. Az ily módon számított 8 órás átlagokat arra a napra kell vonatkoztatni, amelyen a 8 órás időtartam végződik, tehát bármelyik nap első vizsgálati periódusa a megelőző nap 17 órától az adott nap 01 óráig tart. Bármelyik nap utolsó vizsgálati periódusa az adott napon 16 órától 24 óráig tart.

**2. táblázat: Légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 2008/50 /EK irányelv alapján [32]**

Légszennyező anyag	Határérték [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] órás	Határérték [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] 24 órás	Határérték [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] éves
szén-monoxid	10 000	-	-
kén-dioxid	350 (a naptári év alatt 24-nél többször nem léphető túl)	125 (a naptári év alatt 3-nál többször nem léphető túl)	-
nitrogén-dioxid	200 a naptári év alatt 18-nál többször nem léphető túl	-	40
ózon	-	120***	-
szálló por ( $\text{PM}_{10}$ )	-	50 (a naptári év alatt 35-nél többször nem léphető túl)	40

### Szén-monoxid:

Az EPA megfogalmazása alapján a szénmonoxid erősen mérgező, egészségkárosító gáz, azáltal, hogy csökkenti az oxigén szállítását a test szerveiben (mint például szív és agy), valamint a szövetekben [33]. A levegőben lévő koncentrációtól függően, különböző akut és krónikus hatások léphetnek fel, mint például enyhe fejfájás, fáradtság, szédülés (200 ppm), homloktáji fejfájás (400 ppm), hányinger, szédülés (800 ppm) vagy akár eszméletvesztés (1600 ppm) és halál (3200 ppm) is. A szakirodalomban több a szén monoxid mérgezéssel foglalkozó kutatás is fellelhető, mint például Kristin Evans és társai, akik az ultra finom részecskék ( $\text{PM}_{2,5}$ ) és a szénmonoxid koncentráció emelkedésének következtében bekövetkező asztma súlyosságát vizsgálták városi gyerekeken [34]. Kísérletükben a 3 és 10 év közötti korosztályt vették figyelembe összesen 74 tanulóval. Tekintetbe vették a tanulók nemét (fiú/lány), etnikai hovatartozását (fehér/fekete/spanyol/egyéb), betegbiztosítását (rendelkezik vele/nem rendelkezik vele/magán vagy állami biztosítással rendelkezik), asztma előfordulását a családban (édesapa asztmás/édesanya asztmás), valamint dohányzási szokásokat (van dohányos a családban/nincs dohányos). Kutatásuk eredményeképpen megállapították, hogy közlekedési környezetszennyezés miatt a városban élő gyerekeknél az asztmás megbetegedés és megbetegedésre való hajlam lényegesen magasabb. Egy másik

kutatás során Jennifer Vanos, Christopher Hebbern és Sabit Cakmak 10 kanadai várost vizsgált meg és kockázatértékelte a légszennyezés és a meteorológiai viszonyok változásából bekövetkező szív- és érrendszeri, valamint légzőszervi halálozások viszonylatában [35]. Tanulmányukból megállapítható, hogy összehasonlítva a többi légszennyezővel a szénmonoxid szennyezésből bekövetkező halálozási arány a legnagyobb.

#### Kén-dioxid:

Belélegezve az emberre és az állatra is egyaránt ártalmas. Vizes közegben kénsavat alkot, amely izgatja, irritálja az orr-, toroknyálkahártyát és a tüdőt, köhögést, váladékképződést és asztmás rohamokat okozhat. A véráramba jutva a hemoglobint szulf-hemoglobinná alakítja, gátolja az oxigénfelvételt. Krónikus esetben a SO<sub>2</sub> légzőszervi betegségeket, pl. hörghurutot (bronchitist) okozhat. [36] Malek Bentayeb és munkatársai [37] is a légúti megbetegedések és a környezeti levegő összefüggéseit vizsgálták. Vizsgálataikat 3 éven keresztül Franciaországban, Bordeaux-ban és annak környékén végezték el kettőezer-egyszáznegy 65 évnél idősebb emberen, akik közül 61% volt nő és 39% volt férfi. A résztvevők 5,4%-a dohányzott vagy kevesebb, mint 6 hónapja hagyta abba, 30%-a (ex dohányzó) több mint 6 hónapja hagyta abba és 64%-uk nem dohányzott. A résztvevők 14%-a nehézlégzéssel rendelkezett, 11%-uknál folytonos volt a köhögés, 7%-uk szenvedett asztmában, 6%-uknál az elmúlt év során általános volt a zihálás, 3%-nál fordult elő légszomj és 7%-nál pedig szívelégtelenség. Megállapították, hogy a szív és légzőszervi rendszer a leginkább érintett, valamint, hogy a légszennyezettség emelkedésével a bronchitis vagy a bronchitis szerű tünetek megjelenése emelkedett.

#### Nitrogén-dioxid:

A nitrogén-dioxid nagyon reakcióképes, erősen oxidáló tulajdonságú gáz. A nedves légúti nyálkahártyához kötődve salétromos- ill. salétromsavvá alakul, és helyileg károsítja a szöveteket. Nagy koncentrációban kötő- és nyálkahártya izgalmat, köhögési, hányási ingert, fejfájást, szédülést okoz. A véráramba jutva a hemoglobint methemoglobinná oxidálja, így az nem képes az oxigént szállítani [36]. Több kutatás is igazolta, hogy a NO<sub>2</sub> potenciális kockázati tényező a stroke előfordulásánál, mint például Paul J. Villeneuve és munkatársai, akik a kórházi „látogatások” és a légszennyezés emelkedése közötti kapcsolatot vizsgálták. [38]. Elemzésükben összesen 12 422 sztrókos megbetegedéssel küzdő, 65 évnél idősebb személy vett részt 1992 és 2002 között. Eredményeik azt mutatják, hogy a megnövekedett

gépjármű forgalomból - aminek köszönhetően magasabb volt a NO<sub>2</sub> koncentráció a levegőben - a strokeos megbetegedések száma emelkedett. Egy másik kutatócsoport Hongyan Li és Xiaoyun Xin [39], vizsgálatai szerint a nitrogén-dioxid szennyezés potenciális kockázati tényezőként azonosítható a vaszkuláris demencia szempontjából. Zorana J. Anderson és munkatársai projektjük [40] során a stroke és a hosszú távú expozíció kültéri levegő szennyezés kapcsolatát vizsgálták, melynek során megállapították, hogy a hosszú távú közlekedés által kibocsátott légszennyezés hozzájárulhat az ischameas stroke kialakulásához.

#### Ózon:

Az ózon egy erősen oxidáló tulajdonságú gáz, mely tulajdonságának köszönhetően irritálja a szemet, az orr- és toroknyálkahártyát, köhögést és fejfájást okoz, csökkenti a tüdőkapacitást. Kardiovaszkuláris hatásai többek között, hogy csökkenti a szívfrekvencia variabilitást és szívbetegeknél növeli a pitvarfibrilláció kialakulásának esélyét. [36] Uwe Schlink és kutatócsoportja [41] statisztikai modellt készítve elemezte, valamint értékelt az egészségügyi hatásait a talajközeli ózonnak egy 2006-ban megjelent cikkükben. Eredményeik megerősítették, hogy szignifikáns összefüggés van a magas ózon légszennyezés, valamint a gyermekeknél jelentkező léguti megbetegedések számának növekedése között. S.Sousa, M Alvin-Ferraz és F. Martins [42] az ózonszennyezés következtében bekövetkező gyermekkori asztmás megbetegedéseket vizsgálta. Matthew Neidell és Patrick Kinney is egy hasonló kutatást végzett el Dél-Kaliforniában. Összefüggéseket kerestek az ózonszint emelkedés és az asztmás megbetegedések számának növekedése között [43].

#### Szálló por:

A szálló por hatása sokban függ a porrészecske összetételétől, vízdékonyságától és átmérőjétől. A kis átmérőjű részecskék akár nehézfémeket is képesek megkötni a felületükön, ezzel növelve a toxicitásukat. Tüdőbe jutva gyulladást válthatnak ki, a légzőszervi megbetegedésben szenvedők esetén a tünetek súlyosbodása következhet be. A szívbe és az érrendszerbe kerülve, pedig növekszik a trombózis kialakulásának veszélye [36]. A kardiovaszkuláris hatások és az emelkedő szálló por koncentráció közötti összefüggéssel kapcsolatban számos publikáció látott napvilágot, mint például: [44] [45] [46]. N.A.H Jannsen és munkatársai a napi halálozások és a szálló por közötti összefüggéseket vizsgálta. Vizsgálataikban a PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, valamint PM<sub>2,5-10</sub> tartományokban végezték el. Eredményeik azt mutatják, hogy mind a PM<sub>10</sub> és PM<sub>2,5</sub> szignifikáns összefüggést mutat a mortalitással.

Például ha  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ -rel emelkedik meg a levegő szálló por tartalma az előző naphoz képest, akkor  $\text{PM}_{2,5}$  esetén 0,8%-al nagyobb az esély a bekövetkező halálra és 0,6%-al pedig a  $\text{PM}_{10}$  esetén [47].

### **3.2. Városi légszennyezettség**

A fejezet célja ismertetni a városi területeken kialakuló légszennyezettséget befolyásoló társadalmi és természeti (klimatikus) folyamatokat, úgy mint az urbanizáció, valamint a városi klímát befolyásoló tényezők (hősziget, városi szél).

#### **3.2.1. A városok szerepe, urbanizáció**

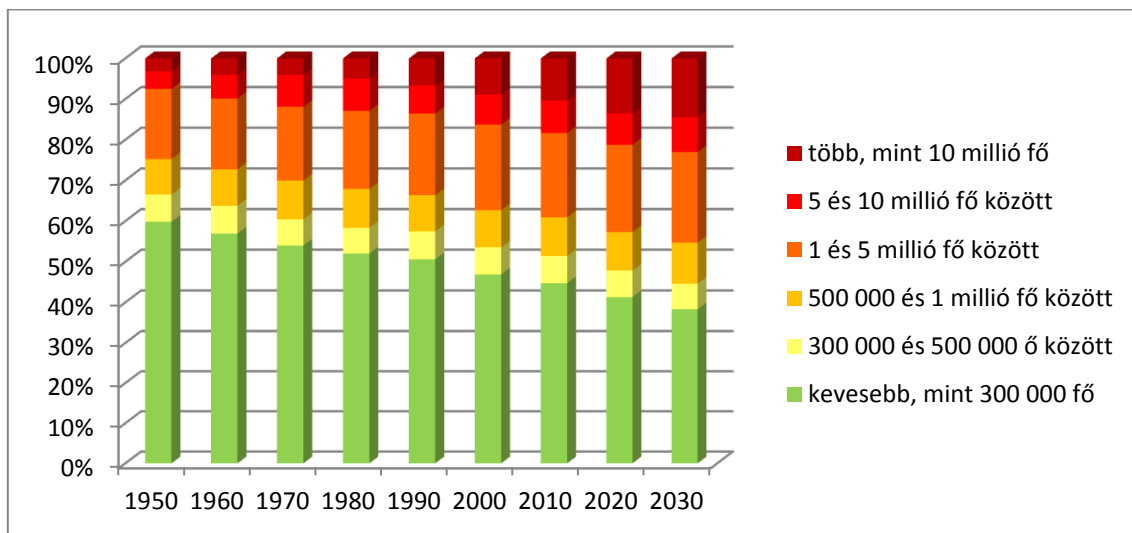
A városok kialakulása a X. század környékén a mezőgazdasági árutermelés kibontakozásának és a kereskedelem fellendülésének köszönhetően kezdődött el. Az első európai városok jellemzően a római kori városok helyén, igazgatási központoknál (királyi, püspöki székhely), kereskedelmi utak találkozásánál, kikötőknél és folyami átkelőknél, valamint földrajzi tájegységek találkozásánál alakultak ki. Legelőször Itáliában és dél-Franciaországban, majd Észak-Franciaországban, Angliában és német területeken jelentek meg. Majd az ipari forradalmaknak köszönhetően a nemzetgazdaság egészében végbemenő robbanásszerű fejlődés, modernizáció alakult ki, amely változásokat indított el a társadalomban, a demográfia, az infrastruktúra, a művészetek, valamint a tudományok terén. Nagymértékben fejlődtek a régi városok és újak is kialakultak s átrendeződött a lakosság térbeli elhelyezkedése.

Az első urbanizációs hullám Észak-Amerikában és Európában zajlott le 1750 és 1950 között, amikor 10%-ról 52%-ra emelkedett a városi lakosság aránya a vidékivel szemben. A második hullám a kevésbé fejlett régiókra terjedt ki, ahol előreláthatólag az 1950-es 18%-os szintről 2030-ra 56% lesz a városiak aránya. Előrejelzések szerint 2000 és 2030 között Ázsia városi lakossága 1.36 milliárdról 2.64 milliárdra fog emelkedni, míg Afrika városi lakossága 294 millió főre 742 millió főre, valamint Latin-Amerikában és a Karib térségben lakó városi polgárok száma meghaladja majd a 609 millió főt [2].

Az UNFPA 2007-es „*A városi növekedés potenciáljának felszabadítása*” [2] című tanulmányában leírja, hogy 2008-ban a Föld lakosságának mintegy 50%-a megközelítőleg 3,3 milliárd ember élt kisebb vagy nagyobb városokban (3. ábra). A leginkább urbanizált régiók közé tartozik Észak-Amerika (a lakosság 82%-a él városi területen), Latin-Amerika és a Karib-térség (80%) és Európa (73%). Ezzel ellentétben Afrikában és Ázsiában többnyire a

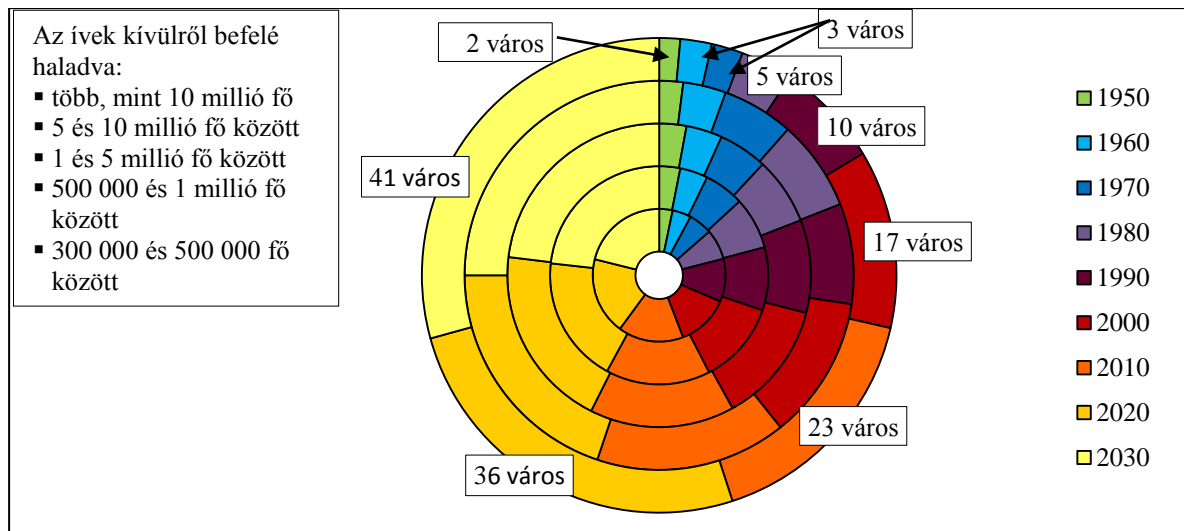


vidéken, csak a lakosság 40-48%-a él városi területen. Minden régióban az urbanizáció mértéke várhatóan erősödni fog a következő évtizedben, de leginkább Afrikában és Ázsiában, ahol az előrejelzések szerint 2050-re a városi lakosság aránya 56-64% körüli lesz [48]. Az UNFPA tanulmánya szerint világ szinten 2030-ra várhatóan a városi lakosság száma meghaladja majd a 4,9 milliárd főt [2].



3. ábra: A világ városi lakosságának megoszlása kategóriák szerint (Adatok forrása: World Urbanization Prospects: The 2014 Revision)

Az 1970-es években a világon mindössze két megaváros (10 millió főnél nagyobb lakosság számmal rendelkező település) volt: Tokyó és New York. Napjainkra ez a szám számottevően megemelkedett. Ázsiában tizenhárom, Latin- Amerikában négy, Afrikában, Európában és Észak Amerikában is egyenként kettő megaváros található. [48]. 2030-ra az előrejelzések szerint 41 lesz. Az előrejelzések szerint továbbra is Tokyó lesz a világ legnagyobb városa (37 millió lakos), s ezt követi majd szorosán Delhi (36 millió lakos). Míg évtizedekkel ezelőtt a világ legnagyobb agglomerációs zónával rendelkező városait a fejlettebb régiókban találhattuk meg, addig a mai nagyvárosok főleg a Föld déli részén koncentrálódnak. A leggyorsabban növekvő közepes méretű városok (1 milliónál kevesebb lakosság) Ázsiában és Afrikában helyezkednek el. (4. ábra) [48].



4. ábra: A városok számának változása kategóriák szerint (Adatok forrása: World Urbanization Prospects: The 2014 Revision)

Jászberényi értekezése alapján az urbanizációs folyamatot négy különböző szakaszra lehet felosztani, amelyek a következők [49]:

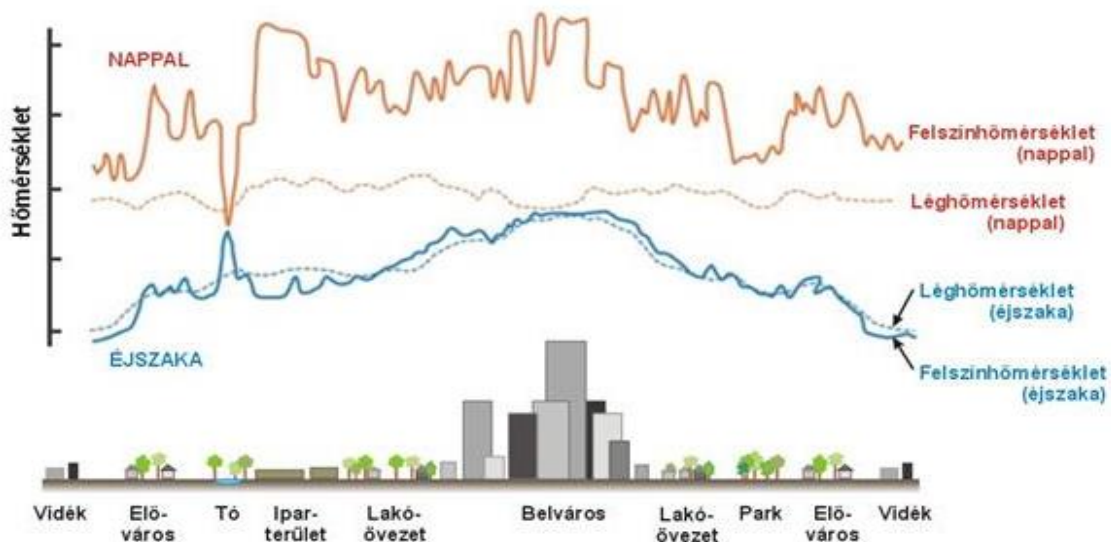
- 1) Városrobbanás: Jellemzője, hogy gyorsan nő a nagyvárosok és közepes városok népessége, nő a munkahelyek száma, megjelennek a lakótelepek.
- 2) Szuburbanizáció: Először az 1920-30-as években figyelték meg Amerikában, amikor jelentősen nagyszámú lakos költözött ki a városokból a városkörnyékekre. Alvóvárosok és ingázási övezetek kialakulása.
- 3) Dezurbanizáció: A fejlettebb országokban az 1970-es évektől kezdve, Közép és Kelet Európában pedig az 1990-es években volt megfigyelhető a folyamat. A munkahelyeket és szolgáltatásokat folyamatosan helyezték ki a városkörnyékekre, míg a városmagok átalakultak üzleti negyedé.
- 4) Reurbanizáció: A városok belső területeinek a korábban lepusztult városnegyedeknek a rehabilitációja, a történelmi városmagok újjáéledése. Lakásfelújítások, tömb rehabilitációk, új szolgáltató létesítmények építése.

### 3.2.2. A városi klímát befolyásoló tényezők

A városi klíma a természetes és az antropogén tényezők kölcsönhatásának az eredménye. Jelentősen befolyásolják többek között a természetföldrajzi adottságok, mint például a magasság, a domborzat, a felszínborítás és a vízfelületek, valamint a település elhelyezkedése az adott éghajlati zónában továbbá mérete, szerkezete és gazdaságának jellege.

## Városi hősziget

Mivel a beépített területek aránya magas (városközpontok, utcák, épületek stb.), valamint a mesterséges anyagok (beton, aszfalt, stb.) fizikai jellemzői jelentősen eltérnek a növényzettel, vagy talajjal borított felszínektől, ezért elmondható, hogy a városi épületek hőkapacitása magasabb. Úgynevezett hő-sziget, vagyis Urban Heat Island (UHI) alakul ki, amely a nagy városoknál igen jelentős mértékű [50].



5. ábra: A városi hősziget nappali és éjszakai keresztmetszete a lég hőmérséklet és a felszínhőmérséklet alapján. (Forrás: [http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/alkalmazott\\_es\\_varosklimatologia/ch12.html](http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/alkalmazott_es_varosklimatologia/ch12.html))

Ahogy az 5. ábra is megfigyelhető a lég hőmérsékleti adatokból meghatározott városi hősziget általában napnyugta után 2-3 órával a legintenzívebb, a felszínhőmérsékleti adatokból meghatározott hősziget intenzitása viszont napközben, dél körül a legnagyobb.

A hősziget jelenséget a nyolcvanas évek óta több kutatócsoport is tanulmányozta, mint például C. Yagüe és E. Zurita [51], Arthur H. Rosenfeld és társai [52] vagy F. Buasto és társai [53]. 2011-ben a közép-európai térség 8 városi és nagyvárosi régiója (Bologna nagyvárosi része, Velence városi folyosója, Bécs, Stuttgart, Lódz és Varsó, Ljubljana, Budapest, Prága) egy közös Városi Hősziget elnevezésű projektet indított el. A program célja többek között az ember által előidézett városi hősziget és a globális klímaváltozás közti összefüggések feltárása, egy nemzetközi hálózat létrehozása a folyamatok folyamatos figyelemmel kísérése érdekében, megfelelő stratégia kidolgozása a hősziget enyhítésére, valamint a földhasználati tervezési eszközök és a polgári védelmi rendszerek oly módon történő továbbfejlesztése, amely illeszkedik a mitigációs és adaptációs stratégiákhoz [54].

### Városok vízháztartása

A városi klímát befolyásoló második tényező a növényzet hiánya és a csapadék elvezetése. Mivel a járdákról, úttestekről, vagyis a burkolt felszínekről a csapadék szinte azonnal a csatornahálózatba jut, valamint télen a havat eltakarítják, így a talajba való beszivárgás, és a párolgás minimális lesz. A száraz időszakokban emiatt kevesebb víz áll rendelkezésre a hűtő hatású párologtatáshoz, ami fokozza a városi légkör felmelegedését. A párolgás alacsony mértékének következményeképpen a relatív nedvesség a települések magas beépítésű negyedeiben jóval alacsonyabb, mint a peremvárosi, nagy zöldterületekkel bíró városrészekben. A különbség különösen gyenge légmozgású időszakokban jelentős, ilyenkor több százalékpontnyi különbség adódik a városnegyedek légnedvessége között, szélsőséges esetekben a belvárosi részekben mesterséges sivatagi klíma is kialakulhat, 20-50%-os relatív páratartalom értékekkel [55].

### Városi szél

A harmadik klímaalakító tényező a légmozgás módosulása. Az épületek geometriája nagymértékben módosítja a szél irányát, erősségét és a légáramlási viszonyokat. A felszín tagoltsága, a nagyobb felszín-közeli sűrűlódás következtében a városokban a szél sebességének eloszlása igen különböző lehet. Egyes esetekben előfordulhat növekedés (kanyon hatás), más esetekben viszont határozott csökkenést figyeltek meg. Landsberg kutatásai szerint az évi átlagos szélesebesség a felszín közelében 20-30%-kal, a heves szellőkések sebessége 10-20%-kal mérséklődik [56].

A nagyvárosok légáramlási képének egyik jellegzetes törvényszerűsége a városi hő-sziget hatására létrejövő sajátos városi szélrendszer, az úgynevezett városi szél. Kialakulása a magas beépítettséggel rendelkező területeken akkor következik be, ha a belterületeken felmelegedett levegő erőteljesen feláramlik és helyére a település külterületéről, illetve a városkörnyéki térségből hűvösebb tiszta levegő áramlik [57].

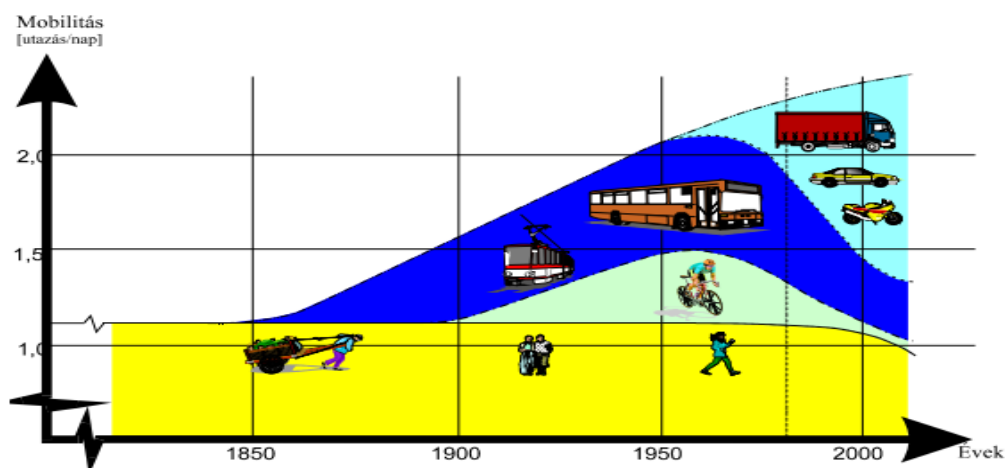
### **3.3. Városi közlekedés, mobilitás**

A következő fejezetben a társadalom átalakulásával kapcsolatos technikai folyamatokat, tendenciákat ismertetem, mint a mobilitás, a közlekedési rendszer, települési közlekedés fejlődése, amelyek hatással vannak a városi levegő minőségére.

### 3.3.1. Mobilitás

A szükséglet az emberi élet anyagi és kulturális feltételeinek biztosításához szükséges javak és szolgáltatások iránti hiányérzet (élelmiszer, ruhanemű, lakóhely, újság, könyv, mosószer, papír, bútor, közlekedési eszköz). Ezek az igények létünk fenntartásának alapelemeitől kezdve egészen a különleges szolgáltatásokig sok formában jelentkeznek. Ilyen szükséglet a mobilitás is, amely a latin mobilitas szóból származik, s amely emberek, eszközök gyors átcsoportosításának képességét és lehetőségét jelenti.

A XX. században a társadalmi és gazdasági fejlődés mellett az emberek helyváltoztatás iránti igénye is növekedett. A mobilitás növekedése köszönhető a közlekedés technikai fejlődésének s a modern közlekedési eszközöknek, melyek segítségével az emberek több és hosszabb utazást képesek megtenni (6. ábra).



6. ábra: A mobilitás változása és közlekedés technika fejlődése [58]

Az ábrán is megfigyelhető a mobilitás növekedés során a közúti motorizáció folyamatának eredményeként egyre több utazás történik személygépkocsival, amely a személygépkocsik számának emelkedésével jár, ami egyrészt több, új utazást indukál másrészt a hagyományos tömegközlekedési eszközök utas számát csökkenti.

### 3.3.2. A közlekedési rendszer főbb jellemzői

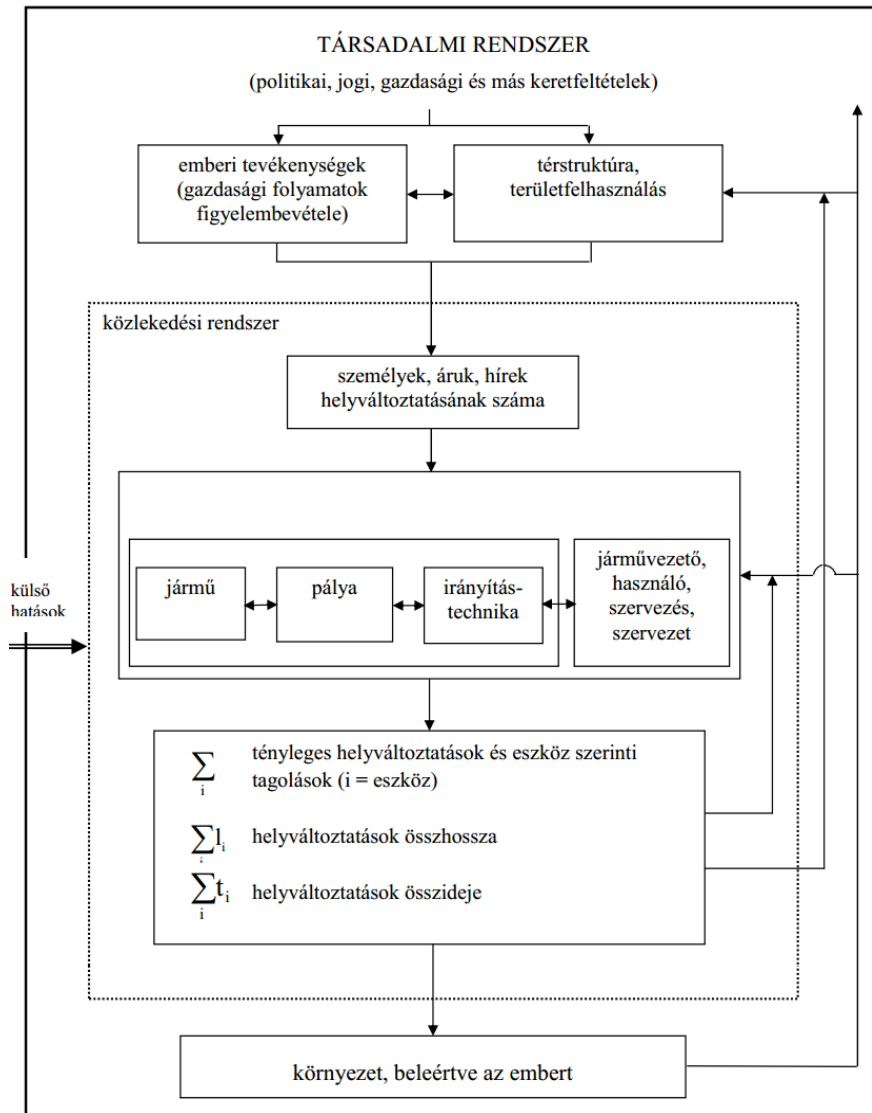
A közlekedés szó alatt személyek vagy anyagi javak önálló vagy tömeges, egyéni vagy szervezett és többnyire rendszeres helyváltoztatását értjük, amelyhez humán erőforrás és

technikai eszköz egyaránt szükséges. A közlekedési tevékenység középpontjában az ember áll, mint a folyamat működtetője és szervezője. A folyamat egyik részét képezik passzív elemként a közlekedési tevékenység tárgyai, amelyeknek célhoz juttatása a tevékenység lényege. A rendszer másik részét a technikai elemek alkotják, amelyek a közlekedést jellemző speciális eszközök, azaz a járművek, a közlekedési pályák, a hajtóerő (energia), és a kiszolgáló létesítmények [59].

3. táblázat: A közlekedési rendszerek csoportosítása [60]

<b>A szállítás tárgya</b>	<b>Szervezési forma</b>	<b>Helyváltoztatási cél</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ személyközlekedés</li> <li>⇒ áruszállítás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ egyéni közlekedés</li> <li>⇒ közforgalmú (tömeg, közösségi) közlekedés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ lakóhely</li> <li>⇒ hivatás</li> <li>⇒ szolgálati tevékenység</li> <li>⇒ képzés</li> <li>⇒ bevásárlás/ellátás</li> <li>⇒ szolgáltatás</li> <li>⇒ szabadidő</li> <li>⇒ pihenés</li> <li>⇒ gazdaság</li> </ul>
<b>Közlekedési/szállító eszközök</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ gyalog</li> <li>⇒ kerékpár</li> <li>⇒ motorkerékpár</li> <li>⇒ személygépkocsi (vezető)</li> <li>⇒ személygépkocsi (utas)</li> <li>⇒ egyéb gépjármű</li> <li>⇒ taxi</li> <li>⇒ autóbusz</li> <li>⇒ trolibusz</li> <li>⇒ villamos</li> <li>⇒ városi vasút</li> <li>⇒ földalatti vasút</li> <li>⇒ elővárosi vasút</li> <li>⇒ távolsági vasút</li> <li>⇒ kötélvasút</li> <li>⇒ hegyi-vasút</li> <li>⇒ hajó</li> <li>⇒ repülőgép</li> <li>⇒ lift</li> <li>⇒ mozgólépcső</li> <li>⇒ mozgójárda</li> </ul>	<b>Közlekedési pálya</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ közúti</li> <li>⇒ vasúti</li> <li>⇒ vízi</li> <li>⇒ légi</li> <li>⇒ vezetékek</li> <li>⇒ csővezeték</li> <li>⇒ szállítószalag</li> <li>⇒ mozgójárda</li> </ul>	
	<b>Mozgási folyamat</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ mozgó forgalom</li> <li>⇒ álló forgalom</li> </ul>	
	<b>Távolsági tartomány</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ rövid távú (helyi)</li> <li>⇒ közepes távú (regionális)</li> <li>⇒ távolsági (helyközi)</li> </ul>	
	<b>Települési vonatkozás</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ belső forgalom</li> <li>⇒ induló és célforgalom</li> <li>⇒ átmenő forgalom</li> </ul>	

A keresleti és kínálati viszonyokat a közlekedést meghatározó rendszerkapcsolatok egymással kölcsönhatásban alakítják ki. A 7. ábra is mutatja, a társadalmi rendszer keretfeltételei a külső hatásokkal együtt eredményezik a közlekedési rendszer legfontosabb jellemző paramétereit, a helyváltoztatások számát és eszközök szerinti megoszlását, a helyváltoztatások teljes hosszát és összes idejét.



7. ábra: A közlekedési rendszer jellemzői [60]

### 3.3.3. A városi közlekedés fejlődésének tendenciái

Dr. Prileszky István és munkatársai [61] megállapították, hogy az egyéni és közösségi közlekedés versengésénél figyelembe kell venni a települési adottságokat.

A város szerkezet szempontjából fontos: a város alakja, a város szerkezete, közlekedési hálózatának geometriája, a közlekedési ártalmaktól kiemelten védendő zónák elhelyezkedése, az intenzív intézményközpontok közlekedési kapcsolatai, a nagyobb bevásárlóközpontok, piacok kapcsolatai és a lakóövezetek, lakótelepek közlekedési kapcsolatai [58].

A város közlekedési rendszerének szempontjából fontos: a közúthálózat adottságai, a tömegközlekedés adottságai, a parkolás adottságai, a parkolási rendszerek, a kerékpáros közlekedés lehetőségei, a gyalogos közlekedés lehetőségei, valamint a közlekedési ágak térbeli és időbeli kapcsolatai [58].

Az EU közlekedési ágazata számokban, statisztikai zsebkönyvben [62] részletesen leírja, hogy 1995 és 2010 között eltelt 15 évben a személyszállítás az EU-27 tagállamában milyen mértékű változást, alakult át. A személyautóval történő szállítás továbbra is a legmeghatározóbb szállítási forma, hiszen több 70%-a a szállításnak ezen utón történik. Megfigyelhető, hogy motorkerékpárral, autóbusszal és vonattal történő közlekedés részaránya folyamatosan csökkent. Míg motorkerékpár és vonat esetén 0,5% és 0,3%-os visszaesésről beszélhetünk addig autóbusz esetén ez már több mint, 1,5%.

4. táblázat: Személyszállítás alakulása az EU-27 tagállamában %-ban kifejezve [62]

Év	Személyautó	Motorkerékpár	Busz	Vonat	Villamos+metró	Levegő	Tenger
1995	73,30	2,30	9,30	6,50	1,30	6,50	0,80
1996	73,30	2,30	9,20	6,40	1,30	6,70	0,80
1997	73,30	2,30	9,10	6,30	1,30	7,00	0,80
1998	73,40	2,30	9,00	6,10	1,30	7,20	0,80
1999	73,50	2,30	8,80	6,10	1,30	7,30	0,70
2000	73,50	1,80	8,70	6,20	1,30	7,70	0,70
2001	73,90	1,90	8,60	6,20	1,30	7,50	0,70
2002	74,50	1,90	8,40	6,00	1,30	7,30	0,70
2003	74,50	1,90	8,40	5,80	1,30	7,50	0,70
2004	74,20	1,90	8,30	5,80	1,30	7,80	0,60
2005	73,40	2,00	8,30	6,00	1,30	8,40	0,60
2006	73,30	1,90	8,10	6,10	1,30	8,60	0,60
2007	73,10	1,80	8,20	6,10	1,30	8,80	0,60
2008	73,10	1,90	8,20	6,30	1,40	8,60	0,60
2009	74,20	1,90	7,90	6,10	1,40	8,00	0,60
2010	74,10	1,80	7,80	6,20	1,40	8,00	0,60

Az adatokból jól látszik továbbá, hogy tagállamokban a vizsgált 15 évben a villamossal és metróval, valamint levegőben történő közlekedés részaránya erősödést mutatott. Előbbi két esetben 1,3%-ról 1,4%-ra, míg utóbbi esetében egy lényegesen nagyobb növekedés következett be 6,5%-ról 8%-ra.



### 3.4. Légszennyező anyagok monitorozása

#### 3.4.1. Monitoring rendszerek céljai, fajtái és elemei

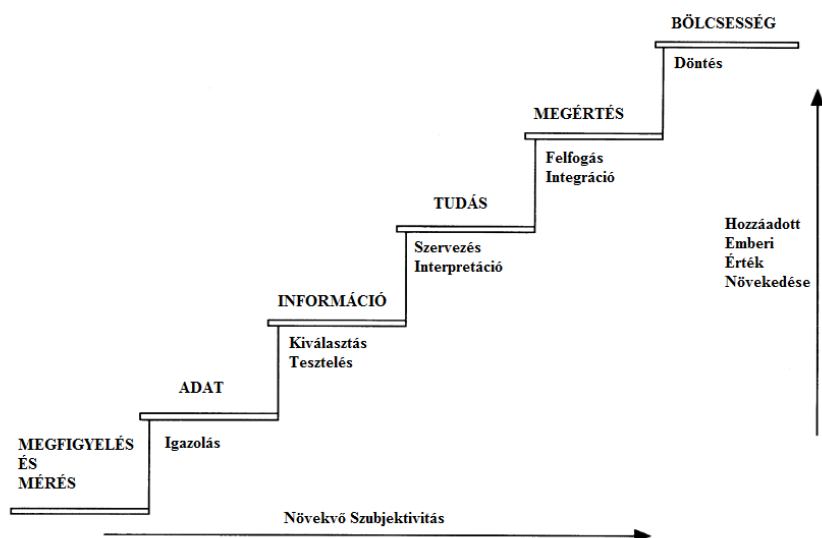
A fejezet ismertetése Janick F. Artiola és munkatársai [63], Gyulai István [64], Bulla Miklós [65], valamint Óvári Mihály [66] továbbá Domokos Endre és munkatársai [67] által írt könyvekből szerzett ismeretek alapján végeztem el.

A környezet állapotának megismeréséhez, valamint a környezeti tevékenységek tervezéséhez szükséges, hogy a megfelelő adatok és információk a rendelkezésünkre álljanak. Maga a környezet az élő szervezeteket körülvevő biotikus (élő) és abiotikus (élettelen) földi tartományok együttes rendszere. Elemei a litoszféra (földkéreg), hidroszféra (vízburok), atmoszféra (léggör), bioszféra (élővilág), valamint a táj és az épített környezet. A környezeti monitorozás fogalma ezen elemek állapotában bekövetkező változások nyomon követését, valamint kidolgozott, objektív mérésen alapuló, rendszeres megfigyelést jelenti (5. táblázat).

5. táblázat: Környezeti monitoring rendszerek

Léggör	Hidrometeorológia Csapadék, sugárzás, szél, léghőmérséklet, párolgás	Levegő minőségi monitoring Városi levegő minősége, vonalmenti források, transzmissziós mérések
Víz	Vízrajzi monitoring Vízállás, vízhozam, vízhőmérséklet, hordalék, jégviszonyok	
	Felszíni vízminőségi monitoring Fizikai, kémiai, hidrobiológiai	Természetvédelmi monitoring Vizes élőhelyek Felszín alatti vizektől függő szárazföldi élőhelyek
Szárazföld	Felszín alatti víz, mennyiségi, minőségi monitoring Talajvíz, rétegvíz, karszt, források	Kármentesítési monitoring Szennyezett területek
Talaj	Talaj és földtani monitoring Talajtípusok, hidrogeológia	

Tudományos szempontból ez azt jelenti, hogy olyan adatokat gyűjtünk, amelyek segítségével az ismeretek bővíthetőek (8. ábra). A környezeti monitoringnak megvan a maga szerepe, amelyet az első három lépcsőfok határoz meg. A cél (tárgy) megfigyelése olyan adatokat produkál, amelyek segítségével értékes információkhoz juthatunk. Az ilyen információkból származó tudás egy probléma vagy helyzet jobb megértéshez vezet, ami javítja az esélyét tájékozottabb döntéshozatalnak. Azonban fontos azt is megjegyezni, hogy más tényezők – a politikai, gazdasági és társadalmi tényezők – befolyással lehetnek a döntéshozatalban.



8. ábra: A tudás „lépcsőfokai” [63]

Monitoringgal kapcsolatban igen komoly elvárás, hogy biztosítva legyen az azonos minőségű és összehasonlítható adatok előállítása, ezért szükséges a nemzetközi és a nemzeti jogszabályokat, előírásokat, rendeleteket, valamint irányelveket alkalmazni. A jelenleg hatályban – levegő monitoringgal kapcsolatos – irányelvek és rendeletek listája a következő:

- 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről
- 4/2002. (X. 7.) KvVM rendelet a légszennyezettségi agglomerációk és zónák kijelöléséről
- 4/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről
- 6/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint és a helyhez kötött légszennyező források kibocsátásának vizsgálatával, ellenőrzésével, értékelésével kapcsolatos szabályokról
- 2008/50/EK Európai Tanács és Parlament irányelve a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról
- 1996/62/EK Európai Tanács és Parlament irányelve a környezeti levegő minőségének vizsgálatáról és ellenőrzéséről

A monitoring tevékenységből származó információkat számtalan különböző módon fel lehet használni, s emiatt a monitoring célja is többféle lehet, mint

- a szennyezőanyag koncentráció térbeli és időbeli eloszlásának vizsgálata

- a változásokat előidéző okok feltárása
- a változásokból eredően fellépő folyamatok mértékének és időbeli alakulásának nyomon követése
- a beavatkozások hatásainak elemzése
- statisztikai jellemzők származtatása (átlag, szélsőérték...)
- határértékek megsértésének ellenőrzése
- havária események nyomon követése
- a folyamatok értékelése alapján prognózisok készítése.

Monitorozás csoportosítása különböző szempontok alapján:

A monitoring egység és a környezeti elem geometriai távolsága alapján három csoportba osztható a monitorozás:

- Űr monitoring: vagy más néven szatellit monitoringról akkor beszélhetünk, ha a monitoring mérő részegysége meghatározott geometriai pályán mozgó műhold fedélzetén helyezkedik el. Ebben az esetben az érzékelő műszerek a tárgyról visszavert, vagy azok által kibocsátott sugárzást rögzítik az elektromágneses spektrumban. Ezzel a fajta monitorozással jól kimutatható és bizonyítható minden környezeti degradáció, nyomon követhetők az erózió, a defláció, továbbá fontos információk nyerhetők az ipar és a közlekedés légszennyező hatásáról is.
- Légi monitoring: Földközeli monitoringról beszélünk abban az esetben, ha az információgyűjtő eszközt léghajók, hő ballonok, repülőgépek, helikopterek, pilóta nélküli robot- és modellrepülőgépek, stb. fedélzetén helyezik el.
- Földfelszíni környezeti monitoring: jellemzője, hogy a vizsgált környezeti elem és a mérési adatot szolgáltató eszköz közötti függőleges távolság elhanyagolható.

Monitorozás csoportosítása a mintavételezés és az analízator által szolgáltatott jel időbeli és térbeli távolsága alapján:

- Off-line monitoring: A környezeti elemből történő mintavétel és az analízis térben és időben is elkülönül egymástól, vagyis egy reprezentatív mintavételi helyen - időben ismétlődően - mintát vesznek, a mintát az analízist végző gyűjtőhelyre szállítják, majd ott végzik el az analízist.

- On-line monitoring: Itt a környezeti elem adott jellemzőjének meghatározásához folyamatosan áramló előkészített, kondicionált, reprezentatív minta szükséges. Az analízis néhány méterrel távolabb, folyamatosan működő analizátorral történik.
- In-line monitoring: A környezeti elem adott jellemzőjének értéke közvetlenül a környezeti elemekben keletkezik, ami azt jelenti, hogy az analizátor közvetlenül a környezeti elemekben van, s csak a mérés eredményét továbbítja.

Monitorozás csoportosítása a mintavételezés és az analizátor által szolgáltatott jel formátuma alapján:

- Analóg mérési eredmény: mérendő mennyiség és az azzal arányos analóg jel között közel lineáris kapcsolat áll fenn
- Digitális mérési eredmény: a mérendő mennyiséggel arányos analóg jelet a megjelenítés előtt analóg/digitális (A/D konverter) jelátalakítóval digitális formába alakítják.

Monitorozás csoportosítása a monitoring egység adatszolgáltatási jellege alapján:

- Emisszió monitoring
- Immisszió monitoring

Monitorozás csoportosítása környezeti elem alapján:

- Környezeti levegő monitoring
- Vízmonitoring (felszíni- és felszín alatti víz)
- Talajmonitoring
- Tájmonitoring
- Épített környezet monitoring
- stb.

A monitoring térbeli és időbeli léptéke

A környezeti monitoring középpontjában a megfigyelés, minta és mérés áll, valamint ezek kapcsolata a tér és idő skálával.

Időbeli skálán megkülönböztetünk:

- Geológiai (>10.000 év),
- Generációs – élethosszig tartó (20-100 év),
- Éves (>1 év),
- Szezonális (>4 hónap),
- Napi (>24 óra),
- Órás (>60 perc)
- Pillanatnyi (<1 másodperc) mérést.

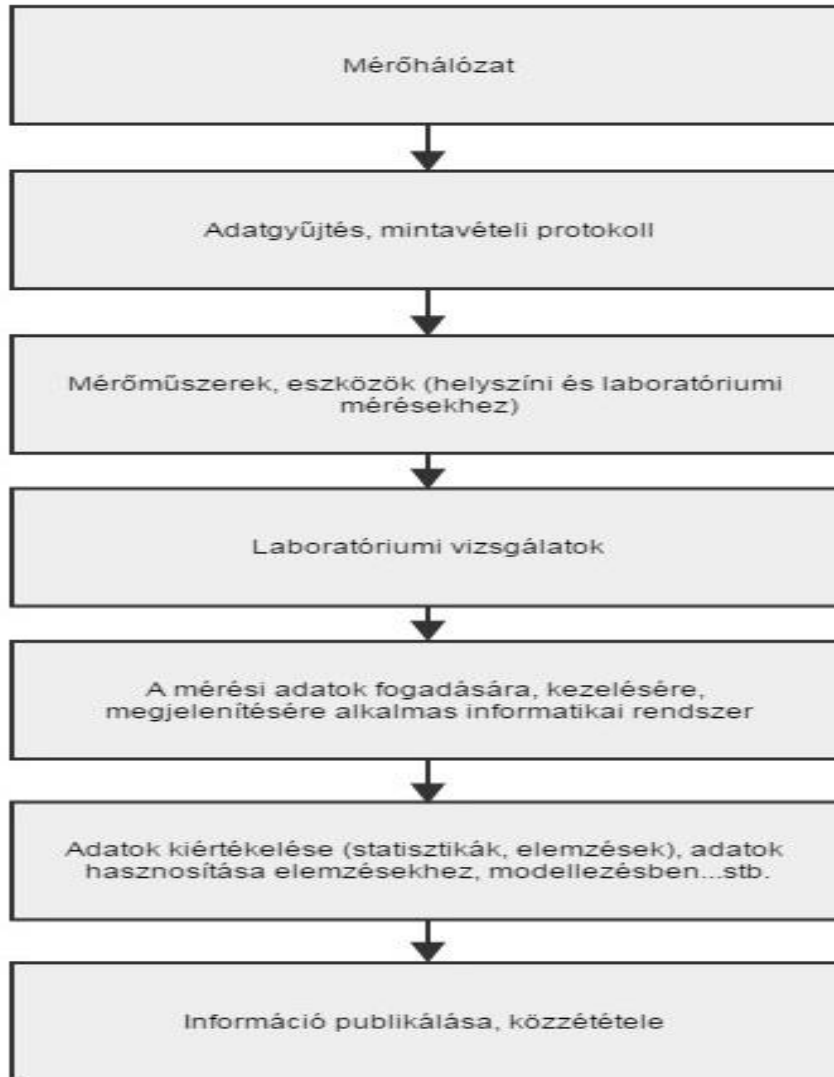
Térbeli skálán a mérések a következők:

- Globális - Föld (>10.000 km),
- Mezo – földrész, ország, állam (>100 km),
- Középső – folyó, tó (>1km),
- Terület – mezőgazdasági terület, hulladéklerakó (>1m),
- Makro – állatok, növények (>1mm),
- Mikro – talaj részecskék, baktériumok, gombák (>1 µm),
- Ultra mikro – vírusok, molekulák (>1nm)
- Atomos – atomok, szubatomi részecskék (<1nm).

A cél ismeretében meg kell teremteni, biztosítani kell a szükséges feltételeket. Először is meg kell határozni a rendszer elemeit (9. ábra), mint a mintavétel helyét, idejét, a minták számát, a mintavételi pontok sűrűségét, a mintavétel időbeni gyakoriságát, a minták típusát, a mintavételezési módszereket, a minta mennyiségét, a minták kezelését és tartósítását, a vizsgálati módszereket, stb.

Meghatározandó paraméterek

A vizsgálandó jellemzők (minőségi, mennyiségi paraméterek) meghatározása. Ezek leggyakrabban fizikai és kémiai paraméterek, amelyek információt szolgáltatnak az adott környezeti elemből vett minta tulajdonságairól vagy összetételéről.



9. ábra: Monitoring rendszer elemei

Minták típusa:

Megkülönböztetünk pontmintát, átlagmintát és sorozatmintát. Ha a meghatározandó paraméter térbeli eloszlása inhomogén és több mintavételi pontot kell kijelölni, az ezekről származó minták neve pontminta. Az átlagminta lehet térbeli és időbeli, utóbbi esetében az eredményt azonos pontban, de időben egymás után vett minták összekeverésével kapjuk. Míg a sorozatminta különböző időpontokban és/vagy helyeken vett pont- és átlagmintákból áll.

Mintavételi helyek kiválasztása

A mintavételi helyeket olyan módon kell megválasztani, hogy azok jellemzőek legyenek a mintázandó elemre, s reprezentálják a megmintázandó sokaságot, valamint megfeleljenek a jogszabályban rögzített szempontoknak (6. táblázat). Figyelembe kell venni továbbá a

mintavételi hely közelében található jelentősebb szennyező forrásokat, valamint a mintavételi hely megközelíthetőségét és az esetleges zavaró hatásokat, mint fák, épületek.

6. táblázat: Levegőkémiai mérőállomások típusai [68]

Mérőhely	Elhelyezkedés	Mérések célja
globális háttérszennyezettség-mérő állomás	emberi tevékenységektől (közvetlen forrásoktól) távoli területen	üvegházgázok globális koncentrációjának meghatározása
regionális háttérszennyezettség-mérő állomás	mezőgazdasági terület, külterület	üvegházgázok és egyéb összetevők regionális koncentrációjának, kicserélődésének meghatározása, regionális terjedés becslése, nagyskálájú emisszió becslése
lokális állomások	ipari közlekedési lakóövezeti	légszennyezők koncentrációjának mérések, emisszió becslések, egészségügyi hatások vizsgálata
ipari emisszió mérések	iparterület (pl. kéményben)	pontos kibocsátás mérések
egyéb emisszió-mérő állomás	forgalmas utak mellett,	emissziók becslése, hatások elemzése

#### Mintavételi gyakoriság:

Az időbeli változások léptéke szabja meg a szükséges mérésszámot a mintavételi gyakoriságnál. Fontos figyelembeveendő szempont, hogy a mérést annál gyakrabban kell végezni, minél változékonyabb a vizsgálandó jellemző. Így megkülönböztetünk azonos időközönkénti mintázást – ahol a nevéből is következik, a mintavétel azonos időközönként történik – valamint rétegzett mintavételezést, amit nem egyenletes eloszlás esetén a kis valószínűségű (pl. rövid idejű, extrém) események méréséhez használnak.

#### 3.4.2. Levegő monitoring hálózatok

A szennyezett környezeti levegő közvetlen és/vagy közvetett módon képes befolyásolni az élőlények egészségét, valamint az épített környezet minőségét. Ahhoz azonban, hogy a környezetben lezajló természetes és mesterséges folyamatokat megértésük, azok hatásait vizsgálni tudjuk elengedhetetlen ezeknek a folyamatoknak a rendszeres megfigyelése, valamint a bekövetkező változások nyomon követése.

7. táblázatban és 8. táblázatban összefoglaltam a levegővel kapcsolatos hazai és nemzetközi adatgyűjtő rendszereket, valamint ezek céljait.

7. táblázat: Levegő adatbázisok (Magyarország)

Adatbázis neve	Célja	Jellemzés
Pont- és területi légszennyező források Magyarországon	Hatósági döntéshozatalt (engedélyezés, bírság) támogató rendszer	Negyedéves bevallásokon alapuló adatsorok a határértékkel jellemzett szennyezőanyagokra
Közlekedési források Magyarországon	Vonalforrások légszennyező hatásának leírása	A hazai fő- és mellékútvonalakon közlekedő járművek által kibocsátott szennyezőanyagok emissziós leltára.
<b>Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat</b>	A hazai települések levegőminőségének egészségügyi célú vizsgálata.	24 órás (manuális) és órás (automata) átlagolású levegőminőségi adatsorok. manuális: 109 település, Automata: 32 településen 59 állomás.
Meteorológiai adatbázis	A légszennyező anyagok terjedését és ülepedését meghatározó meteorológiai alap- és származtatott adatsorok	Földfelszíni és magassági adatsorok mérések, illetve diagnosztikai modellek számításai alapján
Háttérszennyezettség-mérő állomások adatsorai	A regionális háttérlevegő minőségének monitoringja	24 órás (az ózon esetében 1 órás) átlagolású adatsorok a levegő, a csapadék és a légköri aeroszol minőségére vonatkozóan 4 állomáson.

8. táblázat: Levegő kémiai mérőhálózatok (Globális) [68]

Adatbázis neve	Leírás
Cooperative Program for Monitoring and Evaluation of Long Range Transmission of Air Pollution in Europe (EMEP)	Európai Megfigyelési és kiértékelő Program, a légszennyező anyagok emissziójának, immissziójának, határokon átnyúló terjedésének és ülepedésének mérése, modellezése, továbbá a lakosság és a döntéshozók számára megbízható információk szolgáltatása
Centre on Emission Inventories and Projections (CEIP)	EMEP alprogram, Emisszió leltár és előrejelzés a legfontosabb légszennyezők emisszió katasztereit állítja elő 0,1 fokos térbeli felbontásban a tagállamok adatai alapján Európára.
Chemical Coordinating Centre (CCC)	EMEP alprogram, Kémiai koordinációs központ Az immisszió méréseket ez az alprogram végzi. Európa-szerte több száz regionális háttérszennyezettség-mérő és csapadékkémiai állomás tartozik a mérőrendszerhez. A mérések kiterjednek a savasodást okozó komponensekre, az ózonnra, a nehézfémekre és az aeroszol részecskékre.
Meteorological Synthesizing Centre – West (MSC-W)	Meteorológiai központ, nyugat, Oslo, Norvégia, Itt végzik a szennyezőanyagok légköri terjedésének szimulációit. Az emisszió és immisszió adatok felhasználásával becslik és elemzik az egyes országok hozzájárulását a nagytávolságú szennyezőanyag transzportjához.
Meteorological Synthesizing Centre – East (MSC-E)	Meteorológiai központ, kelet, Moszkva, Oroszországi Föderáció, Itt végzik a szennyezőanyagok légköri terjedésének szimulációit. Az emisszió és immisszió adatok felhasználásával becslik és elemzik az egyes országok hozzájárulását a nagytávolságú szennyezőanyag transzportjához.
Centre for Integrated Assessment Modelling (CIAM)	Modell-értékelő központ, Bécs, Ausztria a légszennyezés és az éghajlatváltozás közti összefüggéseket elemzi modellszimulációk segítségével
World Meteorological Organisation – Global Atmosphere Watch (WMO-GAW)	Meteorológiai Világszervezet Globális Megfigyelőrendszere, az alábbi mennyiségek globális léptékű megfigyelése zajlik: légköri aeroszol, üvegházhatású gázok, reaktív gázok, ózon, uv sugárzás, csapadékkémia
European Environment Information and Observation Network (EIONET)	EU Európai Környezetvédelmi Ügynökség, A Közösségnek és a tagországoknak nyújtott segítség, hogy a környezet javításáról, a környezetvédelmi szempontoknak a gazdasági szakpolitikába való integrálásáról, valamint a fenntarthatóság felé való haladásról kellő tájékozottság mellett megalapozottan hozhassanak döntéseket



### 3.4.3. Szenzorok alkalmazása a levegő monitoring rendszerekben

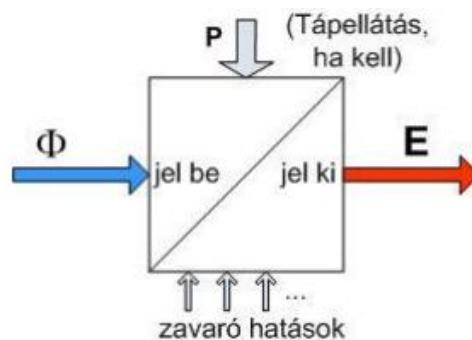
Az érzékelőkkel kapcsolatos alapfogalmakat, csoportosításokat, valamint a szenzorok általános jellemzőit Dr. Pödör Bálint Mikroelektronikai érzékelők I. jegyzete [69], Dr. Halmi Attila Szenzor és aktuátortechnika jegyzete [70], valamint Bánlaci Pál és Lovas Antal Szenzorika és anyagai jegyzete [71] alapján fogom ismertetni.

A szenzorok olyan jelátalakítók, amelyek mennyiséget, tulajdonságot, vagy feltételt, villamos jellé alakítanak át, valamint egyes esetekben pneumatikussá [72]. Másképpen megfogalmazva, a szenzor egy mérési értékfelvevő, mérésérzékelő detektor, mérőváltó, mérőátalakító, mérés jeladó, ami egy fizikai mennyiséget más, felhasználhatóbb jellé alakít át [73], ahogyan azt a következő 10. ábra is szemlélteti.



10. ábra: Szenzor mérési elve

A szenzorok általános funkcionális modelljének rajzjelét 11. ábra szemléltetem.



11. ábra: A szenzor funkcionális modellje ( $\Phi$  jelöli a mérendő tulajdonságot, mennyiséget, E az érzékelő kimeneti jelét, a P pedig a tápforrást) [74]

Az érzékelők csoportosítása, osztályozása különböző szempontok szerint történhet. Megkülönböztethetjük őket a mérendő mennyiség szerint, a jel természete alapján, a jel kialakításában szereplő kölcsönhatás szerint vagy aszerint, hogy szükséges-e külső energiaforrás vagy sem.

Mérendő mennyiség szerint megkülönböztetünk:

- mechanikai érzékelőket (helyzet, elmozdulás, erő, gyorsulás, nyomás, áramlási sebesség, fordulatszám, ultrahang és hanghullámok, stb.),

- termikus mennyiségek (hőmérséklet, hőmennyiség, hőáram, stb.)
- Elektromos és mágneses mennyiségek (elektromos és mágneses tér, töltés, feszültség, áram, ellenállás, stb.)
- Sugárzásérzékelők (elektromágneses sugárzás (rádió-, mikrohullám, fény, Röntgen és gamma-sugárzás),
- Kémiai mennyiségek (semleges és töltött (ion) komponensek koncentrációja és aktivitása különböző közegekben, stb.)
- Biológiai (orvosbiológiai) érzékelők (élő szervezetekre jellemző speciális paraméterek, stb.).

Mérési jel természete alapján a csoportok a következők:

- Elektromos jel
- Kémiai jel
- Mágneses jel
- Mechanikai jel
- Sugárzási jel
- Termikus jel

A jelkialakításban szerepet játszó kölcsönhatás típusa szerint pedig lehetnek:

- fizikai érzékelők,
- kémiai érzékelők,
- bioérzékelők.

A szenzorok fontosabb műszaki jellemzői a statikus jelleggörbe, az érzékenység, valamint mérési tartomány. A szenzor statikus jelleggörbéje vagy más néven karakterisztikája az a kapcsolat, függvény, ami megadja a kimeneten szolgáltatott jel értékét a mérendő tulajdonság, azaz a bemeneti jel értéke szerint. A szenzor érzékenysége alatt a mérendő paraméter legkisebb változását értjük (minél nagyobb a szenzor érzékenysége, annál kisebb változást tudunk vele érzékelni). A szenzor érzékenysége nem más, mint a karakterisztika meredeksége. A levegőminőségi méréseknél esetenként ppm (szén-monoxid), de elsősorban ppb nagyságrendű érzékenységre van szükség. A mérési tartomány: a szenzor kimenete a bemeneti jelet hűen, az elméleti karakterisztika szerint csak egy korlátozott tartományban

követi. A más néven üzemi tartományt kis jelek esetében pl. a megszólalási küszöb, vagy zajjelenségek határolhatják. A túl nagy jelek az ún. túlterhelési tartományba esnek, a kimenet túlvezérlődik, telítésbe megy. Egy kritikus szint felett az érzékelő katasztrofálisan tönkremehet.

A szenzorok három leggyakoribb hibája a tranziens hiba, a hiszterézis, valamint a zaj. Tranziens hiba, amikor a szenzor lassabban tudja csak követni az általa mért tulajdonságok változásait, mint ahogy azok bekövetkeznek, így mire az érzékelő beáll egy tulajdonságnak megfelelő értékre, a tulajdonság már nem azt az értéket mutatja. A hiszterézis a szenzor érzékenysége a mért jellemző növekedése és csökkenése esetén változó. A zaj a szenzor által adott jel véletlenszerűen változik, mely változást nem a mérendő tulajdonság, hanem a szenzor hibája idéz elő.

A szenzorok további hibái lehetnek még többek között a nemlinearitás (a kimenet nem egyenesen arányos a bemenettel.), a lassú válasz (a kimenet lassan éri el az állandósult állapotot (nagy időállandó)), a szűk működési tartomány, az alacsony érzékenység: a szenzor csak nagy bemenetekre ad választ, illetve az interferencia (a kimenet környezeti hatások, pl. elektromágneses sugárzás vagy nedvesség hatására változik).

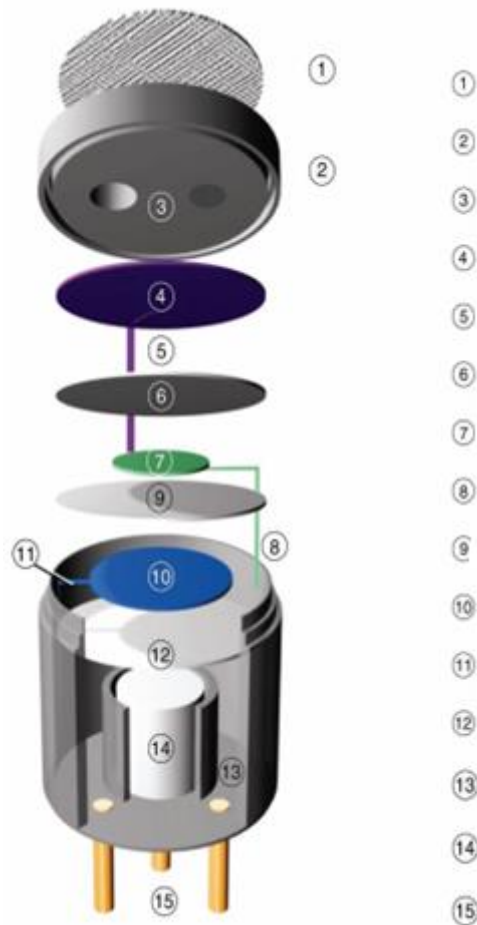
Dolgozatban a kémiai szenzorok kerülnek ismertetésre, mert e szenzorok képesek kémiai komponensek minőségét és/vagy mennyiségét folyadék vagy gázfázisban érzékelni és valós időben elektromos jellé konvertálni. A kémiai szenzorokon belül is az elektrokémiai érzékelők kerülnek tárgyalásra mivel ezen szenzorok az egyik leggyakoribb típusú érzékelők, amelyeket a levegőtisztaság védelemben alkalmaznak.

Mivel a mai modern társadalomban számos olyan analitikai kémiai feladat van, amelyet nem lehet hagyományos laboratóriumi, analitikai kémiai műszerezettséggel megoldani - ennek okai többek között az analitikai mérőrendszer nem megfelelő mérete, a túl hosszú analízisidő vagy az analízis túl magas költsége – szükségessé vált olyan rendszerek kifejlesztése, amelyekkel lehetséges minimális vagy minta-előkészítés nélküli gyors helyszíni vizsgálatok elvégzése, amelyek magukban hordozzák az azonnali információszerzés és ez által a gyors beavatkozás lehetőségét.

Számos anyagspecifikus elektrokémiai érzékelő áll rendelkezésre toxikus gázok, mint például  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{NO}_2$  és  $\text{O}_3$  mérésére. Ezeknek az érzékelőknek kicsi a méretük, valamint az áramigényük. Felbontóképességük a jelenlévő szennyezés és az érzékelő függvényében +/- 1 ppm vagy kisebb. Széles hőmérséklettartományban (-40 és +50°C) alkalmazhatóak. Kialakításuknak köszönhetően minimálisra csökken a zavaró

szennyeződések hatása, s ez által a lehető legspecifikusan kaphatjuk meg a mért gáz adatait.

Egy tipikus elektrokémiai érzékelő felépítése látható a következő.



12. ábra: Tipikus elektrokémiai érzékelő felépítése (1. külső nedvesség elleni terelőfal, 2. diffúziós terelőfal, 3. diffúziós kapilláris, 4. H<sub>2</sub>S érzékelő elektród, 5. áramszedő (érzékelő), 6. elválasztó, 7. referenciaelektród, 8. áramszedő (érzékelő), 9. elválasztó, 10. számláló elektród, 11. áramszedő (számláló), 12. elválasztó, 13. elektrolittároló, 14. kanóc, 15. konnektor csatlakozók) Forrás: [75]

#### 2.3.4. Szenzorok a gyakorlatban

A környezettudatosság folyamatos erősödésével a lakosságot egyre inkább érdekli a saját lakókörnyezetének állapota, legfőképpen a környezeti levegő minősége. Világszerte már szinte mindenütt működnek telepített automata monitorállomások, azonban ezek egy városban belül csak egy kis területről szolgáltatnak adatokat. A távérzékelési technológiák rohamos fejlődésének s a mikroprocesszorok (CPU), mikrokontrollerek ( $\mu$ C, MCU), mikroprogramozható logikai kapuk (FPGA), digitális jelfeldolgozó egységek (DSP) megjelenésének és széleskörű elterjedésének köszönhetően a szenzorok jelentős fejlődésen

mentek keresztül, s így egyre megbízhatóbb módszerekkel vagyunk képesek a környezetünk vizsgálatára. Ennek köszönhetően számos projekt látott napvilágot az utóbbi években, úgy, mint az AIR (Area's Immediate Reading), a MESSAGE (Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments), a Common Sense vagy az Elm (Boston).

A mai városok azonban komplex rendszerek, amelyeket nagyszámú lakosság, vállalkozások, különféle közlekedési módok, kommunikációs hálózatok, szolgáltatások és közművek jellemeznek [76]. A megnövekedett népességgel a különböző műszaki, társadalmi, gazdasági és szervezeti problémák veszélyeztetik leginkább a gazdasági és környezeti fenntarthatóságot a városokban [77]. A gyors növekedés több városban folyamatos forgalmi torlódásokat, valamint egyre növekvő környezetszennyezést váltott ki. Az okos városok – vagyis Smart Cities – ezekre a problémákra adhatnak megoldási alternatívát [76]. A szakirodalom több projektet is bemutat, amelyek közül néhányat a következő táblázatban (9. táblázat) ismertetek.

9. táblázat: Szektorok szerinti célkitűzések és azok leírása

Szektor	Fő célkitűzés	Leírás	Szakirodalom
Közvilágítás	Környezetbarát közvilágítás	Közterületek megvilágítása több funkcióval utcai lámpákkal (pl. levegő szennyezés mérése, Wi-Fi kapcsolat a közvetlen ellenőrzéshez)	[78], [79], [80]
Hulladékgazdálkodás	Fenntartható hulladékgazdálkodás	A hulladékok gyűjtése, újrahasznosítása és ártalmatlanítása oly módon, hogy az se a környezetet se az embert ne veszélyeztesse.	[78], [81],
Környezet	Fenntarthatóság növelése	Kibocsátások ellenőrzése, valamint ösztönző döntések minőségének javítása a környezeti elemek érdekében.	[81], [82], [83]
Közlekedés, mobilitás és logisztika	Fenntartható tömegközlekedés.	Logisztika és szállítás optimalizálása városi területeken figyelembe véve a közlekedési feltételeket, valamint az energiafogyasztást.	[80], [81], [84], [85]
Élelmiszer- és mezőgazdaság	Fenntartható, környezetbarát mezőgazdaság.	Vezeték nélküli érzékelő hálózatok segítségével hatékonyabb növénytermesztés. A különböző érzékelőkkel (pl: páratartalom, hőmérséklet, fényérzékelők) a fagyveszély és az esetleges növénybetegségek esélye csökkenthető.	[84], [81], [86] [87]

A különböző egy – egy szektorra kiterjedő projektek mellett komplett okos város tervek is vannak, ahol nem csak a legmodernebb infokommunikációs és elemzési technológiákat alkalmazzák a közlekedésszervezésben, hanem megfelelő oktatást és egészségügyi ellátást is biztosítanak, vagy például hatékonyan képesek beszélni az adókat. Az ilyen okos város projekteket a következő táblázatban (10. táblázat) mutatom be.

10. táblázat: Okos Város Projektek

Okos Város	Leírás	Szakirodalom
Amsterdam	12 teszt projekt (fenntartható lakáshatás, munka, mobilitás)	[88], [89],
Barcelona	Fenntartható és hatékonyabb energia hálózat,	[90], [91],
Malaga	Energiahatékonyság növelése, CO <sub>2</sub> kibocsátás csökkentése, megújuló energiaforrások használatának növelése	[92], [93], [94], [95],
Songdo	Öko város prototípus, középpontban a fenntarthatóság	[96], [97], [98]
Dongtan City	Öko város prototípus, cél a zéró emisszió, teljes újrafelhasználás,	[99] [100], [101]
Masdar City	Öko város prototípus, innovatív várostervezés, teljes újrafelhasználás	[99], [102], [103], [104], [105], [106]
Salamanca	Légszennyezés és Közlekedés monitorozása	[107],
Santander	Környezeti paraméterek monitorozása (hőmérséklet, zaj, CO)	[108], [109], [110], [111]
Belgrád	tömegközlekedés monitorozása és az abból származó légszennyezés csökkentése	[112], [113],
Szolnok	közvilágítás optimalizálás, optimál energia-mendzsmen, vízminőség-mérő állomás, közösségi közlekedés	[114]

### 3.5. Légszennyezés modellezése

#### 3.5.1. A modell és modellezés fogalma, modellek csoportosítása, modellezés folyamata

A modell szó eredete a latin modus, modulus szó, amely mértéket, módot, módozatot jelent. A modell szót azonban a mindennapi élet számos területén alkalmazzák. A modell szóval jelölik többek között

- egyes termékek mintáit. Mintadarab, amely gyártáshoz mintául használt, mintául készített tárgy (pl. ruhamodell, gépmodell);
- közlekedési eszközök kicsinyített másolatát. Kicsinyített jármű, repülőgép, hajó, autó, amely egy valódi járművöz hasonló kisebb szerkezet (pl. Matchbox);
- épületek geometriailag hű kisebbítését. Kicsinyített más, amely egy felépítendő épület, kisebb méretarányban elkészített formája;
- az olyan szemléltető eszközöket, amelyek valamely nagyon nagy vagy nagyon kicsi objektum oktatási bemutatására szolgálnak (pl. a hidrogénatom modellje, vagy a planetárium).
- továbbá azt a rendszert, amely egy másik rendszerben végbemenő jelenséghez hasonló jelenséget valósít meg [115].

Egységes definíciója nincs. A különböző tudományterületeken más és másként értelmezik a modell fogalmát. Stoff a modellt úgy definiálja, mint olyan „eszmeileg elképzelt vagy anyagilag realizált rendszer, amely visszatükrözve vagy reprodukálva a kutatás objektumát képes helyettesíteni” [116]. Dr. Szűcs Ervin: A modellezés elmélete és gyakorlata [115] jegyzetében összegyűjtötte a különböző értelmező szótárakban és lexikonokban fellelhető definíciókat, amelyek a következők:

### Matematikai Kislexikon

Egy axiómarendszer axiómái a benne szereplő alapelemeket és az azok közti relációkat implicit módon definiálják. Ha ténylegesen találunk olyan matematikai objektumokat és explicite leírható kapcsolatokat, amelyek a megadott axiómarendszert kielégítik, akkor az objektumok e rendszerét, kapcsolataikkal együtt, az axiómarendszer modelljének nevezzük. Egyugyanazon axiómarendszernek többféle modellje is lehetséges.

### Műszaki Lexikon

1. Valamilyen rendszer leképezése hasonló viselkedésű, de más eszközökkel. A fizikai modell hasonló fizikai elveket használ, pl. áramló közegek helyett villamos áramokat, tároló elemek helyett kondenzátorokat. A matematikai modell a rendszer matematikai leírása, olyan matematikai összefüggések felírása, mely hasonló eredményt ad a számítás során, mint a rendszer a benne folyó átalakítással ... 2. (építészet): Épület-együtteseknek (településeknek), épületeknek és építményeknek, valamint fontosabb részleteiknek valóságghű kicsinyített mása ... 3. (textilipar) Új ruházati cikkek bemutatásra készített mintadarabja

### Természettudományi Lexikon

1. (fizika) bonyolult fizikai rendszerek egyszerűsített, minden részletében áttekinthető, gyakorlatilag megvalósított vagy szemléletesen elképzelt, arányosan lekicsinyített vagy felnagyított, matematikailag szabatosan leírható, idealizált mása, amely többé-kevésbé helyesen szemlélteti a vizsgált rendszer vagy folyamat geometriai, kinetikai, dinamikai vagy más fizikai, illetve sztochasztikus sajátosságait. A modellalkotásnál tudatában kell lenni annak, hogy a modell nem azonos a vizsgált rendszerrel vagy folyamattal, és nem tükrözi maradéktalanul összes tulajdonságait. A helyesen alkotott modell mégis magán viseli az objektív anyagi világban meglévő rendszer vagy lejátszódó folyamat fontos ismérveit, és így

alkalmas a döntő törvényszerűségek feltárására és szemléltetésére. A kutatás megfelelő stádiumában a modellalkotásnak nagy a heurisztikus jelentősége, és a modelleknek a fizika fejlődése során mindig fontos szerepe volt. ... 2. Valamely tárgynak (rendszerint kicsinyített) mása.

### **A modellek csoportosítása**

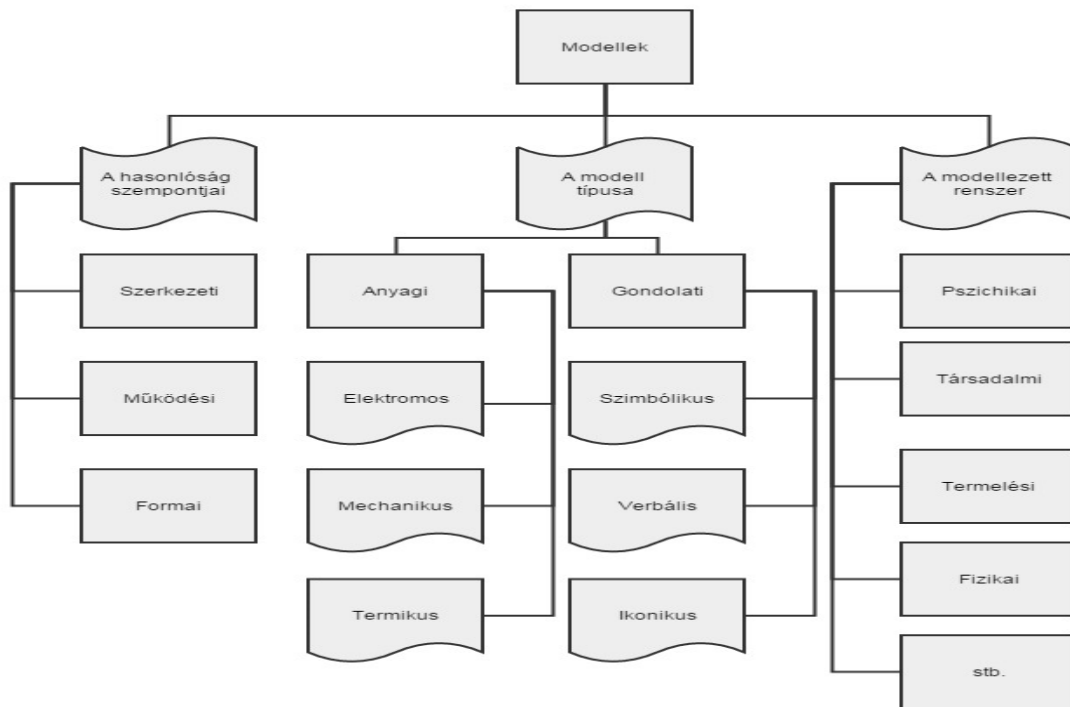
A modellek csoportosítása többféleképpen is lehetséges aszerint, hogy milyen hasonlóság illetve különbség van a modellezett és a modellt szolgáltató objektum között, ahogyan ezt a 13. ábra és 14. ábra is szemlélteti. A modellek típusa kétfajta lehet: anyagi és gondolati. Míg előbbi esetén egy olyan konkrét dolgot modellezünk, amit meg is lehet valósítani, eszközkhöz tudunk kapcsolni, addig utóbbinál olyat modellezünk, amelyet konkrét fizikai eszközkhöz nem tudunk kapcsolni (pl.: verbális, szimbolikus modell).

A gondolati vagy más néven eszmei modellek az ember által felállított logikai kapcsolat szerint „működnek”. Módszerüket, formájukat illetően szubjektívek, tartalmukat nézve objektívek [117]. Alapvetően két fajtát különböztetünk meg. Az egyik a fogalmi modell, amelynek fő eszköze a gondolati kísérlet, s legfőbb célja a kísérletek, tapasztalatok elemzése, értelmezése továbbá a hipotézisek ellenőrzése, valamint újabb hipotézisek felállítása. A másik az úgynevezett jelképes modell, amely hasonlít a fogalmi modellre abban, hogy meglévő kísérleteket, tapasztalatokat vesz alapul, azonban ezeket valamilyen jelrendszerben ábrázolja (táblázat, grafikus megjelenítés) [118].

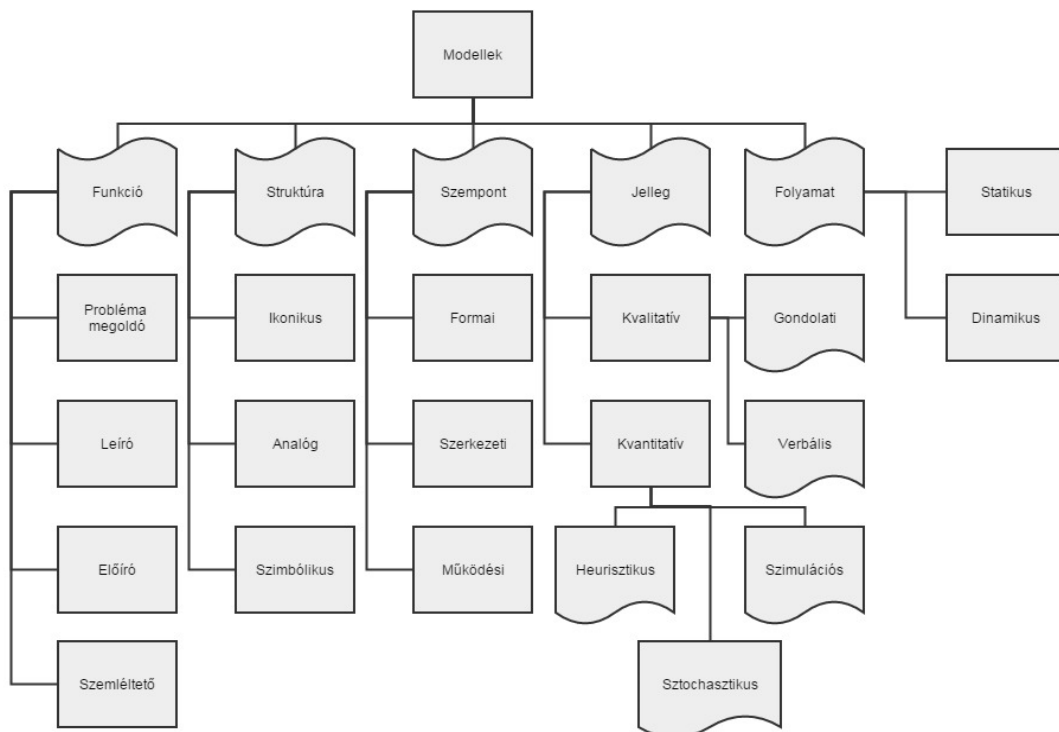
Az anyagi modelleknek vagy más néven az absztrahált modelleknek három fajtáját különbözteti meg a szakirodalom: a geometriai modelleket, a fizikai modelleket és a természeti modelleket. Geometriai modellek vagy homológ modellek esetén a modell geometriailag hasonló az eredeti rendszerhez, körülötte (vagy benne) hasonló vagy az adott vizsgálat szempontjából ugyanolyan fizikai jelenségek játszódnak le [117]. Fizikai modell vagy más néven analóg modell esetén az eredetivel megegyező fizikai természetű modellen tanulmányozzuk a rendszerben lejátszódó jelenséget, vagyis a modellben ugyanazokat a fizikai törvényeket használjuk fel, mint az eredetivel megegyező folyamatban. Az eredeti és a modell hasonlóságának a feltétele, hogy a matematikai leírásuknak meg kell egyeznie [118]. A természetes modelleknél a természetben végbemenő folyamatok és jelenségek általánosítását értjük modell alatt, valamint a természeti jelenségek megfigyelését abban az



esetben, ha a tapasztalatokat felhasználjuk akár természeti, akár technikai folyamatok „előrejelzésére” [118].



13. ábra: Modellek csoportosítása 1. [119]



14. ábra: Modellek csoportosítása 2. [119]

A légszennyezéssel kapcsolatos modelleket több szempont szerint is lehet csoportosítani. Egyik lehetőség a modell által használt koordináta-rendszer alapján történő felosztás. A földhöz rögzített koordináta-rendszert használó modelleket Euler-i, míg a mozgó levegővel együtt haladó koordináta-rendszert alkalmazókat Lagrange-i szemléletűeknek tekintjük.

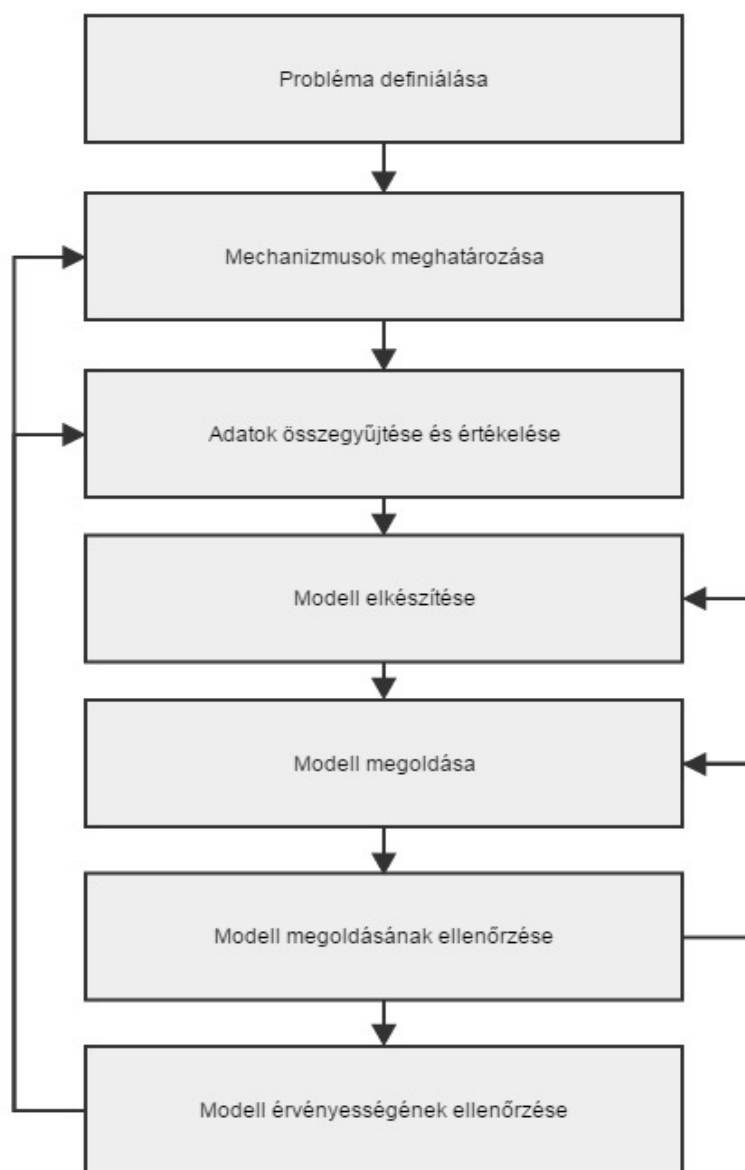
Szepesi D., (1996) a légszennyezési modelleket az alábbi módon csoportosította [120]:

- Egyszerű determinisztikus modellek. Empirikus adatokon alapulnak, legegyszerűbb formában csak levegőminőségi indexet használnak, fejlettebb formában (területi forrás, illetve rollback modellek) az emisszió és az immisszió között írnak fel, tapasztalati alapokra építve, lineáris kapcsolatot.
- Statisztikus modellek. Egyidejűleg észlelt meteorológiai és levegőminőségi adatokra épített matematikai statisztikai modellek.
- Füstfáklya és puff modellek. Folyamatos és pillanatszerű kibocsátások lokális hatásának követésére alkalmas modellek.
- Box és multibox modellek. A diffúzióegyenlet integrális formáját használó modellek, amelyek egy-egy terület feletti „levegődoboz”-ban lévő szennyezőanyag-mennyiség változását írják le, a boxon belül homogén eloszlás feltételezésével.
- Grid modellek. A transzport- és diffúzióegyenlet véges differenciákkal való megoldásával dolgozó numerikus modellek.
- Részecske modellek. Vegyes szemléletű modellek, amelyek a szennyezőanyag mozgását követik egy Euler-i hálózat (grid) rendszeren keresztül.
- Fizikai modellek. Szélcsatornában, folyadék térben megépített léptékhű modellezés.
- Regionális modellek. Több száz kilométeren keresztül követik a szennyezőanyag eljutását. Legjellemzőbb a Lagrange-i trajektória modell, de ide sorolhatók némely grid, illetve részecske modellek is.

### **Modellezés folyamata**

Egy modell elkészítésének a folyamatát hét lépésre lehet bontani (15. ábra). Az első lépés a probléma definiálása, melynek során a modellezési feladat formális leírása készül (a rendszer körülhatárolása, modellezési cél meghatározása, folyamatábra készítés). A második lépés a mechanizmusok meghatározása, vagyis a leírandó jelenségek összegyűjtése. A harmadik lépésben történik az adatok összegyűjtése és értékelése. A negyedik és egyben a modellezés

fő lépése a modell elkészítése. Ebben a lépésben történik a modellezési feltételek megfogalmazása, a modellegyenletek felírása, valamint a kezdeti és peremfeltételek megadása. Az ötödik lépésben történik a modell megoldása, majd ezután következik a modell megoldásának ellenőrzése, a modell verifikációja. Végül hetedik és egyben utolsó lépésként pedig a modell érvényességének ellenőrzése történik. Ez a lépés két al-lépést tartalmaz. Az egyik a modell kalibrációja, amelynek során a modellbeli bizonytalan/ismeretlen paraméterek meghatározása történik paraméterbecsléssel, a másik pedig a modell validációja, mikor a modellt és a valós rendszer mérésekkel meghatározott viselkedését hasonlítjuk össze statisztikai módszerekkel [121].



15. ábra: Modellezés folyamata [121].

### **3.5.2. Matematikai modell és modellezés fogalma, modellek csoportosítása, modellalkotási eljárások**

Ahhoz, hogy a matematikai modellezésről, valamint a különböző modellek fajtáiról beszélni tudjunk, először meg kell határoznunk, hogy mit értünk a matematikai modell fogalma alatt. A különböző szakirodalmak alapján általában véve a következő meghatározást vehetjük alapul:

„Egy matematikai modell matematikai egyenletek (struktúrák) tetszőleges teljes és konzisztens halmaza, amelyet arra terveztek, hogy más tulajdonságok összességét, azok prototípusát írja le. A prototípus lehet fizikai, biológiai, társadalmi, pszichológiai vagy konceptuális (vázlatos) tulajdonság, vagy esetleg éppen egy másik matematikai modell.” [122]

Az Oxford Matematika kislexikon megfogalmazása alapján: „A mindennapi életben a valóságos világ különböző problémáival találkozhatunk, melyek lehetnek például fizikai, gazdasági vagy mérnöki jellegűek, és amelyek megoldásában a matematika felhasználása segítségünkre lehet. De ahhoz, hogy a matematikát alkalmazzuk, gyakran egy absztrakt matematikai problémát kell megfogalmaznunk, melyet az eredeti probléma matematikai modelljének nevezünk, és amely közelítőleg leírja a való életből vett problémát. Egy ilyen modell felállításához gyakran egyszerűsítésekre és feltevésekre van szükség. A matematikai probléma ezek után vizsgálható, esetleg megoldható. Az eredmények interpretálása a valóságos világ fogalmaival megfelelő választ adhat az eredeti problémára.” [123].

#### **Modellek besorolása**

Az alábbi matematikai modelleket, modell párokat definiálhatjuk a rendszer viselkedését leíró matematikai összefüggések jellege, vagy meghatározásának módszere szerint:

##### Statikus és dinamikus modellek

A statikus vagy más néven stacionárius, állandósult vagy egyensúlyi modell egy olyan modell, amely egy időben nem változó állapotot ír le, vagyis a rendszer állapota algebrai egyenletekkel, valamint idő szerinti deriváltakat nem tartalmazó differenciálegyenletekkel írható fel.

A dinamikus modellek ezzel szemben viszont a vizsgált rendszer, folyamat jellemzőinek időbeni változását írják le közönséges vagy parciális differenciálegyenletek/ekel, vagy egyenletrendszerek segítségével [117].

### Lineáris és nemlineáris modellek

Lineáris modellek esetén a modellben csak a változók és deriváltjaik szerepelnek, általában állandó együtthatókkal szorozva. Egy matematikai modell akkor, és csak akkor lehet lineáris, ha a folyamatot leíró egyenletrendszer kielégíti a szuperpozíció elvét, amiből pedig következik, hogy lineáris matematikai modellek alakjai csak a homogén, lineáris egyenletek, illetve egyenletrendszerek lehet.

Ezzel szemben a nemlineáris modellek az előzőekben felsorolt kötöttségektől mentesek. Az adott rendszerben lejátszódó folyamatot leíró egyenletek legalább egyike nemlineáris, azaz valamilyen hatvány szög-, vagy egyéb más függvényt is tartalmaz [117].

### Determinisztikus és sztochasztikus modellek

A determinisztikus modellek a fizika vagy más tudományág alaptörvényeire, igazolt összefüggéseire alapul, s általában differenciál- és integrálegyenletek rendszereként írható le.

A sztochasztikus modellekben szereplő jellemzők és/vagy változók csak bizonyos valószínűségi összefüggések felhasználásával határozhatók meg [117].

### Folytonos idejű és diszkrét idejű modellek

A folytonos idejű modellekben a modellezett rendszert vagy folyamatot leíró jellemzők, független és függő változók a vizsgált idő alatt bármelyik pillanatban vehetnek fel valamilyen értéket. Ami azt jelenti, hogy a folytonos idejű modellek inputjai (bemeneti) és outputjai (kimeneti) egyaránt folytonos idejű jelek.

Diszkrét idejű modell esetében a jellemzők csak adott, konkrét időpillanatokban vehetnek fel értékeket, vagyis a diszkrét idejű modell független és függő változói diszkrét idejű jelek lehetnek [117].

### Folytonos paraméterű és diszkrét paraméterű modellek

A folytonos paraméterű vagy folytonos állapotterű modellek esetén a modellben a változók egy adott tartományon, értékhatáron belül bármilyen értéket felvehetnek.

Diszkrét paraméterű vagy diszkrét állapotterű modellekben viszont a változók csak a meghatározott diszkrét értékeket vehetik fel, vagyis a diszkrét paraméterű modellek inputjai és outputjai egyaránt diszkrét paraméterű jelek [117].

A matematikai modelleket nem csak fentebb említett modell párok alapján szokás csoportosítani, hanem a bemeneti és kimeneti változók száma szerint is. Ezek alapján a 11. táblázatban szereplő modelleket különböztetünk meg.

**11. táblázat: Modellek osztályozása a be- és kimenő jellemzők számai alapján [117]**

<b>Modell típus</b>	<b>Felhasznált matematikai egyenlet</b>
egy bemenetű — egy kimenetű (Single Input Single Output — SISO)	Skalár—skalár
egy bemenetű — több kimenetű (Single Input Multi Output — SIMO)	Vektor—skalár
több-bemenetű — egy kimenetű (Multi Input Single Output — MISO)	Skalár—vektor
több-bemenetű — több kimenetű (Multi Input Multi Output — MIMO)	Vektor—vektor

### **Matematikai modellalkotási eljárások**

A modell alkotás folyamatát három fő részre lehet osztani, amelyek a következők:

1. **Identifikáció:** Az első fázis az azonosítás, melynek során számbavételezzük a modellezendő folyamattal kapcsolatosan szóba jöhető alaptörvények és feltételek lehetséges rendszerét, majd azokból kiválasztjuk a probléma megválaszolásához szükséges és elégséges kritériumok részrendszerét.
2. **Optimalizáció:** A második fázis a matematikai modell szabadsági fokait jelentő modellparaméterek és „állandók” pontosítását jelenti, amely általában valamely múltbeli megfigyelés, mérés alapján történik, s melynek során az a feladat, hogy modellt olyan paraméterekkel ruházzuk fel, amelyekkel számolva eredményeink a „lehető legjobban” közelítsék a valóságot.

3. Validáció: A harmadik fázis az igazolás ahol az optimalizált paraméterekkel és állandókkal felruházott matematikai modellünk nem csak az optimalizáláshoz felhasznált mérésekhez igazodik, hanem egy attól különböző mérésorozaton is igazolni tudjuk, hogy a modell a szóban forgó folyamat prototípusa.

Egy rendszer matematikai modelljének megalkotásához három elméleti módszer ismeretes: a white-box eljárás, a black-box eljárás, valamint egy köztes úgynevezett vegyes modell a grey-box eljárás.

#### White-box (fehér-doboz) eljárás

A fehér-doboz eljárás esetében a modell felállítása alapvetően a rendszerről vagy folyamatról kapott előzetes információk alapján, fizikai megfontolásokra, törvényszerűségekre támaszkodva történik. Az eljárás előnye, hogy a modell fizikai paramétereinek valós tartalma, jelentése van, a hátránya viszont, hogy a modell felépítése általában rendkívül bonyolult [124].

#### Black-box (Fekete-doboz) eljárás

A fekete-doboz eljárás esetében a modell felállításához csak kísérletekkel, mérésekkel lehet információkat szerezni. A black-box modellek előnye, hogy viszonylagos egyszerűek viszont nagy hátrányuk, hogy a paramétereknek, adott esetben, nincs valós fizikai jelentése. Mivel az ilyen a modelleket a vizsgált rendszer kimeneti és bemeneti jellemzői alapján állítjuk elő, egyes idegen nyelvű szakirodalmak Input/Output (I/O) modelleknek is nevezik [124].

#### Grey-box (Szürke-doboz) eljárás

A szürke-doboz eljárás lényegében az előző két módszer kombinációját jelenti. A műszaki gyakorlatban legtöbbször ezzel az esettel találkozhatunk mivel egy probléma megoldása során nem kell teljes egészében „a sötétben tapogatoznunk”, mindig vannak kapaszkodók, ugyanakkor vannak nem ismert „sötét foltok” is [124].

### **3.5.3. Dimenzióanalízis, dimenzionális homogenitás, folyamatok hasonlósága**

A dimenzió analízis (DA) vagy más néven Tényező-Jel Módszer (Factor-Label Method), vagy Egység Tényező Módszer (Unit Factor Method) egy jól ismert metódus a fizika, a kémia és más műszaki területeken. Segítségével az eredeti változók számánál kevesebb változót

kapunk és ezek közötti összefüggéssel jellemezhetjük a vizsgált folyamatot illetve rendszert. Maga a dimenzióanalízis elnevezés Bridgmantól (1969) származik: „A dimenzionálisan homogén összefüggések visszavezethetők a változókból képzett dimenzió nélküli hatványszorzatok <<teljes készlete>> közötti kapcsolatra.” [125].

Az analízis középpontjában hasonlóság koncepciója áll. A technika gyökerei egészen a 19. század első feléig vezethetők vissza. Első megjelenésük Fourier munkáiban található, de később a század második felében nagyobb figyelmet kaptak. Dimenzió analízissel foglalkozott munkáiban többek között Lord Rayleigh és Reynold Maxwell továbbá Froude és Carvallo, valamint Vashy [126].

A dimenzióanalízis megismeréséhez legelőször ismernünk kell magának a dimenzió szónak a fogalmát. Pokorádi L. (2008) úgy fogalmazta meg, hogy a dimenzió (jele:  $\dim f$ ) egy olyan kifejezés (szimbólum), amely megadja, hogy milyen kapcsolat van a fizikai mennyiség és az alapmennyiségek/alapegységek között; vagyis a mennyiségnek a tartalmát fejezi ki, és független a számértéktől és a mértékegységtől; csak azt fejezi ki, hogyan határoztuk meg az alapmennyiséggel.

Például a sebesség dimenziója, ami egyenlő az  $l$  távolság dimenziója osztva a  $T$  idő dimenziójával.

$$\dim v = \frac{\dim l}{\dim T} = LT^{-1} \quad (3.1)$$

Tehát a dimenzió alatt az alapmennyiségek hatványszorzatát értjük, ahol a kitevő pozitív, vagy negatív egész szám, vagy nulla. Fontos azonban megjegyezni, hogy a dimenzió nem utal a jelenség belső lényegére, s egy adott dimenziójú mennyiséghez több mértékegység is rendelhető, egy mértékegység azonban csak egy dimenzióhoz rendelhető hozzá.

Például a sebesség dimenziója a fentebb említett  $LT^{-1}$ , viszont a mértékegysége lehet:

$$\frac{m}{s} = m s^{-1}; \frac{km}{h} = km h^{-1} \quad (3.2)$$

### SI mértékegységrendszer

A ma érvényben lévő Nemzetközi Mértékegységrendszer (Systeme International d'Unités = SI) a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Bizottság dolgozta ki, és 1960-ban a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi értekezlet fogadta el. A rendszer hét alapegységből (12. táblázat) és két kiegészítő egységből áll, amelyek mértékegységeit alap mértékegységnek nevezzük. A többi



úgynevezett származtatott egység e két egységből származtatható szorzással és/vagy osztással a fizikai fogalmat, állapotot, folyamatot meghatározó egyenlettel.

12. táblázat: Az SI rendszer alapegységei és alpmennyiségei

Alapegység			SI egység	
Neve	Jelölése	Dimenziójele	Neve	Jele
hosszúság	$l$	L	méter	m
tömeg	$m$	M	kilogramm	kg
idő	$t$	T	másodperc	s
elektromos áramerősség	$I$	I	amper	A
termodinamikai hőmérséklet	$T$	$\theta$	kelvin	K
anyagmennyiség	$n$	N	mól	mol
fényerősség	$I_v$	J	kandela	Cd

### Dimenzionális homogenitás szabályai

Bármely fizikai összefüggést leíró egyenletnek két alapvető kritériumnak kell megfelelni. Először is mindkét oldalnak numerikusan egyenlőnek kell lennie. Másodsor pedig mindkét oldalnak dimenzionálisan homogénnek kell lennie.

Pokorádi László Rendszertechnika című jegyzetében [127] a dimenzionális homogenitás 9 szabályát a következőképpen fogalmazta meg:

1. szabály: Minden analitikusan levezetett egyenlet bal és jobb oldala azonos dimenziójúnak, mértékegységűnek kell lennie. Minden szám, mely megjelenik az egyenletben, dimenziómentesnek (pontosabban 1 dimenziójúnak) kell lennie.
2. szabály: Ha egy elméleti úton levezetett egyenlet egyik vagy mindkét oldalán több mint egy tag összeadással vagy kivonással összekötve szerepel, akkor minden ilyen tag dimenziója, mértékegysége azonos kell, hogy legyen.
3. szabály: A zérus dimenziója bármennyi és bármi lehet.
4. szabály: Elméletileg levezetett (de, csak a levezetés végeredményeként megjelenő) egyenletben egy transzcendens függvény kitevői és argumentumai dimenziómentesek.
5. szabály: Minden dimenzionálisan és numerikusan helyes fizikai összekapcsolást leíró egyenlet csak egy függő (kimenő) változót tartalmazhat.
6. szabály: Egy grafikon akkor és csakis akkor homogén, azaz bármely mértékegységrendszerben érvényes a koordinátaléptékek megváltoztatása nélkül, ha a változókhoz társított paraméter(ek) dimenziómentes(ek).

7. szabály: Ha egy dimenzionálisan homogén egyenletben minden változó dimenziómentes, akkor a paraméterek is dimenziómentesek
8. szabály: Egy dimenziómentes változó nagysága invariáns azon dimenzió- és mértékegységrendszerre nézve, melyben a változó összetevőit kifejeztük.
9. szabály: Ha egy mennyiség valamely mértékegységrendszerben dimenziómentes, akkor minden más mértékegységrendszerben is dimenziómentes.

### Dimenzióanalízis módszere

A dimenzióanalízis módszerét Ain A. Sonin: A dimenzió analízis fizikai alapjai [126] című könyve alapján ismertetem.

Tegyük fel, hogy adott egy fizikai mennyiség  $Q_0$  ami egy „függő változó” egy jól meghatározott fizikai folyamat vagy esemény. Ami alatt azt értem, hogy ha az összes mennyiség, amely meghatározza az adott folyamatot vagy eseményt rendelkezésre áll akkor abból egyértelműen a  $Q_0$  értéke következik.

#### 1. lépés: Független változók

Az első és legfontosabb lépés a dimenzióanalízis során, hogy meg kell határozni a feladat típusát és figyelembe veendő változókat, valamint a peremfeltételeket. Ahogyan Maxwell fogalmazott: „minden fizikai kutatás sikere attól függ: helyesen választjuk-e ki azt, ami a legfontosabb, és azokat a tulajdonságokat, amelyeket elhanyagolhatunk”. Tehát azonosítani kell az összes független változót  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  amely befolyásolja  $Q_0$  értékét.

$$Q_0 = f(Q_1; Q_2; \dots Q_n) \quad (3.3)$$

A  $Q_1 \dots Q_n$  halmaz akkor teljes, ha minden egyes tag értéke meg van határozva, és ha nincs más olyan változó, amely hatással van a  $Q_0$  értékére. A  $Q_1 \dots Q_n$  halmaz akkor független, ha minden tag értéke előállítható tetszőlegesen anélkül, hogy az befolyásolja a halmaz bármely másik tagját.

#### 2. lépés: A változók dimenziói

Ezt követően felírjuk a dimenzió képletét a függő változónak  $Q_0$  és a független változóknak  $Q_1 \dots Q_n$ . Vegyünk példának egy egyszerű mechanikai problémát leíró rendszert, ahol az összes mennyiségnek a dimenzióalakja:

$$[Q_i] = L^{l_i} M^{m_i} t^{\tau_i} \quad (3.4)$$

ahol a kitevők  $l_i$ ,  $m_i$  és  $\tau_i$  dimenzió nélküli számok, amelyek az összes mennyiség definíciójából következnek.

Ezt követően kiválasztunk egy fizikailag független  $Q_1 \dots Q_k$  ( $k \leq n$ ) részhalmazt a független fizikai változók  $Q_1 \dots Q_n$  teljes halmazából és kifejezzük a dimenzióját minden egyes megmaradó független változónak  $Q_{k+1} \dots Q_n$  és a függő változónak  $Q_0$ . Minden fizikai mennyiségnek van olyan dimenziója, amelyet ki lehet fejezni az alap dimenziókkal. A  $Q_1 \dots Q_n$  halmaz  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmaza dimenzionálisan független, ha egyik tagja sem rendelkezik olyan dimenzióval, amelyet ki lehet fejezni a maradék tagok dimenzióival. Továbbá a  $Q_1 \dots Q_n$  halmaz  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmaza akkor teljes, ha a teljes halmaz megmaradt tagjainak dimenzióit  $Q_{k+1} \dots Q_n$  ki lehet fejezni a  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmaz dimenzióinak a szempontjából.

Mivel (3.3) egyenlet dimenzionálisan homogén,  $Q_0$  függő változó dimenziója is kifejezhető a  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmaz dimenzióinak a szempontjából.

A dimenzionálisan független  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmaz próbálgatás alapján került kiválasztásra, de a dimenzionálisan független mennyiségek  $k$  száma az egész  $Q_1 \dots Q_n$  halmazban egyedülálló, s nem lehet kifejezni az alap dimenziók számával. Például, ha  $Q_1 \dots Q_n$  dimenziói csak a hosszúság, tömeg és idő akkor  $k \leq 3$ .

Miután kiválasztottuk a teljesen, dimenzionálisan független  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmazt, kifejezzük a  $Q_0$  dimenzióit és a fennmaradó mennyiségeket  $Q_{k+1} \dots Q_n$  a  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmaz dimenzióinak a szempontjából, ami a következő formában írható fel, ha  $i > k$  vagy  $i=0$ .

$$[Q_i] = [Q_1^{N_{i1}} Q_2^{N_{i2}} \dots Q_n^{N_{ik}}] \quad (3.5)$$

Az  $N_{ij}$  kitevők dimenzió nélküli valós számok és a legtöbb esetben gyorsan megtalálhatóak vizsgálattal vagy formális algebrai módszerekkel.

A formális eljárás illusztrálható a következő példával ahol a hosszúság, tömeg és az idő az alapmennyiségek (abban az esetben, ha minden dimenzióknak (3.4) egyenletben meghatározott formája van). Vegyük  $Q_1$ ,  $Q_2$  és  $Q_3$ -at, mint teljesen dimenzionálisan független alhalmazt. A dimenziókat egyenlővé téve a (3.4) egyenlet által és a (3.5) egyenlettel, a következő három egyenletet kapjuk, amelyek megoldhatóak a három ismeretlenre  $N_{i1}$ ,  $N_{i2}$  és  $N_{i3}$ -ra:

$$l_i = \sum_{j=1}^3 N_{ij} l_j \quad (3.6)$$

$$m_i = \sum_{j=1}^3 N_{ij} m_j \quad (3.7)$$

$$t_i = \sum_{j=1}^3 N_{ij} t_j \quad (3.8)$$

### 3. lépés: Dimenzió nélküli változók

Definiáljuk a dimenzió nélküli alakját az n-k maradék független változónak s elosztjuk mindegyiket a  $Q_1 \dots Q_k$  alhalmazzal aminek ugyanaz a dimenziója, ahol  $i=1,2,\dots, n-k$ :

$$\Pi_i = \frac{Q_{k+i}}{Q_1^{(k+i)1} Q_2^{(k+i)2} \dots Q_k^{(k+i)k}} \quad (3.9)$$

A  $Q_0$  függő változó dimenzió nélküli alakja:

$$\Pi_0 = \frac{Q_0}{Q_1^{N_{01}} Q_2^{N_{02}} \dots Q_k^{N_{0k}}} \quad (3.10)$$

### 4. lépés: Végso egyenlet és a Buckingham $\pi$ elmélet

Az (3.3) egyenlet alternatív alakja a következő:

$$\Pi_0 = f(Q_1, Q_2, \dots, Q_k; \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (3.11)$$

ahol az összes mennyiség dimenzió nélküli kivéve  $Q_1 \dots Q_k$ . A dimenzió nélküli mennyiségek értékei függetlenek az alapegységek méreteitől. A  $Q_1 \dots Q_k$  értékei, viszont függenek az alapegység méreteitől. Nem rakhatóak bele egy dimenzió nélküli alakba mivel dimenzionálisan függetlenek egymástól. Az elv, hogy minden fizikailag jelentőségteljes egyenletnek dimenzionálisan homogénnek kell lennie, azaz érvényes, hogy az alapegységek mérete független, s ebből következik, hogy  $Q_1 \dots Q_k$  valójában nem lehet benne a (3.11) egyenletben, azaz:

$$\Pi_0 = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (3.12)$$

A (3.12) egyenlet a dimenzió analízis végső formája, amely már tartalmazza Buckingham  $\pi$  elméletet, vagyis: Ha a kapcsolatot, ami a dimenzionális fizikai mennyiségek között van, kifejezzük dimenzió nélküli alakban, akkor a független mennyiségek, amelyek megjelennek benne levonásra kerülnek az eredeti  $n$ -ből  $n-k$ -ra, ahol  $k$  a maximális száma az eredeti  $n$ -nek, amelyek dimenzionálisan függetlenek.

### A folyamatok hasonlósága, fizikai hasonlóság

Maxwell megfogalmazása alapján: „Megfigyelhető, hogy két különböző tudományban a változók olyan rendszere van, amelyek közötti matematikai kapcsolat ugyanaz, tekintet nélkül arra, hogy a folyamatok fizikai lényege egészen különböző”. Ha nem ismernénk a hasonlóság fogalmát akkor minden egyes rendszert külön-külön kellene vizsgálnunk, viszont a hasonlóság ismeretében az egyes vizsgálati eredmények felhasználhatóak újabb, még nem ismert rendszerek jellemzőinek előzetes meghatározásához.

Két rendszer működését akkor tekintjük hasonlónak egymáshoz, ha az egyik állapotváltozóinak (jellemzőinek) értékéből (és azok változásából) a másik állapotváltozóinak értéke (és változása) kölcsönösen egyértelműen meghatározható, ahogyan azt Kirpicsov (1874) is megfogalmazta a hasonlóságra vonatkozó tétéleiben:

1. tétel: ha két jelenség hasonló, akkor az őket leíró differenciálegyenletekből és egyértelműségi feltételekből képezett invariánsok számértéke mindkét jelenségre megegyezik (azonos).
2. tétel: a hasonlósági kritériumok és a dimenzió nélküli függő változók közt egyértelmű összefüggések állnak fenn.
3. tétel: a rendszerek hasonlóságának szükséges és elégséges feltétele a leíró egyenletek és az egyértelműségi feltételek dimenzió nélküli formájának, vagyis a dimenzió nélküli matematikai modellnek a megegyezése.

A hasonlóság feltételi egyenletei Szűcs Ervin A modellezés elmélete és gyakorlata [115] című könyve alapján kerülnek bemutatásra:

Két rendszerben végbemenő folyamat hasonlóságának vizsgálatakor az egyes fizikai változókat transzformáljuk. Az  $i$ -edik változót jelöljük az egyik rendszerben  $x_i$ -vel, a másik rendszerben  $x'_i$ -vel.

Az  $x_i$  és az  $x'_i$  változó arányát  $c_i$ -vel jelöljük:

$$c_i = \frac{x_i}{x'_i} \quad (3.13)$$

A „vesszővel jelölt rendszer” egyes változóit a  $c_i$  hasonlósági transzformációs szorzók viszik át a másik rendszer megfelelő változóiba. A transzformációs szorzók értéke minden változóra más és más lehet, de ugyanazon változóra egy rendszeren belül szigorúan állandó. A két rendszer egy-egy változója egymással arányos.

A hasonló rendszerek megfelelő pontjaira nézve

$$c_1 = \frac{x_1}{x'_1}; c_2 = \frac{x_2}{x'_2}; \dots; c_n = \frac{x_n}{x'_n} \quad (3.14)$$

vagyis

$$x'_1 = c_1 x_1; x'_2 = c_2 x_2; \dots; x'_n = c_n x_n; \quad (3.15)$$

Mivel a hasonló rendszerek matematikai modelljei a hasonlósági transzformációval szemben változatlanok (invariánsak), ezért a két rendszer differenciálegyenletének meg kell egyeznie:

$$D(x_1, x_2, \dots, x_n) = D(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) \quad (3.16)$$

A jobb oldali egyenletet az  $x'_i = c_i x_i$  felhasználásával is megadhatjuk, ebben az esetben az egyenlet a következőképpen fog kinézni:

$$D(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) = D(c_1 x_1; c_2 x_2; \dots, c_n x_n) = \Psi(c_1, c_2, \dots, c_n) D(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.17)$$

ahol  $\Psi(c_1, c_2, \dots, c_n)$  egyenlő az egyes transzformációs szorzók közötti függvénykapcsolatokkal.

A fenti két összefüggés egybevetéséből következik, hogy

$$\Psi(c_1, c_2, \dots, c_n) = 1 \quad (3.18)$$

Annak feltétele tehát, hogy két rendszer egymáshoz hasonló legyen az, hogy a transzformációs szorzók közötti függvénykapcsolat értéke 1 legyen. Ezt az egyenletet ezért feltételi egyenletnek nevezzük. Bizonyítható, hogy  $k$  számú alapidimenzió felvételével  $n$  darab változóból  $n-k$  darab dimenzió nélküli hatványszorzat képezhető. Ennek megfelelően a transzformációs szorzókra  $n-k$  számú

$$c_{ks} = c_1^{\alpha_{s1}} c_2^{\alpha_{s2}} \dots c_k^{\alpha_{sk}} = \prod_{i=1}^k c_i^{\alpha_{si}} \quad (3.19)$$

alakú összefüggés adható meg, ahol

$$s = 1, \dots, n-k$$

$c_1, c_2, \dots, c_k$  a  $k$  darab egymástól független dimenziójú fizikai mennyiség transzformációs szorzója,

$\alpha_{si}$  hatványkitevő, amely kifejezi, hogy a  $(k+s)$ -edik transzformációs szorzó hogyan függ az  $i$ -edik független transzformációs szorzótól,

$\Pi$  a szorzat jele.

Átrendezve a következő kifejezést kapjuk:

$$\frac{c_{ks}}{c_1^{\alpha_{s1}} c_2^{\alpha_{s2}} \dots c_k^{\alpha_{sk}}} = 1 \quad (3.20)$$

Behelyettesítve a  $c_i = x_i / x'_i$  értékeket az egyenlet a következő formát veszi fel,

ahol  $s=1, \dots, n-k$

$$\frac{x_{ks}}{x_1^{\alpha_{s1}} x_2^{\alpha_{s2}} \dots x_k^{\alpha_{sk}}} = \frac{x'_{ks}}{x'_1{}^{\alpha_{s1}} x'_2{}^{\alpha_{s2}} \dots x'_k{}^{\alpha_{sk}}} = P_s \quad (3.21)$$

A hasonló jelenségek esetében tehát a változókból képzett  $(n-k)$  számú,  $P_s$  típusú dimenzió nélküli jellemző azonos értéket vesz fel, vagyis az előbbi hatványszorzat invariáns a transzformációval szemben.

## 4. Adatbázis és módszer

Ebben a fejezetben kívánom ismertetni a kutatásom alapjául szolgáló adatokat, módszereket, módszertani eljárásokat, valamint szoftvereket, amelyek segítségével az általam megfogalmazott hipotéziseket bizonyítani tudtam.

Hipotéziseim bizonyításához a következő főbb módszereket alkalmaztam:

- a) a vonatkozó hazai és nemzetközi légszennyezéssel, urbanizációval, motorizációval kapcsolatos szakirodalom elemzése és értékelése,
- b) a légszennyezéssel kapcsolatos monitoring rendszerek feltárása,
- c) a légszennyezettség terjedésére alkalmazott modellek, modellezési eljárások bemutatása,
- d) a témához kapcsolódó hazai és EU-s statisztikai kiadványok, források feltárása, adatok keresése, valamint az adatok összehasonlító elemzése és értékelése
- e) variancia módszer, Ward – féle eljárással lefuttatott klaszteranalízis
- f) statisztikai számítások, regressziós számítások, legkisebb négyzetek módszere
- g) idősor elemzés, térbeli elemzés,
- h) digitális terepmodellezés, IDW interpoláció,
- i) dimenzió analízis, Buckingham  $\pi$  elmélet (A módszer bemutatása a Dimenzióanalízis, dimenzionális homogenitás, folyamatok hasonlósága 3.5.3-as fejezetben megtörtént)

### 4.1. Klaszteranalízis

A klaszteranalízis egy összetett statisztikai módszer. Olyan dimenziócsökkentő eljárás, melynek segítségével adattömböket homogén csoportokba sorolunk, klasszifikálunk. Ezeket a csoportokat klasztereknek nevezzük. Az egyes klasztereken belüli adatok valamilyen dimenzió szerint hasonlítanak egymáshoz, és e dimenzió mentén különböznek a többi klaszter elemeitől [128]. A csoportosítás alapját különböző távolság- vagy hasonlóságmértékek képezik. A gyakorlatban alkalmazott eljárások két nagy csoportba sorolhatóak:

- nem hierarchikus módszerek,
- hierarchikus módszerek.



Dolgozatomban a hierarchikus módszerek csoportjába tartozó eljárást alkalmaztam, ezért ezen eljárások kerülnek ismertetésre. A hierarchikus módszerek közös tulajdonsága, hogy az egyedeknek, illetve csoportjaiknak egy rendszerezett struktúráját adják meg. A módszerek összevonó (agglomeratív) vagy felosztó (divizív) eljárások lehetnek.

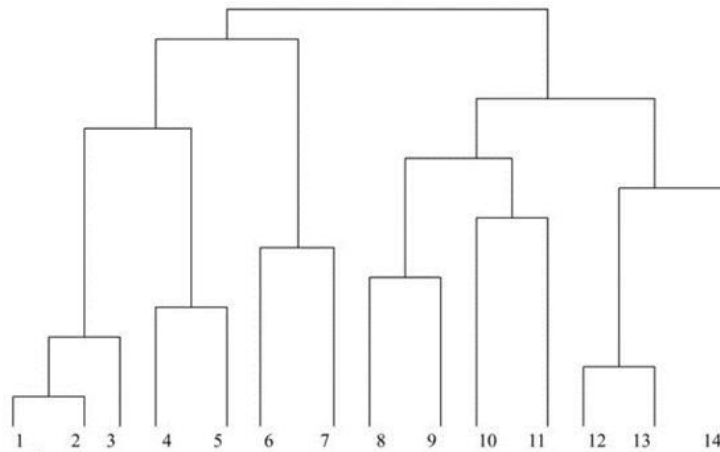
Az agglomeratív módszerek alapjai:

- a) a vizsgálat megkezdések a vizsgálatba bevont elemek ( $n$  darab) egyelemű csoportot/klasztert képviselnek,
- b) a hasonlóság mértéke alapján megkeresik az egyes klaszterek közötti távolságot, majd veszik a minimum/maximum értékhez tartozó két leghasonlóbb csoportot/klasztert, és beintegrálják őket egy klaszterbe ( $n - 1$  klaszter marad),
- c) ezt követően az új csoport/klaszter távolságát újraszámítják a többitől, és a művelet a b) ponttól folytatódik iteratívan addig, míg minden elem egy közös klaszterbe nem kerül [128].

Az agglomeratív eljárások négy fajtája:

- Legközelebbi szomszéd (nearest-neighbour) vagy egyszerű lánc módszer: a két klaszter távolságát a két klaszter legközelebbi tagjai közötti távolságként értelmezi.
- Legtávolabbi szomszéd (furthest-neighbour) vagy teljes lánc módszer: a klaszterek távolságát a két klaszter legtávolabbi pontjai közötti távolságként értelmezi.
- Centroid módszer: két klaszter távolságát a két klaszter középpontjának (centroidjának) a távolságaként értelmezi.
- Ward-módszer: olyan csoportosítás megvalósítása, amelyben a csoportokon belüli eltérés-négyzetösszeg minimális [128].

Az agglomeratív, vagy más néven összevonó módszerek eredményét az ún. dendrogramokon ábrázoljuk. A vízszintes tengelyen az egyedek sorszámait, a függőlegesen pedig a klaszterek összevonásának szintjeit, a távolságmértékek vannak feltüntetve.



16. ábra: Dendrogramm [128]

## 4.2. Regresszió analízis

A regressziószámítás célja függvényszerű kapcsolatok meghatározása egy vagy több magyarázó változó (vagy független változó) és egy függő változó között. Matematikai modell segítségével specifikáljuk az analitikus regressziófüggvényt, ahol X-ekkel a magyarázó változókat, Y-nal a függő változókat jelöljük. Feltételezzük, hogy a két változó közötti összefüggés függvény formájában kifejezhető:

$$Y = f(X) \text{ vagy } Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$$

A gyakorlatban a leggyakrabban előforduló függvények: lineáris regresszió, hatványkitevős regresszió, exponenciális regresszió, parabolikus regresszió, valamint a hiperbolikus regresszió.

Dolgozatomban lineáris regressziót alkalmaztam, ezért az ehhez a függvényhez tartozó számításokat fogom ismertetni. [129],[130],[131],[132],[133]

Alkalmazási feltételek:

1. linearitás: Az  $Y$  eloszlások várható értéke az ún. alapsokasági regressziós egyenesre esik.  $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x$
2. A variancia állandó:  $D^2(y/x = x_i) = \sigma^2$
3. Függetlenség: Az  $y_1, y_2, \dots, y_n$  valószínűségi változók függetlenek.
4. Az eloszlás normális: Az  $y_1, y_2, \dots, y_n$  változók normális eloszlásúak.
5. A hibatenyező: Az  $e_1, e_2, \dots, e_n$  normális eloszlású, egymástól független változók, amelyek várható értéke 0, varianciája pedig  $\sigma^2$ .

A lineáris regressziós modell az alábbi matematikai egyenlettel írható fel:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (4.1)$$

ahol:

$\beta_0$  a függvény konstans tagja

$\beta_1, \beta_2 \dots \beta_m$  a ható tényezők

$\varepsilon$  a regressziós egyenes hibatagja.

#### 4.2.1. A regressziós együtthatók becslése a legkisebb négyzetek módszerével

Meghatároztam a függvény  $\beta_0; \beta_1$  paramétereinek azon becslését ( $\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1$ ) amely mellett a megfigyelésből származó és a regressziófüggvény alapján becsült  $Y$  értékek különbségének eltérésnégyzet-összege a legkisebb:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_1)^2 \rightarrow MIN \quad (4.2)$$

Majd a regressziófüggvényt behelyettesítettem a célfüggvénybe:

$$\sigma(\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1) = \sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_1)^2 \rightarrow MIN \quad (4.3)$$

Az  $\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1$  paramétereket a szélsőérték-számítás szabályai alapján határoztam meg.

A  $\sigma(\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1)$  és  $\sigma(\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1)$  szerinti parciális deriváltjait vettem, és ezeket nullával tettem egyenlővé, így meghatároztam a stacionárius pontokat:

$$\frac{\partial \sigma(\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1)}{\partial \hat{\beta}_0} = -2 \times \sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_1) = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \sigma(\hat{\beta}_0; \hat{\beta}_1)}{\partial \hat{\beta}_1} = -2 \times \sum_{i=1}^n (y_1 - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_1) \times X_i = 0 \quad (4.5)$$

Így megkaptam a normál egyenleteket:

$$\sum y = \hat{\beta}_0 \times n + \hat{\beta}_1 \times \sum x \quad (4.6)$$

$$\sum xy = \hat{\beta}_0 \times \sum x + \hat{\beta}_1 \times \sum x^2 \quad (4.7)$$

A normálegyenletek megoldásával a  $\hat{\beta}_1$  és  $\hat{\beta}_0$  paraméterek meghatározhatók. Az ismeretleneket a Cramer-szabály felhasználásával határoztam meg.

**Cramer szabály:**

$$D = \begin{vmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix} = n \times \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \quad (4.8)$$

A  $\hat{\beta}_1$  paramétert az alábbi egyenletből kaptam meg:

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_1 &= \frac{\begin{vmatrix} n & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 \end{vmatrix}}{D} = \frac{n \times \sum x_i y_i - \sum x_i \times \sum y_i}{n \times \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\sum x_i y_i - n \times \bar{x} \times \bar{y}}{\sum x_i^2 - n \times \bar{x}^2} \\ &= \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum d_x \times d_y}{\sum d_x^2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

A  $\hat{\beta}_0$  paramétert pedig az alábbi egyenletből kaptam meg:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (4.10)$$

#### 4.2.2. Hipotézisvizsgálat

Hipotézisvizsgálat során három kérdésre keressük a választ:

1. A kapott (becsült) paraméterek jók-e, azaz a nekik megfelelő változók jó magyarázó változók-e a regressziós modellben?
2. A változók együttesen kielégítő módon magyarázzák-e az eredményváltozót?
3. A modellfeltételek a becslések tükrében helytállóak voltak-e, avagy empirikus eredményeink arra utalnak, hogy ezek valamelyike nem teljesült?

A paraméterek teszteléséhez felállítunk egy nullhipotézist miszerint a j-edik sokasági paraméter értéke 0, illetve egy ellenhipotézist ami pedig kimondja, hogy a j-edik sokasági paraméter értéke  $\neq 0$ , azaz

$$H_0 = \beta_j = 0 \quad (4.11)$$

$$H_1 = \beta_j \neq 0 \quad (4.12)$$

A nullhipotézis azt jelenti, hogy a j-edik magyarázó változó regressziós együtthatója 0, azaz a j-edik változó tetszőleges elmozdulása nem befolyásolja az eredményváltozót.

A hipotézis tesztelésére a T-próbát alkalmazzuk (valóban függ-e az  $y$  az  $x_i$ -től, egyenként), amely a becslt regressziós együttható és a standard hiba hányadosa, azaz

$$t = \frac{\beta_j}{S_{\beta_j}} \quad (4.13)$$

A kiszámolt  $t$ -értéket a Student-táblázatban található  $t_{kritikus}$  értékhez hasonlítjuk:

- Ha  $|t| < t_{kritikus}$  a  $H_0$  hipotézist elfogadjuk. Ebben az esetben a paraméter nem különbözik szignifikánsan a nullától.
- Ha  $|t| > t_{kritikus}$  a  $H_0$  hipotézist elvetjük. A mintabeli információk ekkor azt mutatják, hogy releváns kapcsolat van az  $X$  és  $Y$  változó között.

A hipotézis másik tesztelési lehetősége az F-próba alkalmazása (valóban függ-e az  $y$  az  $x_i$ -től, együtt az összestől), amelyet a következő egyenlettel fejezhetünk ki:

$$f = \frac{\frac{SSR}{p}}{\frac{SSE}{n-p-1}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{p}}{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}} \quad (4.14)$$

ahol

SSR = regressziós becslések átlagtól vett eltérésnégyzet-összege

SSE = a reziduális négyzetösszeg

$p$  = a számláló szabadságfoka

$n-p-1$  = a nevező szabadságfoka

A kiszámolt  $f$ -értéket az F-próba kritikus értékei táblázatban található  $f_{kritikus}$  értékhez hasonlítjuk:

- Ha  $|f| < f_{kritikus}$  a  $H_0$  hipotézist elfogadjuk, s megállapítjuk, hogy a vizsgált szignifikancia-szinten a modell nem jó, a magyarázó változók nem tudtak érdemben több magyarázatot adni az eredményváltozó alakulására, mint az eredményváltozó egyszerű mintaátlaga.

- Ha  $|f| > f_{\text{kritikus}}$  a  $H_0$  hipotézist elvetjük, vagyis az adott szignifikancia-szinten a modell nem utasítható el egyértelműen, legalább egy lényeges relációt megragad, ezért érdemes tovább vizsgálni.

A varianciaszámítás eredményeit ANOVA (Analysis of Variancia) táblázatban összegezzük.

13. táblázat: ANOVA táblázat

Variancia forrása	Eltérésnégyzetösszeg (SS)	Szabadságfok (DF)	Átlagos négyzetösszeg (MS)	F-érték
Regresszió (R)	SSR	p	MSR=SSR/p	F=MSR/MSE
Rezidum (E)	SSE	n-p-1	MSE=SSE/(n-p-1)	
Teljes (T)	SST	n-1		

#### 4.2.3. Determinációs együttható

Megmutatja, hogy a független változók együttesen milyen erősséggel határozzák meg az Y változó ingadozását, vagyis, hogy a függő változó teljes szórásnégyzetéből mekkora a regresszió tulajdonítható, tehát a tényezőváltozókkal megmagyarázható hányad.

Az  $R^2$  jellemzői:

- értéke 0 és 1 között változik,
- $R^2 = \max$ , ha az X változók determinisztikusan meghatározzák Y-t,
- $R^2 = 0$ , ha az Y szóródását teljes egészében a véletlen magyarázza,
- %-os formában értelmezzük.

Az illeszkedés jósága kifejezhető a regressziós becslések átlagtól vett eltérésnégyzet-összege illetve a függő változó átlagtól vett eltérésnégyzet-összegének a hányadosaként, azaz

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (4.15)$$

Kapcsolatok jellemzése az  $R^2$  számértéke alapján:

$R^2=1$	Függvénykapcsolat
$1 >  R^2  \geq 0,75$	Nagyon szoros kapcsolat
$0,75 >  R^2  \geq 0,5$	Szoros kapcsolat
$0,5 >  R^2  \geq 0,25$	Laza kapcsolat
$0,25 >  R^2  \geq 0$	Nagyon laza kapcsolat
$R^2=0$	Nincs kapcsolat

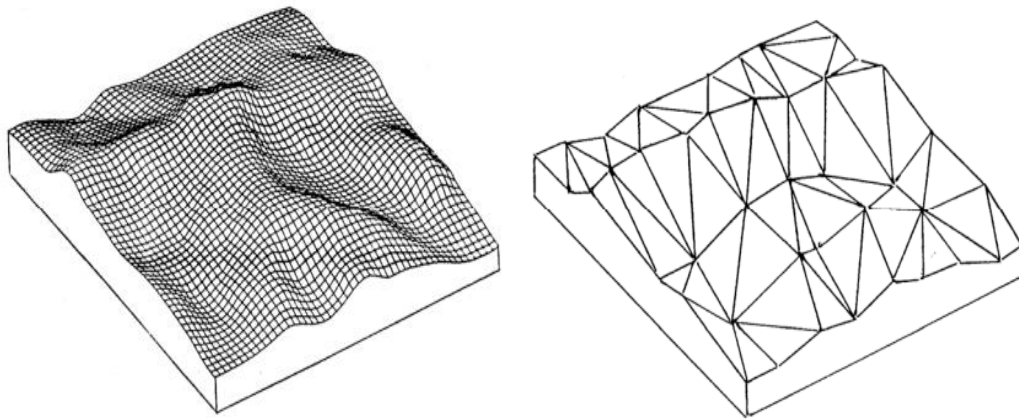
### 4.3. Interpoláció és digitális domborzat/terepmodellezés

Domborzatmodelleket alkalmazunk a földfelszín digitális kezelésére. A digitális terepmodell (DTM) egy olyan adatbázis, amely egy topográfiai felület bizonyos pontjainak X, Y, Z térbeli koordinátáit tartalmazza. Két típusát különböztetjük meg [134] [135] [136]:

- DDM – digitális domborzatmodell: a magassági adatok a földfelszínre vonatkoznak.
- DFM – digitális felületmodell: készíthető minden olyan paraméter alapján, amit a földrajzi tér egy adott pontján egy számmal tudunk jellemezni és kellő sűrűségben állnak rendelkezésre az adatok, ilyenek lehetnek a meteorológiai tényezők (pl. hőmérséklet, nyomás), de akár társadalmi mutatók (pl. jövedelem, népsűrűség) is.

A digitális terepmodelleknek a gyakorlatban két nagy csoportját különböztetjük meg, úgy mint [137]:

1. raszteres modellek: A raszteres adatmodell (raster, grid, mátrix) elemi pixelekből (picture element) felépülő adatmodell, ahol minden egyes pixel egy adott területegységet fed le. A területen az egyes pixelek rácsszerűen sorokban és oszlopokban helyezkednek el (többnyire négyzetek vagy oszlopok formájában). A felszín magasságát kétféleképpen adhatjuk meg, vagy a négyzetek (téglalapok) középpontjában adjuk meg, ez a cella-középpontú (cell-centered) elrendezés vagy a rácspontokban adjuk meg, ez utóbbi a rács-középpontú (node-centered) elrendezés.
2. vektoros modellek: ebbe a csoportba tartoznak a szabálytalan háromszögháló (TIN) típusú modellek. A modell geometriai alapja egy az adott peremfeltételek mellett a támpontokra szerkeszthető lehető legzömökebb háromszögháló. Ezt matematikailag azzal a feltétellel tudjuk megfogalmazni, hogy olyan háromszögeket kell készíteni, amelyekben a háromszög csúcsain átmenő kör nem tartalmaz további TIN-pontot. Ennek a feltételnek a Delaunay háromszögelés felel meg, amikor a vizsgált terület minden pontját hozzárendeljük a legközelebb eső TIN-ponthez s így megkapjuk a Thiessen poligonokat (Voronoi-diagram). Két TIN-pontot akkor kötünk össze, ha Thiessen poligonjaiknak van közös éle



**17. ábra: Raszteres terepmodell és vektoros terepmodell 3D ábrázolása [138]**

Dolgozatomban raszteres modellt alkalmaztam, emiatt a DTM elkészítéséhez térbeli interpolációt kellett végrehajtanom, hogy a rács minden egyes pontjához hozzá tudjak rendelni egy magassági értéket a meglévő adatok alapján. Interpolációról beszélünk, ha egy függvény értéke ismert bizonyos pontokban, és a köztes helyeken szeretnénk meghatározni a függvény értékét [139].

Interpolációs módszerek csoportosítási lehetőségei [140]:

- lokális vagy globális: Ebben az esetben a lokális és globális fogalom azt fejezi ki, hogy az adott interpolációs technika hogyan választja ki a támpontokat.
- szabatos vagy közelítő: A szabatos módszerek tiszteletben tartanak minden támpontot, a közelítő módszerek megengednek eltéréseket a támpontokon.
- folyamatos vagy szakadásos: Az interpolátorok a létrehozott felszín folyamatosságára szerint különböztethetők meg. A folyamatos interpoláció a kérdéses ponthoz bárholnan közelítve ugyanazt az eredményt adja, míg a szakadásos interpolátorok lépcsőzetes felszín hoznak létre.
- determinisztikus vagy sztochasztikus: determinisztikus interpolációnak nevezzük azokat az algoritmusokat is, amelyek a környező pontokra valamilyen matematikai függvényt illesztve interpolálnak. Ezzel szemben a sztochasztikus interpoláció statisztikai függvényeket is felhasznál a becslés folyamán.

Térképeim elkészítéséhez a determinisztikus interpoláció csoportjába tartozó távolsággal fordítottan arányos súlyozás (IDW, Inverse Distance Weighting, Shepard's Method) interpolációt választottam. A módszer lényege, hogy az ismert adatpontokhoz rendelt



súlytényező a kiszámítandó ponttól való távolsággal fordítottan arányos, következésképpen egy pont minél messzebb van a vizsgált helytől, annál kevésbé számít a magasságértéke. A súlytényező kiszámítását az alábbi képlet segítségével határoztam meg:

$$W_i = \frac{d_i^{-r}}{\sum_{j=1}^n d_j^{-r}} \quad (4.16)$$

Ahol

$d_i$  a mért  $P_i$  pont és a meghatározandó pont távolsága (euklideszi értelemben);  
 $r$  a távolsággal való súlycsökkenés mértékét meghatározó szám ( $r > 1$ )

#### 4.4. Alapadatok forrásai

Az alapadatok forrásaiként az alábbi hazai és nemzetközi intézmények szolgáltak:

##### a) Központi Statisztikai Hivatal (KSH) adatai:

- a. Nemzetgazdasági ágak ózon prekursor kibocsátása (2000-2011),
- b. Nemzetgazdasági ágak nitrogén-oxidok (NO<sub>x</sub>) kibocsátása (2000-2011),
- c. Nemzetgazdasági ágak kén-dioxid (SO<sub>2</sub>) kibocsátása (2000-2011),
- d. Nemzetgazdasági ágak szén-monoxid (CO) kibocsátása (2000-2011),
- e. Nemzetgazdasági ágak 10 µm átmérő alatti szálló por (PM<sub>10</sub>) kibocsátása (2000-2011),
- f. Nemzetgazdasági ágak 2,5 µm átmérő alatti szálló por (PM<sub>2,5</sub>) kibocsátása (2000-2011),
- g. Nehézfém kibocsátás (1980-2011),
- h. Egészségi állapot (2000-2011),
- i. Egészséget meghatározó tényezők (2000-2009),

##### b) Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat adatai:

- a. A levegő nitrogén-oxidok (NO<sub>x</sub>)-szennyezettsége az automata mérőhálózat adatai alapján (2003–2012),
- b. A levegő kén-dioxid (SO<sub>2</sub>)-szennyezettsége az automata mérőhálózat adatai alapján (2003–2012),
- c. A levegő szén-monoxid (CO)-szennyezettsége az automata mérőhálózat adatai alapján (2003–2012),

- d. A levegő ózon (O<sub>3</sub>) koncentrációja az automata mérőhálózat adatai alapján (2003–2012),
- e. A levegő 10 µm átmérő alatti szálló porral (PM<sub>10</sub>) való szennyezettsége az automata mérőhálózat adatai alapján (2003–2012)

**c) Európai Statisztikai Hivatal (EUROSTAT) adatai:**

- a. Közúti közlekedés infrastruktúra (Road transport infrastructure),
- b. Közúti közlekedés eszközei (Road transport equipment - Stock of vehicles),
- c. A városi lakosság veszélyeztetettsége szálló porra (Urban population exposure to air pollution by particulate matter),
- d. A városi lakosság veszélyeztetettsége ózonra (Urban population exposure to air pollution by ozone),
- e. A halálozások száma évente 65 évnél fiatalabbak esetén a keringési és légzési rendszer miatt (Number of deaths per year under 65 due to diseases of the circulatory or respiratory systems),
- f. Krónikus megbetegedések, asztma, hörghurut (People reporting a chronic disease, by disease, sex, age and educational attainment level)

**d) Egészségügyi Világszervezet (WHO) kutatásai, tanulmányai:**

- a. Világ egészségi állapota 2010-ben (World health report 2010: Health systems financing - the path to universal coverage),
- b. Világ egészségi állapota 2013-ban (World health report 2013: Research for universal health coverage)

**e) ENSZ Népesedési Alapja (UNFPA) tanulmányai:**

- a. A Föld lakosainak száma 2007-ben (State of the World Population 2007: Unleashing the potential of urban growth),
- b. A Föld lakosainak száma 2011-ben (State of the World Population 2011: People and possibilities in a World of 7 billion)

**f) Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA) adatai és tanulmányai:**

- a. Európai levegőminőségi adatbázis (AirBase v.8),
- b. Levegő minősége Európában 2014 (Air quality in Europe – 2014 report),
- c. Levegő minősége Európában 2013 (Air quality in Europe – 2013 report),

- d. EEA jelzések 2013, Minden lélegzetvétel, amit beszívunk (EEA signals 2013 – Every beath we take),
- e. Légszennyező anyag emissziójának megértése az európai városok (Understanding pollutant emissions from Europe's cities),
- f. Levegő megvalósítási terv – Tanulságok a levegőminőségi jogszabályok implementációjáról a városok szintjén (Air Implementation Pilot - Lessons learnt from the implementation of air quality legislation at urban level),
- g. A városi közlekedés közelebbi szemügyre vétele –TERM:2013 a közlekedési mutatók nyomonkövetése a környezetvédelmi célok elérésén át Európában (A closer look at urban transport – TERM 2013: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe)

**g) Szlovák Hidrometeorológiai Intézet mérőállomásainak adatai és tanulmányai:**  
Éves légszennyezettségi adatok a Szlovák Köztársaságban 2007 és 2012 között (Air pollution in the slovak Republic 2007-2012),

**h) Saját mérések alapján készített egyszerűbb és összetettebb táblázatok, grafikonok**

A dolgozatban felhasznált szoftverek:

- a) Az adatok kiértékeléséhez a Microsoft cég által fejlesztett Microsoft Office EXCEL szoftvert, valamint a statisztikai elemzésekhez az IBM cég SPSS Statistic Standard nevű programját használtam.
- b) Adataim grafikus megjelenítéséhez a QGIS Pisa 2.10 nyílt forráskódú térinformatikai szoftvert választottam, amely alkalmazásainak köszönhetően különböző térinformatikai problémák megoldására, közlésére, két- vagy háromdimenziós, esetleg időben folytonos megjelenítésére továbbá hatékonyságnövelésre, döntéstámogatásra alkalmazható.

## 5. Új tudományos eredmények

### 5.1. Első hipotézis bizonyítása

A következőkben az általam felállított első hipotézist – „*Matematikai módszerekkel bizonyítható, hogy a városiasodás növekedésével, , valamint a közúti forgalom erősödésével a környezeti levegő szennyezettsége jelentős problémává vált a városokban.*”– szeretném bizonyítani.

Primer kutatási eredményeimet a 3.1.1. A városok antropogén légszennyezésének forrásai, okai és a 3.1.2. A leggyakoribb szennyező anyagok és jellemzőik fejezetekben mutatom be.

Hipotézisem bizonyításához szekunder kutatást végeztem el széleskörű hazai és nemzetközi irodalom feldolgozásával.

#### 5.1.1. Városiasodás az EU-ban

A városi területek létfontosságú gazdasági szerepet játszanak. Az Európai Unió GDP-nek 85%-a a városokban hozzák létre. Az EU lakosainak több mint 74%-a városi területeken él, amely az előrejelzések szerint 2030-ra 80% fölé is emelkedhet. Ezen tényezők miatt először a városiasodás mértékét vizsgáltam 284 európai városban. A Ward – féle eljárással (variancia módszerrel) lefuttatott klaszteranalízis segítségével a városokat 5 különböző csoportba soroltam. A dendrogram első csoportjába 19 város került, közöttük Brüsszel, Prága, Budapest és Bécs. Ebben a csoportban a városok átlagos lakos száma 2 és 3 millió fő között mozog, s a népesség növekedés üteme meghaladta a 3,5%-ot.

14. táblázat: Első csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)

Év	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Városi lakosság (100ezer fő)	493,37	495,82	498,44	501,94	504,95	507,44	510,11	512,90

A második csoport 92 várost foglal magába, mint például Brno, Hannover, Dublin vagy Zágráb. A csoportban található városok népessége 800 ezer és 1 millió 700 ezer fő között mozog. Ebben a csoportban a népesség növekedése meghaladta a 4%-ot.

**15. táblázat: Második csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)**

Év	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Városi lakosság (100ezer fő)	1048,95	1056,46	1063,53	1071,48	1078,15	1083,34	1088,98	1094,66

A harmadik és egyben legnépesebb csoport 166 várost foglal magába úgy, mint Gent, Várna, Ljubljana vagy Linz. A csoportban található városok népessége 200 ezer és 700 ezer fő között mozog. A népesség növekedés üteme itt volt a legalacsonyabb, mindössze 1%.

**16. táblázat: Harmadik csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)**

Év	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Városi lakosság (100ezer fő)	836,06	838,29	840,65	843,35	846,03	848,45	851,01	847,16

A negyedik csoportba 6 olyan nagyváros került, mint Berlin, Madrid vagy Róma. Ebben a csoportban a városok átlagos lakossága 3 millió 500 ezer és 5 millió 500 ezer fő között mozog. A népesség növekedés üteme meghaladta az 5 %-ot.

**17. táblázat: Negyedik csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)**

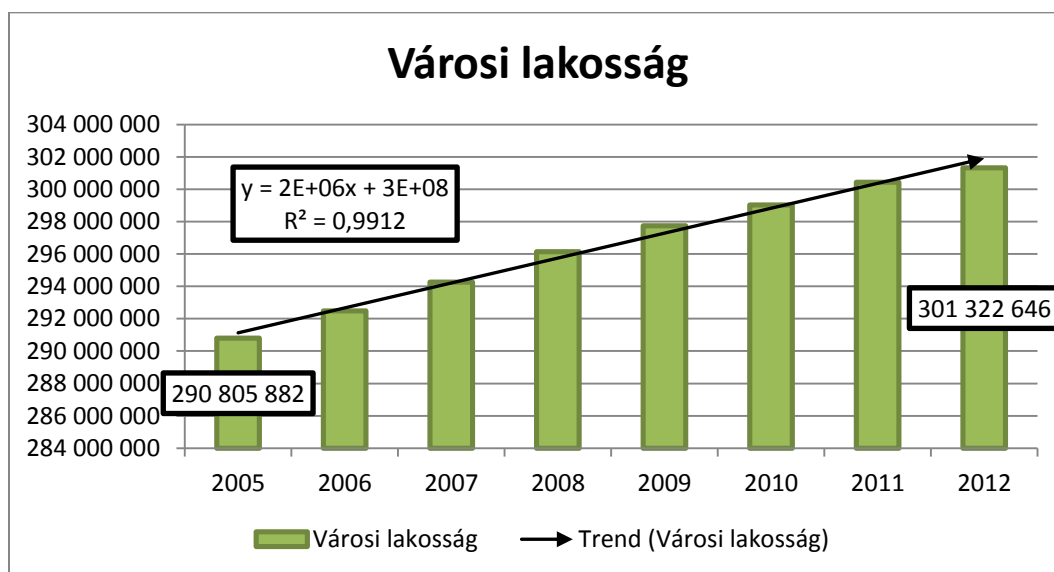
Év	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Városi lakosság (100ezer fő)	289,51	292,06	296,09	298,99	300,67	301,61	302,58	303,21

Az utolsó csoportba 2 nagyváros került, Párizs és London, ahol a legnagyobb 6 %-os népesség növekedés volt figyelhető meg az évek során.

**18. táblázat: Ötödik csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)**

Év	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Városi lakosság (100ezer fő)	240,18	242,13	243,82	245,58	247,55	249,46	251,60	255,29

A csoportok eredményeit összegezve tehát elmondható, hogy a városi lakosság aránya 2005-ben 290 millió fő volt, míg 2012-ben ez a szám már meghaladta a 301 millió főt, s a növekedés üteme több mint 3% volt. Továbbá megfigyelhető, hogy a legnagyobb mértékű növekedés a negyedik és az ötödik kategóriába tartozó városok estén következett be.



18. ábra: Városi lakosság növekedése 2005 – 2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)

#### 5.1.2. Személyszállítás alakulása

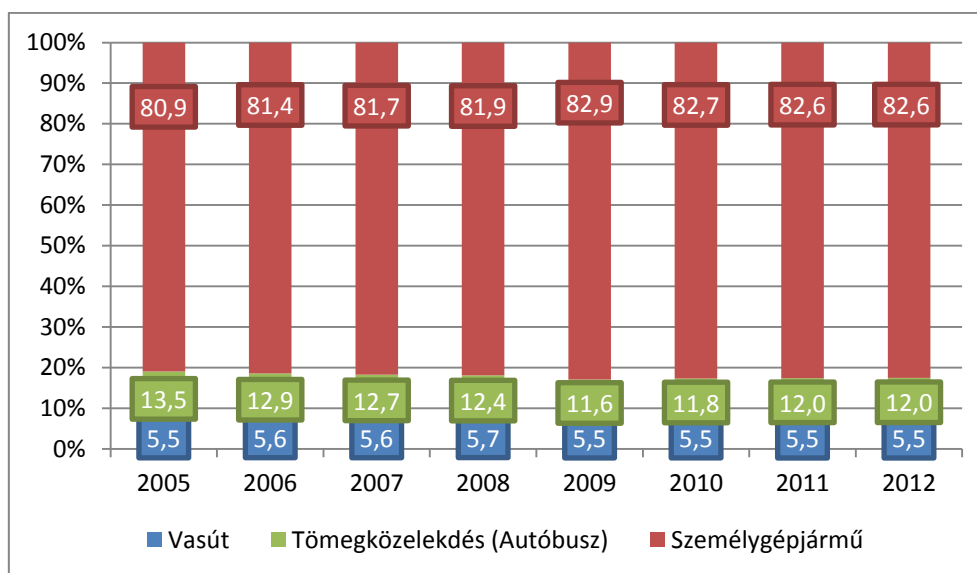
A városiasodás után a személyszállítás alakulásának megoszlását vizsgáltam. Számításaimnál 27 ország utazási szokásainak a 2005 és 2012 közötti változását vettem figyelembe.

Vasúti közlekedés szempontjából 2 csoportba osztottam az országokat. Az első csoportba kerültek azok az államok, ahol a vasúti közlekedés használata erősödést mutatott. Ide tartoznak többek között a Skandináv országok és a Balti államok (Dánia, Norvégia, Svédország, Finnország, Lettország, Észtország) ahol az emelkedés mértéke meghaladta a 10%-ot, valamint az Egyesült Királyság, Ausztria és Luxemburg ahol több mint 20%-os volt az emelkedés. A második csoportba kerültek azok az országok ahol a vasúti közlekedés visszaesést mutatott. Ilyen ország volt például Magyarország, Lengyelország vagy Litvánia, ahol a csökkenés mértéke meghaladta 20%-ot.

Tömegközlekedés használatának a szempontjából a fentiekhez hasonlóan ismét két csoportot különböztettem meg. Az első csoportba 5 olyan ország került - többek között Franciaország, Spanyolország és Olaszország - ahol a tömegközlekedés használata átlagosan 15% növekedést mutatott. Míg a második, a jóval népesebb csoportba pedig azok az országok kerültek – mint például Portugália, Szlovákia és Görögország - ahol a tömegközlekedés használata folyamatosan csökkent. Csökkenő személygépjármű használatot 9 ország - úgy,

mint Olaszország, Franciaország vagy Ausztria - estén figyeltem meg. Ezekben az országokban a csökkenés mértéke 2% és 5% között változott. A vizsgálatomban részvevő másik 19 országban különböző mértékű növekedés volt megfigyelhető. A legnagyobb 10% feletti növekedést 3 országban, Szlovákiában, Észtországban és Bulgáriában tapasztaltam.

A csoportok eredményeit a 19. ábra összegeztem ahol észrevehető, hogy a vizsgált 27 európai országban, a legnagyobb mértékben a személygépjárművel történő szállítás növekedett. 2005-ben 80,9% volt, míg 2012-re átlépte a 82,6%-os értéket. Ezzel szemben a tömegközlekedés használata folyamatosan csökkent a vizsgált periódusban. 2005-ben a lakossági közlekedés 13,5%-a történt tömegközlekedéssel, míg 7 évvel később 2012-ben ez a szám alig érte el a 12%-ot. A vasúti közlekedés szinte változatlanul alacsony számokat mutatott, s 5,6 – 5,5% körül alakult.



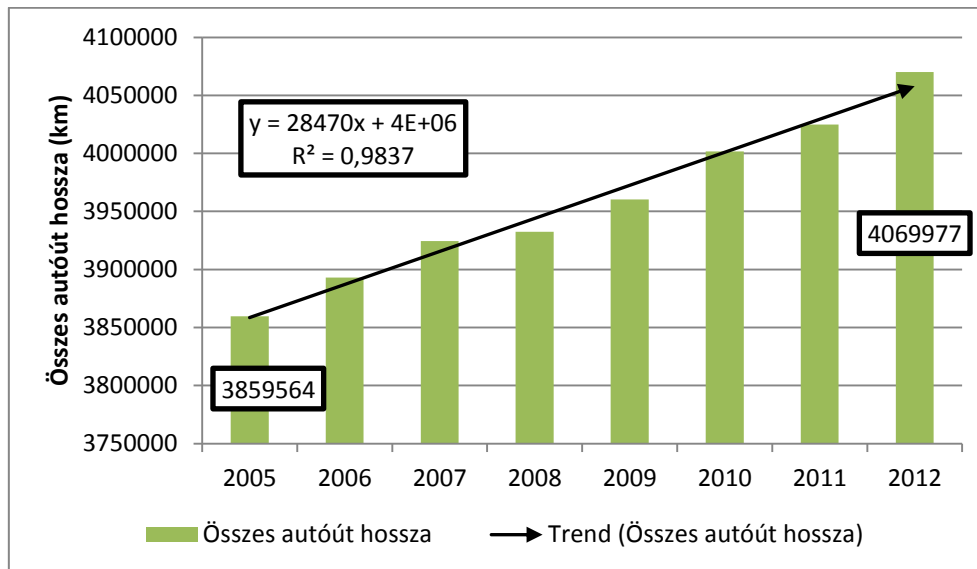
19. ábra: Személyszállítás százalékos megoszlása a vizsgált országokban 2005-2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)

### 5.1.3. Autóutak hossza, 1000 lakosra jutó személygépjárművek száma

A városiasodás és a személyszállítás alakulásának megoszlása után az autóutak hosszát, valamint 1000 lakosra jutó személygépjárművek számát vizsgáltam. Számításaimnál 27 ország 2005 és 2012 közötti adatait vettem figyelembe.

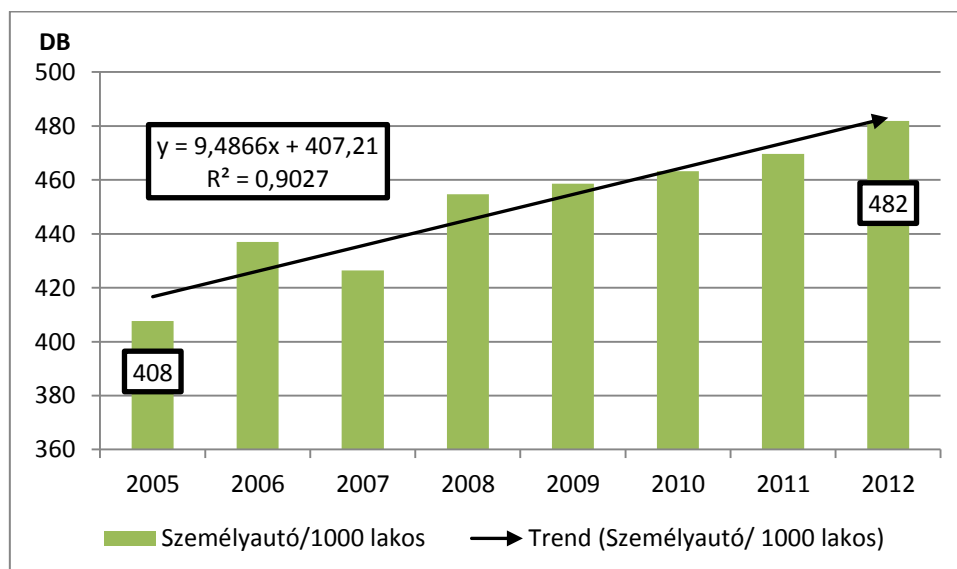
Az autóutak hosszát kilométerben határoztam meg és tekintetbe vettem az autópályák, valamint az egyéb autóutakat is. Számításaim eredményét a 20. ábra szemléltetem, ahonnan

leolvasható, hogy 2005-höz képest egy egyenletes és folytonos növekedés figyelhető meg az autópályák hosszát illetően a 2012-es évig.



20. ábra: Az összes autópályák hossza km-ben a vizsgált országokban 2005-2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)

Az ezer lakosra jutó személygépjárművek darabszámának változásánál is hasonló folyamatot figyeltem meg. 2005-ben átlagosan 408 darab személygépjármű jutott 1000 lakosra. 2012-ben pedig 482 darab, ami azt jelenti, hogy 7 év alatt 15%-os változás következett be.



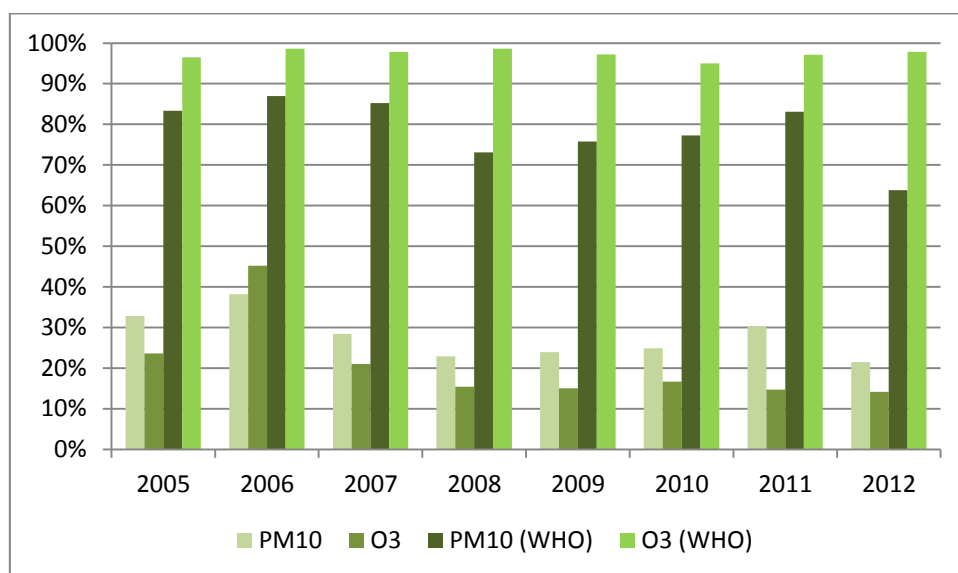
21. ábra: 1000 főre jutó személygépjármű darabszáma a vizsgált országokban 2005-2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás)



#### 5.1.4. A városi lakosság veszélyeztetettsége

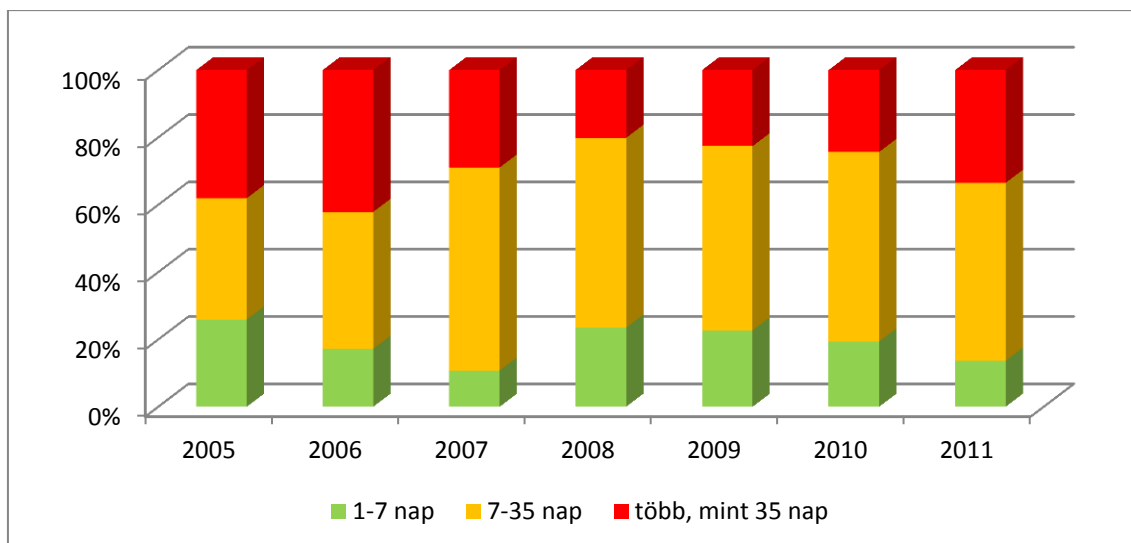
Hipotézisem igazolásához vizsgáltam továbbá a városi lakosság kitettségét az egyes légszennyező anyagokra (PM<sub>10</sub> és O<sub>3</sub>). Számításaimnál 27 országának az adatait vettem figyelembe a 2005 és 2012 közötti időszakban.

Megállapítottam, hogy a vizsgált időszakban (22. ábra) a városi lakosság 20-40% volt kitéve olyan PM<sub>10</sub> koncentrációnak a környezeti levegőben, amely meghaladta az EU határértéket, vagyis a légszennyező anyag koncentrációja több mint 35 napon át magasabb volt, mint 50µg/m<sup>3</sup>. A WHO ajánlásokkal összehasonlítva a lakosság 64-85% volt érintett. A második vizsgált légszennyező anyagnál, az ózonnál az EU határértéket több mint 25 napon át napi 120µg/m<sup>3</sup> határértéket meghaladó koncentráció a lakosság 14-45%-át érintette. A WHO ajánlásokkal összehasonlítva pedig a lakosság több, mint 95%-a volt érintett.



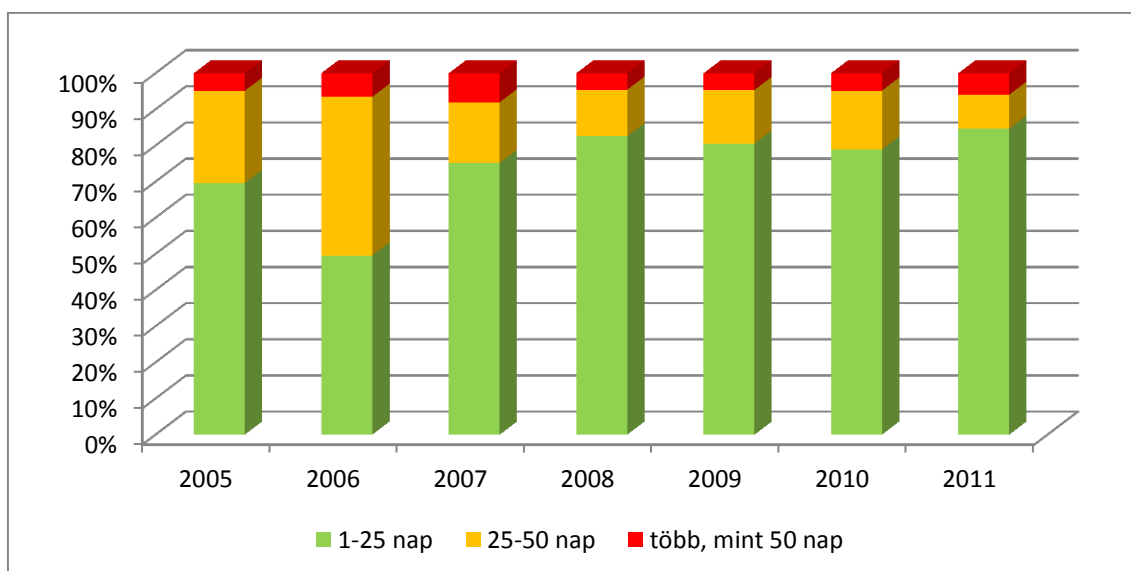
22. ábra: Városi lakosság százalékos aránya ahol a légszennyező anyagok koncentráció meghaladta az EU határértéket, valamint WHO ajánlásokat. (Eurostat- Urban Audit és az Airbase adatbázis adatai alapján készített összeállítás)

A megfigyelt idősnél (23. ábra) megállapítottam, hogy a lakosság több mint 70%-a hét napnál többet volt kitéve az egészségügyi határértéket meghaladó PM<sub>10</sub> koncentrációnak. Ezen belül a 7 és 35 nap közötti határérték átlépések átlagosan a lakosság 30-60%-át érintették. A vizsgált európai városokban 2012-ben több esetben meghaladta a légszennyező anyag koncentrációja a megengedett értéket: Torinóban (94 nap), Katowice-ben (103 nap), Varsóban (71 nap), Zilinában (65 nap), Bukarestben (66 nap), Marseilleben (40 nap) és Plovdivban (139 nap) is [141].



23. ábra: A városi lakosság kitettségének százalékos eloszlása a PM<sub>10</sub> koncentráció határértéket meghaladó napok függvényében (Eurostat- Urban Audit és az Airbase adatbázis adatai alapján készített összeállítás)

A 24. ábra jól mutatja, hogy 2005 és 2011 között a városi lakosság 80%-a volt kitéve legalább 1 nap olyan magas O<sub>3</sub> szennyezésnek, ami meghaladta a 120µg/m<sup>3</sup>-t. A 25 és 50 nap közötti szennyezettségnek a lakosság 8-40% volt kitéve, míg az 50 napot meghaladó terhelést elszenvedő lakosság aránya 4-34% között változott. Határértéket meghaladó koncentrációt mértek 2012-ben többek között Brno-ban (34 nap), Ljubljanában (48 nap), Luganoban (69 nap), Veronában (73 nap) és Padovában (91 nap) [141].



24. ábra: A városi lakosság kitettségének százalékos eloszlása az O<sub>3</sub> koncentráció határértéket meghaladó napok függvényében (Eurostat- Urban Audit és az Airbase adatbázis adatai alapján készített összeállítás)

### 5.1.5. Következtetés

Az első hipotézisemben a városiasodás, a közúti forgalom erősödése, valamint ennek következtében bekövetkező légszennyezés kapcsolatait vizsgáltam a városi lakosságra nézve. Ward – féle variancia módszerrel lefuttattam egy klaszteranalízist, amelynek segítségével a vizsgált európai városokat (285 db) 5 különböző csoportba soroltam méret (lakosság) és növekedés alapján. A csoportok eredményeit összegezve megállapítottam, hogy a városi lakosság aránya 2005-ben 290 millió fő volt, míg 2012-ben már meghaladta a 301 millió főt, s a növekedés üteme több mint 3% volt. Továbbá kiszámítottam, hogy a legnagyobb mértékű növekedés a 3 millió lakosnál többel rendelkező városok estén következett be. Ezt követően a személyszállítás alakulását vizsgáltam az európai országokban, s megállapítottam, hogy a legnagyobb mértékben a személygépjárművel történő szállítás növekedett. 2003-ban 80,1% volt, míg 2012-re átlépte a 82,6%-os értéket. Ezzel szemben a tömegközlekedés használata folyamatosan csökkent 14%-ról 12%-ra míg a vasúti közlekedés szinte változatlanul alacsony szinten 5,6 – 5,5% körül alakult. A városiasodás növekedésével egy időben az autópályák hossza, valamint az 1000 lakosra jutó személygépjárművek száma is folytonos növekedést mutatott. Míg 2005-ben átlagosan 408 darab személygépjármű jutott 1000 lakosra, addig 2012-ben több mint 482 darab, ami azt jelenti, hogy 7 év alatt több mint 15%-os növekedés következett be. Az urbanizáció és az erősödő motorizáció hatással volt a városok levegő minőségére is. A vizsgált időszakban a városi lakosság 20-40% volt kitéve olyan  $PM_{10}$  koncentrációnak a környezeti levegőben, amely meghaladta az EU határértéket, (vagyis a légszennyező anyag koncentrációja több mint 35 napon át magasabb volt, mint  $50\mu g/m^3$ ), s a lakosság 14-65%-át érintette több mint 25 napon át napi  $120\mu g/m^3$  határértéket meghaladó magas ózon koncentráció.

*Az első számú hipotézisemet, mely szerint „Matematikai módszerekkel bizonyítható, hogy a városiasodás növekedésével, valamint a közúti forgalom erősödésével a környezeti levegő szennyezettsége jelentős problémává vált a városokban.” igazoltnak tekintem a primer és szekunder kutatási eredményeim összegzése alapján.*

## 5.2. Második hipotézis bizonyítása

A következőkben az általam felállított második hipotézist - *A közlekedésből származó légszennyezettség kapcsolata a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások számával statisztikai módszerek alkalmazásával alátámasztható.* – szeretném bizonyítani.

### 5.2.1. Társadalmi mutatószám, légszennyezettség mértéke

Regressziós számításokat végeztem a Központi Statisztikai Hivatal és az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat adatbázisainak a segítségével. Megállapítottam a kapcsolatok mértékét a közlekedésből származó különböző légszennyező anyagok koncentrációja és a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedések számának alakulása között.

A regressziós számításoknál a következő egyenletet alkalmaztam:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$$

Ahol:

- $x$  = az adott légszennyező anyag koncentrációja, (2003-2014)
- $\hat{y}$  = Társadalmi mutatószám – Egészségi állapot, (2003-2014)

A számításaimhoz felhasznált adatokat, valamint az eredményeket a következő táblázatokban és a regressziós egyeneseket ábrázoló grafikonokon fogom bemutatni.

19. táblázat: Társadalmi mutatószám – Egészségi állapot (KSH adatok alapján saját összeállítás)

Vizsgálat éve	Keringési betegségek*	Emésztőrendszeri betegségek*	Légzőrendszer betegségei*
2003	973	107	71
2004	928	104	67
2005	960	95	83
2006	874	96	78
2007	855	97	83
2008	816	93	75
2009	803	90	77
2010	803	84	73
2011	771	79	76
2012	780	74	79
2013	756	69	80
2014	740	68	78

\*Standardizált halálozási ráta, halálok csoportok szerint: Európai népesség kormegoszlására standardizált arányszám, százezer lakosra.

\*\*A háztartások egészségügyre fordított kiadásai mutató azt fejezi ki, hogy a magán háztartások közvetlenül mekkora összeget fordítottak gyógyszerekre, gyógyárakra, gyógyászati segédeszközökre, járóbeteg-ellátásra (orvosi, fogászati, egyéb), kórházi szolgáltatásokra. Az összes egészségügyi szolgáltatás esetében tartalmazza a hálapénzt is.

20. táblázat: Az automata mérőhálózat adatai alapján a légszennyezettség mértéke ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Vizsgálat éve	Az automata mérőhálózat adatai alapján ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				
	A levegő nitrogén-oxid ( $\text{NO}_x$ )-szennyezettsége	A levegő kén-dioxid ( $\text{SO}_2$ )-szennyezettsége	A levegő szén-monoxid (CO)-szennyezettsége	A levegő ózon ( $\text{O}_3$ )-szennyezettsége	A levegő 10 $\mu\text{m}$ átmérő alatti szálló porral ( $\text{PM}_{10}$ ) való szennyezettsége
2003	55	14	672	48	40
2004	51	10	667	42	32
2005	54	7	647	45	33
2006	53	7	630	43	37
2007	50	6	572	43	31
2008	44	7	538	43	30
2009	42	7	577	46	30
2010	42	8	584	44	30
2011	44	7	586	45	34
2012	37	8	545	49	28
2013	36	8	526	45	28
2014	39	7	534	40	27

### 5.2.2. Számítások eredményei

A levegő nitrogén-oxid ( $\text{NO}_x$ ) szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

21. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata  $\text{NO}_x$  keringési megbetegedések

Modell	R	$R^2$	Korrigált $R^2$	Becslés standard hibája
1	,919	,844	,829	2,79841

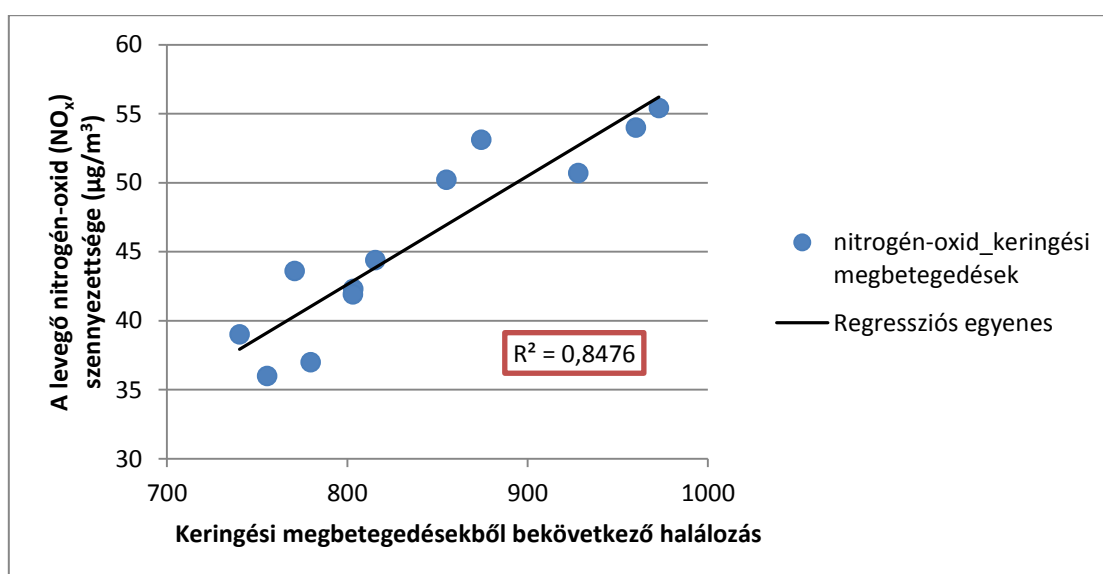
22. táblázat: Varianciaanalízis  $\text{NO}_x$  keringési megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
1 Regressziós modell	424,606	1	424,606	54,220	,000
Hiba	78,311	10	7,831		
Összesen	502,917	11			

23. táblázat: Együtthatók\_NO<sub>x</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	-19,745	8,909		-2,216	,051	-39,595	,105
1 Keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,078	,011	,919	7,363	,000	,054	,102

A regressziós számítás igazolta, hogy van kapcsolat a levegő nitrogén-oxid szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,844$ , vagyis a két tényező között pozitív, erős kapcsolat van.



25. ábra: Regressziós egyenes\_NO<sub>x</sub>\_keringési megbetegedések

A levegő nitrogén-oxid (NO<sub>x</sub>) szennyezettsége és a emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

24. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_NO<sub>x</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,892	,796	,776	3,19948

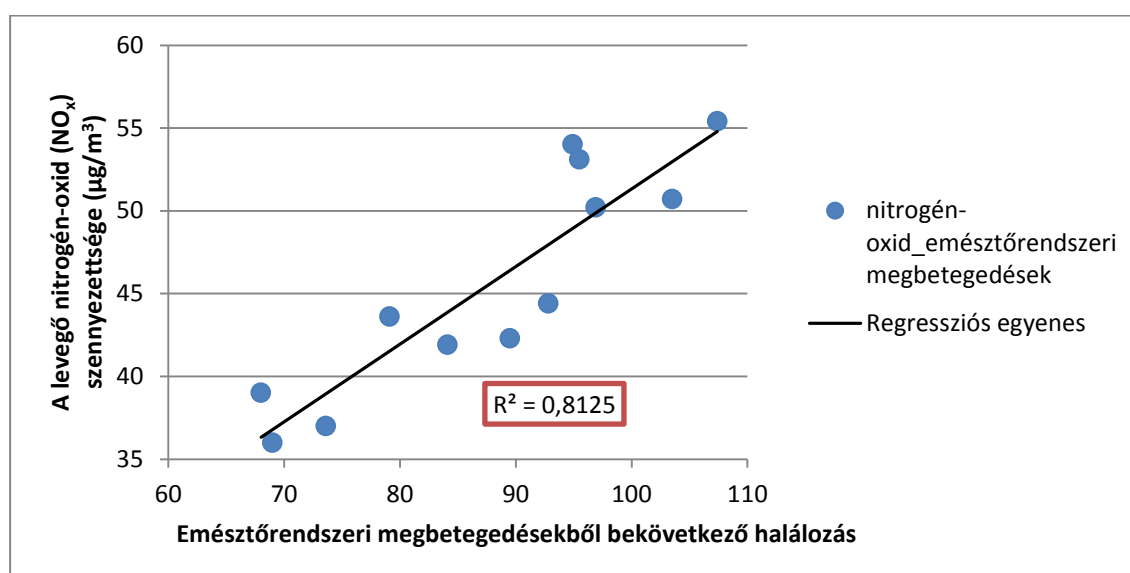
25. táblázat: Varianciaanalízis\_NO<sub>x</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	400,550	1	400,550	39,129	,000
1 Hiba	102,367	10	10,237		
Összesen	502,917	11			

26. táblázat: Együtthatók\_NO<sub>x</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	5,114	6,535		,783	,452	-9,447	19,676
1 Emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,460	,074	,892	6,255	,000	,296	,624

A regressziós számítás igazolta a kapcsolatot a levegő nitrogén-oxid szennyezettsége és az emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,796$  vagyis a két tényező között pozitív, erős kapcsolat van.



26. ábra: Regressziós egyenes\_NO<sub>x</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

A levegő nitrogén-oxid (NO<sub>x</sub>) szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

27. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_NO<sub>x</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,171	,029	-,068	6,98746

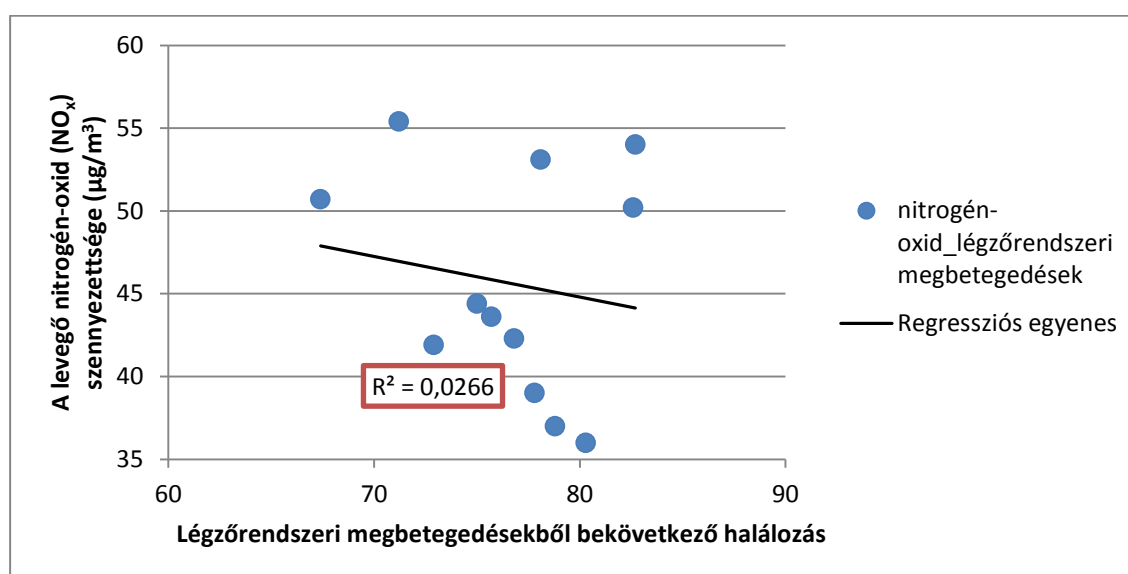
28. táblázat: Varianciaanalízis\_NO<sub>x</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	14,671	1	14,671	,300	,596
1 Hiba	488,246	10	48,825		
Összesen	502,917	11			

29. táblázat: Együtthatók\_NO<sub>x</sub> légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	64,434	34,448		1,870	,091	-12,321	141,189
1 Légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	-,246	,449	-,171	-,548	,596	-1,245	,754

A regressziós számítás részben igazolta a kapcsolatot a levegő nitrogén-oxid szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,029$  a két tényező között negatív, nagyon gyenge a kapcsolat.



27. ábra: Regressziós egyenes\_NO<sub>x</sub> légzőrendszeri megbetegedések

A levegő kén-dioxid (SO<sub>2</sub>) szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

30. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_SO<sub>2</sub> keringési megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,546	,298	,227	1,87397

31. táblázat: Varianciaanalízis\_SO<sub>2</sub> keringési megbetegedések

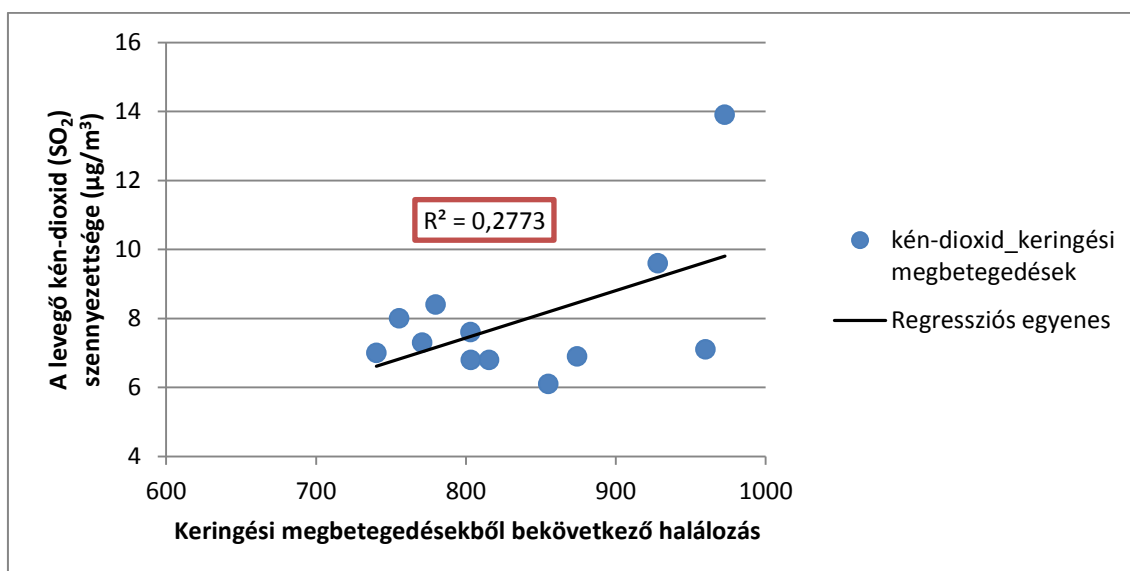
Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	14,882	1	14,882	4,238	,067
1 Hiba	35,118	10	3,512		
Összesen	50,000	11			



32. táblázat: Együtthatók\_SO<sub>2</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	-4,231	5,966		-,709	,494	-17,523	9,062
1 Keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,015	,007	,546	2,059	,067	-,001	,030

A regressziós számítás részben igazolta, hogy van kapcsolat a levegő kén-dioxid szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,298$ . A két tényező között pozitív gyenge kapcsolat van.



28. ábra: Regressziós egyenes\_SO<sub>2</sub>\_keringési megbetegedések

A levegő kén-dioxid (SO<sub>2</sub>) szennyezettsége és a emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

33. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_SO<sub>2</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,439	,192	,112	2,00942

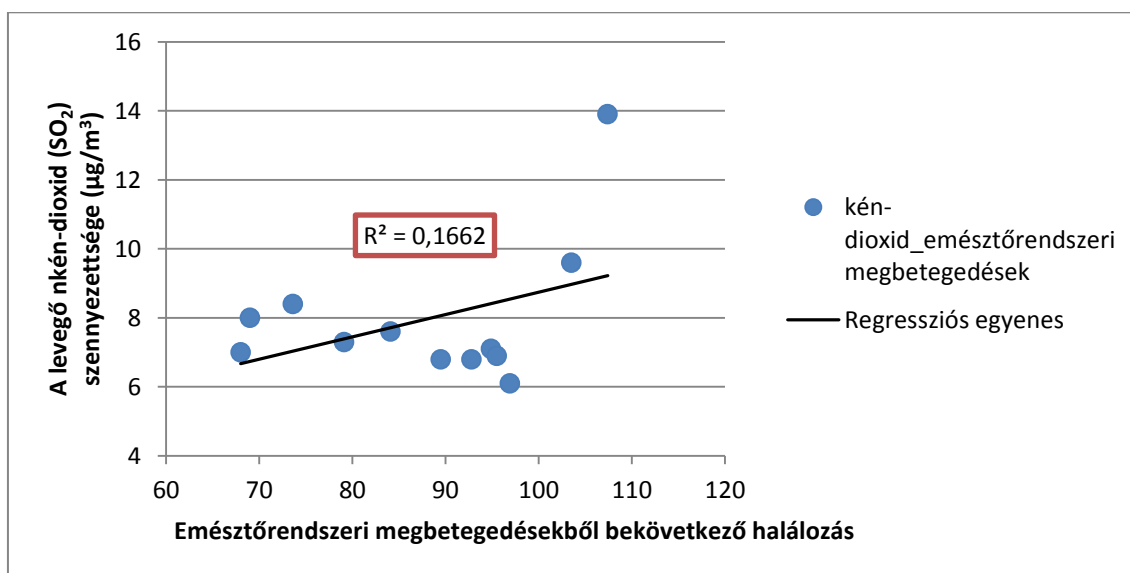
34. táblázat: Varianciaanalízis\_SO<sub>2</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	9,622	1	9,622	2,383	,154
1 Hiba	40,378	10	4,038		
Összesen	50,000	11			

35. táblázat: Együtthatók\_SO<sub>2</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	1,728	4,104		,421	,683	-7,417	10,873
1 Emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,071	,046	,439	1,544	,154	-,032	,174

A regressziós számítás részben igazolta, hogy van kapcsolat a levegő kén-dioxid szennyezettsége és az emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,192$ . A két tényező között gyenge pozitív kapcsolat van.



29. ábra: Regressziós egyenes\_SO<sub>2</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

A levegő kén-dioxid (SO<sub>2</sub>) szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

36. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_SO<sub>2</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,663	,439	,383	1,67451

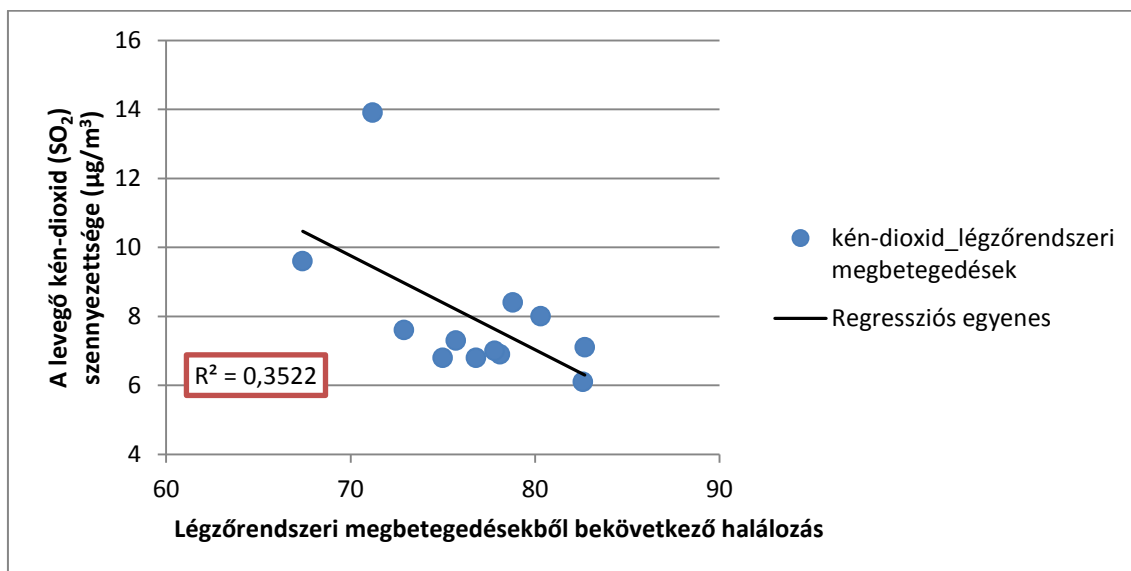
37. táblázat: Varianciaanalízis\_SO<sub>2</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	21,960	1	21,960	7,832	,019
1 Hiba	28,040	10	2,804		
Összesen	50,000	11			

38. táblázat: Együtthatók\_SO<sub>2</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	31,063	8,255		3,763	,004	-12,669	49,457
1 Légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	-,301	,107	-,663	-2,799	,019	-,540	-,061

A regressziós számítás igazolta, hogy van kapcsolat a levegő kén-dioxid szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható értéke  $R^2 = 0,439$ . A két tényező között negatív, közepes kapcsolat van.



30. ábra: Regressziós egyenes\_SO<sub>2</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

A levegő szén-monoxid (CO) szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

39. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_CO\_keringési megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,906	,821	,804	23,14768

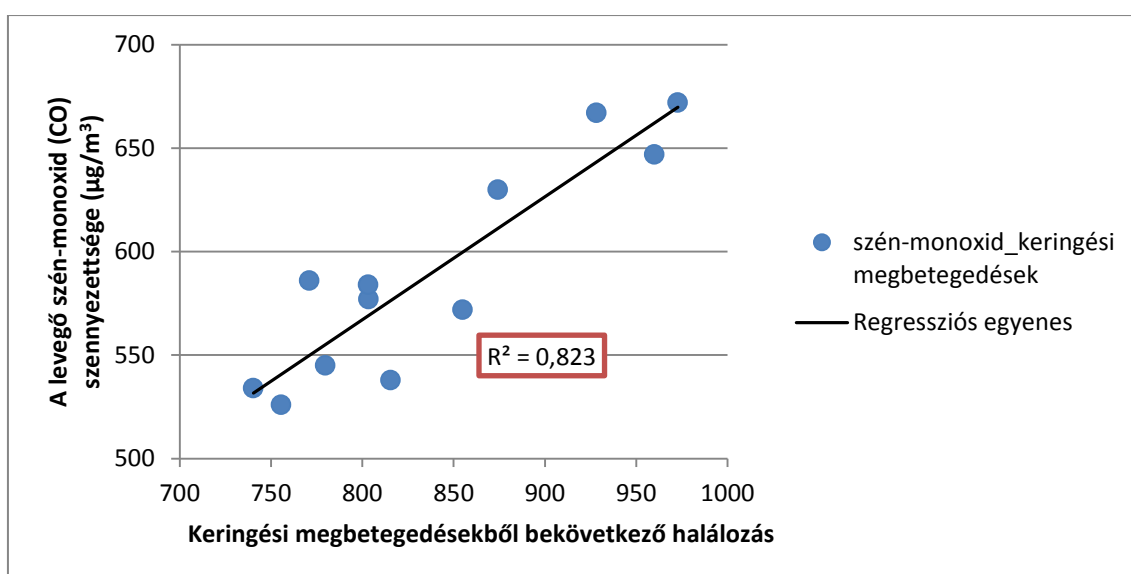
40. táblázat: Varianciaanalízis\_CO\_keringési megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	24649,518	1	24649,518	46,004	,000
1 Hiba	5358,149	10	535,815		
Összesen	30007,667	11			

41. táblázat: Együtthatók\_CO\_keringési megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	92,081	73,690		1,250	,240	-72,111	256,273
1 Keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,594	,088	,906	6,783	,000	,399	,789

A regressziós számítás igazolta, hogy van kapcsolat a levegő szén-monoxid szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,82$ . A két tényező között pozitív, erős kapcsolat van.



31. ábra: Regressziós egyenes\_CO\_keringési megbetegedések

A levegő szén-monoxid (CO) szennyezettsége és a emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

42. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_CO\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,807	,652	,617	32,31882

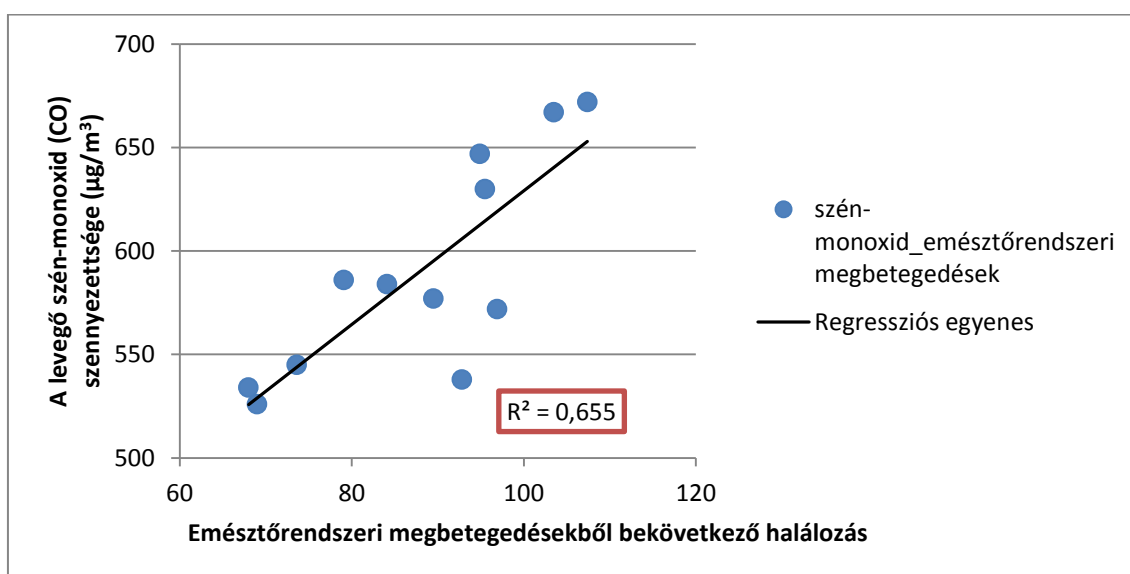
43. táblázat: Varianciaanalízis\_CO\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	19562,602	1	19562,602	18,729	,001
1 Hiba	10445,064	10	1044,506		
Összesen	30007,667	11			

44. táblázat: Együtthatók\_CO\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	307,016	66,013		4,651	,001	159,930	454,102
1 Emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	3,214	,743	,807	4,328	,001	1,559	4,868

A regressziós számítás igazolta, hogy van kapcsolat a levegő szén-monoxid szennyezettsége és az emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,652$ . A két tényező között pozitív közepes kapcsolat van.



32. ábra: Regressziós egyenes\_CO\_emésztőrendszeri megbetegedések

A levegő szén-monoxid (CO) szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

45. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_CO\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,443	,196	,116	49,11846

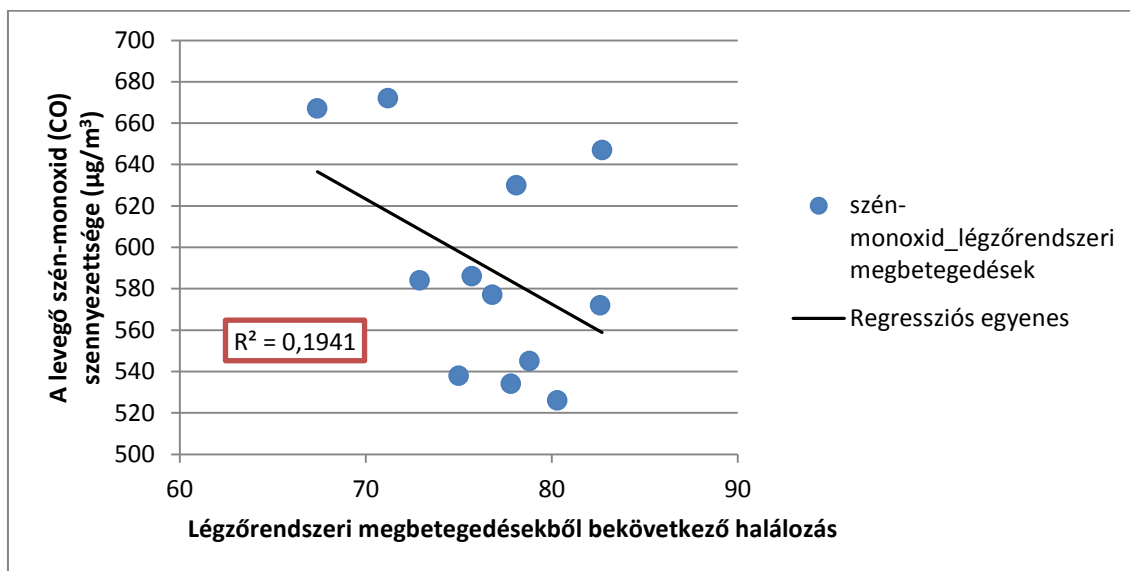
46. táblázat: Varianciaanalízis\_CO\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	5881,436	1	5881,436	2,438	,150
1 Hiba	24126,231	10	2412,623		
Összesen	30007,667	11			

47. táblázat: Együtthatók\_CO\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	967,269	242,154		3,994	,003	427,716	1506,822
1 Légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	-4,923	3,153	-,443	-1,561	,150	-11,949	2,102

A regressziós számítás részben igazolta, hogy van kapcsolat a levegő szén-monoxid szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható értéke  $R^2 = 0,196$ . A két tényező között negatív, gyenge a kapcsolat.



33. ábra: Regressziós egyenes\_CO\_légzőrendszeri megbetegedések

A levegő ózon (O<sub>3</sub>) szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

48. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_O<sub>3</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,152	,023	-,075	2,59486

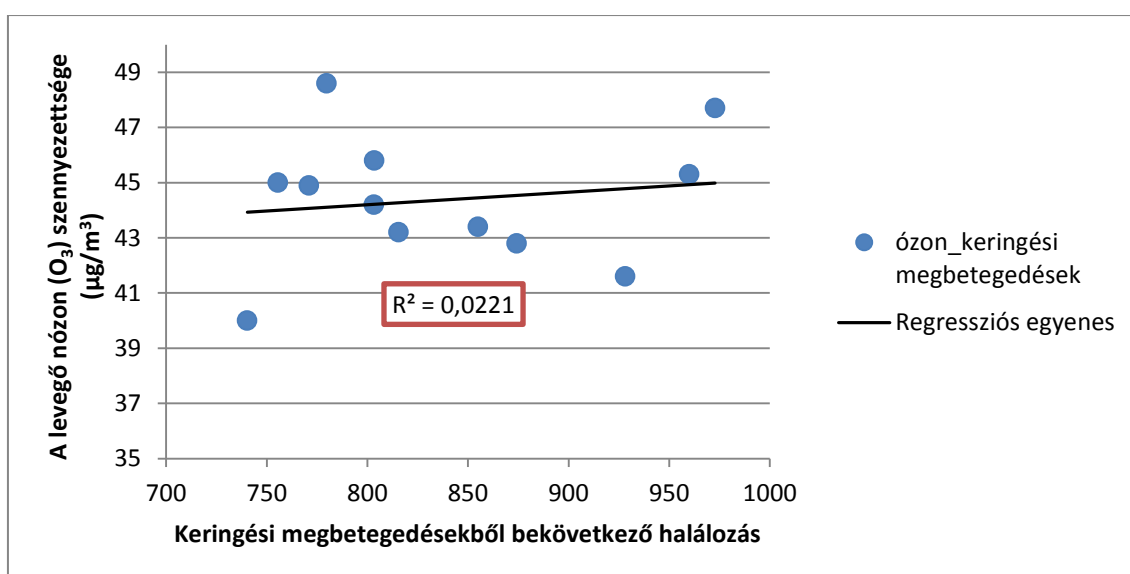
49. táblázat: Varianciaanalízis\_O<sub>3</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	1,584	1	1,584	,235	,638
1 Hiba	67,333	10	6,733		
Összesen	68,917	11			

50. táblázat: Együtthatók\_O<sub>3</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	40,427	8,261		4,894	,001	22,021	58,833
1 Keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,005	,010	,152	,485	,638	-,017	,027

A regressziós számítás részben igazolta, hogy van kapcsolat a levegő ózon szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,023$ . A két tényező között pozitív, nagyon gyenge a kapcsolat.



34. ábra: Regressziós egyenes\_O<sub>3</sub>\_keringési megbetegedések

A levegő ózon (O<sub>3</sub>) szennyezettsége és a emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

51. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_\_O<sub>3</sub>\_ emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,042	,002	-,098	2,62293

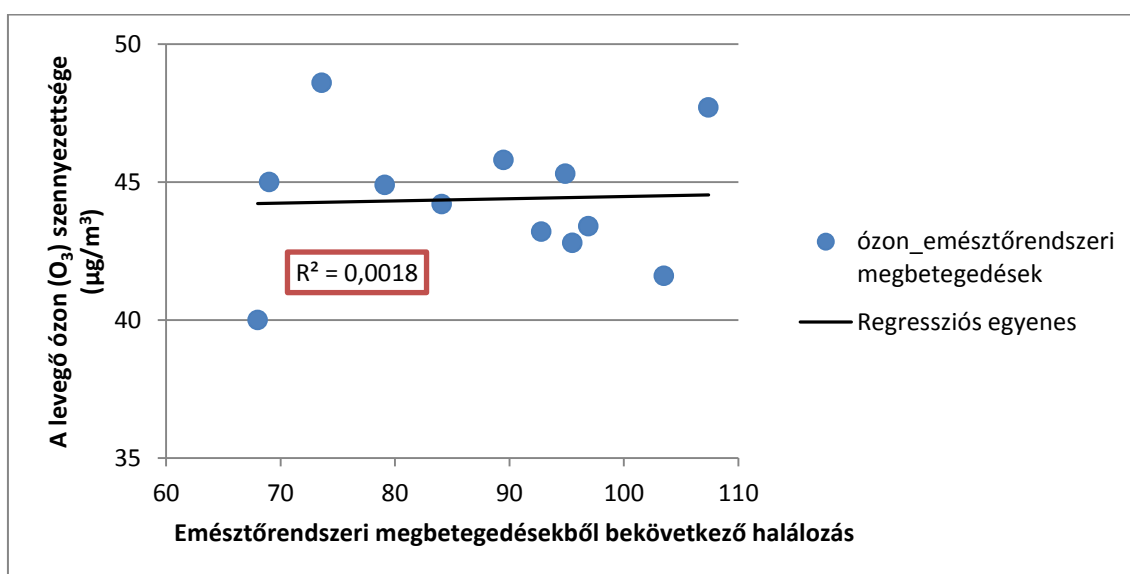
52. táblázat: Varianciaanalízis \_\_O<sub>3</sub>\_ emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	,119	1	,119	,017	,898
1 Hiba	68,798	10	6,880		
Összesen	68,917	11			

53. táblázat: Együtthatók\_O<sub>3</sub>\_ emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	43,720	5,357		8,160	,000	31,782	55,657
1 Emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,008	,060	,042	,898	,001	-,126	,142

A regressziós számítás részben igazolta a kapcsolatot a levegő ózon szennyezettsége és az emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,00$ . A két tényező között nagyon gyenge pozitív kapcsolat van.



35. ábra: Regressziós egyenes\_O<sub>3</sub>\_ emésztőrendszeri megbetegedések

A levegő ózon (O<sub>3</sub>) szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

54. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_O<sub>3</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,052	,003	-,097	2,62171

55. táblázat: Varianciaanalízis\_O<sub>3</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

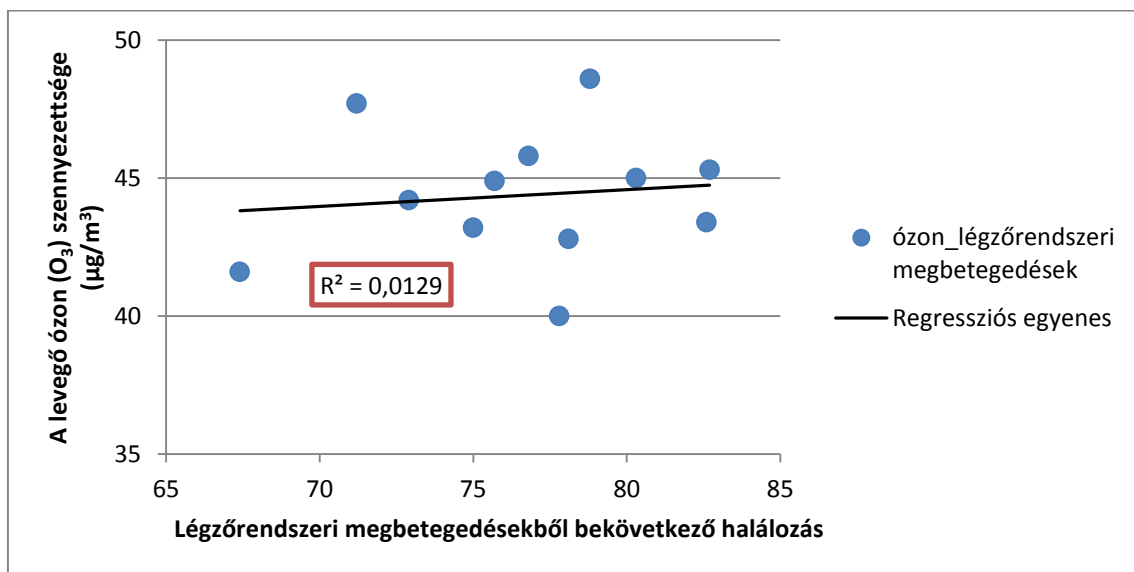
Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	,183	1	,183	0,27	,874
1 Hiba	68,734	10	6,873		
Összesen	68,917	11			



56. táblázat: Együtthatók\_O<sub>3</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	42,310	12,925		3,284	,008	13,512	71,109
1 Légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,027	,168	,052	,163	,874	-,348	,402

A regressziós számítás részben igazolta a kapcsolatot a levegő ózon szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható értéke  $R^2 = 0,003$ . A két tényező között pozitív, nagyon gyenge kapcsolat van.



36. ábra: Regressziós egyenes\_O<sub>3</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

A levegő szálló por (PM<sub>10</sub>) szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

57. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_PM<sub>10</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,731	,535	,488	2,75098

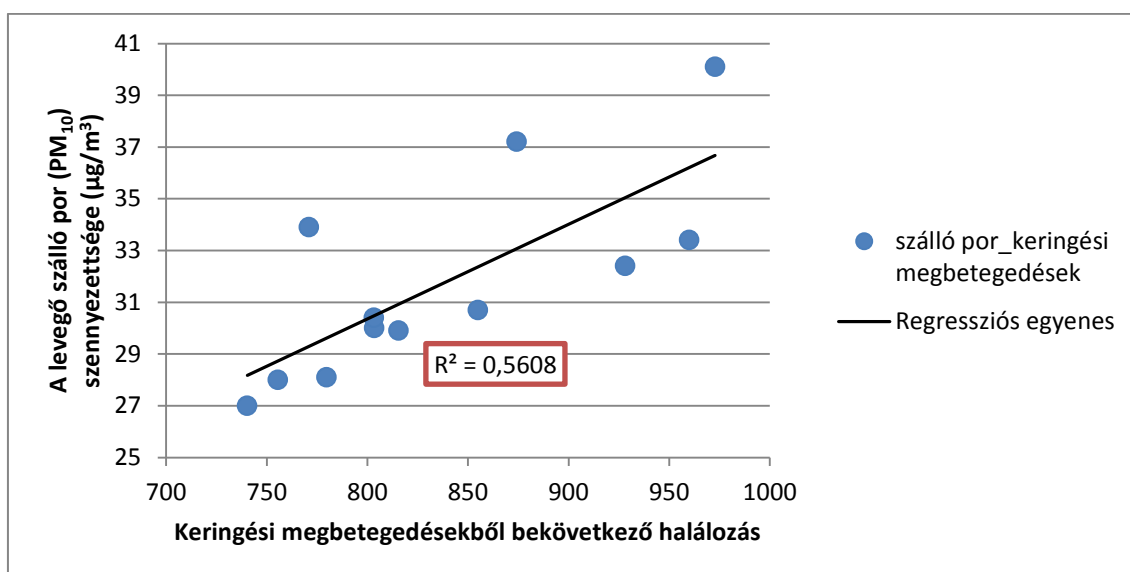
58. táblázat: Varianciaanalízis\_PM<sub>10</sub>\_keringési megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
1 Regressziós modell	86,988	1	86,988	11,494	,007
Hiba	75,679	10	7,568		
Összesen	162,667	11			

59. táblázat: Együtthatók\_PM10\_keringési megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
1 Regressziós állandó	2,098	8,758		,240	,816	-17,416	21,611
1 Keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,035	,010	,731	3,390	,007	,012	,058

A regressziós számítás igazolta, hogy van kapcsolat a levegő szálló por szennyezettsége és a keringési megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,535$ . A két tényező között pozitív, közepes kapcsolat van.



37. ábra: Regressziós egyenes\_PM10\_keringési megbetegedések

A levegő szálló por (PM<sub>10</sub>) szennyezettsége és a emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

60. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_\_PM10\_ emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,717	,514	,466	2,81126

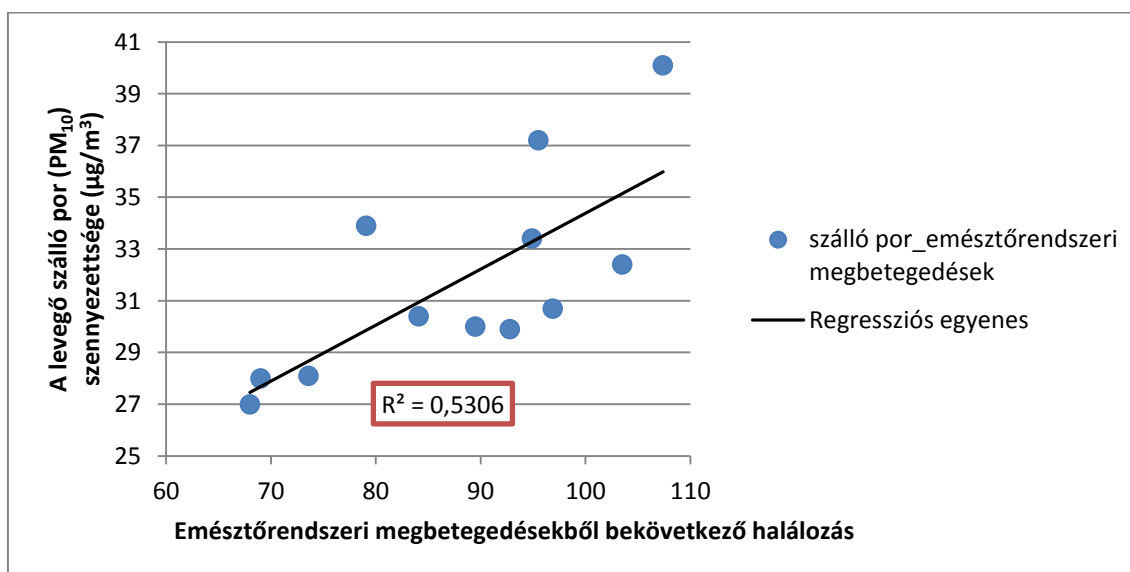
61. táblázat: Varianciaanalízis \_\_PM10\_ emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
1 Regressziós modell	83,635	1	83,635	10,582	,009
Hiba	79,032	10	7,903		
Összesen	162,667	11			

62. táblázat: Együtthatók\_PM<sub>10</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	13,175	5,742		2,294	,045	,380	25,969
1 Emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	,210	,065	,717	3,253	,009	,066	,354

A regressziós számítás igazolta a kapcsolatot a levegő szálló por szennyezettsége és az emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható  $R^2 = 0,514$ . A két tényező között közepes, pozitív kapcsolat van.



38. ábra: Regressziós egyenes\_PM<sub>10</sub>\_emésztőrendszeri megbetegedések

A levegő szálló por (PM<sub>10</sub>) szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás közötti regressziószámítás eredménye:

63. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata\_PM<sub>10</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	R	R <sup>2</sup>	Korrigált R <sup>2</sup>	Becslés standard hibája
1	,299	,089	-,002	3,84915

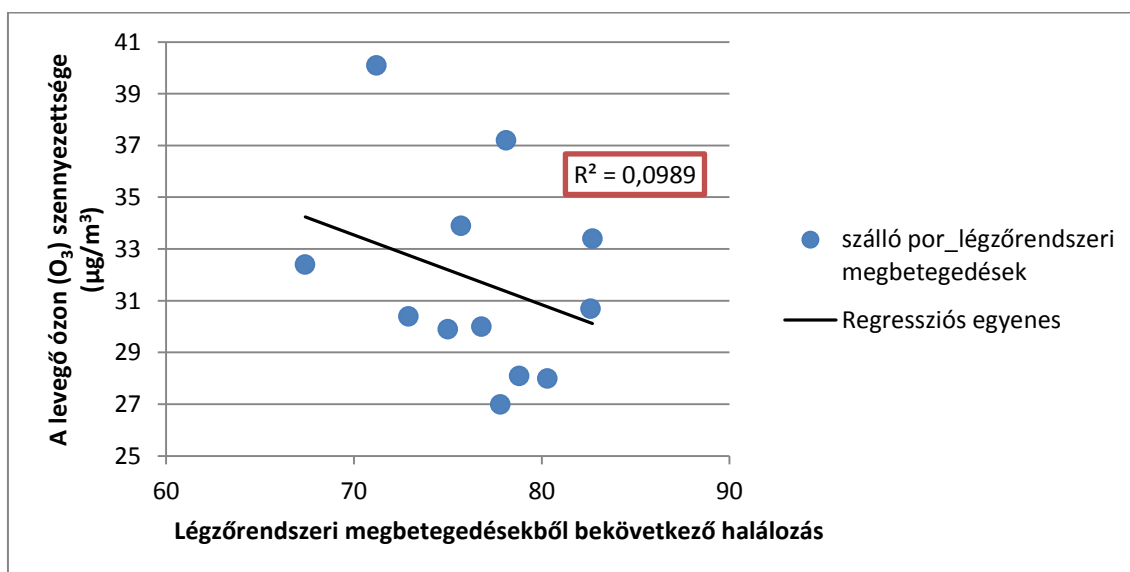
64. táblázat: Varianciaanalízis\_PM<sub>10</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Négyzetes eltérések összegei	Szabadságfok	Variancia	F	Szig.
Regressziós modell	14,507	1	14,507	,979	,346
1 Hiba	148,159	10	14,816		
Összesen	162,667	11			

65. táblázat: Együtthatók\_PM<sub>10</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

Modell	Standardizálatlan együtthatók		Standardizált együtthatók	t	Szig.	95,0% -os megbízhatóság	
	B	Standard hiba	Beta			Alsó határ	Felső határ
Regressziós állandó	50412	18,976		2,657	,024	8,130	92,694
1 Légzőrednszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozás	-,245	,247	-,299	-,990	,346	-,795	,306

A regressziós számítás részben igazolta a kapcsolatot a levegő szálló por szennyezettsége és a légzőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A determinációs együttható értéke  $R^2 = 0,089$ . A két tényező között negatív, nagyon gyenge kapcsolat van.



39. ábra: Regressziós egyenes\_PM<sub>10</sub>\_légzőrendszeri megbetegedések

### 5.2.3. Következtetés

A második hipotézisemben a légszennyezettség, ezen belül is a közlekedésből származó légszennyezettség, valamint a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások száma közötti kapcsolatot vizsgáltam. A hipotézisem bizonyításához regresszió analízist végeztem a KSH, valamint az OLM adataira támaszkodva. Vizsgálataimat 2003 és 2014 közötti időszakra vonatkozóan készítettem el. Számításaimnál a közlekedésből származó meghatározó légszennyező anyagokat (nitrogén-oxidok, kén-dioxid, szén-monoxid, ózon, szálló por), valamint három társadalmi mutatószámot - a légzőrendszer betegségei, keringési betegségek, valamint emésztőrendszer betegségei - vettem figyelembe.

Megállapítottam, hogy a légzőrendszeri megbetegedéséből bekövetkező halálozások esetén 44%-ban a kén-dioxid és 20%-ban a szén-monoxid a felelős. Szálló pornál a kapcsolat mértéke kevesebb, mint 10%, míg a nitrogén-oxidoknál 3% volt. Ózon esetén nagyon gyenge kapcsolatot kimutatni.

Számításaimmal igazoltam, hogy a keringési rendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások, továbbá a nitrogén-oxidok és a szén-monoxid légszennyező anyag koncentrációja között nagyon erős 80%-ot meghaladó kapcsolat van. Szálló pornál 54%-os volt a kapcsolat erőssége. Kén-dioxid esetén gyenge 30%-os erősséget mutattam ki, míg ózon esetén nagyon gyenge, mindösszesen 2%-ost.

Ezt követően meghatároztam a kapcsolatok erősségét a légszennyező anyagok illetve az emésztési rendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások között. Megállapítottam, hogy a kapcsolat erőssége a vizsgált társadalmi mutatószám illetve a nitrogén-oxidok között nagyon erős 80%-os, a szén-monoxiddal 65%-os erős, szálló por pedig 51%-os. Kén-dioxid esetén gyenge, 19%-os kapcsolatot tudtam kimutatni, míg ózon esetén ennél is gyengébb volt a kapcsolat mértéke.

Össességében arra a következtetésre jutottam, hogy a két leginkább meghatározó, legerősebb kapcsolatot mutató légszennyező anyagok a nitrogén-oxidok és a szén-monoxid volt, míg a leggyengébb kapcsolatot az ózon mutatta.

***A fenti megállapításokat figyelembe véve illetve a saját számításaim alapján a második számú hipotézisemet „A közlekedésből származó légszennyezettség kapcsolata a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások számával statisztikai módszerek alkalmazásával alátámasztható” igazoltnak tekintem.***

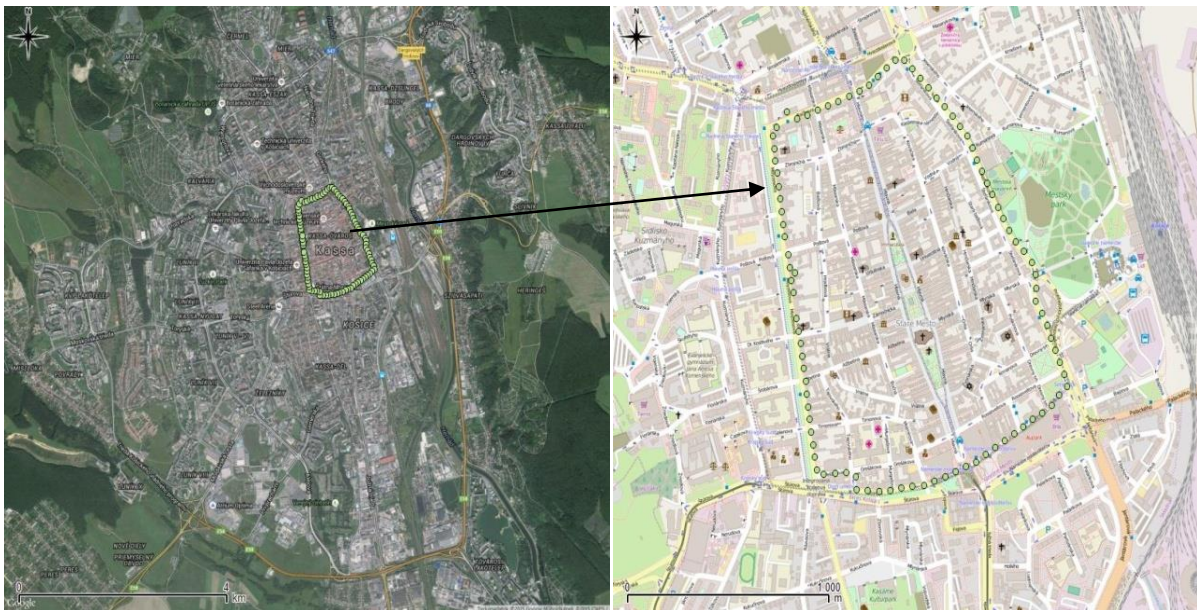
### 5.3. Harmadik hipotézis bizonyítása

A következőkben az általam felállított harmadik hipotézist – „A közlekedésből származó légszennyezettség mértéke egy adott városrészben vagy az egész városban dinamikus mérések elvégzésével megfelelő pontossággal jellemezhető” – szeretném bizonyítani.

#### 5.3.1. Mérési helyszín

Méréseimet a Szlovák Köztársaság második legnagyobb és iparilag legfejlettebb városában Kassán végeztem el (40. ábra). A város kelet Szlovákiában a Hernád folyó völgyében helyezkedik el, melyet nyugatról a Szlovák Érc-hegység nyúlványai, keletről a Szalánci-hegység határolnak. A város központja 208 méter tengerszint feletti magasságban helyezkedik el. [142] A város erős gazdasági bázissal rendelkezik emiatt a légszennyezettség egyik fő oka a nehézipar, a színesfém- és vaskohászat. A legnagyobb munkáltató az U. S. Steel Košice, s. r. o. kohászati vállalat, amely több mint 13 ezer dolgozót foglalkoztat [143]. A szennyezés másik oka a közlekedés.

A Regionális Statisztikai Hivatal adatai alapján Kassa lakossága megközelítőleg 240 ezer fő és több mint 300 ezer regisztrált gépjármű található meg a városban. Az utóbbi években, évtizedben a szállított utasok száma lecsökkent 65 ezer főről 28 ezer főre, ezzel szemben a személygépjárművek száma viszont emelkedett 165 ezer darabról 226 ezer darabra [144].



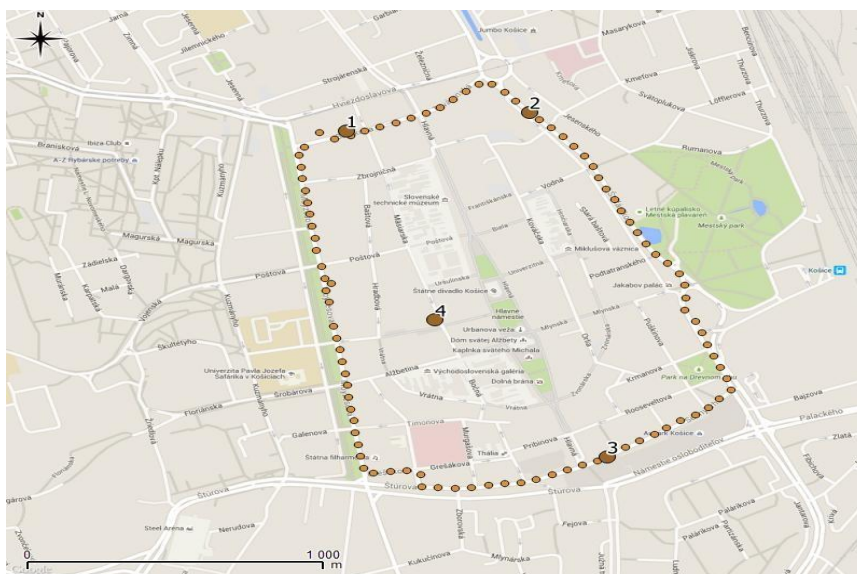
40. ábra: Mérési helyszín elhelyezkedése



Az 66. táblázat a statikus mérési helyszíneim pontos földrajzi elhelyezkedését mutatja. Összesen négy különböző helyszínen végeztem statikus méréseket. Az első M1-es ponttal jelölt helyszín egy egyirányú utca, amely viszonylag nagy forgalmat bonyolít le. Az M2-el jelölt mérőpont közvetlen közelében egy körforgalom, valamint egy kétszer két sávós közepesen erős forgalmat lebonyolító út található, valamint az SHMU telepített mérőkonténerre. Az M3-as mérőpont a térkép déli részén egy bevásárlóközpont előtti téren kapott helyett, amely körül szintén közepesen erős forgalommal terhelt útszakaszok találhatóak. Az M4-es mérőpont esik a sétálóutcahoz legközelebb. A téren autóforgalom nincs vagy korlátozva van, viszont van egy parkoló a tér keleti oldalán.

66. táblázat: Statikus mérési helyszínek földrajzi koordinátái

Vizsgálati helyszín neve:	Bačikova	Štefánikova	Námestie osloboditeľov	Dominikánske námestie
<b>Mérési pont jele:</b>	M1	M2	M3	M4
<b>Földrajzi elhelyezkedés:</b>				
▪ <b>Szélesség:</b>	48°43'33.52"É	48°43'35.18"É	48°43'1.96"É	48°43'14.80"É
▪ <b>Hosszúság:</b>	21°15'11.38"K	21°15'29.83"K	21°15'40.10"K	21°15'20.48"K



41. ábra: Mérőpontok elhelyezkedése

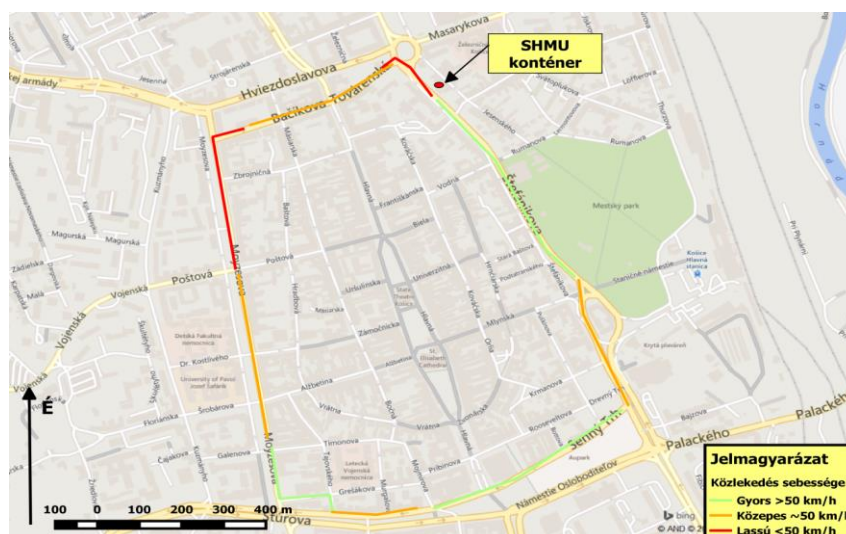
A 41. ábra szemlélteti a mérőpontok elhelyezkedését egymáshoz képest. A 42. ábra pedig a mérési területet szemlélteti a tömegközlekedés szempontjából. A kiválasztott területen található a nemzetközi és belföldi áru és személyforgalmat lebonyolító vasútállomás, valamint az autóbusszpályaudvar, ezenkívül két trolibusz vonal (71,72) továbbá 13 helyijárat (10,13,16,17,19,22,23,24,25,27,29,36,57) vonal megállói.



42. ábra: Mérési útvonal a tömegközlekedés szempontjából

### A terület forgalmi viszonyai

A mérések megkezdése előtt felmértem a terület forgalmi viszonyait a Google Forgalomfigyelő alkalmazás segítségével (43. ábra), valamint magam is végeztem közúti forgalom számlálást. (Forgalomszámlálás eredményeit a 2. számú melléklet tartalmazza.) Melyek alapján megállapítottam, hogy a kutatási területet bal oldalról (Moyzesova) egy közepesen erős forgalmú egyik irányban két sávós, másik irányban egy sávós út határolja. Északon egy erős forgalmat lebonyolító egyirányú utca található. Jobbról egy körforgalom és egy elég forgalmas kétszer két sávós út (Stefánikova), valamint a Városligettel helyezkedik el. A terület déli határát egy bevásárlóközpont és az előtte található tér (Námestie Osloboditeľov) képezi, amelyek előtt szintén egy közepes forgalommal bíró út található.



43. ábra: Forgalom alakulása a mérési útvonalon (Google Forgalomfigyelő alkalmazása alapján készített térkép)



### 5.3.2. Alkalmazott jogszabályok

A statikus mérési helyszínek kiválasztásánál a Szlovák Köztársaság Földművelésügyi, Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium által meghatározott *360/2010: A levegő minősége* [145] című rendeletének 3. számú mellékletében megfogalmazott követelményeket vettem figyelembe, melynek alapján a következő kritériumoknak tettem eleget:

- ⇒ a mintavételi szonda beszívó nyílásait a környezeti tárgyak (épületek, fák,) ne zavarják, helyükről a szabad égbolt legalább 270°-os szög alatt látható legyen, minden irányban, , valamint az állomás jó átszellőzésű helyen legyen, nem lehet pangó levegőjű, szélmentes zugban. A mintavételi pont elhelyezése néhány méterre az épületektől, fáktól, erkélyektől és egyéb akadályoktól
- ⇒ a mintavételi szonda beszívó nyílása a légzési zónában kell, hogy elhelyezkedjen 1,5 és 4 m közötti magasságban.
- ⇒ a mintavételi szonda beszívó nyílása nem lehet közvetlen közelében a kibocsátó forrásnak
- ⇒ a mintavételi szonda elhelyezése a főbb forgalmi csomópontok szélétől legalább 25m távolságban

A mérésim során figyelembe vettem továbbá a Szlovák Köztársaság Földművelésügyi, Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium által meghatározott *137/2010: A tiszta levegő* [146] című rendeletét.

### 5.3.3. Mérőműszerek, mérés menete

22 alkalommal végeztem méréssorozatokat a közlekedésből származó egyik meghatározó légszennyező anyagra, a nitrogén oxidokra (NO<sub>x</sub>).

67. táblázat: Statikus Mérések időpontjai

Mérések időpontja	
2014.07.14	10:00 - 11:00
2014.07.15	10:00 – 11:00
2014.07.16	11:00 – 12:00
2014.07.17	11:00 – 12:00
2014.08.04	10:00 – 11:00
2014.08.05	10:00 – 11:00
2014.08.06	11:00 – 12:00
2014.08.07	11:00 – 12:00
2014.08.08	10:00 – 11:00

68. táblázat: Dinamikus Mérések időpontjai

Mérés időpontja	Alkalmak
2014.06.16 – 2014.06.24	5 alkalommal 10:00 – 12:00
2014.07.07 – 2014.07.16	4 alkalommal 10:00 – 12:00
2014.08.11 – 2014.08.15	4 alkalommal 10:00 – 12:00

Méréseim során a mérőeszközöket a következő 44. ábrán látható módon rögzítettem egy Skoda típusú személygépjármű tetejére. A gépjárművet alternatív üzemanyaggal autógázzal, vagy más nével LPG-vel tankoltam. A mintavétel a területen a forgalommal együtt egyenletes sebességgel haladva a mérőműszerek beállási idejét figyelembe véve folyamatosan történt. Egy mérés alkalmával a területet kétszer kerültem körbe. Egy mérő kör megtétele átlagosan 60 – 70 percet vett igénybe.



**44. ábra: Mérőműszerek rögzítése**

A 69. táblázatban a méréseim során alkalmazott mérőműszereket és adatgyűjtő eszközöket foglaltam össze.

**69. táblázat: Mérőműszerek és az adatgyűjtő rendszerek**

Sor-szám	Megnevezés	Gyártó	Típusa
1.	NO szenzor	ADOS	TOX 592
2.	NO <sub>2</sub> szenzor	ADOS	TOX 592
3.	Adatgyűjtő	AHLBORN	ALMEMO 5690-2
5.	Adatkezelő számítógép (adatkezelő szoftverek: AMR CONTROL)	AHLBORN	AMR Control 5.15

70. táblázatban a méréseim során alkalmazott elektrokémiai szenzorok technikai adatai kerülnek bemutatásra.

70. táblázat: Mérőműszerek technikai adatai [147]

Tulajdonság	Szenzor: NO	Szenzor: NO <sub>2</sub>
Mérési tartomány	0-50 ppm / 0-61 µg/m <sup>3</sup>	0-30ppm / 0-56 µg/m <sup>3</sup>
Pontosság	±3%	±3%
Referenciapont vándorlás	<2%	<2%
Kereszt érzékenység	<2%	<2%
Beállási idő	<60 másodperc	<60 másodperc
Üzemi feszültség	15-24V	15-24V
Üzemelési hőmérséklet	-10 és +40°C	-10 és +40°C
Méret	80mm x 80mm	80mm x 80mm
Anyag	Alumínium	Alumínium
Tömeg	0,6 kg	0,6 kg

#### 5.3.4. Meteorológiai paraméterek

Méréseim során a meteorológiai paraméterek is gyűjtésre kerültek (1. számú melléklet). Az adatokból kiolvasható, hogy a mérések során a környezeti levegő átlagos napi középhőmérséklete 18°C és 29°C között hullámzott. A levegő páratartalma 30% és 78% között változott. A légnyomás csak kis mértékben ingadozott 1006hPa és 1018hPa között. Az uralkodó szélirány északi volt és az átlagos szélesség pedig meghaladta a 9,75km/h-t. Az általam és az intézet (SHMU) által mért adatokat az összehasonlításhoz egységesen mikrogramm per köbméterre (µg/m<sup>3</sup>), valamint 20°C (293,15K) hőmérsékletre és 101.325kPa nyomásra számoltam át.

#### 5.3.5. Statikus mérőpontok eredményei

Az 71. táblázat a statikus méréseim során kapott eredményeket, míg az 72. táblázat a statikus méréseim során a Szlovák Hidrometeorológiai Intézet konténere által mért eredményeket foglalja össze. (\*nincs adat=a mérőpont területét lezárták építkezés miatt.)

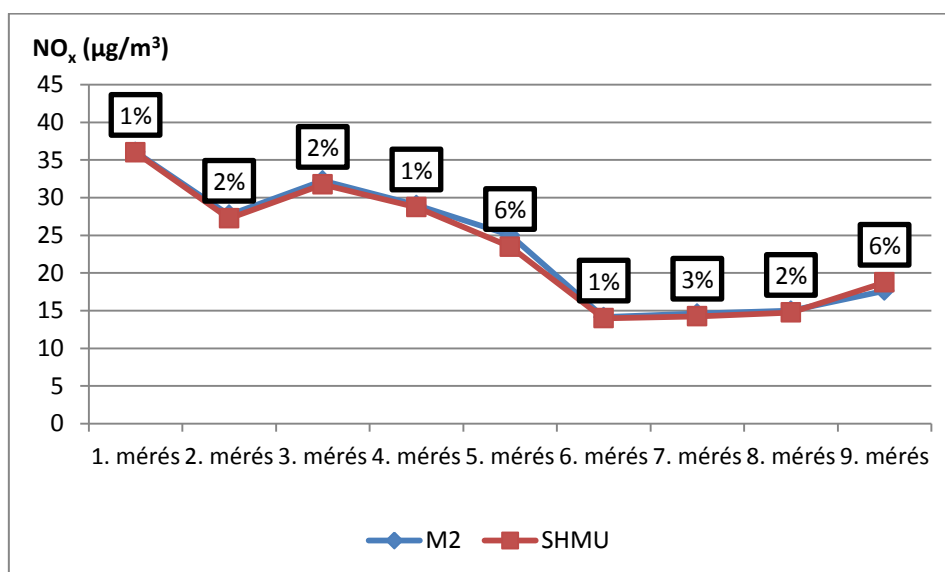
71. táblázat: Mérési eredmények nitrogén oxidok (µg/m<sup>3</sup>)

NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )				
Dátum	M1	M2	M3	M4
2014.07.14	28	36	45	41
2014.07.15	28	28	38	44
2014.07.16	30	32	33	36
2014.07.17	23	29	22	19
2014.08.04	22	25	24	24
2014.08.05	21	14	11	nincs adat*
2014.08.06	14	15	15	nincs adat*
2014.08.07	21	15	13	14
2014.08.08	23	18	15	16

72. táblázat: A statikus méréseimmel egy időben az SHMU által kapott mérési eredmények (Forrás: SHMU-tól kapott adatok alapján saját készítés)

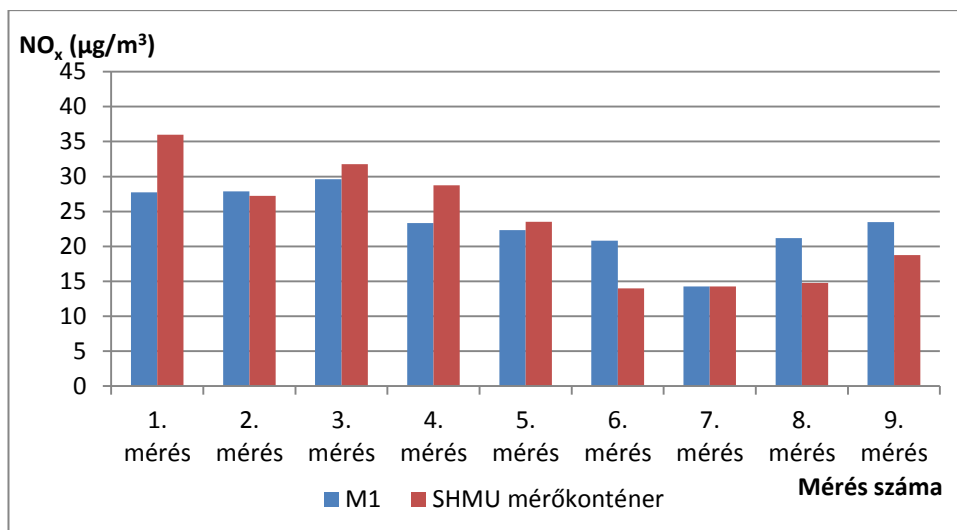
Dátum	Helyszín	NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
2014.07.14	Košice, Štefánikova	36
2014.07.15	Košice, Štefánikova	27
2014.07.16	Košice, Štefánikova	32
2014.07.17	Košice, Štefánikova	29
2014.08.04	Košice, Štefánikova	24
2014.08.05	Košice, Štefánikova	14
2014.08.06	Košice, Štefánikova	14
2014.08.07	Košice, Štefánikova	15
2014.08.08	Košice, Štefánikova	19

A második M2 statikus mérőpontomat a Szlovák Hidrometeorológiai Intézet mérőkonténerének a közvetlen közelében jelöltem ki. Összehasonlítva a mérőkonténer adatait a saját méréseimmel (45. ábra) megállapítható, hogy az eltérés a két mérőműszer között nem nagyobb, mint ±6%, ezért a többi mérőponton mért eredményeket is használhatónak tekintem.



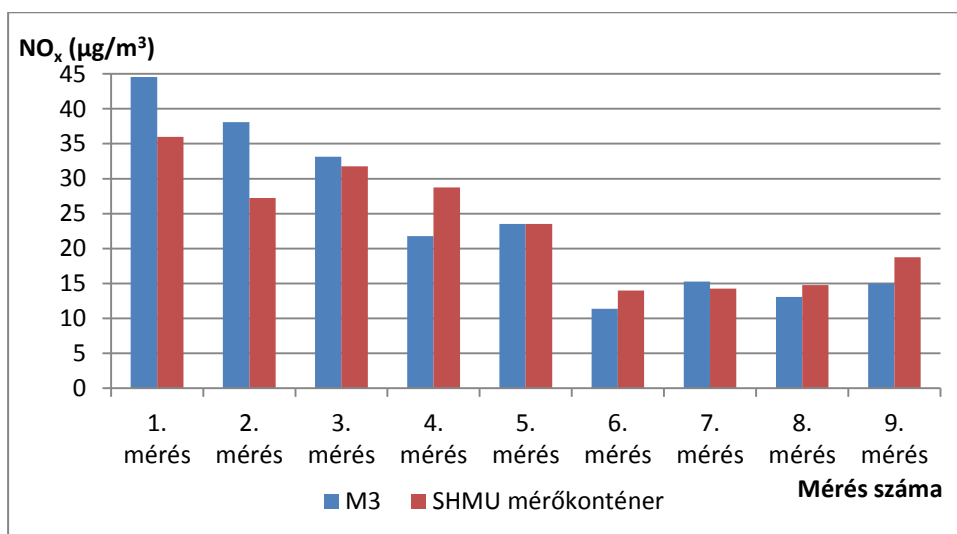
45. ábra: M2-es mérőpont és az SHMU érőkonténer adatainak összehasonlítása

Az M1-es mérőpont adatait összehasonlítva az SHMU mérőkonténer adataival megállapítható, hogy 5 alkalommal - vagyis több mint a mérések felénél - a NO<sub>x</sub> koncentrációja az M1 mérőpontban 25-45%-al magasabb volt, mint amit a mérőkonténer mért.



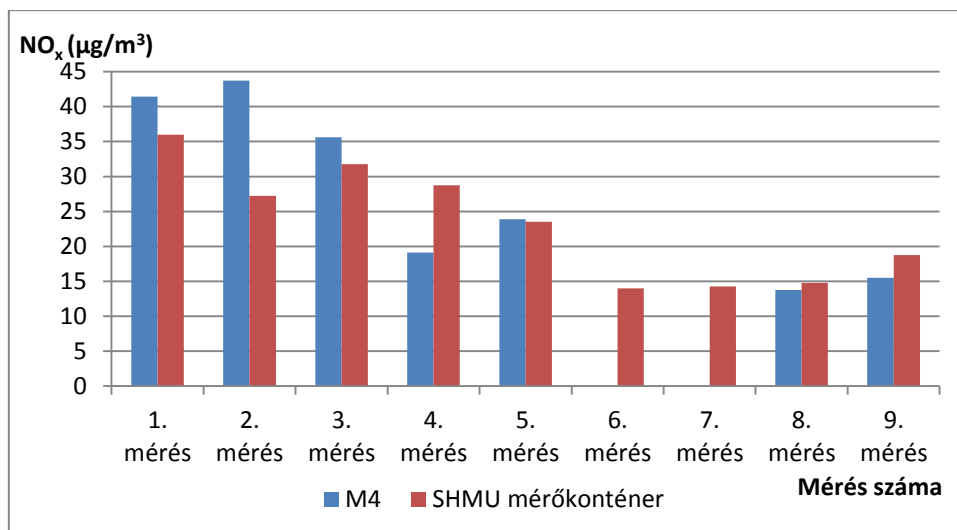
46. ábra: M1-es mérőpont és az SHMU adatainak összehasonlítása

Az M3-as mérőpont adatait összehasonlítva az SHMU mérőkonténer adataival szintén megállapítható, hogy ebben az esetben is 5 alkalommal - vagyis több mint a mérések felénél - a NO<sub>x</sub> koncentrációja az M3 mérőpontban 10-25%-al magasabb volt, mint amit a mérőkonténer mért.



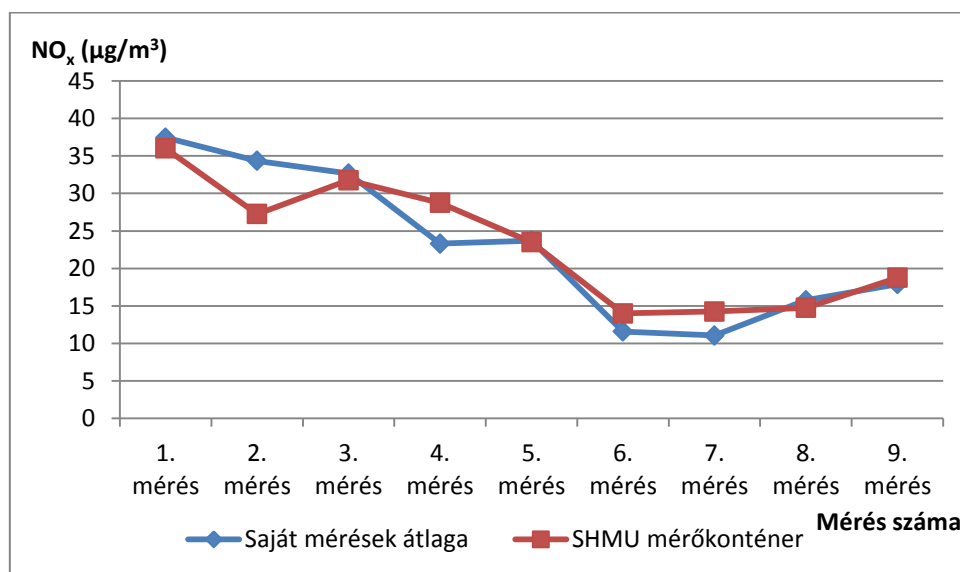
47. ábra: M3-as mérőpont és az SHMU adatainak összehasonlítása

Az M4-es mérőpont adatait összehasonlítva az SHMU mérőkonténer adataival szintén megállapítható, hogy ebben az esetben 4 alkalommal a NO<sub>x</sub> koncentrációja az M4 mérőpontban 10-60%-al magasabb volt, mint amit a mérőkonténer mért.



48. ábra: M3-as mérőpont és az SHMU adatainak összehasonlítása

Összességében megállapítható, hogy 5 alkalommal - július 14,15,16 , valamint augusztus 4 és 7 – magasabb koncentrációt mértem, mint az SHMU mérőkonténerre (49. ábra). Összehasonlítva az adatokat 5-25% közötti különbség figyelhető meg. Ezzel szemben 4 alkalommal viszont 5-30% alacsonyabb koncentrációkat mértem.



49. ábra: Saját mérésekből számolt átlag és az SHMU mérőkonténer összehasonlítása

### 5.3.6. Dinamikus mérőpontok eredményei

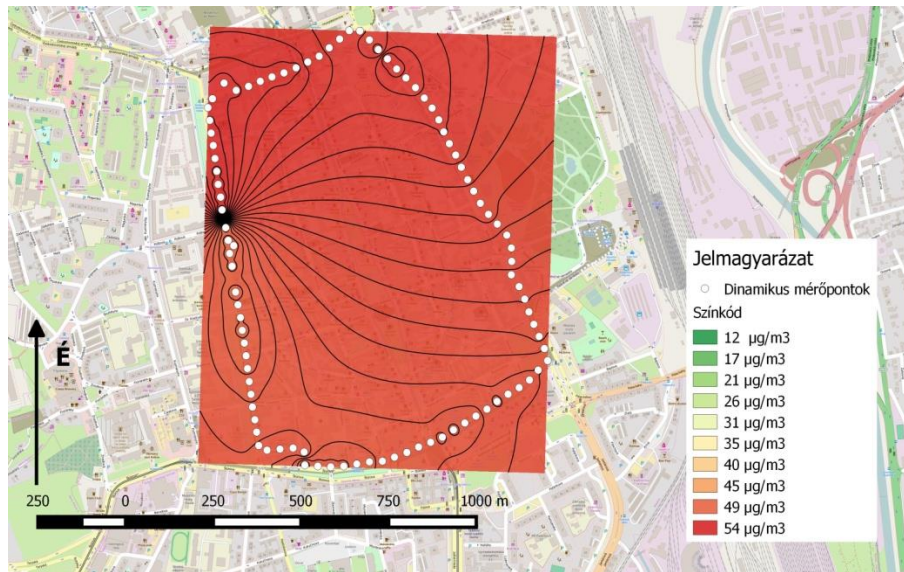
Az 73. táblázat a dinamikus méréseim során a Szlovák Hidrometeorológiai Intézet konténerére által kapott eredményeket, valamint az általam mért eredmények átlagait foglalja össze.

73. táblázat: Dinamikus mérési eredmények átlaga , valamint a méréseimmel egy időben az SHMU által kapott mérési eredmények (Forrás: SHMU-tól kapott adatok alapján saját készítés)

Dátum	Saját mérések NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	SHMU NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
2014.06.16	18	32
2014.06.18	42	41
2014.06.19	35	36
2014.06.24	52	48
2014.06.27	47	32
2014.07.07	51	33
2014.07.08	49	25
2014.07.10	20	32
2014.07.16	21	32
2014.08.11	16	18
2014.08.13	22	11
2014.08.14	13	16
2014.08.15	19	12

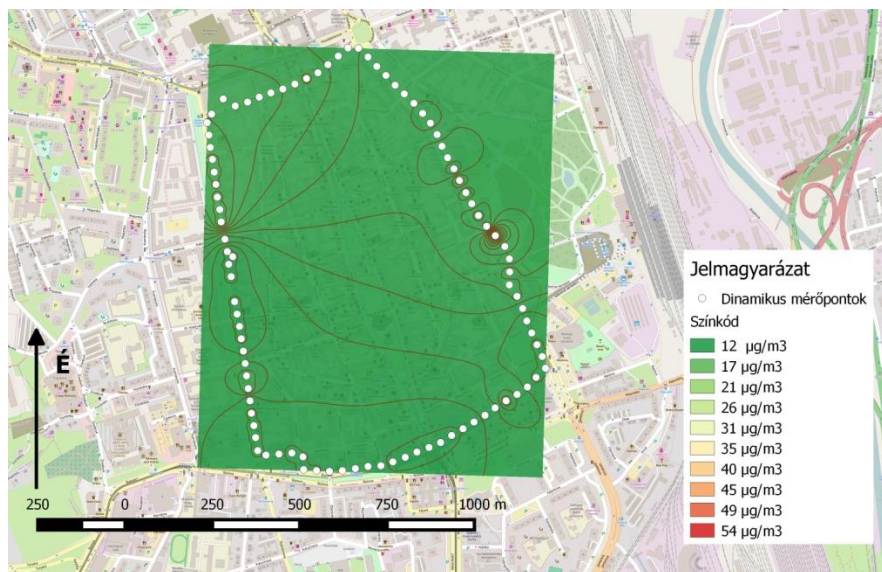
Ezt követően az adataimon egy térbeli elemzést végeztem a QGIS Pisa 2.10 térinformatikai szoftvert segítségével, amely alkalmas földrajzi információk megjelenítésére, kezelésére, elemzésére, új térképek létrehozására is. Figyelembe véve Waldo Tobler „a földrajz első törvénye” elnevezésű törvényét, amely kimondja, hogy minden mindennel összefügg, de a közelebbi dolgok erősebben hatnak egymásra; a távolsággal fordítottan arányos súlyozás (IDW, Inverse Distance Weighting, Shepard’s Method) modellt választottam.

Az adataimon idősorlemzést végeztem el, hogy az idősorban hosszabb időszakon tartósan érvényesülő tendenciákat, az idősor alakulásának a fő irányát megállapíthassam. Megállapítottam, hogy legszennyezettebb hónap a vizsgált időszakban a június volt (50. ábra), köszönhetően az alacsonyabb hőmérsékletnek (18-23°C) és páratartalomnak (30-45%), valamint az <5 m/s-ot nem meghaladó szélesebbességnek.



**50. ábra: Legszennyezettebb nap mérési eredményei (2014.06.24)**

Az elemzés alapján a legkevésbé szennyezett hónap az augusztus volt (51. ábra), ahol légszennyezettség mértéke nem haladta meg  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  értéket. (Az összes térképet a 4. számú melléklet tartalmazza)

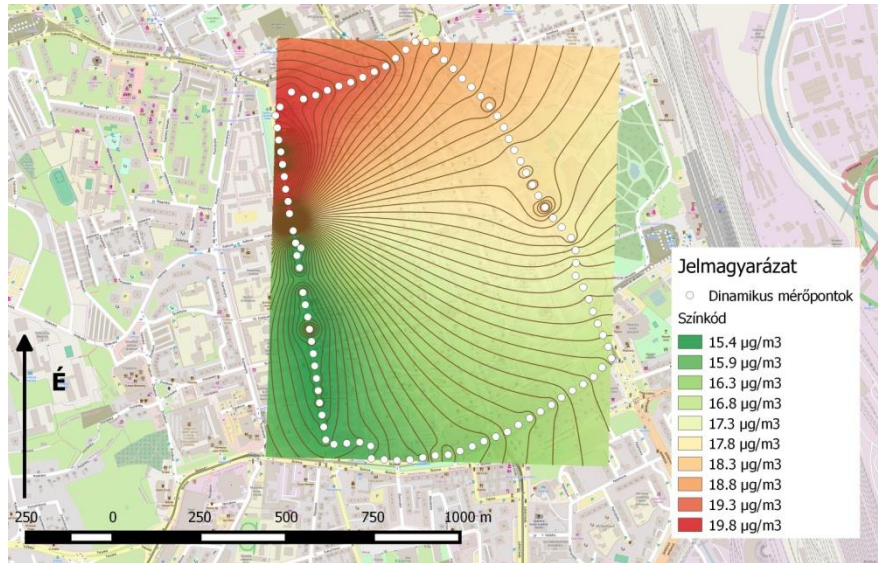


**51. ábra: Legkevésbé szennyezett nap mérési eredményei (2014.08.14)**

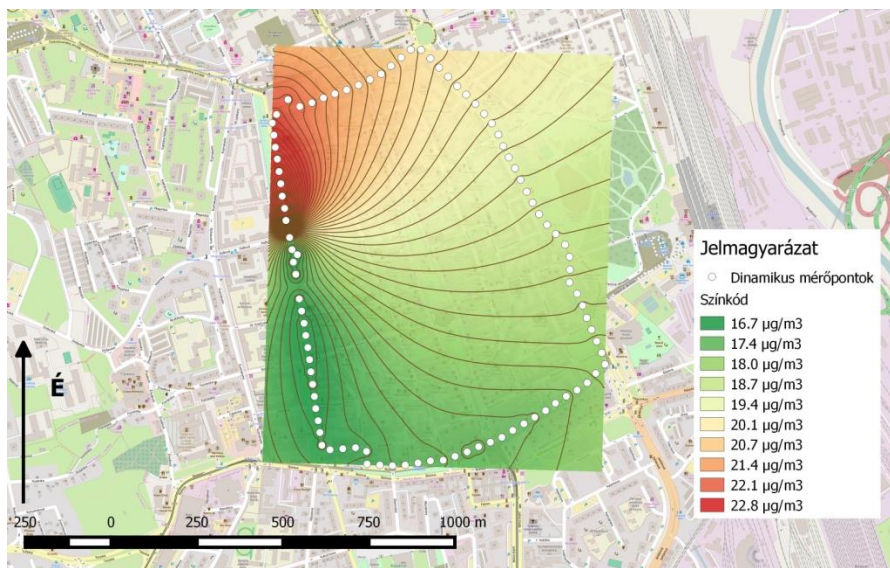
Ezt követően vizsgáltam a szennyező anyag térbeli elhelyezkedését a területen. Az elemzés eredményeként mind a három vizsgált hónapra külön légszennyezettség térképeket készítettem. (Az összes térképet a 5. számú melléklet tartalmazza) A térképek alapján megállapítottam, hogy a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentrációja szignifikánsan magasabb volt a vizsgált terület északi részén. A legszennyezettebb rész a mérő terület bal felső sarka volt ahol egy kereszteződés található. Északról délre haladva a légszennyező anyag



koncentrációja számottevően csökkent köszönhetően a jobb oldalon elhelyezkedő városi park hatásának, valamint a ball oldalon található fasornak.



52. ábra: Dinamikus mérési eredmények (1. nap – első mérési nap)



53. ábra: Dinamikus mérési eredmények (13. nap – utolsó mérési nap)

### 5.3.7. Következtetés

Kutatásom során, Kassán több ponton összesen 22 alkalommal mértem a NO<sub>x</sub> légszennyező anyag koncentrációját. Az eredmények azt mutatták, hogy az SHMU állomás által mért NO<sub>x</sub> koncentráció értékek csak a konténer közelében érvényesek. A négy kijelölt mérőponton mért adatokból jól látszott, hogy megközelítőleg 30% az eltérés a konténer és a saját mérések között. Erre építettem azt a következtetést, hogy a NO<sub>x</sub> légszennyező anyag koncentrációja egy folyamatosan változó és eloszlással rendelkező rendszer, amelynek jellemzésére elégtelen a város egy pontján mérni a tulajdonságait. Elméletem bizonyításához egy dinamikusan változó mérőpontokból álló mérőrendszert alkottam, amivel végrehajtottam egy ismételt méréssorozatot. A második méréssorozatot követően a dinamikus mérőrendszer mérési eredményein egy térbeli elemzést hajtottam végre. Az adatok IDW interpolációjának segítségével meghatároztam a NO<sub>x</sub> légszennyezettség változásának mértékét a kutatási területen. Megállapítottam, hogy a legszennyezettebb hónap a június volt és, hogy a NO<sub>x</sub> légszennyező anyag koncentrációja szignifikánsan magasabb volt a vizsgált terület északi részén. A mérések segítségével a legszennyezettebb terület is megállapításra került, amely a mérő terület bal felső sarkában foglalt helyet ahol egy forgalmas kereszteződés található.

*A fenti megállapításokat , valamint a számításaimat figyelembe véve a hármas számú hipotézisemet, mely szerint „A közlekedésből származó légszennyezettség mértéke egy adott városrészben vagy az egész városban dinamikus mérések elvégzésével megfelelő pontossággal jellemezhető” igazoltnak tekintem.*

## 5.4. Negyedik hipotézis bizonyítása

A következőkben az általam felállított negyedik hipotézist -, *A környezeti levegő légszennyezettségének mértéke meteorológiai és domborzati adatok ismeretében matematikailag modellezhető*” – szeretném bizonyítani.

A légköri emissziók előrejelzésére és analizálására a modellezés egy nélkülözhetetlen eszköz. Két különböző megközelítés alkalmazása terjedt el világszerte. Az első megközelítés a statisztikus elv, melynél adatsorok – elsősorban légszennyezést mérő monitoring hálózatokból származó adatok alapján – statisztikai módszerekkel történik a vizsgálat. A második megközelítés a dinamikus elv, ahol az adott kiindulási helyzetből a fizikai és kémiai folyamatok matematikai leírásán keresztül becsülik az adott légszennyező anyag koncentrációjának térbeli és időbeli alakulását. A szakirodalomban több különböző modellel is találkozhatunk [148] [149] [150] [151], ahogyan azt a primer kutatásaimban már bemutattam. A hipotézisem bizonyításához a dimenzió analízist (DA) választottam – amelyet 3.5.3 fejezetben írtam le – s a továbbiakban az általam elkészített modellt fogom ismertetni.

### 5.4.1. Dimenzió analízis modell

Először a környezeti levegő minőségét befolyásoló paraméterek kerültek meghatározásra, valamint azok SI alapegységben vett mértékegysége, amelyek a következők:

- ⇒ Q1= Érdesség ( $Z_0$ )
- ⇒ Q2= Hőmérséklet (T)
- ⇒ Q3= Légnyomás (p)
- ⇒ Q4= Szélsébség (v)
- ⇒ Q5= Légszennyező anyag koncentrációja ( $\text{NO}_x$ )
- ⇒ Q6= Csapadék (Cs)

- ⇒  $Q_1 = m$
- ⇒  $Q_2 = K$
- ⇒  $Q_3 = kg \times m^{-1} \times s^{-2}$
- ⇒  $Q_4 = m \times s^{-1}$
- ⇒  $Q_5 = kg \times m^{-3}$
- ⇒  $Q_6 = m \times s^{-1}$

Ezt követően az általános kapcsolat került megállapításra, amely a kiválasztott változók között megtalálható, s amely befolyásolja a környezeti levegő NO<sub>x</sub> koncentrációját, s amit a következő kifejezéssel lehet leírni:

$$\varphi(Q_1; Q_2; Q_3; Q_4; Q_5; Q_6) = 0 \quad (5.1)$$

A dimenziós analízis modellem alapja a Buckingham  $\pi$  elmélet, mely szerint minden folyamatot n darab fizikai mennyiség ír le és az összes fizikai mennyiség (változó) r darab különböző fizikai alapidimenziót tartalmaz, s így egy n-r féle dimenziótlan csoport formálható meg. Ezen elv alapján készült el a dimenzió mátrix (5.2), ahol r=4 fizikai változó és n=5 különböző fizikai mennyiség egy 4x5-ös mátrixot határoz meg.

<i>egység/változó</i>	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	
<i>K</i>	0	1	0	0	0	0	
<i>m</i>	1	0	-1	1	-3	1	(5.2)
<i>kg</i>	0	0	1	0	1	0	
<i>s</i>	0	0	-2	-1	0	-1	

A szélesség Q4 , valamint a csapadék Q6 mértékegysége megegyezik. A dimenzió analízis elve pedig kimondja, hogy ha két változónak azonos a mértékegysége, akkor az egyik használható fel. Ezért úgy döntöttem, hogy jelen esetben a szélességet Q6-ot választom. A csapadék Q6 egy következő számításban egy szimplex (dimenzió nélküli argumentum)  $\pi_2$ -ben került alkalmazásra, amelyet a (5.10) egyenletben fogok bemutatni.

Az argumentum általános formája, amelyre az egyenlet igaz a következő:

$$\pi_i = Q_1^{x_1} \times Q_2^{x_2} \times Q_3^{x_3} \times Q_4^{x_4} \times Q_5^{x_5} \times Q_6^{x_6} \quad (5.3)$$

A mátrix átalakított formája amelyre igaz, hogy a determinánsa nem egyenlő nullával.

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & -1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{vmatrix} = (-1) \times \begin{vmatrix} 0 \\ -3 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix} \times |x_5| \quad (5.4)$$

A mátrix determinánsa:

$$\Delta_A = \sum (-1)^{i+j} \times a_{ij} \times M_{ij} \quad (5.5)$$

$$\Delta_A = 1$$

Ezt követően a mátrixból (5.4) lineáris egyenletek (5.6) - összesen négy darab lineáris egyenlet öt ismeretlen paraméterrel – került megállapításra.

$$\begin{aligned} 0 &= x_2 \\ 3x_5 &= x_1 - x_3 + x_4 \\ x_3 &= -x_5 \\ -2x_3 - x_4 &= 0 \end{aligned} \tag{5.6}$$

A négy lineáris egyenlet (5.6) megoldásával az ismeretlen paraméterek meghatározásra kerültek, s egy független vektort (5.7) alkotnak.

$$\begin{array}{rcccccc} \text{vektor} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ \pi_1 & 0 & 0 & 1 & 2 & -1 \end{array} \tag{5.7}$$

A (5.1) egyenletbe behelyettesítve megkapjuk a  $\pi_1$ -et, ami a következő:

$$\pi_1 = P^1 \times v^2 \times NO_x^{-1} \tag{5.8}$$

Ezután a két azonos mértékegységgel (dimenzióval) rendelkező változó közötti kapcsolat került meghatározásra:

$$\begin{array}{cc} x_4 & x_6 \\ -1 & 1 \end{array} \tag{5.9}$$

A dimenzió nélküli argumentum formája:

$$\pi_2 = v^{-1} \times Cs^1 \tag{5.10}$$

A két vektorból alkotott rendszer dimenzió nélküli formája, amely a végső érvényes megoldás:

$$\begin{array}{rccccccc} \text{vektor} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ \pi_1 & 0 & 0 & 1 & 2 & -1 & 0 \\ \pi_2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{array} \tag{5.11}$$

A keresett homogén dimenziós függvény dimenzió nélküli formája:

$$\varphi(\pi_1 \pi_2) = 0 \quad (5.12)$$

A változók átalakítását, behelyettesítését követően a függvény következő alakja:

$$\varphi\left(\frac{P \times v^2}{NO_x}; \frac{Cs}{v}\right) = 0 \quad (5.13)$$

A dimenzió nélküli argumentum  $\pi_1$  tartalmazza az ismeretlen  $NO_x$  paramétert, ezért ez az argumentum kifejezhető a  $\pi_2$  argumentumával, ami a következő:

$$\varphi(\pi_2) = \pi_1 \quad (5.14)$$

A kapcsolat (5.14) amely a független  $\pi_2$  argumentum és a függő  $\pi_1$  között fennáll a következő exponenciális egyenlettel írható le:

$$\pi_1 = A \times \pi_2^B \quad (5.15)$$

A regressziós egyeneshez a regressziós koefficiens a legkisebb négyzetek módszerével lehet meghatározni. A (5.15) egyenlet kiszámolásával pedig felírható a légszennyező anyag koncentrációjának a környezeti levegővel való kapcsolata:

$$\frac{P \times v^2}{NO_x} = A \times \left(\frac{Cs}{v}\right)^B \quad (5.16)$$

A változók átalakítását követően a függvény alakja a következő:

$$NO_x = A^{-1} \times Cs^{-B} \times P \times v^2 \times v^B \quad (5.17)$$

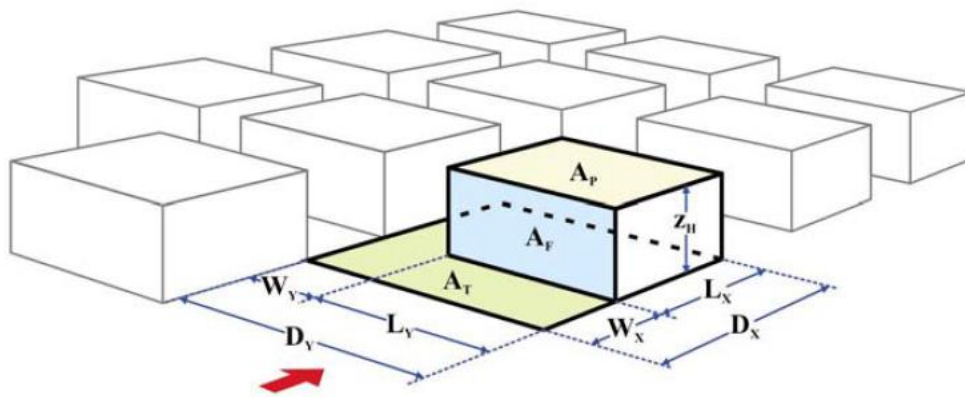
$$NO_x = \frac{P \times v^{2+B}}{A \times Cs^B} \quad (5.18)$$

A (5.17) és a (5.18) egyenlet mutatja be a légszennyező anyag koncentrációját meghatározó modellt.

#### 5.4.2. Modellhez szükséges adatok

A releváns, szükséges meteorológiai paraméterek: Hőmérséklet (K); Légnyomás ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$ ); Szélsebesség ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) és Csapadék ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a Szlovák Hidrometeorológiai Intézettől kapott adatok kerültek felhasználásra.

Az érdesség paraméter kiszámításához a morfológikus módszert alkalmaztam, amely a felszíngeometria számszerűsítésén alapul. A módszer a vizsgált területen előforduló összes objektumot (épületek, növények, stb.) érdességi elemként fogja fel és a felszínérdesség számítását ezen elemek geometriáját jellemző értékekre vezeti vissza.



54. ábra: A morfológikus felszínérdesség számítási módszer alapadatai szabályos épületrendezés esetén, a piros nyíl jelöli a feltételezett áramlási irányt

A legelterjedtebb számítási módszer a következő:

$$Z_0 = f_0 \times \bar{z}_H \quad (5.19)$$

Ahol,

$Z_0$  az érdesség magassággal (aerodynamical roughness length)

$f_0$  együttható értéke 0,06 és 0,13 közötti változó

$z_H$  pedig az átlagos magassággal súlyozott frontális felület arány (average height weighted with frontal area)



Továbbá 2014 nyarán két hónapon keresztül – július és augusztus hónapban – több alkalommal NO<sub>x</sub> légszennyező anyag koncentráció méréseket végeztem elektrokémiai szenzorokkal Kassa 4 különböző pontján, a belvárosi részén (55. ábra).



55. ábra: A kutatási projekt méréseinek helyszíne és annak földrajzi helye (a) Légi felvétel a belvárosról (b) Mérések földrajzi helyszíne (Google Earth)

A statisztikailag feldolgozott adatokat a következő 74. táblázatban ismertetem (egy adat egyenlő az egy mérési időtartamban mért adatok átlagával)

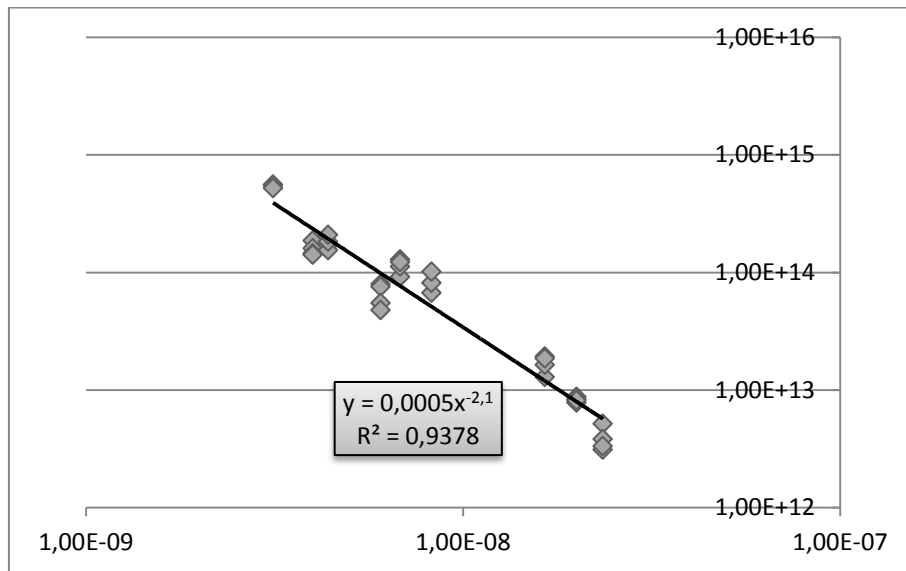
74. táblázat: Releváns paraméterek értékei , valamint a mért légszennyező anyag koncentrációja

	Érdesség	Hőmérséklet	Légnyomás	Szélsebesség	Csapadék	NO <sub>x</sub>
	m	K	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup>	m.s <sup>-1</sup>	m.s <sup>-1</sup>	kg.m <sup>-3</sup>
14.07	2.08	2.98E+02	1.01E+05	1.17E+00	2.74E-08	3.72E-08
15.07	2.08	3.00E+02	1.02E+05	4.53E+00	2.74E-08	3.40E-08
16.07	2.08	3.01E+02	1.02E+05	6.86E+00	2.74E-08	3.06E-08
17.07	2.08	3.00E+02	1.02E+05	6.25E+00	2.74E-08	2.25E-08
04.08	2.08	3.02E+02	1.01E+05	1.39E+00	2.78E-08	2.37E-08
05.08	2.08	2.98E+02	1.01E+05	3.37E+00	2.78E-08	1.42E-08
06.08	2.08	2.98E+02	1.01E+05	8.87E+00	2.78E-08	1.47E-08
07.08	2.08	2.98E+02	1.01E+05	4.08E+00	2.78E-08	1.51E-08
08.08	2.08	2.94E+02	1.01E+05	1.68E+00	2.78E-08	1.76E-08



### 5.4.3. A modell érvényesítése

Az 74. táblázatban szereplő releváns paraméterek alapján, a dimenzió nélküli argumentum kiszámításra került az (5.8) és az (5.10) egyenlet alapján. Az (5.14) egyenlet alapján a dimenzió nélküli argumentumok  $\pi_1$  és a  $\pi_2$  ábrázolásra kerültek egy logaritmikusan változó skálán (56. ábra).



56. ábra: Dimenzió nélküli argumentum és a regressziós egyenes logaritmikus skálán ábrázolva

A regressziós egyenlet formája a következő:

$$\pi_1 = 0,0005 \times \pi_2^{-2,1} \quad (5.20)$$

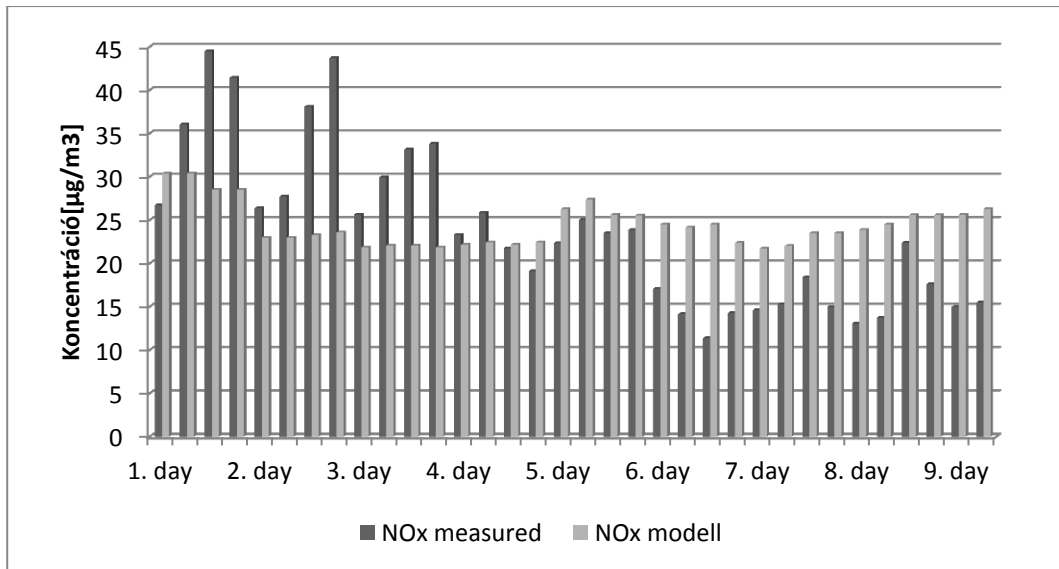
A regressziós koeficiensek a következők:

$$A = 0,0005$$

$$B = -2,1$$

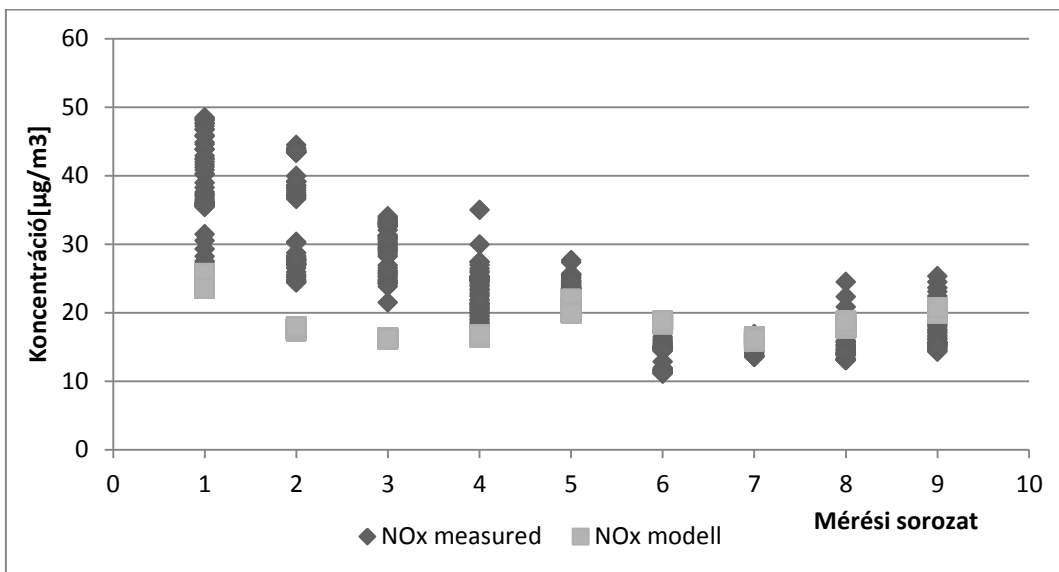
A nitrogén oxid koncentráció az (5.17) egyenlet alapján lett kiszámítva. A modellbe a július és augusztus hónapban mért  $\text{NO}_x$  adatok lettek felhasználva. A mért és modell által számolt értékek összehasonlításra kerültek, amelyeket a következő 57. ábra szemléltet. A vízszintes tengelyen a mérési periódus (9 mérőnap) a függőleges tengelyen pedig a mért és modell által kalkulált  $\text{NO}_x$  koncentrációk láthatóak. Minden

oszlop az 57. ábrán egyenlő egy mérési periódusban mért értékek átlagával egy mérőponton.



57. ábra: Mért és modell által kalkulált nitrogén koncentráció

Az 58. ábrán a mért és a modell által kalkulált  $\text{NO}_x$  koncentráció szórása látható. Az x tengelyen – ahogyan az előbbi 57. ábrán – a mérési periódus (9 mérőnap) az y tengelyen pedig a mért és modell által kalkulált  $\text{NO}_x$  koncentrációk szórása látható. Minden oszlop az 58. ábrán egyenlő egy mérési periódusban mért értékek átlagával az összes mérőponton.



58. ábra: Mért és modell által kalkulált nitrogén koncentráció szórása

Ezt követően a modell bizonytalansága is kiszámításra került, amihez a következő egyenletet használtam fel.

$$\sigma = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|C_{i,méert} - C_{i,modell\ által\ kalkulált}|}{C_{i,méert}} \times 100 \quad (5.21)$$

A modell bizonytalansága a (5.21) egyenlet alapján:

$$\sigma = 32\%$$

#### 5.4.4. A modell helyessége

Miután megalkottam az NO<sub>x</sub> légszennyező anyag koncentrációját a környezeti levegőben meghatározó modellt az egyenlet helyességét ellenőriztem a fizikai hasonlóság vizsgálattal.

A 56. ábra minden egyes pontja, ami a  $\pi_1 = \varphi(\pi_2)$  függvény egyenesén fekszik egy lehetséges megoldás, abban az esetben, ha a dimenzió nélküli argumentumok a  $\pi_1$  és  $\pi_2$  fix értékek. Minden egyes pontban ahol a függvény  $\pi_1 = \varphi(\pi_2)$ -vel megegyezik végtelen számú fizikailag hasonló eset van, amelyek esetén elmondható, hogy

$$\pi_{1(model)} = \pi'_{1(valóság)} \quad (5.22)$$

Ezt követően a dimenzió nélküli argumentumokat behelyettesítve az (5.22) képletbe megkapjuk a megfelelő változókat

$$\frac{P \times v^2}{NO_x} = \frac{P' \times v'^2}{NO_{x'}} \quad (5.23)$$

Az arányossági tényezők változása az egyes paraméterek esetén (releváns változók) a modell és a „valóság” esetén:

$$\frac{P'}{P} = C_P \quad (5.24)$$

$$\frac{v^{2'}}{v^2} = c_{v^2} \quad (5.25)$$

$$\frac{NO_x'}{NO_x} = c_{NO_x} \quad (5.26)$$

$$\frac{Cs'}{Cs} = c_{Cs} \quad (5.27)$$

$$\frac{v'}{v} = c_P \quad (5.28)$$

A kapott konstansokat behelyettesítve az (5.23) egyenletben meghatározott arányossági kapcsolatba megkapjuk a modell törvényt, amelyet hasonlóság jelzésnek is neveznek (indication similarities) az öt állandó arányosságára. A mi esetünkben az összes változók száma 5, de mivel Cs/v állandó, ezért 3.

Modell törvény szerint átalakítva

$$1 = \frac{c_P \times c_{v^2}}{c_{NO_x}} \quad (5.29)$$

Modell törvény alkalmazása a különböző szélviszonyok esetén:

Feltételezem, hogy a valóság és modell különbözőségei szélviszonyok alakulása miatt vannak. Megváltoztathatja, a skálát a releváns változók (5.26) és (5.27) közötti kapcsolat szabályozása. Az öt ismeretlen és két dimenzió nélküli argumentumból ki tudjuk választani az arányokat a három releváns változó és a két kiszámolt változóra.

A kiválasztott adatok legyenek a következők:

$$\begin{aligned} \text{a) } c_P &= 2 \\ c_v^2 &= 1 \quad \text{azaz} \quad c_{P'/C_P} = 2 \end{aligned}$$

Modell kiszámítása modell törvény alapján:

$$c_{NO_x} = c_P \times c_{v^2} \quad (5.30)$$

Majd a (28) egyenletbe behelyettesítve és azt megoldva:

$$c_{NO_x} = 1$$

Ennek következtében:

$$\frac{NO_x'}{NO_x} = c_{NO_x} \rightarrow NO_x' = c_{NO_x} \times NO_x$$
$$NO_x' = 1 \times NO_x$$

Ezt követően meg kell vizsgálni, hogy ugyanazt az eredményt kapjuk-e abban az esetben, ha közvetlenül alkalmazzuk a hasonlósági és fizikai kritériumokat az (5.22) egyenlet alapján, 56. ábra ábrázolt funkcionális függés a  $\pi_1 = \varphi(\pi_2)$  esetén is.

A (5.22) egyenlet alapján tehát:

$$\pi_1 = \pi_1' \quad (5.31)$$

Vagyis

$$\log \pi_1 = \log \pi_1' \quad (5.32)$$

A (31) egyenletbe behelyettesítve a releváns változókat

$$\frac{P \times v^2}{NO_x} = \log \pi_1 = \log \pi_1' = \frac{P' \times v'^2}{NO_x'} \quad (5.33)$$

Ahonnán

$$NO_x' = \frac{P \times v^2}{NO_x} \times P' \times v'^2 = NO_x \times c_P \times c_{v^2} \quad (5.34)$$

Mivel

$$\frac{c_P'}{c_P} = 2 \quad \frac{c_{v^2}'}{c_{v^2}} = 1$$

A (5.34) egyenletbe behelyettesítve megkapjuk, hogy

$$NO_x' = 1 \times NO_x$$

Tehát a levezetést követően megállapítható, hogy a modell és a valóság fizikailag hasonlóak egymáshoz.

#### 5.4.5. Következtetés

A negyedik hipotézisem fő feladata egy olyan matematikai modell megalkotása volt, amellyel meghatározható a környezeti levegő  $\text{NO}_x$  koncentrációja. A modellem a dimenzió analízisen, valamint annak legismertebb tételén, a Buckingham  $\pi$  elven alapult. A kifejlesztett modell kalibrálására és ellenőrzésére a Kassa belvárosában mért légszennyező, illetve meteorológiai és domborzati adatokat használtam fel. Kiszámoltam továbbá a modell bizonytalanságát, s összehasonlítottam a mért légszennyező anyag koncentrációkkal. A modell abszolút bizonytalansága 32%. Több már említett szerző hozott létre hasonló dimenzió analízisen alapuló matematikai modellt, ahol az abszolút hiba 18% [150] és 31% [152] volt. Ez az eltérés megengedhetőnek tekinthető olyan folyamatok modellezésénél, mint a légszennyező anyag koncentrációja a környezeti levegőben. Így az érték elfogadható és ez megerősíti, hogy a fentebb bemutatott matematikai modell használható a környezeti levegő  $\text{NO}_x$  koncentrációjának előrejelzésére.

*A fenti megállapításokat, számításokat figyelembe véve a négyes számú hipotézisemet, mely szerint „A környezeti levegő légszennyezettségének mértéke meteorológiai és domborzati adatok ismeretében matematikailag modellezhető” igazoltnak tekintem.*

## 6. Következtetések és javaslatok

### 6.1. Következtetések

Disszertációmban a különböző matematikai, fizikai számítások és elemzések elvégzését követően az alábbi következtetéseket vontam le:

1. Statisztikai vizsgálataim alapján elmondható, hogy a városi lakosság aránya – Európában vizsgált 285 különböző méretű város alapján – 2005-ben 290 millió főről 2012-ben 301 millió főre emelkedett, s a növekedés üteme több mint 3% volt. A legnagyobb mértékű növekedés a 3 millió lakosnál többel rendelkező városok estén következett be (~6%).
2. Számításaim alapján kijelenthető, hogy a személygépjárművel történő szállítás számai folyamatosan emelkedtek Európában az évek során 80,1%-ról 82,6%-ra. Ezzel párhuzamosan a tömegközlekedés használata folyamatosan csökkent 14%-ról 12%-ra míg a vasúti közlekedés szinte változatlanul alacsony szinten 5,6 – 5,5% körül alakult.
3. Konstatálható továbbá, hogy a városiasodás növekedésével egy időben az autóutak hossza, valamint az 1000 lakosra jutó személygépjárművek száma is folytonos növekedést mutatott. Míg 2005-ben átlagosan 408 darab személygépjármű jutott 1000 lakosra, addig 2012-ben több mint 482 darab, ami azt jelenti, hogy 7 év alatt több mint 15%-os változás következett be.
4. Megállapítottam, hogy a fokozott urbanizáció és az erősödő motorizáció következtében a városi lakosság 20-40% volt kitéve több mint 35 napon át  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ -nél magasabb  $\text{PM}_{10}$  koncentrációnak a környezeti levegőben, s a lakosság 14-65%-át érintette több mint 25 napon át napi  $120\mu\text{g}/\text{m}^3$  határértéket meghaladó magas ózon koncentráció.
5. Kapcsolatot találtam a regressziós számítások eredményeként a különböző légszennyező anyagok és a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között. A légzőrendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások esetén a két legerősebb kapcsolatot a kén-dioxid (44%) és a szén-monoxid mutatta (20%).
6. Számításaimmal igazoltam, hogy a keringési rendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások, illetve a nitrogén-oxidok és a szén-monoxid

légszennyező anyag koncentrációja között nagyon erős 80%-ot meghaladó kapcsolat van.

7. Megállapítottam, hogy a kapcsolat erőssége az emésztési rendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások között illetve a nitrogén-oxidok között nagyon erős 80%-os, a szén-monoxiddal 65%-os erős, szálló por pedig 51%-os.
8. Regressziós számításaim eredményei azt mutatták, a két leginkább meghatározó, legerősebb kapcsolatot mutató légszennyező anyagok a nitrogén-oxidok és a szén-monoxid volt, míg a leggyengébb kapcsolatot az ózon mutatta.
9. Mérési eredményeim igazolták, hogy az SHMU állomás által mért  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentráció értékei csak a konténer közelében érvényesek. A négy különböző helyszínen felállított mérőponton mért adatokból jól látszott, hogy megközelítőleg 30% az eltérés a konténer és a saját mérések között.
10. Dinamikusan változó mérőpontokból álló mérőrendszert alkottam, majd a mérési adatokat térinformatikai módszerekkel modelleztem és az adatokon egy térbeli elemzést, interpolációt hajtottam végre. Ezt követően meghatároztam a leginkább szennyezett területet – ahol a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentrációja szignifikánsan magasabb értékeket mutatott – amely a mérő terület bal felső sarkában foglalt helyet ahol egy forgalmas kereszteződés található.
11. Létre hoztam egy dimenzió analízisen alapuló matematikai modellt, amellyel meghatározható a környezeti levegő  $\text{NO}_x$  koncentrációja. A kifejlesztett modell kalibrálására és ellenőrzésére Kassa belvárosában mért légszennyező , valamint meteorológiai és domborzati adatokat használtam fel. A modell abszolút bizonytalansága 32%, ami megengedhetőnek tekinthető olyan folyamatok modellezése esetén, mint a légszennyező anyag koncentrációja a környezeti levegőben.



## 6.2. Javaslatok

A közlekedésből származó légszennyezettség csökkentésére a következő javaslatokat teszem:

- 1) **A gépjárművek hagyományos benzinnel vagy dízellel történő üzemeltetéséről egy korszerűbb és környezetbarátabb üzemeltetésre történő áttérés.**
  - a) A dízelüzemű gépjárművek sűrített földgáz (CNG) üzemre történő átállítása.
  - b) A benzinüzemű gépjárművek autógáz (LPG) üzemre történő átállítása.
  - c) Hibrid hajtású gépjárművek (személy- és tehergépjárművek) beszerzése.
  - d) Elektromos hajtású gépjárművek (személy- és tehergépjárművek) beszerzése.
  
- 2) **A tömegközlekedés népszerűsítése és a benne résztvevők számának növelése.** Ehhez szükséges a jelenlegi elavult gépjárműparkot egy korszerűbbre lecserélni, a különböző menetrendeket egymáshoz kellene összehangolni, továbbá függetleníteni kellene a közforgalmú közlekedés járműveit a torlódásoktól például buszsávok kijelölésével. A világ több mint 77 városában [153] – például Tallin (Észtország), Mariehamn (Finnország), Kiruna (Svédország) – vezettek be sikeresen ingyenes vagy részben bizonyos szolgáltatásokra kiterjedő ingyenes utazást. Úttörőnek számít két európai város a belga Hasselt, valamint a németországi Templin, ahol nem kell fizetni a buszos tömegközlekedését. [154] Az 1997-es bevezetése óta Hasseltban több mint tízszeresére Templinben pedig tizenkétszeresére emelkedett az utasok száma. [154]
  
- 3) **Park and Ride – parkolni és utazni – parkolás népszerűsítése** és az ilyen parkolók számának növelése, mellyel a városmagok, történelmi városrészek, valamint zöldövezetek terheltsége jelentősen lecsökkenthető. Az egyik legjobb példa a P+R rendszerre Hollandiában található. Az Amszterdamot körülvevő A10-es autópályán 7 darab p+r parkolót létesítettek ahonnan a belváros

tömegközlekedéssel szinte pillanatok alatt elérhető. A parkolók a hét minden napján napi 24 órában állnak rendelkezésre. [155]

- 4) **A különböző nem motorizált közlekedési módok, mint bérelhető városi kerékpár rendszer kiépítése, támogatása, népszerűsítése.** A jó működéshez elengedhetetlen a minél több dokkoló állomás kiépítése, valamint a kerékpárút hálózat korszerűsítése és növelése. Már működő rendszerre példa a Bécsben üzemeltetett CityBike Wien elnevezésű városi kerékpár kölcsönzési rendszer, ahol több mint 110 állomáson napi 24 órában a hét minden napján lehetőség van kerékpár bérlésre kedvezményes áron. [156] Magyarországon, Budapesten hasonló rendszert vezettek be.
- 5) **A városokban növelni kell a zöldterületek arányát.** Ehhez elengedhetetlen a közparkok és terek növényzetének rehabilitációja, valamint az elhanyagolt füves területeken és az út menti részeken a faültetési programok elindítása továbbá a lakóingatlanok között található zöldterületek növényzettel való beültetése és gondozása.
- 6) **A városok szerkezetének jól átgondolt tervezése a környezetvédelmi szempontok figyelembe vételével.** Itt kell megemlíteni az erdők és parkok helyreállítását, a környezetbarát építőanyagok engedélyezését, az esztétikus városkép kialakítását, valamint az utak helyes vonalvezetésének tervezését. Erre példa a Bostonban lezajlott megaprojekt amely „Big Dig” néven vált híressé. A város közepén áthaladó I-93 autópályát lebontották és helyette egy 5,6km hosszú többsávos alagutat építettek. Az 1991 és 2006 között lezajlott építkezés eredményeként a felszínen 45 park került kialakításra, valamint egy teljesen új közlekedési hálózatot kapott a metropolisz. [157]
- 7) **A társadalom környezettudatosabb viselkedéskultúrájának kialakítása.** Ehhez szükséges a megfelelő tananyagok kidolgozása, szakoktatói gárda kitermelése, valamint különböző kampányok és népszerűsítő rendezvények szervezése.

## 7. Összefoglalás

A kutatási munkám fő célterülete a légszennyezettség problémaköre, azon belül is a városi levegő minőség változásának figyelemmel kísérése és okainak feltérképezése volt, különös tekintettel a közlekedésből származó légszennyezettségre és annak hatásaira az emberi szervezetekre.

A hazai és nemzetközi irodalomra támaszkodva bemutattam a légszennyezés fő okait és fajtáit, valamint a legfontosabb légszennyező anyagok (felszínközeli ózon, a szén-monoxid, a nitrogén oxidok, a kén-dioxid, valamint a por) tulajdonságait és hatásukat az élő szervezetekre. Regressziós számításokkal bizonyítottam, hogy az egyes légszennyező anyagok ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ ) szintjének alakulása, illetve a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között kapcsolat áll fenn.

Értekezésemben nagy gondot fordítottam továbbá az európai városokban zajló fokozódó urbanizációra és erősödő motorizációra, valamint ennek következtében bekövetkezett közeledési szokások változására. Az adatok elemzését variancia módszerrel, Ward-féle eljárással lefuttatott klaszteranalízissel, valamint különböző matematikai, statisztikai számításokkal végeztem el. Megállapítottam emellett, hogy a városi lakosság 20-40% volt kitéve határértéket meghaladó  $\text{PM}_{10}$  koncentrációnak, valamint a lakosság 14-65%-át érintette határértéket meghaladó magas ózon koncentráció.

Ismertettem ezen felül a környezeti monitoring fogalmát, elemeit és fajtáit kitérve a levegő monitorozására, a hazai és nemzetközi levegő monitoring hálózatokra, valamint a légszennyezés mérése során alkalmazott szenzorokra és egyéb szenzorhálózatokra. Mérésekkel igazoltam, hogy egy monitoring állomás által mért  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentráció értékei csak a konténer közelében érvényesek. Erre építve azt a következtetést fogalmaztam meg, hogy a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentrációja egy folyamatosan változó és eloszlással rendelkező rendszer, amelynek jellemzésére elégtelen a város egy pontján mérni a tulajdonságait. A következtetés alátámasztásához egy dinamikus változó mérőpontokból álló mérőrendszert alkottam, s az adatok térbeli elemzésével, s különböző térinformatikai módszerek segítségével (IDW

interpoláció, távolsággal fordítottan arányos súlyozás) meghatároztam a területen a légszennyező anyag eloszlását, illetve rámutattam a leginkább szennyezett területre.

Ezt követően áttekintettem a légszennyező anyagok terjedésével és azok modellezésével foglalkozó nemzetközi és hazai szakirodalmat, elsődlegesen a matematikai modellekre koncentrálnak, s létrehoztam egy olyan matematikai modellt, amely a dimenzióanalízisen és a Buckingham  $\pi$  elméleten alapul, s amellyel meghatározható a környezeti levegőben a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentrációja a meteorológiai, valamint a domborzati adatok felhasználásával.

## **7.1. Új tudományos eredmények**

A PhD kutatómunkám során elért új tudományos eredményeket az alábbi négy tézispontban fogalmaztam meg:

1. Tézis: Igazoltam, hogy matematikai módszerekkel bizonyítható, hogy a városiasodás növekedésével, valamint a közúti forgalom erősödésével a környezeti levegő szennyezettsége jelentős problémává vált a városokban.
  - a. Kimutattam, hogy a városi lakosság növekedésének üteme több mint 4% volt, s a legnagyobb mértékű növekedés a 3 millió lakosnál többel rendelkező városok estén következett be.
  - b. Megállapítottam, hogy a legnagyobb mértékben a személygépjárművel történő szállítás növekedett, míg a tömegközlekedés használata folyamatosan csökkent.
  - c. Megállapítottam, hogy a városiasodás növekedésével egy időben az autópályák hossza, illetve az 1000 lakosra jutó személygépjárművek száma is emelkedett (17%).
  - d. Kimutattam, hogy az urbanizáció és az erősödő motorizáció hatással volt a városok levegő minőségére. A városi lakosság 20-40% volt kitéve olyan  $\text{PM}_{10}$  koncentrációnak a környezeti levegőben, amely meghaladta az EU határértéket, s a lakosság 14-65%-át érintette több mint 25 napon át napi  $120\mu\text{g}/\text{m}^3$  határértéket meghaladó magas ózon koncentráció.

2. Tézis: Igazoltam, hogy a közlekedésből származó légszennyezettség kapcsolata a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások számával statisztikai módszerek alkalmazásával alátámasztható.
  - a. Megállapítottam, hogy a légzőrendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások esetén a két legerősebb kapcsolatot a  $\text{SO}_2$  (44%) és a CO (20%) esetén áll fenn.
  - b. Kimutattam, hogy a keringési rendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások, illetve a  $\text{NO}_x$  és a CO légszennyező anyag koncentrációja között nagyon erős, 80%-ot meghaladó kapcsolat van.
  - c. Megállapítottam, hogy erős kapcsolat áll fenn az emésztési rendszer megbetegedéséből bekövetkező halálozások illetve a  $\text{NO}_x$  (80%-os), a CO (65%-os),  $\text{PM}_{10}$  (51%-os) között.
  - d. Megállapítottam, hogy a két leginkább meghatározó, legerősebb kapcsolatot mutató légszennyező anyagok a  $\text{NO}_x$  és a CO, míg a leggyengébb kapcsolatot az  $\text{O}_3$  mutatta.
  
3. Tézis: Megállapítottam, hogy a közlekedésből származó légszennyezettség mértéke egy adott városrészben vagy az egész városban dinamikus mérések elvégzésével megfelelő pontossággal jellemezhető.
  - a. Statikus mérőpontjaim eredményeivel igazoltam, hogy a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentrációja egy folyamatosan változó és eloszlással rendelkező rendszer, amelynek jellemzésére elégtelen a város egy pontján mérni a tulajdonságait.
  - b. Dinamikus méréseimen végrehajtott térbeli elemzéssel megállapítottam a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag változásának mértékét, illetve kimutattam a legszennyezettebb részeket a vizsgált területen.

4. Tézis: Kidolgoztam egy modellt, amellyel a környezeti levegő légszennyezettségének mértéke meteorológiai és domborzati adatok ismeretében matematikailag modellezhető.
- a. Kidolgoztam egy egyenletet amely öt meghatározott paraméteralapján lehetővé teszi a  $\text{NO}_x$  környezeti levegőben található koncentrációjának kimutatását.
  - b. A kidolgozott módszerrel a légszennyező anyag koncentrációja megközelítőleg meghatározhatóvá vált légszennyező anyag monitoringja nélkül.

## **7.2. Az eredmények hasznosíthatósága**

Az 1. hipotézisben ismertetett eredmények segítségével átfogóbb képet kapunk a jelenleg Európában zajló urbanizációról és motorizációról, valamint ezek és a városi levegő légszennyezés változásának összefüggéseiről.

A 2. hipotézis eredményei bizonyították, hogy az egyes légszennyező anyagok, valamint a légúti-, keringési- és emésztőrendszeri megbetegedésekből bekövetkező halálozások között szoros kapcsolat áll fenn.

A 3. hipotézisben bemutatott dinamikus mérőpontokból álló mérőrendszer segítségével és a térinformatikai eszközök együttes használatával a légszennyező anyagok térbeli elhelyezkedése, valamint a szennyezettebb területek feltárása jobban meghatározható.

A 4. hipotézisben létrehozott matematikai modell segítségével a meteorológiai, valamint domborzati adatok felhasználásával meghatározható a környezeti levegőben a  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag koncentrációja mérés nélkül.

### 7.3. Továbbfejlesztés lehetőségei

Az 1. hipotézisem során kutatási munkáimban nagy hangsúlyt fektettem az Európában zajló urbanizációs és motorizációs folyamatok széleskörű feltárására. A közlekedés változásánál csak a közúti és tömegközlekedést vettem figyelembe, így a jövőbeni kutatásnál a légi- és vízi közlekedést is számba lehetne venni, továbbá célszerű lenne az Európán kívüli területeken – Ázsia, Afrika, Észak- és Dél-Amerika – is megvizsgálni a folyamatokat.

A 2. hipotézisben a hangsúlyt Magyarországra helyeztem, s csak pár légszennyező anyag kapcsolatát vizsgáltam a különböző társadalmi mutatószámokkal. A vizsgálatokba több légszennyező anyagot – például benzol –, valamint más társadalmi mutatószámot is bele lehetne venni ezen kívül a számolásokat el lehetne végezni más országok adataival és össze lehetne őket hasonlítani.

A 3. hipotézisben bemutatott méréseket Kassa belvárosi részén végeztem el 3 hónapon keresztül a nyári időszakban. A jövőbeni kutatási munka során a mérőhelyszínt lehetne tágítani, több mérőkört lehetne létrehozni, valamint a méréseket hosszabb ideig is – fél év, egy év – el lehetne végezni.

A 4. hipotézisben létrehozott matematikai modellt a környezeti levegő légszennyező anyag koncentrációjának meghatározásához hoztam létre. A modellbe  $\text{NO}_x$  légszennyező anyag adatai lettek betáplálva. Érdekes lenne a modellt kipróbálni más légszennyező anyag adataival, például szén-monoxid, kén-dioxid vagy szálló por.

## 8. Summary

Since the world is undergoing the largest wave of urban growth in history - more than half of the world's population is living in towns and cities – environmental issues such as climate change (e.g. global warming, sea level rise, greenhouse gases, ocean acidification...etc.), environmental degradation (such as biodiversity loss, habitat destruction, invasive species) as well as resource depletion (for instance deforestation, overfishing, overharvesting...etc.) and furthermore air-, soil- and water pollution (like smog, acid rain, soil erosion...etc.) becomes an intricate problem that plays an essential role in human well being.

The main object of this research was the urban air quality, the changes of the air pollution concentration levels in particular with regard to the traffic related air pollution.

Based on the domestic and international literature I presented the main causes and types of the air pollution as well as I described the features of the most important air pollutants (ground-level ozone, carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur dioxide and particulate matter) and their effects on the living organisms. With the regression and the correlation calculations I proved that there is strong connection between the changes of the level of the individual air pollutants ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ ) and the respiratory and circulatory diseases as well as the gastrointestinal disorders.

In my dissertation furthermore I analyzed the relationship linking air quality and the accelerated urbanization and the increased mobility as well as the road traffic in European cities. The data analysis was carried out by the help of variance method (Ward's cluster analysis) and with different statistical and mathematical calculations. I found out that, 20-40% of the urban population in EU cities was potentially exposed to particulate matter ( $\text{PM}_{10}$ ) concentrations above the EU limit value set for the protection of human health and 14-65% of the urban population was potentially exposed to ozone ( $\text{O}_3$ ) concentrations above the EU limit value.

Moreover I presented the concept of environmental monitoring, air pollution monitoring, including its types and elements as well as the domestic and international air monitoring networks and sensors, sensor networks used in the measurement of air



pollution. My measurements proved that the values of NO<sub>x</sub> air pollutant concentrations measured by a monitoring station are only valid in the vicinity of the container. Building on this I defined a conclusion, that the concentration of the air pollutant NO<sub>x</sub> is a constantly changing system, so to characterize it on one measurement point in the city is not enough. To support that conclusion I created a measurement system with dynamic measurement points. With the help of the various GIS methods, like spatial analysis of the data (IDW - Inverse Distance Weighting interpolation), I determined the spatial distribution of the air pollutant, and as well as I pointed out the most contaminated area.

Subsequently I reviewed the domestic and the international literature which is dealing with the mathematical modelling of air pollutants. Therefore I created a mathematical model - based on dimensional analysis and the Buckingham  $\pi$  theorem - using only meteorological and topographical data for the prediction of the NO<sub>x</sub> concentrations in the ambient air.

## 9. Zusammenfassung

Da sich die Welt in der größte Welle des städtischen Wachstums in der Geschichte befindet, leben mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung bereits in Städten. Umweltprobleme wie Klimawandel (z.B. globale Erwärmung, Anstieg des Meeresspiegels, Treibhausgase, Versauerung der Ozeane ... etc.), Umweltzerstörung (wie Verlust der biologischen Vielfalt, Lebensraumzerstörung, invasive Arten), Ressourcenverbrauch (z.B. Entwaldung, Überfischung, Raubbau ... etc.) sowie Luft-, Boden- und Wasserverschmutzung (wie Smog, saurer Regen, Bodenerosion ... etc.) werden zu einem komplexen Problem, was auch für das menschliche Wohlbefinden eine wichtige Rolle spielt.

Das Hauptziel dieser Studie war die Luftqualität in Städten, die Konzentrationsänderung der Luftverschmutzung, insbesondere im Hinblick auf die verkehrsbedingte Luftverschmutzung. Basierend auf der nationalen und internationalen Literatur werden die wichtigsten Ursachen und Arten von Luftverschmutzungen präsentiert, sowie die Eigenschaften der wichtigsten Luftschadstoffe (bodennahes Ozon, Kohlenmonoxid, Stickoxide, Schwefeldioxid und Feinstaub) und deren Auswirkungen auf die lebenden Organismen beschrieben. Mit Hilfe von Regressions- und Korrelationsberechnungen konnte bewiesen werden, dass starke Verbindungen (Korrelationen) zwischen den Konzentrationsveränderungen der einzelnen Schadstoffe ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ ) und den Atmungs- und Kreislauferkrankungen sowie die Erkrankungen des Gastrointestinaltrakts.

Darüber hinaus analysierte ich in meiner Dissertation die Beziehungen zwischen der Luftqualität und der beschleunigten Urbanisierung, der zunehmenden Mobilität sowie zu dem Straßenverkehr in europäischen Städten. Die Auswertung der Daten erfolgte mit Hilfe der Varianzmethode (Ward Cluster-Analyse) und mit verschiedenen statistischen und mathematischen Berechnungen. Ich fand heraus, dass 20-40% der Bevölkerung in EU-Städten möglicherweise Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$ ) Konzentrationen über dem EU-Grenzwert für den Schutz der menschlichen Gesundheit ausgesetzt sind. Des Weiteren

sind möglicherweise 14 - 65% der städtischen Bevölkerung auch EU grenzwertüberschreitenden Ozon (O<sub>3</sub>) Konzentrationen ausgesetzt.

Außerdem wird ein Konzept zur der Umweltüberwachung und zur Überwachung der Luftverschmutzung, einschließlich der Typen und Elemente sowie der nationalen und internationalen Luftmessnetze und Sensoren, sowie verwendete Sensornetzwerke zur Messung der Luftverschmutzung, vorgestellt. Meine Messungen bewiesen, dass die Werte der NO<sub>x</sub>-Luftschadstoffkonzentrationen, welche durch eine Überwachungsstation gemessen wurden, nur in der Nähe des Behälters Gültigkeit besitzen. Darauf aufbauend definierte ich die Schlussfolgerung, dass sich die Konzentrationen der Luftschadstoffe NO<sub>x</sub> in einem ständig verändernden System befinden, sodass zur Charakterisierung ein einziger Messpunkt in der Stadt nicht ausreicht. Um dieses Ergebnis zu unterstützen habe ich ein Messsystem mit dynamischen Messpunkten erstellt. Mit Hilfe der verschiedenen GIS-Methoden, wie die räumliche Analyse der Daten (IDW - Inverse Distance Weighting Interpolation), bestimmte ich die räumliche Verteilung der Luftschadstoffe sowie die am stärksten kontaminierten Bereiche (der Stadt).

Anschließend untersuchte ich die nationale und internationale Literatur, die sich mit der Modellierung von Luftschadstoffen beschäftigt. In erster Linie konzentrierte ich mich auf die mathematischen Modelle. Ich erstellte ein mathematisches Modell auf - basierend auf der Dimensionsanalyse und dem Buckingham  $\pi$ -Theorem – unter der Nutzung von ausschließlich meteorologischen und topographischen Daten zur Vorhersage der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in der Umgebungsluft.

## 10. Köszönetnyilvánítás

*„Arra tanítanak, hogy csak a jelentős pillanatokra emlékezzünk, pedig a kis lépések, amik odáig elvezettek minket ugyanolyan jelentősek. Visszatekintve észrevesszük, hogy nem csak a jó dolgok, hanem a rosszak is meghatározták, hogy kik vagyunk, és hogy kik leszünk.”  
Everwood, Your Future Awaits*

Elsősorban a családomnak szeretném megköszönni a szüntelen támogatást és a türelmet, amellyel tanulmányaim során segítettek. Külön köszönöm **Édesanyámnak** és **Édesapámnak** a folyamatos buzdítást, amit tőlük kaptam és hasznos tanácsaikat, amik nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

Köszönet illeti **Dr. Domokos Endre** professzort, aki elvállalta, hogy a témavezetőm lesz és egy olyan szakmai műhelyt és kapcsolatrendszert bocsátott a rendelkezésemre, ami termékeny talaj volt ambícióim számára.

Köszönöm **Dr. Silvia Vilcekova** professzor asszony támogatását, aki amellet, hogy tanszékén Kassán igen nagy szeretettel fogadott lehetővé tette számomra kutatási témám széles körű feldolgozását s mind tanácsaival mind természettudományos ismereteivel segítette munkámat.

Értekezésem témakörében született publikációim társszerzői közül hálásan köszönöm **Vincze-Csom Veronikának** az együttgondolkodásokat és a közös munkát.

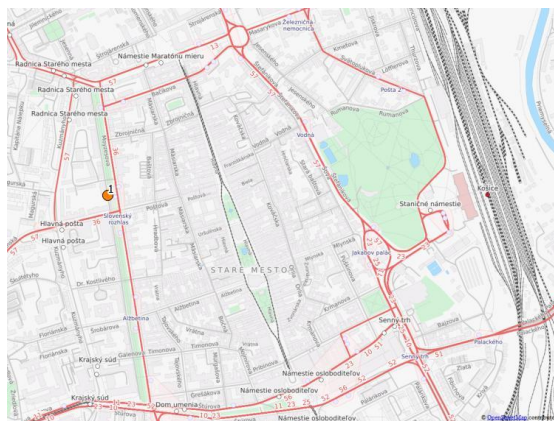
Külön köszönet jár **Dr. Varga Józsefnek** amiért bármilyen problémám kapcsán mindig számíthattam szakértő és jóindulatú segítségére.

Továbbá köszönettel tartozom a **Környezetmérnöki Intézet dolgozóinak, PhD hallgatóinak** akik technikailag számos módon és mindig gondosan segítették a munkámat.

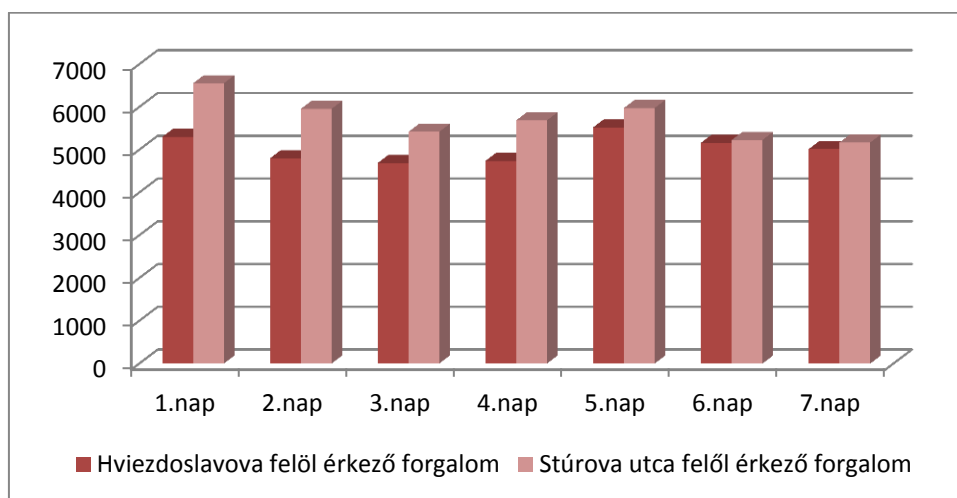
## **Mellékletek**

## 1. számú melléklet

Forgalomszámlálást végeztem a mérések megkezdése előtt, hogy meghatározzam a területen áthaladó gépjárműforgalom erősségét. A számlálást a Moyzesova úton (59. ábra) végeztem a Magyar Közút Nonprofit ZRt számlálási útmutató kiadványa alapján [158]. A kézi számlálásra a méréseket megelőző héten került sor (2014. június 9 és 15 között). A számlálás időtartama minden alkalommal 12 óra volt (06 és 18 óra között). A számlálást forgalmi irányonként végeztem.



59. ábra: Forgalomszámlálás Moyzesova út



60. ábra: Forgalomszámlálás eredménye

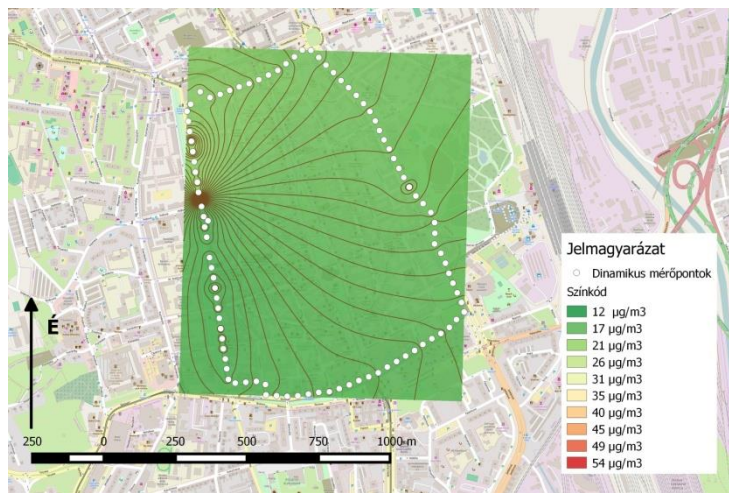
Az adatok kiértékelését követően megállapítottam, hogy a Stúrova utca felől érkező forgalom számottevően erősebb volt, mint a másik irányból a Hviezdoslavova felől érkező forgalom. A legerősebb forgalmat a hét elején hétfőn a reggeli órákban (06:00-09:00) , valamint a péntek kora délutáni órákban (15:00-18:00) tapasztaltam.

## 2. számú melléklet

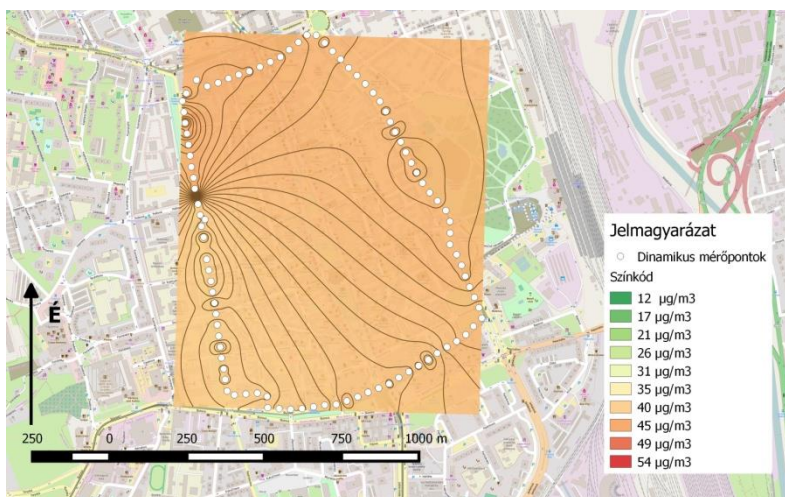
75. táblázat: A méréseim során tapasztalt időjárási körülmények

<b>Idő</b>	<b>Hőmérséklet (°C)</b>	<b>Páratartalom (%)</b>	<b>Légnyomás (hPa)</b>	<b>Szélesség (m/s)</b>
2015.06.16	18	42	1017	5,00
2015.06.18	22	37	1017	3,42
2015.06.19	23	30	1013	2,93
2015.06.24	21	38	1014	0,81
2015.06.27	20	45	1018	4,48
2015.07.07	29	43	1017	0,26
2015.07.08	28	49	1011	7,40
2015.07.10	21	65	1007	2,05
2015.07.14	25	52	1013	0,32
2015.07.15	27	46	1016	4,53
2015.07.16	27	42	1017	6,85
2015.07.16	28	42	1017	6,85
2015.07.17	26	49	1017	6,24
2015.08.04	28	47	1013	1,38
2015.08.05	24	56	1013	3,36
2015.08.06	24	60	1012	8,85
2015.08.07	24	61	1012	4,07
2015.08.08	21	78	1014	1,68
2015.08.11	29	43	1017	0,26
2015.08.13	23	64	1012	2,19
2015.08.14	23	70	1010	1,76
2015.08.15	21	53	1013	1,60

### 3. számú melléklet



61. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (1. nap – 2014.06.16)

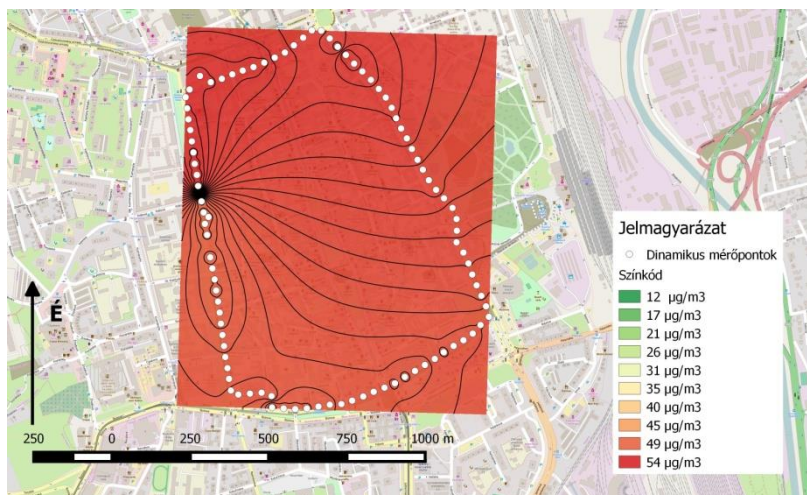


62. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (2. nap – 2014.06.18)

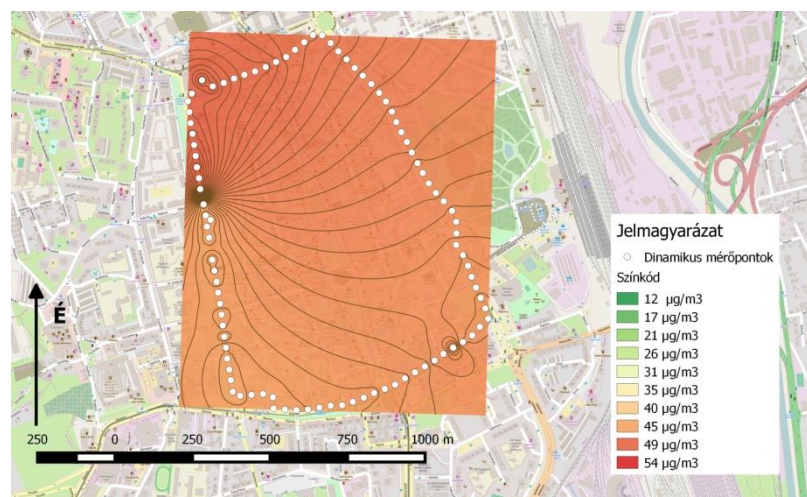


63. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (3. nap – 2014.06.19)

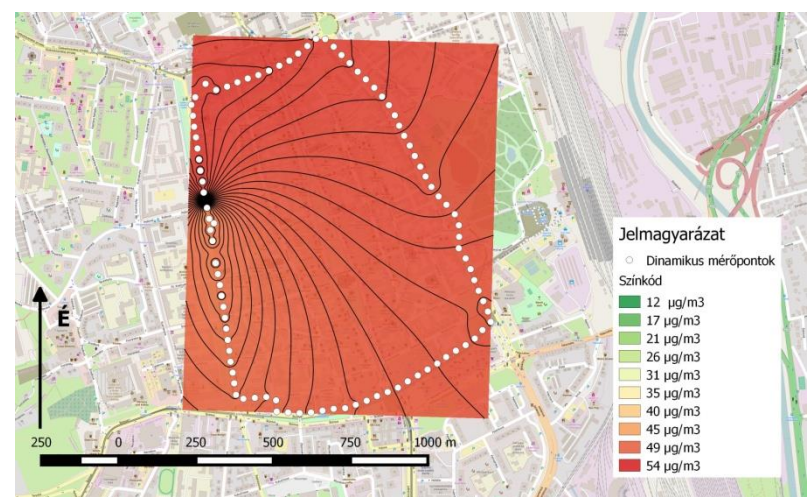




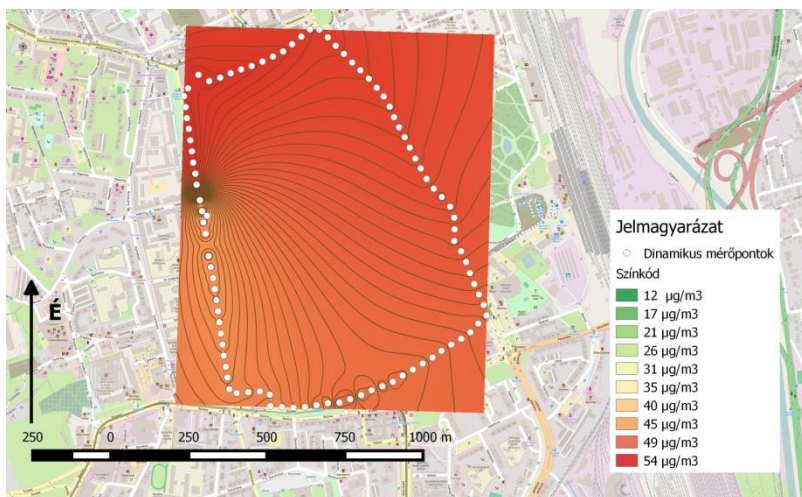
64. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (4. nap – 2014.06.24)



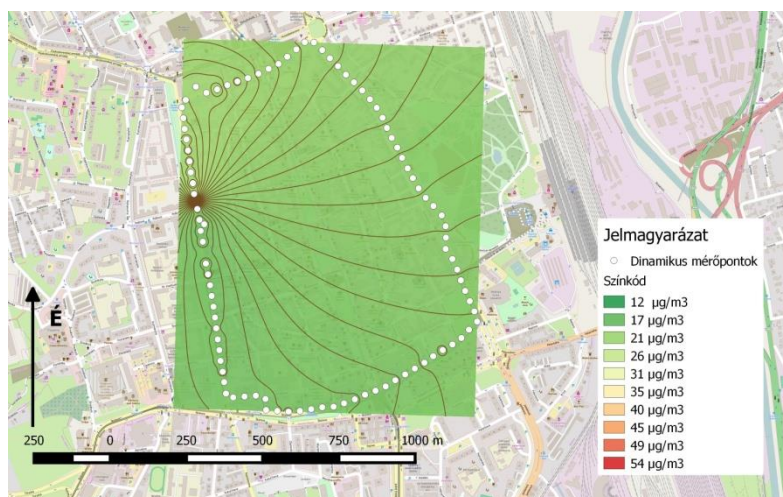
65. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (5. nap – 2014.06.27)



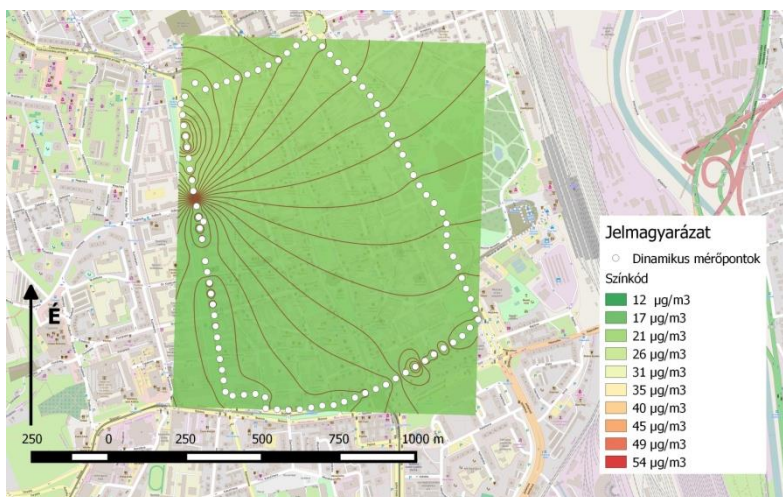
66. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (6. nap – 2014.07.07)



67. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (7. nap – 2014.07.08)



68. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (8. nap – 2014.07.10)

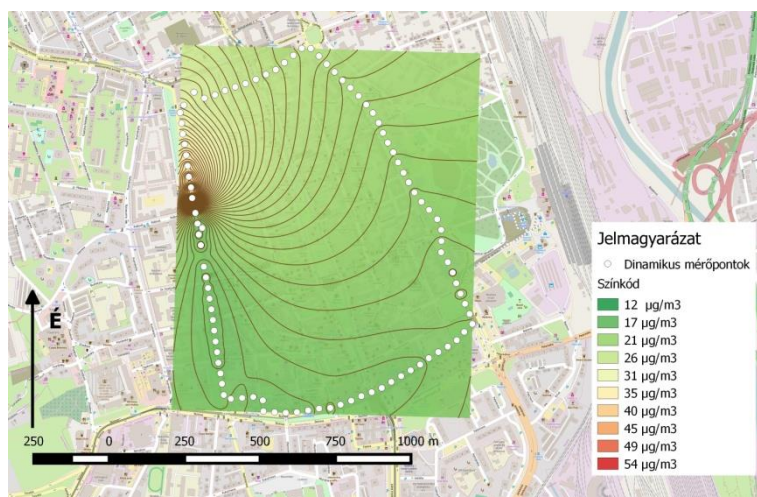


69. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (9. nap – 2014.07.16)

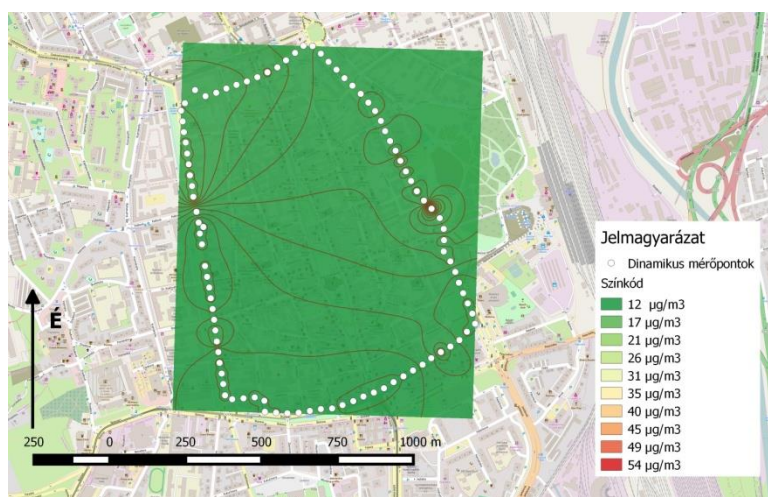




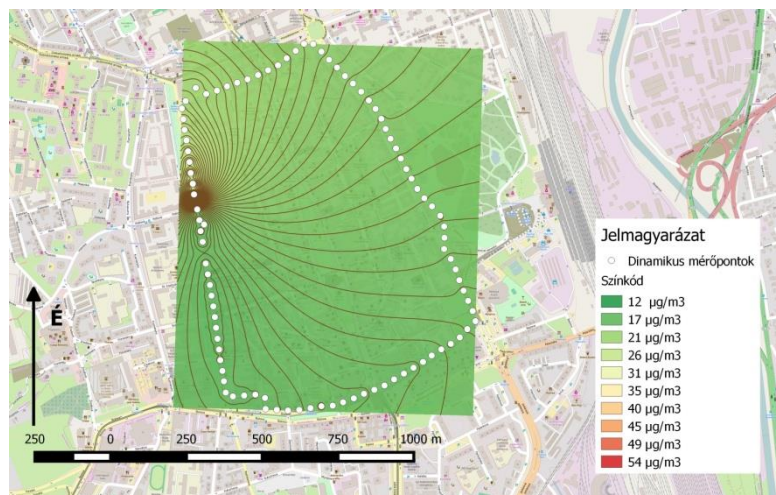
70. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (10. nap – 2014.08.11)



71. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (11. nap – 2014.08.13)



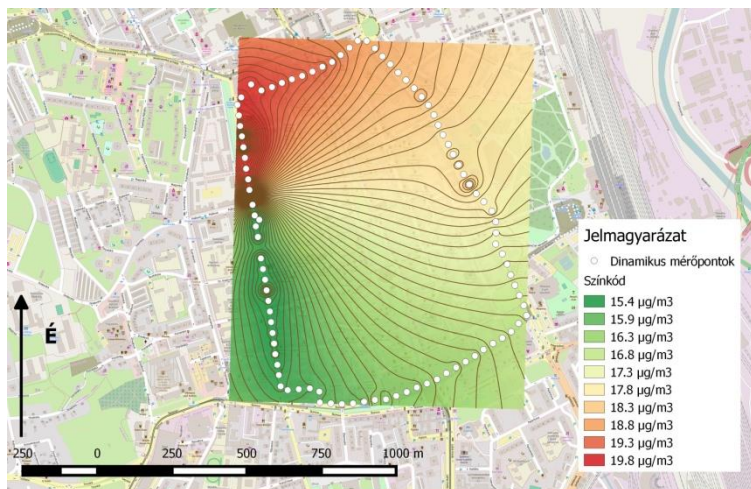
72. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (12. nap – 2014.08.14)



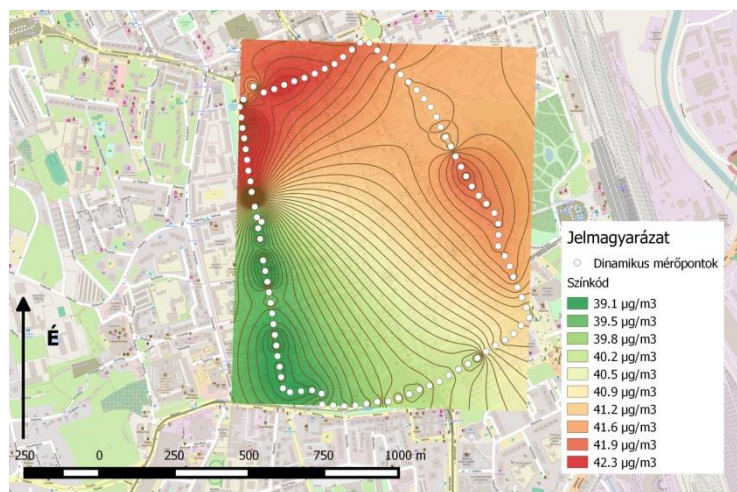
73. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színkód (13. nap – 2014.08.15)



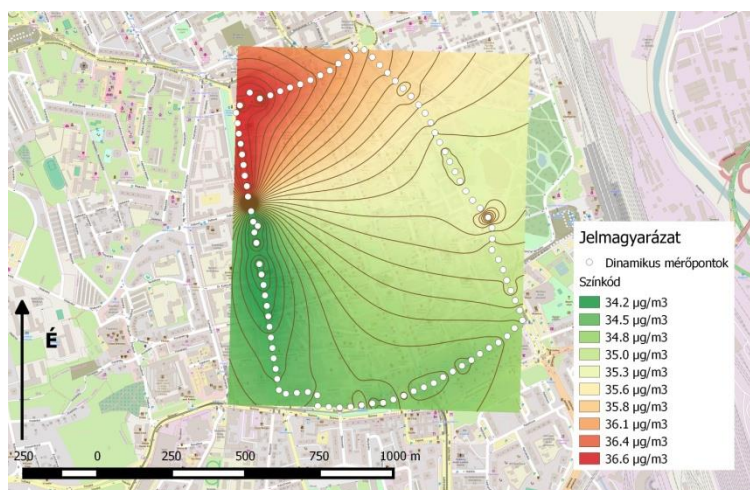
#### 4. számú melléklet



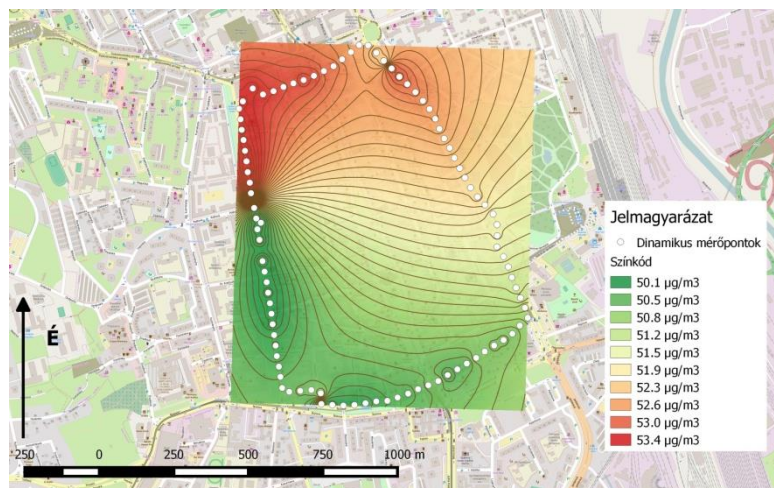
74. ábra: Dinamikus mérési eredmények (1. nap – 2014.06.16)



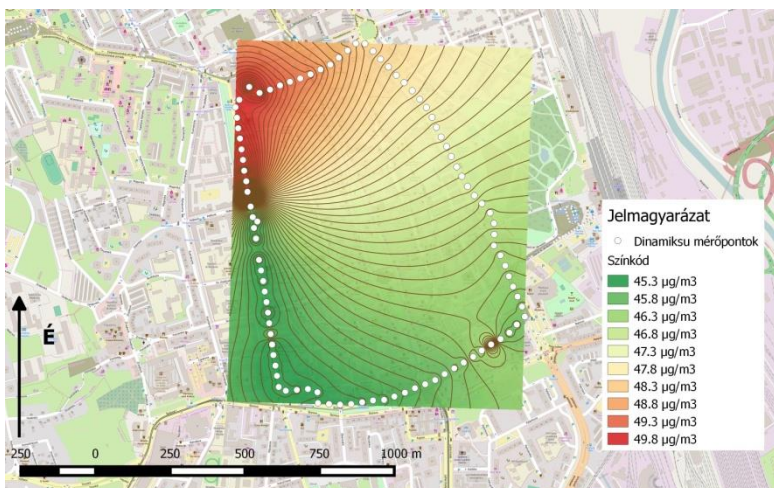
75. ábra: Dinamikus mérési eredmények (2. nap – 2014.06.18)



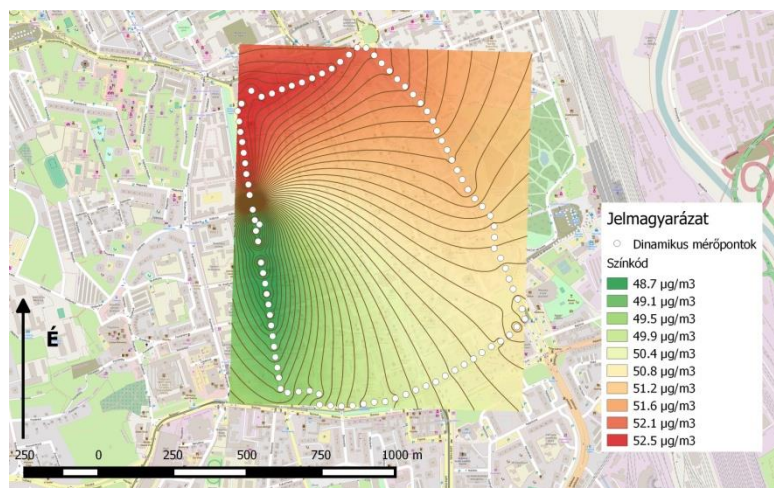
76. ábra: Dinamikus mérési eredmények (3. nap – 2014.06.19)



77. ábra: Dinamikus mérési eredmények (4. nap – 2014.06.24)

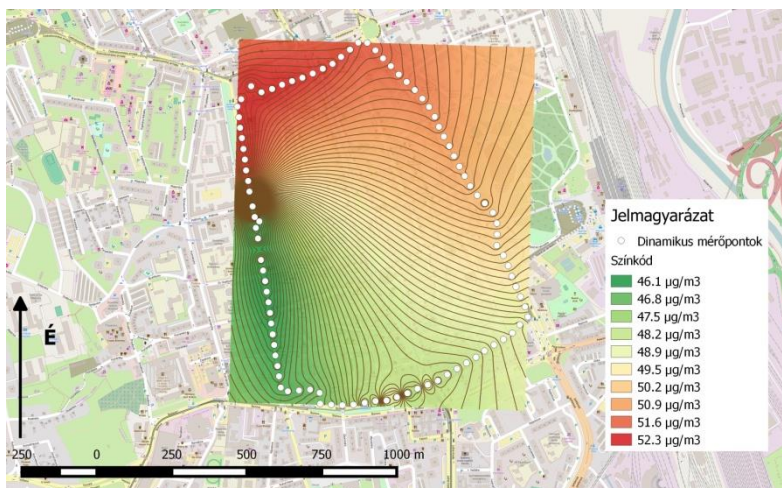


78. ábra: Dinamikus mérési eredmények (5. nap – 2015.06.27)

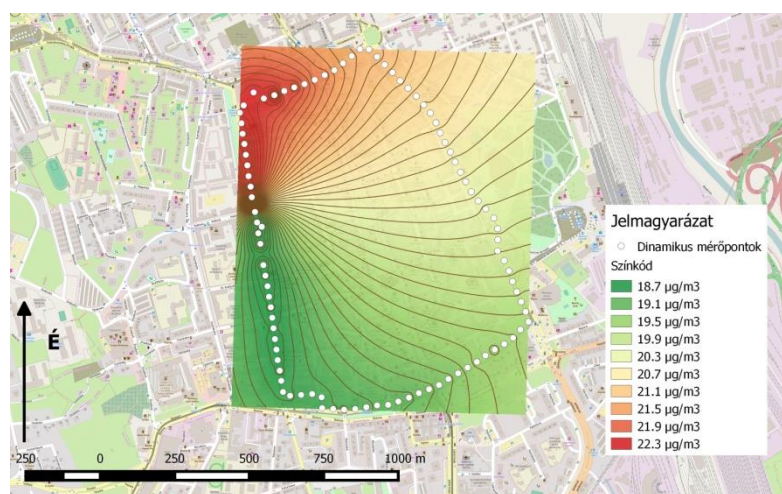


79. ábra: Dinamikus mérési eredmények (6. nap – 2015.07.07)

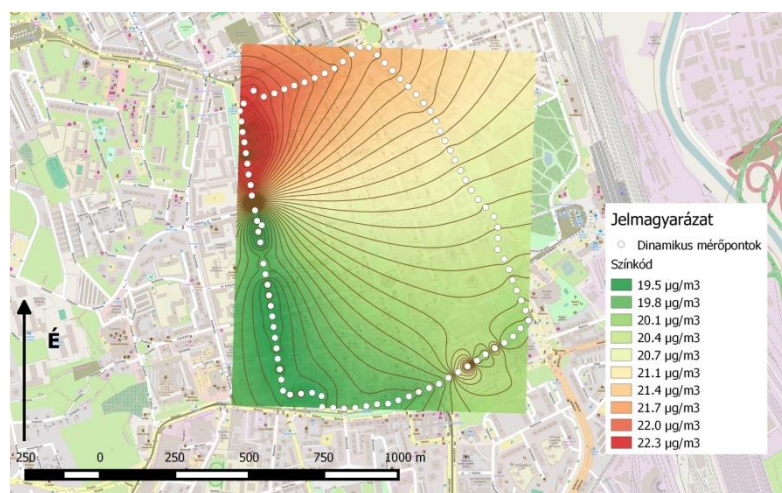




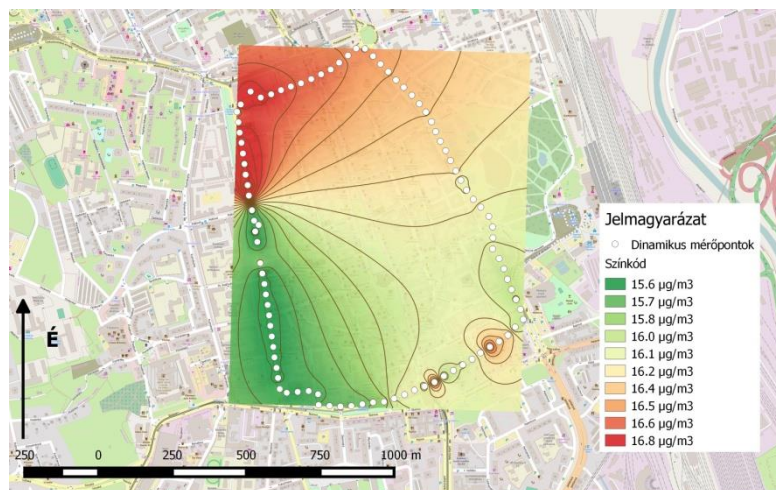
80. ábra: Dinamikus mérési eredmények (7. nap – 2014.07.08)



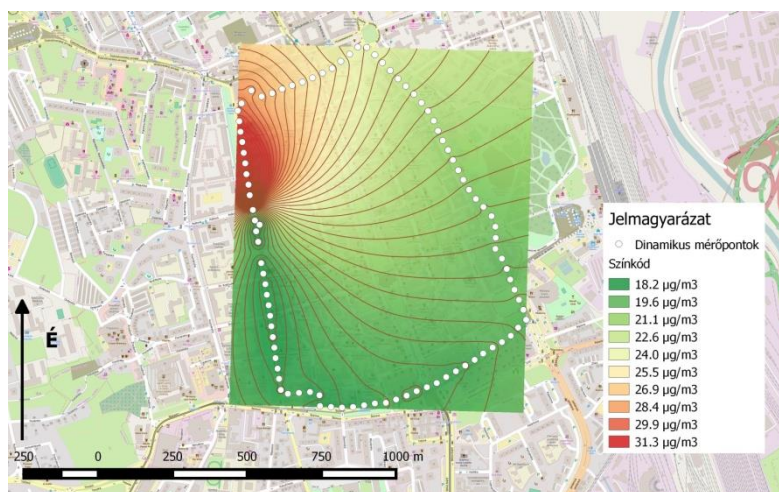
81. ábra: Dinamikus mérési eredmények (8. nap – 2014.07.10)



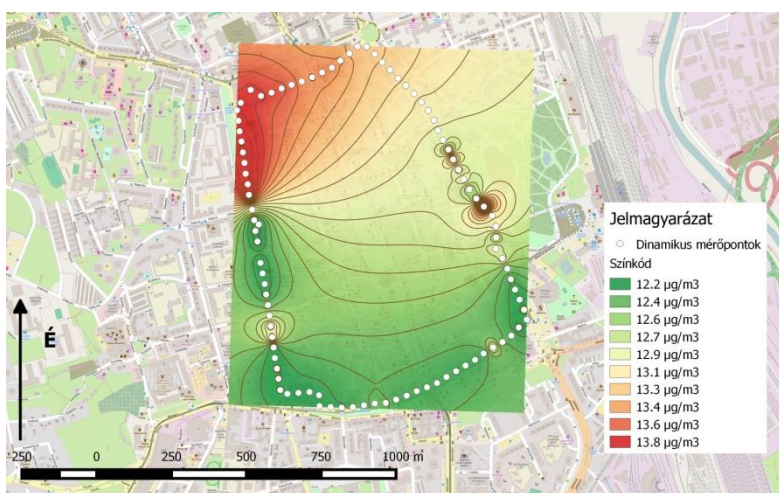
82. ábra: Dinamikus mérési eredmények (9. nap – 2014.07.16)



83. ábra: Dinamikus mérési eredmények (10. nap – 2014.08.11)

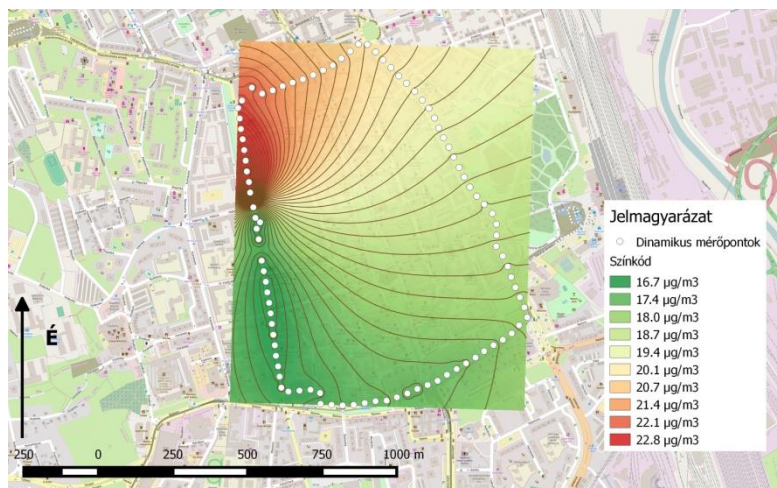


84. ábra: Dinamikus mérési eredmények (11. nap – 2014.08.13)



85. ábra: Dinamikus mérési eredmények (12. nap – 2014.08.14)





86. ábra: Dinamikus mérési eredmények (13. nap – 2014.08.15)

## Rövidítések jegyzéke

**AIR:** Area's Immediate Reading

**CCC:** Chemical Coordinating Centre (Kémiai koordinációs központ)

**CEIP:** Centre on Emission Inventories and Projections (Központi emisszió leletár és előrejelzés)

**CIAM:** Centre for Integrated Assessment Modelling (Modell-értékelő központ)

**CPU:** Central Processing Unit (központi feldolgozóegység)

**DA:** Dimensional Analysis (dimenzió analízis)

**DSP:** Digital Signal Processing (Digitális jelfeldolgozó egység)

**EEA:** European Environment Agency (Európai Környezetvédelmi Ügynökség)

**EIONET:** European Environment Information and Observation Network (Európai Környezeti Információs és Megfigyelő Hálózat)

**EMEP:** European Monitoring and Evaluation Programme (Európai Megfigyelési és kiértékelő Program)

**EPA:** United States Environmental Protection Agency (Amerikai Környezetvédelmi Hivatal)

**EU:** European Union (Európai Unió)

**EUROSTAT:** (Európai Statisztikai Hivatal)

**FPGA:** Field-programmable Gate Array (mikro programozható logikai kapu)

**IDW:** távolsággal fordítottan arányos súlyozás (, Inverse Distance Weighting, Shepard's Method)

**KSH:** Központi Statisztikai Hivatal

**KvVM:** Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium

**MCU:** Multipoint Control Unit (multi pont kontroller)

**MESSAGE:** Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments

**MIMO:** Multi Input Multi Output (több bemenet és több kimenet)

**MISO:** Multi Input Single Output (több bemenet és egy kimenet)

**MSC-E:** Meteorological Synthesizing Centre – East (Meteorológiai központ, kelet)

**MSC-W:** Meteorological Synthesizing Centre – West (Meteorológiai központ, nyugat)

**OLM:** Országos Légszennyezettségi MÉRőhálózat

**RITA:** Research and Innovative Technology Administration (Kutatási és innovációs technológiai Hivatal)

**SHMU:** Slovensky Hydrometeorologicky Ustav (Szlovák Hidrometeorológiai Intézet)

**SI:** Systeme International d'Unités (Nemzetközi Mértékegységrendszer)

**SIMO:** Single Input Multi Output (egy bemenet és több kimenet)

**SISO:** Single Input Single Output (egy bemenet és egy kimenet)

**TSPM:** Total Suspended Particulate Matter (Összes szálló por)

**UHI:** Urban Heat Island (Hő-sziget)

**UNFPA:** The United Nations Population Fund (ENSZ Népesedési Alapja)

**VM:** Vidékfejlesztési Minisztérium

**WHO:** World Health Organization (Egészségügyi Világszervezet)

**WMO-GAW:** World Meteorological Organization - Global Atmosphere Watch (Meteorológiai Világszervezet Globális Megfigyelőrendszere)

## Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: Légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 4/2011 VM rendelet I.sz. melléklete alapján (31).....	20
2. táblázat: Légszennyező anyagok egészségügyi határértékei a 2008/50 /EK irányelv alapján (32).....	21
3. táblázat: A közlekedési rendszerek csoportosítása (60).....	30
4. táblázat: Személyszállítás alakulása az EU-27 tagállamában %-ban kifejezve (61).....	32
5. táblázat: Környezeti monitoring rendszerek.....	33
6. táblázat: Levegőkémiai mérőállomások típusai (67).....	39
7. táblázat: Levegő adatbázisok (Magyarország).....	40
8. táblázat: Levegő kémiai mérőhálózatok (Globális) (67).....	40
9. táblázat: Szektorok szerinti célkitűzések és azok leírása .....	45
10. táblázat: Okos Város Projektek.....	46
11. táblázat: Modellek osztályozása a be- és kimenő jellemzők számai alapján (115).....	54
12. táblázat: Az SI rendszer alapegységei és alapmennyiségei.....	57
13. táblázat: ANOVA táblázat .....	70
14. táblázat: Első csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	76
15. táblázat: Második csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	77
16. táblázat: Harmadik csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	77
17. táblázat: Negyedik csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	77
18. táblázat: Ötödik csoportba tartozó városok lakosságának növekedése (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	77
19. táblázat: Társadalmi mutatószám – Egészségügyi állapot (KSH adatok alapján saját összeállítás).....	84
20. táblázat: Az automata mérőhálózat adatai alapján a légszennyezettség mértéke ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).....	85
21. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata $\text{NO}_x$ keringési megbetegedések.....	85
22. táblázat: Varianciaanalízis $\text{NO}_x$ keringési megbetegedések.....	85
23. táblázat: Együtthatók $\text{NO}_x$ keringési megbetegedések.....	86
24. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata $\text{NO}_x$ emésztőrendszeri megbetegedések. 86	
25. táblázat: Varianciaanalízis $\text{NO}_x$ emésztőrendszeri megbetegedések.....	86

26. táblázat: Együtthatók_NO <sub>x</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések.....	87
27. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_NO <sub>x</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	87
28. táblázat: Varianciaanalízis_NO <sub>x</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	87
29. táblázat: Együtthatók_NO <sub>x</sub> _légzőrendszeri megbetegedések .....	88
30. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_SO <sub>2</sub> _keringési megbetegedések .....	88
31. táblázat: Varianciaanalízis_SO <sub>2</sub> _keringési megbetegedések .....	88
32. táblázat: Együtthatók_SO <sub>2</sub> _keringési megbetegedések .....	89
33. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_SO <sub>2</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések ..	89
34. táblázat: Varianciaanalízis_SO <sub>2</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések .....	89
35. táblázat: Együtthatók_SO <sub>2</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések .....	90
36. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_SO <sub>2</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	90
37. táblázat: Varianciaanalízis_SO <sub>2</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	90
38. táblázat: Együtthatók_SO <sub>2</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	91
39. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_CO_keringési megbetegedések .....	91
40. táblázat: Varianciaanalízis_CO_keringési megbetegedések .....	91
41. táblázat: Együtthatók_CO_keringési megbetegedések .....	92
42. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_CO_emésztőrendszeri megbetegedések ..	92
43. táblázat: Varianciaanalízis_CO_emésztőrendszeri megbetegedések .....	92
44. táblázat: Együtthatók_CO_emésztőrendszeri megbetegedések .....	93
45. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_CO_légzőrendszeri megbetegedések .....	93
46. táblázat: Varianciaanalízis_CO_légzőrendszeri megbetegedések .....	93
47. táblázat: Együtthatók_CO_légzőrendszeri megbetegedések.....	94
48. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_O <sub>3</sub> _keringési megbetegedések .....	94
49. táblázat: Varianciaanalízis_O <sub>3</sub> _keringési megbetegedések .....	94
50. táblázat: Együtthatók_O <sub>3</sub> _keringési megbetegedések.....	95
51. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata__O <sub>3</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések	95
52. táblázat: Varianciaanalízis__O <sub>3</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések .....	95
53. táblázat: Együtthatók__O <sub>3</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések.....	96
54. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_O <sub>3</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	96
55. táblázat: Varianciaanalízis_O <sub>3</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	96
56. táblázat: Együtthatók_O <sub>3</sub> _légzőrendszeri megbetegedések .....	97
57. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata_PM <sub>10</sub> _keringési megbetegedések .....	97
58. táblázat: Varianciaanalízis_PM <sub>10</sub> _keringési megbetegedések .....	97
59. táblázat: Együtthatók_PM <sub>10</sub> _keringési megbetegedések .....	98

60. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata __PM <sub>10</sub> _ emésztőrendszeri megbetegedések .....	98
61. táblázat: Varianciaanalízis __PM <sub>10</sub> _ emésztőrendszeri megbetegedések .....	98
62. táblázat: Együtthatók __PM <sub>10</sub> _ emésztőrendszeri megbetegedések .....	99
63. táblázat: Regressziós modell összesítő táblázata _PM <sub>10</sub> _ légzőrendszeri megbetegedések....	99
64. táblázat: Varianciaanalízis _PM <sub>10</sub> _ légzőrendszeri megbetegedések.....	99
65. táblázat: Együtthatók _PM <sub>10</sub> _ légzőrendszeri megbetegedések.....	100
66. táblázat: Statikus mérési helyszínek földrajzi koordinátái .....	103
67. táblázat: Statikus Mérések időpontjai.....	105
68. táblázat: Dinamikus Mérések időpontjai .....	105
69. táblázat: Mérőműszerek és az adatgyűjtő rendszerek .....	106
70. táblázat: Mérőműszerek technikai adatai (145).....	107
71. táblázat: Mérési eredmények nitrogén oxidok ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) .....	107
72. táblázat: A statikus méréseimmel egy időben az SHMU által kapott mérési eredmények (Forrás: SHMU-tól kapott adatok alapján saját készítés).....	108
73. táblázat: Dinamikus mérési eredmények átlaga , valamint a méréseimmel egy időben az SHMU által kapott mérési eredmények (Forrás: SHMU-tól kapott adatok alapján saját készítés) .....	111
74. táblázat: Releváns paraméterek értékei , valamint a mért légszennyező anyag koncentrációja .....	120
75. táblázat: A méréseim során tapasztalt időjárási körülmények .....	143

## Ábrák jegyzéke

1. ábra: Légszennyező anyagok hatása az emberi szervezetre (Air quality in Europe, 2013 riport (30) alapján készített ábra) .....	19
2. ábra: Egészségügyi hatások piramis (Air quality in Europe, 2013 riport (30) alapján készített ábra).....	20
3. ábra: A világ városi lakosságának megoszlása kategóriák szerint (Adatok forrása: World Urbanization Prospects: The 2014 Revision) .....	25
4. ábra: A városok számának változása kategóriák szerint(Adatok forrása: World Urbanization Prospects: The 2014 Revision).....	26
5. ábra: A városi hősziget nappali és éjszakai keresztmetszete a léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet alapján. (Forrás: <a href="http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/alkalmazott_es_varosklimatologia/ch12.html">http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/alkalmazott_es_varosklimatologia/ch12.html</a> .....	27
6. ábra: A mobilitás változása és közlekedés technika fejlődése (58).....	29
7. ábra: A közlekedési rendszer jellemzői (60) .....	31
8. ábra: A tudás „lépcsőfokai” (62).....	34
9. ábra: Monitoring rendszer elemei .....	38
10. ábra: Szenzor mérési elve.....	41
11. ábra: A szenzor funkcionális modellje ( $\Phi$ jelöli a mérendő tulajdonságot, mennyiséget, E az érzékelő kimeneti jelét, a P pedig a tápforrást) (73).....	41
12. ábra: Tipikus elektrokémiai érzékelő felépítése (1. külső nedvesség elleni terelőfal, 2. diffúziós terelőfal, 3. diffúziós kapilláris, 4. H <sub>2</sub> S érzékelő elektród, 5. áramszedő (érzékelő), 6. elválasztó, 7. referenciaelektród, 8. áramszedő (érzékelő), 9. elválasztó, 10. számláló elektród, 11. áramszedő (számláló), 12. elválasztó, 13. elektrolittároló, 14. kanóc, 15. konnektor csatlakozók) Forrás: (74).....	44
13. ábra: Modellek csoportosítása 1. (117) .....	49
14. ábra: Modellek csoportosítása 2. (117) .....	49
15. ábra: Modellezés folyamata (119).....	51
16. ábra: Dendogramm (126) .....	66
17. ábra: Raszteres terepmodell és vektoros terepmodell 3D ábrázolása (136) .....	72
18. ábra: Városi lakosság növekedése 2005 – 2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	78
19. ábra: Személyszállítás százalékos megoszlása a vizsgált országokban 2005-2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás).....	79

20. ábra: Az összes autótút hossza km-ben a vizsgált országokban 2005-2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás).....	80
21. ábra: 1000 főre jutó személygépjármű darabszáma a vizsgált országokban 2005-2012 (EUROSTAT adatai alapján készített saját összeállítás) .....	80
22. ábra: Városi lakosság százalékos aránya ahol a légszennyező anyagok koncentráció meghaladta az EU határértéket , valamint WHO ajánlásokat. (Eurostat- Urban Audit és az Airbase adatbázis adatai alapján készített összeállítás).....	81
23. ábra: A városi lakosság kitettségének százalékos eloszlása a PM <sub>10</sub> koncentráció határértéket meghaladó napok függvényében (Eurostat- Urban Audit és az Airbase adatbázis adatai alapján készített összeállítás).....	82
24. ábra: A városi lakosság kitettségének százalékos eloszlása az O <sub>3</sub> koncentráció határértéket meghaladó napok függvényében (Eurostat- Urban Audit és az Airbase adatbázis adatai alapján készített összeállítás).....	82
25. ábra: Regressziós egyenes_NO <sub>x</sub> _keringési megbetegedések.....	86
26. ábra: Regressziós egyenes_NO <sub>x</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések.....	87
27. ábra: Regressziós egyenes_NO <sub>x</sub> _légzőrendszeri megbetegedések .....	88
28. ábra: Regressziós egyenes_SO <sub>2</sub> _keringési megbetegedések.....	89
29. ábra: Regressziós egyenes_SO <sub>2</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések.....	90
30. ábra: Regressziós egyenes_SO <sub>2</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	91
31. ábra: Regressziós egyenes_CO_keringési megbetegedések .....	92
32. ábra: Regressziós egyenes_CO_emésztőrendszeri megbetegedések .....	93
33. ábra: Regressziós egyenes_CO_légzőrendszeri megbetegedések.....	94
34. ábra: Regressziós egyenes_O <sub>3</sub> _keringési megbetegedések.....	95
35. ábra: Regressziós egyenes__O <sub>3</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések.....	96
36. ábra: Regressziós egyenes_O <sub>3</sub> _légzőrendszeri megbetegedések .....	97
37. ábra: Regressziós egyenes_PM <sub>10</sub> _keringési megbetegedések.....	98
38. ábra: Regressziós egyenes__PM <sub>10</sub> _emésztőrendszeri megbetegedések.....	99
39. ábra: Regressziós egyenes_PM <sub>10</sub> _légzőrendszeri megbetegedések.....	100
40. ábra: Mérési helyszín elhelyezkedése .....	102
41. ábra: Mérőpontok elhelyezkedése .....	103
42. ábra: Mérési útvonal a tömegközlekedés szempontjából .....	104
43. ábra: Forgalom alakulása a mérési útvonalon (Google Forgalomfigyelő alkalmazása alapján készített térkép) .....	104
44. ábra: Mérőműszerek rögzítése .....	106
45. ábra: M2-es mérőpont és az SHMU érókonténer adatainak összehasonlítása .....	108



46. ábra: M1-es mérőpont és az SHMU adatainak összehasonlítása .....	109
47. ábra: M3-as mérőpont és az SHMU adatainak összehasonlítása .....	109
48. ábra: M3-as mérőpont és az SHMU adatainak összehasonlítása .....	110
49. ábra: Saját mérésekből számolt átlag és az SHMU mérőkonténer összehasonlítása .....	110
50. ábra: Legszennyezettebb nap mérési eredményei (2014.06.24).....	112
51. ábra: Legkevésbé szennyezett nap mérési eredményei (2014.08.14).....	112
52. ábra: Dinamikus mérési eredmények (1. nap – első mérési nap).....	113
53. ábra: Dinamikus mérési eredmények (13. nap – utolsó mérési nap).....	113
54. ábra: A morfometrikus felszínérdesség számítási módszer alapadatai szabályos épületrendezés esetén, a piros nyíl jelöli a feltételezett áramlási irányt.....	119
55. ábra: A kutatási projekt méréseinek helyszíne és annak földrajzi helye (a) Légi felvétel a belvárosról (b) Mérések földrajzi helyszíne (Google Earth).....	120
56. ábra: Dimenzió nélküli argumentum és a regressziós egyenes logaritmikus skálán ábrázolva .....	121
57. ábra: Mért és modell által kalkulált nitrogén koncentráció .....	122
58. ábra: Mért és modell által kalkulált nitrogén koncentráció szórása .....	122
59. ábra: Forgalomszámlálás Moyzesova út .....	142
60. ábra: Forgalomszámlálás eredménye .....	142
61. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (1. nap – 2014.06.16) .....	144
62. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (2. nap – 2014.06.18) .....	144
63. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (3. nap – 2014.06.19) .....	144
64. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (4. nap – 2014.06.24) .....	145
65. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (5. nap – 2014.06.27) .....	145
66. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (6. nap – 2014.07.07) .....	145
67. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (7. nap – 2014.07.08) .....	146
68. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (8. nap – 2014.07.10) .....	146
69. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (9. nap – 2014.07.16) .....	146
70. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (10. nap – 2014.08.11) .....	147
71. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (11. nap – 2014.08.13) .....	147
72. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (12. nap – 2014.08.14) .....	147
73. ábra: Dinamikus mérési eredmények, azonos színek (13. nap – 2014.08.15) .....	148
74. ábra: Dinamikus mérési eredmények (1. nap – 2014.06.16).....	149
75. ábra: Dinamikus mérési eredmények (2. nap – 2014.06.18).....	149
76. ábra: Dinamikus mérési eredmények (3. nap – 2014.06.19).....	149
77. ábra: Dinamikus mérési eredmények (4. nap – 2014.06.24).....	150

78. ábra: Dinamikus mérési eredmények (5. nap – 2015.06.27).....	150
79. ábra: Dinamikus mérési eredmények (6. nap – 2015.07.07).....	150
80. ábra: Dinamikus mérési eredmények (7. nap – 2014.07.08).....	151
81. ábra: Dinamikus mérési eredmények (8. nap – 2014.07.10).....	151
82. ábra: Dinamikus mérési eredmények (9. nap – 2014.07.16).....	151
83. ábra: Dinamikus mérési eredmények (10. nap – 2014.08.11).....	152
84. ábra: Dinamikus mérési eredmények (11. nap – 2014.08.13).....	152
85. ábra: Dinamikus mérési eredmények (12. nap – 2014.08.14).....	152
86. ábra: Dinamikus mérési eredmények (13. nap – 2014.08.15).....	153

## Irodalomjegyzék

1. **Makra László.** Szemelvények a környezetszennyezés történetéből, különös tekintettel a levegő szennyezésére, I. rész. *Szegedi Tudomány Egyetem.* [Online] 2004. [Hivatkozva: 2014. 05 15.] <http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/legszenny1.htm>.
2. **UNFPA.** Unleashing the potential of urban growth. *United Nations Population Fund.* [Online] 2007. [Hivatkozva: 2013. 12 13.] <https://www.unfpa.org/swp/2007/english/introduction.html>.
3. **KSH.** Népeesség a település jellege szerint. *Központi Statisztikai Hivatal.* [Online] 2014. 03 20. [Hivatkozva: 2014. 01 06.] [http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat\\_eves/i\\_wdsd001b.html](http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_wdsd001b.html).
4. **Barkács Katalin, Kiss Ádám, Mádlné Szőnyi Judit, Mészáros Róbert, Papp Sándor, Pongrácz Rita, Szabó Mária, Tasnádi Péter, Torkos Kornél, Tóth Erzsébet, Weiszburg Tamás, Zsemle Ferenc.** *Környezettan alapjai.* Budapest : Typotex Kiadó, 2012. ISBN 978-963-279-545-4.
5. **Dr.Patkó, István.** *Környezettechnika I (levegőtisztaság védelem).* Budapest : Budapesti Műszaki Főiskola, 2009.
6. 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet a levegő védelméről.
7. **Dr. Barótfi, István.** *Környezettechnika.* Budapest : Mezőgazda Kiadó, 2000. ISBN 963 9239 50 X.
8. **Gurjar, Bhola R., Molina, Luisa T. és Ojha, Chandra S.P.** *Air pollution, Health and environmental impacts.* United States of America : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. ISBN: 978-1-4398-0963-1.
9. **Tiwary, Abhishek és Colls, Jeremy.** *Air Pollution, Measurement, modelling and mitigation, Third edition.* USA : Routledge, 2010. ISBN 0-203-87196-0.
10. **Dr.Anda, Angéla, Dr. Burucs, Zoltán és Dr. Kocsis, Tímea.** *Globális környezeti problémák és néhány társadalmi hatásuk.* Magyarország : Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ, 2011.
11. *Populations potentially exposed to traffic-related air pollution in seven world cities.* **Jason G. Su, Joshua S. Apte, Jonah Lipsitt, Diane A. Garcia-Gonzales, Bernardo**

**S. Beckerman, Audrey de Nazelle, José Luis Texcalac-Sangrador, Michael Jerrett.** 2015., *Environment International*, 78. kötet, old.: 82-89.

12. *Modelling traffic and air pollution in an integrated approach – the case of Munich.* **Friederike Hülsmann, Regine Gerike, Matthias Ketzl.** 2014., *Urban Climate*, 10. kötet, old.: 732-744.

13. *Noise, air pollutants and traffic: Continuous measurement and correlation at a high-traffic location in New York City.* **Zev Ross, Iyad Kheirbek, Jane E. Clougherty, Kazuhiko Ito, Thomas Matte, Steven Markowitz, Holger Eisl.** 8, 2011., *Environmental Research*, 111. kötet, old.: 1054–1063.

14. *Wood combustion, a dominant source of winter aerosol in residential district in proximity to a large automobile factory in Central Europe.* **J. Hovorka, P. Pokorná, P.K. Hopke, K. Krumal, P. Mikuska, M. Pisová.** 2015., *Atmospheric Environment*, 113. kötet, old.: 98–107.

15. *Impact of biomass burning sources on seasonal aerosol air quality.* **Tunga Salthammer, Tobias Schripp, Sebastian Wientzek, Michael Wensing.** 2013., *Atmospheric Environment*, 67. kötet, old.: 37–447.

16. *Impacts of controlling biomass burning emissions on wintertime carbonaceous aerosol in Europe.* **C. Fountoukis, T. Butler, M.G. Lawrence, H.A.C. Denier van der Gon, A.J.H. Visschedijk, P. Charalampidis, C. Pilinis, S.N. Pandis.** 2014., *Atmospheric Environment*, 87. kötet, old.: 175–182.

17. **Dr. Bánhidi, Olivér.** Egyetemi jegyzet. *Miskolci Egyetem.* [Online] 2009. 04 02. [Hivatkozva: 2014. 04 11.] [http://www.uni-miskolc.hu/home/web/wwwkoh/www/hun/kemiai\\_int/kollegak/o\\_banhidi/k\\_vedelem\\_4.pdf](http://www.uni-miskolc.hu/home/web/wwwkoh/www/hun/kemiai_int/kollegak/o_banhidi/k_vedelem_4.pdf).

18. **EPA.** What Are the Six Common Air Pollutants? *United States Environmental Protection Agency.* [Online] 2012. [Hivatkozva: 2014. 01 13.] <http://www.epa.gov/airquality/urbanair/>.

19. **Rubin, Mordecai B.** The history of ozone. The schönbein period, 1839-1868. *Bulletin for history of chemistry.* 26, 2001., 1. kötet.

20. **Divéky, Erika.** *A felszínközeli ózon mérése és vizsgálata Magyarországon.* Szeged : Szegedi Tudományegyetem-Földtudományi Doktori Iskola, 2004.

21. **Láng, István.** *Környezetvédelem Lexikon I-II.* . Budapest : Akadémia Kiadó, 2007. ISBN:978 963 05 8496 8.
22. **Műszeroldal Kft.** Műszeroldal. *Az egyes légszennyezők legfontosabb egészségkárosító hatásai.* [Online] 2005. [Hivatkozva: 2012. 01 10.] [http://www.muszeroldal.hu/assistance/legszennezo\\_anyagok\\_hatasa.pdf](http://www.muszeroldal.hu/assistance/legszennezo_anyagok_hatasa.pdf).
23. Az argon és a hélium. *Természettudományi közlöny.* Magyarország, 1895., 27. kötet, 316.
24. **Mészáros, Ernő.** *Légkörtan.* Veszprém : Veszprémi Egyetemi Kiadó, 1993.
25. **Gács, Iván és Katona, Zoltán.** *Környezetvédelem, Energetika és levegőkörnyezet.* Budapest : Budapesti Műszaki Egyetem, 1998.
26. **Szepesváry, Pálné fordítása.** A flogiszonmentes levegőről és a légkör összetételéről. *Magyar Tudományos Akadémia, KFKI telephely.* [Online] 1997. [Hivatkozva: 2014. 01 15.] <http://www.kfki.hu/~cheminfo/hun/olvaso/histchem/priest.html>.
27. **Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat.** Légszennyezők egészségügyi hatásai. *OLM - Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat.* [Online] [Hivatkozva: 2014. 01 14.] <http://www.kvvm.hu/olm/info.php?id=5>.
28. **Patkós, András.** *Kémiai kislexikon.* Magyarország : Typotex Elektronikus Kiadó Kft., 2007.
29. **WHO.** Almost 600 000 deaths due to air pollution in Europe: new WHO global report. *WHO: World Health Organisation.* [Online] 2014. 03 25. [Hivatkozva: 2014. 04 12.] <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/urban-health/news/news/2014/03/almost-600-000-deaths-due-to-air-pollution-in-europe-new-who-global-report>.
30. **Agency), EEA (European Environment.** *EEA Report No 9/2013 - Air quality in Europe - 2013 report.* 2013. ISSN 1725-9177.
31. 6/2011. (I. 14.) VM rendelet a levegőterheltségi szint és a helyhez kötött légszennyező források kibocsátásának vizsgálatával, ellenőrzésével, értékelésével kapcsolatos szabályokról.
32. 2008/50/EK a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról. (2008. május 21.).

33. **UNEP.** Carbon Monoxide. *United States Environmental Protection Agency.* [Online] 2012. 02 10. [Hivatkozva: 2014. 05 14.] <http://www.epa.gov/airquality/carbonmonoxide/>.
34. **Kristin A. Evansa, Jill S. Haltermanb, Maria Fagnanob, David Q. Richa.** Increased ultrafine particles and carbon monoxide concentrations are associated with asthma exacerbation among urban children. *Environmental Research.* 2014., 129. kötet, old.: 11-19.
35. **Jennifer K. Vanosa, Christopher Hebberna, Sabit Cakmaka.,** Risk assessment for cardiovascular and respiratory mortality due to air pollution and synoptic meteorology in 10 Canadian cities. *Environmental Pollution.* 2014., 185. kötet, old.: 322-332.
36. **Sárváry Attila.** *Környezetegészségtan.* Debrecen : Debreceni Egyetem, 2011.
37. **Malek Bentayeb, Catherine Helmer, Chantal Raheison, Jean François Dartigues, Jean-François Tessier, Isabella Annesi-Maesanoa.** Bronchitis-like symptoms and proximity air pollution in French elderly. *Respiratory Medicine.* 2010., 104. kötet, old.: 880-888.
38. **Paul J. Villeneuve, Li Chen, Dave Stieb, Brian H. Rowe.** Associations between outdoor air pollution and emergency department visits for stroke in Edmonton, Canada. *European Journal of Epidemiology.* 2006., 21. kötet, old.: 689-700.
39. **Hongyan Li, Xiaoyun Xin.** Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) pollution as a potential risk factor for developing vascular dementia and its synaptic mechanisms. *Chemosphere.* 2013., 92. kötet, old.: 52-58.
40. **Z.J. Andersen, L.C. Kristiansen, K.K. Andersen, T.S. Olsen, M. Hvidberg, S.S. Jensen, M. Ketzel, S. Loft, M. Sørensen, A. Tjønneland, K. Overvad, O. Raaschou-Nielsen.** Stroke and long-term exposure to outdoor air pollution from nitrogen dioxide: a cohort study. *Stroke.* 2012., 43. kötet, old.: 320-325.
41. **Uwe Schlinka, Olf Herbartha, Matthias Richtera, Stephen Dorlingb, Giuseppe Nunnaric, Gavin Cawleyd, Emil Pelikane.** Statistical models to assess the health effects and to forecast ground-level ozone. *Environmental Modelling & Software.* 2006., 21. kötet, old.: 547-558.
42. **S.I.V. Sousa, M.C.M. Alvim-Ferraz, F.G. Martins.** Health effects of ozone focusing on childhood asthma: What is now known – a review from an epidemiological point of view. *Chemosphere.* 2013., 90. kötet, old.: 2051-2058.

43. **Matthew Neidella, Patrick L. Kinneyb.** Estimates of the association between ozone and asthma hospitalizations that account for behavioral responses to air quality information. *Environmental Science & Policy*. 2010., 13. kötet, old.: 97-103.
44. **R.D. Brook, J.R. Brook, S. Rajagopalan.** Air pollution: the “Heart” of the problem. *Curr. Hypertens. Rep.* 2003., old.: 32-39.
45. **R.D. Brook, B. Franklin, W. Cascio, Y. Hong, G. Howard, M. Lipsett, R. Luepker, M. Mittleman, J. Samet, S.C. Smith Jr., I. Tager.** Air pollution and cardiovascular disease: a statement for healthcare professionals from the Expert Panel on Population and Prevention Science of the American Heart Association. *Circulation*. 2004., old.: 2655-2671.
46. **Glantz, S.A.** Air pollution as a cause of heart disease. Time for action. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2002., old.: 943-945.
47. **N.A.H. Janssen, P. Fischera, C. Amelinga, F.R. Casseea.,** Short-term effects of PM2.5, PM10 and PM2.5–10 on daily mortality in the Netherlands. *Science of The Total Environment*. 2013., 463-464. kötet, old.: 20-26.
48. **Department of Economic and Social Affairs of the United Nations, Population Division.** *World Urbanization Prospects, The 2014 Revision*. New York : United Nations, 2015.
49. **Jászberényi Melinda.** *Fenntartható Mobilitás Budapest Agglomerációjában, PhD értekezés.* Budapest : Budapesti Corvinus Egyetem, 2008.
50. **Bottyán, Zsolt.** A városi hősziget, mint a települések lokális klímájának markáns sajátossága. *Hadmérnök.* 2009. június, 4. kötet.
51. *Statistical analysis of the Madrid urban heat island.* **C. Yagüe, E. Zurita.** 3, Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere, 1991., 25. kötet, old.: 327-332.
52. *Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates.* **Arthur H. Rosenfeld, Hashem Akbari, Sarah Bretz, Beth L. Fishman, Dan M. Kurn, David Sailor, Haider Taha.** 3, Energy and Buildings, 1995., 22. kötet, old.: 255-265.
53. *Three years of study of the Urban Heat Island in Padua: Experimental results.* **F. Busato, R.M. Lazzarin, M. Noro.** Sustainable Cities and Society, 2014., 10. kötet, old.: 251-258.

54. **UHI.** UHI Project. *Urban Heat Island*. [Online] 2014. [Hivatkozva: 2014. 04 19.] <http://www.eu-uhi.eu/>.
55. **Belügyminisztérium, VÁTI Nonprofit Kft.** *Klímaparát városok – Kézikönyv az európai városok klímaváltozással kapcsolatos feladatairól és lehetőségeiről*. Budapest : Belügyminisztérium – VÁTI, 2011.
56. **Landsberg, H. E.** *The Urban Climate*. New York : Academic Press, 1981. old.: 275.
57. **Gál Tamás, Mátyás.** *Az összetett városi felszín geometriáját leíró paraméterek számítása és városklímatológiai alkalmazása*. Szeged : Szegedi Tudományegyetem, 2009.
58. **Prileszky István, Dr. Fülöp Gábor, Dr. Horváth Balázs.** *Közúti üzemtan I.* [Elektronikus jegyzet] Győr : ismeretlen szerző, 2006.
59. **Lengyel Tamás.** *Közlekedéscsúszás*. [Elektronikus jegyzet] 2007.
60. **Kövesné Dr. Gilicze Éva.** *Közlekedési rendszerek*. [Elektronikus jegyzet] Budapest : ismeretlen szerző, 2004.
61. **Prileszky István, Fülöp Gábor, Horváth Balázs.** *Közúti üzemtan I.* (Elektronikus jegyzet). *Széchenyi István Egyetem, Műszaki Tudományi Kar*. [Online] 2006. [Hivatkozva: 2015. 09 29.] [http://rs1.sze.hu/~farkasi/Kozuti\\_uzemtan.pdf](http://rs1.sze.hu/~farkasi/Kozuti_uzemtan.pdf).
62. **European Comission.** *EU TRANSPORT in figures – Statistical pocketbook 2013*. Belgium : ismeretlen szerző, 2013. ISBN 978-92-79-28860-9.
63. **Janick F. Artiola, Ian L. Pepper, Mark L. Brusseau.** *Environmental Monitoring and Characterization*. Academic Press, 2004.
64. **Gyulai István.** *Környezeti informatika*. Magyarország : ismeretlen szerző, 2011.
65. **Bulla Miklós.** *Környezetállapot-értékelés, monitorozás*. Veszprém : Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet, 2011.
66. **Óvári Mihály, Tatár Enikő.** *Környezeti mintavételezés*. Typotex Kiadó, 2012.
67. **Domokos Endre, Kovács József, Tóthné File Edina.** *Környezetvédelmi monitoring*. Veszprém : Pannon Egyetem, Környezetmérnöki Intézet, 2014.



68. **Mészáros Róbert.** *Meteorológiai műszerek és mérőrendszerek.* Budapest : Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2013.
69. **Bálint, Pődör.** *Mikroelektronikai érzékelők 1.* Budapest. 2008.
70. **Attila, Halmai.** *Szenzor- és aktuátortechnika.* hely nélk. : EDUTUS Főiskola, 2012.
71. **Bánlaci Pál, Lovas Antal.** *Szenzorika és anyagai.* Typotex Kiadó, 2012.
72. **Vajda Ferenc.** Érzékelők, szenzorrendszerek. *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.* [Online] 2013. [Hivatkozva: 2014. 03 06.] [http://3dmr.iit.bme.hu/edu/introb/slides/01\\_%C3%89rz%C3%A9kel%C5%91k.pdf](http://3dmr.iit.bme.hu/edu/introb/slides/01_%C3%89rz%C3%A9kel%C5%91k.pdf).
73. **Hegedűs János.** Szenzorok, egyetemi jegyzet. *Miskolci Egyetem Honlapja.* [Online] 2002. [Hivatkozva: 2014. 03 06.] <http://www.bosch.uni-miskolc.hu/userfiles/docs/szenzorok.pdf>.
74. **Bánlaci Pál, Lovas Antal.** *Szenzorika és anyagai.* Magyarország : Typotex kiadó, 2012. ISBN 978-963-279-629-1.
75. **Henderson, R.** Using Electrochemical Sensors for Toxic Gas Measurement. *Occupational hazards.* 2005., 67. kötet, old.: 60-63.
76. **Paolo Neirotti, Alberto De Marco, Anna Corinna Cagliano, Giulio Mangano, Francesco Scorrano.** Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. *Cities, The International Journal of Urban Policy and Planning.* 2014., 38. kötet.
77. **Voula Mega.** Viewpoint, Cities inventing the civilisation of sustainability: an odyssey in the urban archipelago of the European Union. *Cities.* 2000., 17. kötet, 3, old.: 227-236.
78. Building and managing an intelligent city. *Accenture.* [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 13.] <http://www.accenture.com/SiteCollectionDocuments/PDF/Accenture-Building-Managing-Intelligent-City.pdf>.
79. **L. M. Correia, & Wünstel, K.** Smart Cities applications and requirements. White Paper of the Experts Working Group. *Net!Works European Technology Platform.* [Online] 2011. [Hivatkozva: 2014. 02 13.] <http://www.scribd.com/doc/87944173/White-Paper-Smart-Cities-Applications>.
80. **Pardo, Taewoo Nam & Theresa A.** Conceptualizing Smart City with Dimensions of Technology, People, and Institutions. *Center for Technology in Government.*

[Online] 2011. [Hivatkozva: 2014. 02 12.]  
[http://www.ctg.albany.edu/publications/journals/dgo\\_2011\\_smartcity/dgo\\_2011\\_smartcity.pdf](http://www.ctg.albany.edu/publications/journals/dgo_2011_smartcity/dgo_2011_smartcity.pdf).

81. **The Climate Group, ARUP, Accenture, & The University of Nottingham.** Information marketplaces the new economics of cities. [Online] 2011. [Hivatkozva: 2014. 02 13.]  
[http://www.theclimategroup.org/\\_assets/files/information\\_marketplaces\\_05\\_12\\_11.pdf](http://www.theclimategroup.org/_assets/files/information_marketplaces_05_12_11.pdf).

82. **Think.** Smart Cities initiative: How to foster a quick transition towards local sustainable energy systems. [Online] 2011. január. [Hivatkozva: 2014. 02 13.]  
[http://www.symple.tm.fr/uploaded/pdf/THINK\\_smart\\_cities.pdf](http://www.symple.tm.fr/uploaded/pdf/THINK_smart_cities.pdf).

83. **Anna Kramers, Mattias Höjer, Nina Lövehagen, Josefin Wangel.** Smart sustainable cities e Exploring ICT solutions for reduced energy use in cities. *Environmental Modelling & Software*. 2014.

84. **Toppeta, Donato.** The Smart City vision:How Innovation and ICT can build smart, “liveable”, sustainable cities. *The Innovation Knowledge Foundation*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 18.] [http://www.inta-aiavn.org/images/cc/Urbanism/background%20documents/Toppeta\\_Report\\_005\\_2010.pdf](http://www.inta-aiavn.org/images/cc/Urbanism/background%20documents/Toppeta_Report_005_2010.pdf).

85. **Dierwechter, Yonn.** Smart city-regionalism across Seattle: Progressing transit nodes in labor space? *Geoforum*. 2013. július.

86. **Jesus Roberto Millan-Almaraza, Irineo Torres-Pachecob, Carlos Duarte-Galvanb, Ramon Gerardo Guevara-Gonzalezb, Luis Miguel Contreras-Medinab, Rene de Jesus Romero-Troncosoc, Jesus Rooney,Rivera-Guillend.** FPGA-based wireless smart sensor for real-time photosynthesis monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013. július, 95. kötet, old.: 58-69.

87. **Aqeel-ur-Rehmana, Abu Zafar Abbasib, Noman Islamb, Zubair Ahmed Shaikhb.** A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*. 2014. február, 36. kötet, old.: 263-270.

88. Smart Amsterdam City. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.]  
<http://amsterdamsmartcity.com/>.

89. Amsterdam Smart City. *European Commission*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.]  
[http://ec.europa.eu/regional\\_policy/projects/practices/details.cfm?pay=NL&the=68&sto=2115&region=ALL&lan=7&obj=ALL&per=ALL&defL=EN](http://ec.europa.eu/regional_policy/projects/practices/details.cfm?pay=NL&the=68&sto=2115&region=ALL&lan=7&obj=ALL&per=ALL&defL=EN).

90. Smartcity Barcelona . *Endesa*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://www.endesa.com/en/aboutEndesa/businessLines/principalesproyectos/Barcelona\\_Smartcity](http://www.endesa.com/en/aboutEndesa/businessLines/principalesproyectos/Barcelona_Smartcity).
91. Barcelona Ciutat Intel-ligent. *Smart Barcelona*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] <http://smartbarcelona.cat/en/>.
92. **Susana Carillo-Aparicioa, Juan R. Heredia-Larrubiab, Francisco Perez-Hidalgoc.** SmartCity Málaga, a real-living lab and its adaptation to electric vehicles in cities. *Energy Policy*. 2013. November, 62. kötet, old.: 774-779.
93. Malaga, Spain. *Smarter Cities Challenge*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://smartercitieschallenge.org/city\\_Malaga\\_Spain.html](http://smartercitieschallenge.org/city_Malaga_Spain.html).
94. **J. García-Nieto, E. Alba, A. Carolina Olivera.** Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2012. Március, 25. kötet, 2, old.: 274-283.
95. **Juan de Oña, Penélope Gómezb, Enrique Mérida-Casermeiroc.** Adjustment boarding and alighting passengers on a bus transit line using qualitative information. *Applied Mathematical Modelling*. 2014. Február, 38. kötet, 3, old.: 1147-1158.
96. **Kim, Chigon.** Place promotion and symbolic characterization of New Songdo City, South Korea. *Cities*. Február, 2010., 27. kötet, 1, old.: 13-19.
97. **Donghee Kima, Kyu-Sun Kimb, Seongkwon Koc, Youngmin Choid, Woojin Lee.** Assessment of geotechnical variability of Songdo silty clay. *Engineering Geology*. 2012. Április, 133-134. kötet, old.: 1-8.
98. **Donghee Kima, Kyu-Sun Kimb, Seongkwon Koc, Youngho Chaed, Woojin Lee.** Influence of estimation method of compression index on spatial distribution of consolidation settlement in Songdo New City. *Engineering Geology*. 2013. Január, 152. kötet, 1, old.: 172-179.
99. **M. Premalatha, S.M. Tauseef, Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi.** The promise and the performance of the world's first two zero carbon eco-cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Szeptember, 25. kötet, old.: 660-669.
100. **Wu, Fulong.** China's eco-cities. *Geoforum*. 2012. Március, 43. kötet, 2, old.: 169-171.

101. **Inayatullah, Sohail.** City futures in transformation: Emerging issues and case studies. *Futures*. 2011. Szeptember, 43. kötet, 7, old.: 654-661.
102. **Reiche, Danyel.** Renewable Energy Policies in the Gulf countries: A case study of the carbon-neutral “Masdar City” in Abu Dhabi. *Energy Policy*. 2010. Január, 38. kötet, 1, old.: 378-382.
103. **Isam Janajreh, Liu Sua, Fathi Alanb.** Wind energy assessment: Masdar City case study. *Renewable Energy*. 2013., 52. kötet, old.: 8-15.
104. **Nader, Sam.** Paths to a low-carbon economy—The Masdar example. *Energy Procedia*. 2009. Február, 1. kötet, 1, old.: 3951-3958.
105. **T. Kansara, I. Ridley.** Post Occupancy Evaluation of buildings in a Zero Carbon City. *Sustainable Cities and Society*. 2012. December, 5. kötet, old.: 23-25.
106. **Mohamed Elchalakani, Tarek Aly, Emad Abu-Aisheh.** Sustainable concrete with high volume GGBFS to build Masdar City in the UAE. *Case Studies in Construction Materials*. 2014., 1. kötet, old.: 10-24.
107. Smart City project in Salamanca to monitor Air Quality and Urban Traffic. *Libelium*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://www.libelium.com/smart\\_city\\_air\\_quality\\_urban\\_traffic\\_waspnote/](http://www.libelium.com/smart_city_air_quality_urban_traffic_waspnote/).
108. **Luis Sanchez, Luis Muñoz, Jose Antonio Galache, Pablo Sotres, Juan R. Santana, Veronica Gutierrez, Rajiv Ramdhany, Alex Gluhak, Srdjan Krcod, Evangelos Theodoridis, Dennis Pfisterer.** SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed. *Computer Networks*. 2013.
109. Santander on Fire, Future internet reserach and experimentation. *Smart Santander*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] <http://www.smartsantander.eu/>.
110. **Katerina DIAMANTAKI, Charalampos RIZOPOULOS, Vasileios TSETOS, Iouliani THEONA, Dimitris CHARITOS, Nikos KAIMAKAMIS.** Integrating game elements for increasing engagement and enhancing User Experience in a smart city context. *Smart Santander*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://www.smartsantander.eu/downloads/Presentations/Diamantaki\\_Rizopoulos\\_Tsetos\\_Theona\\_Charitos\\_Kaimakamis\\_Intelligent%20Environments%20workshop\\_CUI\\_2013\\_CAMERA%20READY.pdf](http://www.smartsantander.eu/downloads/Presentations/Diamantaki_Rizopoulos_Tsetos_Theona_Charitos_Kaimakamis_Intelligent%20Environments%20workshop_CUI_2013_CAMERA%20READY.pdf).
111. **Jose A. GALACHE, Verónica GUTIÉRREZ, Juan R. SANTANA, Luis SÁNCHEZ, Pablo SOTRES, Javier CASANUEVA, Luis MUÑOZ.** SmartSantander:

A joint service provision facility and experimentation-oriented testbed, within a smart city environment. *Smart Santander*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://www.smartsantander.eu/downloads/Presentations/SmartSantander\\_A\\_joint.pdf](http://www.smartsantander.eu/downloads/Presentations/SmartSantander_A_joint.pdf).

112. Smart City project in Serbia for environmental monitoring by Public Transportation. *Libelium*. [Online] [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://www.libelium.com/smart\\_city\\_environmental\\_parameters\\_public\\_transportation\\_waspmote/](http://www.libelium.com/smart_city_environmental_parameters_public_transportation_waspmote/).

113. **Brković Matija, Sretović Višnja.** Urban Sensing-Smart Solutions for Monitoring Environmental Quality: Case Studies from Serbia. *Isocarp*. [Online] 2012. [Hivatkozva: 2014. 02 12.] [http://www.isocarp.net/projects/case\\_studies/cases/cs\\_info.asp?ID=2215](http://www.isocarp.net/projects/case_studies/cases/cs_info.asp?ID=2215).

114. T-City Szolnok - A jövő városa. *Telekom*. [Online] [Hivatkozva: 2015. 09 29.] [http://www.telekom.hu/rolunk/t-city/a\\_jovo\\_varosa](http://www.telekom.hu/rolunk/t-city/a_jovo_varosa).

115. **Szűcs Ervin.** A modellezés elmélete és gyakorlata. *Adalékok a technikai műveltséghez*. [Online] 2001. 01. [Hivatkozva: 2014. 12 09.] <http://web.t-online.hu/eszucs7/modell/Modell.htm#Tartalom>.

116. **Stoff.** *Modell és filozófia*. Budapest : Kossuth, 1973.

117. **Pokorádi László.** *Rendszerek és folyamatok modellezése*. Debrecen : Campus, 2008.

118. **Anda Angéla, Burucs Zoltán, Kocsis Tímea, Józsa Sándor, Jakush Pál.** Modellezés, mint módszer bemutatása. *Pannon Egyetem Georgikon Kar, Meteorológia és Vízgazdálkodás Tanszék*. [Online] 2012. 03 12. [Hivatkozva: 2014. 12 09.] [http://www.georgikon.hu/tanszekek/meteor/tamop/tamop21m/8\\_eloadas.pdf](http://www.georgikon.hu/tanszekek/meteor/tamop/tamop21m/8_eloadas.pdf).

119. **Szentesi Péter.** A modellezés elmélete és gyakorlata. *Debreceni Egyetem - Általános Orvostudományi Kar - Élettani Intézet*. [Online] 2009. [Hivatkozva: 2015. 01 12.] <http://phys.dote.hu/files/oktatas/molbiol/modellezes/eloadasanyagok/bevezetes.pdf>.

120. **Szepesi D., Feketéné Dr. Nárαι K., Pohl L.** *Útmutató a levegőkörnyezeti KHT. Készítéséhez a 152/1995. (XII. 12.) Kormány rendelete alapján.* hely nélk. : Levegőkörnyezet-gazdálkodási Szaktanácsadó Bt., 1996.

121. **Hangos Katalin.** Modelling fundamentals. *Dinamikus rendszerek irányítási és diagnosztikai célú modellezése*. [Online] 2012. [Hivatkozva: 2014. 12 09.] [file:///C:/Users/KMI/Downloads/Model\\_modalapok.pdf](file:///C:/Users/KMI/Downloads/Model_modalapok.pdf).

122. **Aris, Rutherford.** *Mathematical Modelling Techniques.* United States of America : Dover Publications Inc., 1978.
123. **Tóth János.** *OXFORD - Matematika : Kislexikon.* Budapest : Typotex Elektronikus Kiadó Kft., 2007.
124. **Pokorádi László.** A matematikai modell. *Szolnoki Tudományos Közlemények.* 2007.
125. **P.W, Bridgman.** *Dimensional analysis.* New Haven : Yale University Press, 1922.
126. **Ain A. Sonin.** *The Physical Basis of DIMENSIONAL ANALYSIS.* Cambridge : Department of Mechanical Engineering, 2001.
127. **Pokorádi László.** *Rendszertechnika.* Budapest : TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. Szakkönyvkiadó Üzletága,, 2013.
128. **József, Lehota.** *Marketingkutató az agrárgazdaságban.* hely nélk. : Mezőgazda Kiadó, 2001. ISBN 963 9358 25 8.
129. **József, Závoti.** *Matematikai statisztikai elemzések 6.: Regressziószámítás:kétváltozós lineáris és nemlineáris regresszió, többváltozós regresszió.* Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Kar, 2010.
130. **Balázs Katalin.** Lineáris regresszió, statisztika jegyzet. *Debreceni Egyetem, Pszichológia Intézet.* [Online] 2010. [Hivatkozva: 2015. 09 07.] [http://psycho.unideb.hu/munkatarsak/balazs\\_katalin/stat1/stat1ora4.pdf](http://psycho.unideb.hu/munkatarsak/balazs_katalin/stat1/stat1ora4.pdf).
131. Regresszió-számítás, jegyzet. *Miskolci Egyetem Gazdaságtudományi Kar.* [Online] [Hivatkozva: 2015. 09 07.] [http://193.6.12.228/uigtk/uise/gik/stat\\_mm\\_bgi\\_6ea.pdf](http://193.6.12.228/uigtk/uise/gik/stat_mm_bgi_6ea.pdf).
132. **Jenő, Reiczigel.** Korreláció és regressziószámítás . *Szent István Egyetem, Állatorvos Tudományi Kar.* [Online] 2008. [Hivatkozva: 2015. 09 07.] <http://www2.univet.hu/users/zslang/phd/korr+regr.pdf>.
133. **Domán Csaba.** *Többváltozós korreláció- és regressziószámítás, oktatási segédlet.* Miskolc : Miskolci Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, 2005.
134. **Vincze László.** *Nagyméretarányú térképezés 3., A digitális alaptérképek fogalma, fajtái, jellemzői.* Nyugat-magyarországi Egyetem, 2010.

135. Mérnöki létesítményekhez kapcsolódó geodéziai, térinformatikai tevékenységek összefoglalása. [Online] [Hivatkozva: 2014. 09 07.] [http://www.agt.bme.hu/tantargyak/bsc/bmeeoafasi2/BMEEOAFASI2\\_ea\\_01-13.pdf](http://www.agt.bme.hu/tantargyak/bsc/bmeeoafasi2/BMEEOAFASI2_ea_01-13.pdf).
136. **Mélykúti Gábor.** Topográfia 9., Digitális topográfiai térképezés alapfogalmai. [Online] 2010. [Hivatkozva: 2015. 09 08.] [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027\\_TOP9/ch01s03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_TOP9/ch01s03.html).
137. **Telbisz Tamás, Székely Balázs, Timár Gábor.** *Digitális terepmodellek, Adat, látvány, elemzés.* Budapest : Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2013.
138. **Katona Endre.** *Térinformatika, Előadás jegyzet.* Szeged : Szegedi Tudományegyetem, 2013.
139. **Béla, Márkus.** *Térinformatika 12.: 3D elemzés.* Nyugat-magyarországi Egyetem , 2010.
140. —. *Térinformatika 11.: Interpoláció és domborzatmodellelés.* Nyugat-magyarországi Egyetem, 2010.
141. **Eurostat.** Environment - cities and greater cities. *Eurostat, the Statistical Office of the European Union.* [Online] 2014. 10 7. [Hivatkozva: 2014. 11 03.] [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/region\\_cities/city\\_urban/data\\_cities/database\\_sub1](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/region_cities/city_urban/data_cities/database_sub1).
142. **Košice, Magistrát mesta.** Általános Információ. *Kosice.* [Online] 2014. [Hivatkozva: 2014. 08 14.] [http://www.kosice.sk/clanok.php?sekcia=vseobecne\\_info](http://www.kosice.sk/clanok.php?sekcia=vseobecne_info).
143. **U.S.Steel.** *Corporate Responsibility Report 2010.* Kosice : U.S.Steel Kosice s.r.o., 2010.
144. **Statistical Office, of the Slovak Republic.** Regional Statistic Database. *Statistical Office of the Slovak Republic.* [Online] 2013. [Hivatkozva: 2014. 08 14.] at: [http://px-web.statistics.sk/PXWebSlovak/index\\_en.htm](http://px-web.statistics.sk/PXWebSlovak/index_en.htm).
145. **360/2010 Korm. rendelet.** 360/2010: A levegő minősége. 2010.
146. **137/2010 Korm.rendelet.** 137/2010: A tiszta levegő. 2010.
147. **ADOS GmbH.** *Operating Instructions, Chemical Gas Sensor for Measuring Nitrogenmonoxyd and Nitrogendioxyd.* 2013.

148. **Mária Čarnogurská, Miroslav Příhoda, Tomáš Brestovič.** Modelling of nitrogen oxides formation applying dimensional analysis. *Chemical and Process Engineering*. 2011., 32. kötet, old.: 175-184.
149. **Mária Čarnogurská, Miroslav Příhoda, Marcel Koško, René Pyszko.** Verification of pollutant creation model at dendromass combustion. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012., 26. kötet, 12, old.: 4161-4169.
150. **Senítkova., Silvia Vilcekova. I.** Modeling the occurrence of nitrogen oxides indoors. *Indoor and Built Environmen.* 2009., 18. kötet, old.: 138-143.
151. **Martina Zeleňáková Pavol Purcz, Anna Oravcová.** Trends in Water Quality in Laborec River, Slovakia. *Procedia Engineering*. 2015., 119. kötet, old.: 1161–1170.
152. **Martina Zeleňáková, Mária Čarnogurská.** A dimensional analysis-based model for the prediction of nitrogen concentrations in Laborec River, Slovakia. *Water and Environment Journal*. 2013., 27. kötet, 2, old.: 284–291.
153. **freepublictransport.com.** Cities. *Free Public Transport*. [Online] 2014. [Hivatkozva: 2014. 08 15.] <http://freepublictransports.com/city/>.
154. **Fearnley, Nils.** Free Fares Policies: Impact on Public Transport Mode Share and Other Transport Policy Goals. 2013., 01. kötet, 01, old.: 75-90.
155. **iamsterdam.com.** Park & Ride (P+R). *I am amsterdam*. [Online] 2014. [Hivatkozva: 2014. 08 15.] <http://www.iamsterdam.com/en-GB/experience/plan-your-trip/getting-around/parking/park-and-ride>.
156. **www.citybikewien.at.** CITYBIKE WIEN - das gratis Stadtrad für Wien. *CITYBIKE WIEN*. [Online] 2014. [Hivatkozva: 2014. 08 15.] <http://www.citybikewien.at/>.
157. **Commonwealth of Massachusetts.** The Big Dig. *The Official Website of The Massachusetts Department of Transportation*. [Online] 2014. [Hivatkozva: 2014. 08 15.] <http://www.massdot.state.ma.us/highway/thebigdig/projectbackground.aspx>.
158. *Számlálási útmutató.* Budapest : Magyar Közút Nonprofit Zrt., 2012.