



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



Térségünk szmoghelyzete és a légköri inverzió vizsgálata

Készítette:

Báthory Csongor

Konzulensek:

Dr. Palotás Árpád Bence

Dr. Szemmelveisz Tamásné

Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék

2013. november

Tartalom

1	Bevezetés.....	3
2	A légkör tulajdonságai	3
2.1	Levegő összetétele	3
2.1.1	Alapgázok	3
2.1.2	Vendéganyagok	4
2.2	Levegő öntisztulása	4
2.2.1	A szennyező anyag a légkörből távozik	4
2.2.2	A szennyező anyag más, esetleg közömbös anyaggá alakul át	5
2.2.3	A szennyező anyag koncentrációja hígulással csökken	5
3	A szmog	5
3.1	A szmog története	5
3.2	Szmog típusok.....	6
3.2.1	London típusú szmog.....	6
3.2.2	Los Angeles típusú szmog.....	7
3.3	Szmog kialakulásának feltételei.....	8
3.3.1	A szélcsend szerepe a szmog kialakulásában	9
3.3.2	A légnedvesség-tartalom hatása a szmog kialakulásában	9
3.3.3	Az légköri inverzió fajtái és jelentősége a szmog kialakulásában.....	10
3.3.4	A beépítettség hatása a szmog kialakulásában	13
3.4	A szmog képződés és energiafelhasználás kapcsolata	14
3.4.1	Energiatermelő egységek	16
3.4.2	Ipari folyamatok	17
3.4.3	Közlekedés okozta légszennyezés	18
3.5	A szmog kialakulásának mérnöki megközelítése.....	21
3.5.1	Légköri mérések rövid története	21
3.5.2	A légköri inverziós helyzetek előfordulása	21
3.5.3	A keveredési rétegvastagság	22
3.5.4	Határrétegek vastagságának meghatározása.....	24
3.5.5	Példa a szmoghelyzet rádiószondás mérésen alapuló vizsgálatára	27
3.5.6	Hamburgi mérőtorony.....	28
4	Az ÉMI-KTVF mérőhálózata	30
4.1	Az állomás típusok.....	31
4.1.1	Háttér állomás	31

4.1.2	Ipari állomás	31
4.1.3	Közlekedési állomás.....	31
4.2	Telepítési előírások.....	32
4.3	Automata mérőhálózat	32
4.4	Manuális mérőhálózat.....	33
5	Immissziós adatok elemzése	34
5.1	Miskolci állomások adatainak elemzése	34
5.2	Sajó völgye PM ₁₀ koncentrációja	41
5.3	Ázsiai extrém esetek.....	46
6	A légköri inverzió mérése	46
6.1	Mérési módszer	47
6.2	Előzetes hibaanalízis.....	47
6.3	Eszközök kiválasztása	47
6.3.1	Emelő szerkezet.....	48
6.3.2	Rögzítő szerkezet.....	48
6.3.3	Mérő berendezés	48
6.4	Érzékelők matematikai statisztikai ellenőrzése.....	50
6.4.1	Magasságmérés.....	51
6.4.2	Hőmérsékletmérés	52
6.4.3	Magasság és hőmérséklet	53
6.5	Mérési eredmények	54
6.6	Jövőbeli tervek.....	57
7	Összegzés.....	58
8	Irodalomjegyzék	60
9	Melléklet.....	62

1 Bevezetés

Földi légkörünk minőségének megőrzése elengedhetetlen az élet fenntartásához, mindennapi tevékenységünk végzéséhez, de gépeink, berendezéseink is ugyanazt a levegőt használják működésükkor, legyen itt szó hűtésről vagy fűtésről. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) nemrég rákkeltőnek minősítette a szennyezett levegőt és károsabbnak tartja, mint a passzív dohányzást (1). Egészségünk és gépeink is veszélyben vannak a nem kellő odafigyelésnek köszönhetően. A megnövekedett energiafelhasználásnak és ipari tevékenységnek köszönhetően a légkörbe egyre több anyag kerül, ezért a levegőtisztaságvédelem ezt szabályozza, koordinálja. Megfigyelik, hogy a kibocsátott anyagok milyen hatást gyakorolnak a környezetre, mérik és feltérképezik a változásokat, hogy ez alapján, a veszélyesnek ítélt anyagok kibocsátását megelőzhessék, valamilyen módon szűrjék, eltávolítsák.

Dolgozatomban a szmog jelenséggel kívánok foglalkozni, mely főleg az emberi egészségre káros, de életterünk minden részére kihat. Ismertetem kialakulásának körülményeit, típusait, majd megvizsgálom az energiafelhasználáshoz fűződő kapcsolatát. A szmog kialakulásának egyik feltételét, az inverziós réteget vizsgálva kívánom elővetíteni a szennyezők alsóbb légkörből való eltávolításának egy lehetséges módszerét. Ez a módszer egy kürtő vagy kémény segítségével kívánja áttörni az inverziós réteget, majd a kéményhatást beindítva kiszellőztetni az alsóbb légkört a felsőbbek felé, ahol már eloszlik a légszennyezettség. Ennek megvalósításához pontosan kell tudnunk az inverziós réteg aktuális helyzetét, így erre alkalmas mérési módszert kell találnunk. A lehető legegyszerűbb módon, a hőmérséklet változását mérjük a magasság függvényében és így következtetünk az légrétegződés szerkezetére.

2 A légkör tulajdonságai

A légkör vagy atmoszféra, a Földet körülvevő vastag gázburok. A légkör felfelé ritkulva megy át a bolygóközi térbe, külső határát nehéz meghatározni, kb. 1000 km. A légkör tömegének fele helyezkedik el 5 km alatt, 99%-a 30 km alatt, de az össztömege a Föld tömegének csak mintegy 1 milliommód része. (2)

2.1 Levegő összetétele

A levegő aerodiszperz rendszer, mert a gázokon kívül szilárd és cseppfolyós részeket is tartalmaz.

2.1.1 Alapgázok

Ahogy az 1. táblázatban bemutatjuk, a gázfázis komponensei közül a nitrogén és az oxigén van jelen túlnyomó részben.

1. táblázat Az alapgázok térfogat százalékos aránya (3)

Gáz	% v/v
Nitrogén (N ₂)	78,10
Oxigén (O ₂)	20,93
Argon (Ar)	0,93
Szén-dioxid (CO ₂)	0,03
Hidrogén (H) és nemesgázok	0,01

2.1.2 Vendéganyagok

- Gázok
 - *Vízgőz:*
Az egyenlítői övben 3-4%, a mérsékelt övben 1% a levegő vízgőz tartalma. Ha a vízgőz a kondenzációs magvakon kicsapódik (pl. por, korom, higroszkopikus gázmolekulák pl. SO_2 felületén) felhő vagy köd keletkezik.
 - *Villámlás, vulkánikus- vagy az emberi tevékenység következtében az atmoszférába kerülő egyéb gázok:*
 - metán (CH_4)
 - kén-dioxid (SO_2)
 - kén-hidrogén (H_2S)
 - ammónia (NH_3)
 - nitrogén-oxidok (NO_x)Ezek a gázok nagyobb koncentrációban ártalmasak, kisebb koncentrációban viszont nem, mert az ember ezen gázok kisebb koncentrációjához alkalmazkodott. Nem kell tehát ezen anyagok teljes eltávolítására törekedni.
- Aeroszol részecskék
 - 1 cm^3 levegőben átlagosan 250-500 db aeroszol részecske található.
 - A levegőben mindig jelen vannak az ún. aeroplankton tagjai is (mikroorganizmus propagulonok, virágporszemek).
 - Cseppfolyós részecskék (pl. tengerek felett).
 - Szilárd részecskék (főleg a szél által a talajfelszínről felkavart porral, vulkáni kitörés alkalmával kerülnek a levegőbe).
- Radioaktív szennyeződések
Természetes eredetű, földkéregből származó nemes gáz a radon ^{222}Rn . Az ^{238}U -ból kiinduló bomlási sor tagja. Felezési ideje 3,8 nap. Bomlása során alfa sugarakat bocsát ki. A gáz belélegzésekor a tüdőt alfa-sugárzás éri, ami növeli a tüdőrák kockázatát. A gáz a talajból a levegőbe jut. Bomlásakor szilárd termék képződik, ami a levegő aeroszolkaihoz kötődik, ezért a levegő aeroszolkai többé-kevésbé radioaktívak. Ez azonban csak csekély erősségű. Az óceánok felett a tengervíz csekély rádiumtartalma következtében a radon koncentrációja egy-két nagyságrenddel kisebb, mint a szárazföldek felett.

A fentebb említett vendéganyagok okozzák a Föld ún. globális háttérszennyezését. Lakott területeken a levegőszennyezettség főleg a helyi, ember okozta mesterséges forrásokból származik. (3)

2.2 Levegő öntisztulása

Ha a levegőbe kerülő anyagok változatlan formában a levegőben maradnának, akkor annak összetétele úgy megváltozna, hogy emberi tartózkodásra alkalmatlanná válna a légkör. Szerencsére a levegőnek a talajhoz és a vízhez hasonlóan öntisztulása van. A levegő öntisztulási folyamatait három csoportba sorolhatjuk:

2.2.1 A szennyező anyag a légkörből távozik

- Ülepedés, szedimentáció - ezzel a mechanizmussal a cseppfolyós vagy szilárd szennyeződés durva frakciója távozik a levegőből. Radioaktív szennyeződések ülepedésére vagy szedimentációra használják a kihullás (fall out) fogalmát.
- Impakció, precipitáció: felületekhez történő tapadás útján távozik a szennyeződés.
- Termoprecipitáció: hidegebb felületre történik a kicsapódás.
- Elektroprecipitáció: a részecskék ellenkező töltésű felületekre csapódnak ki.

- Ad- és abszorpció: gázok megkötése különböző felületeken (tengervíz, talaj, élővilág).
- Kondenzáció (rain out) és kimosódás (wash out): felhő képződéskor a szennyeződések kondenzációs magként szerepelnek és csapadékkal, így maguk is kijutnak az atmoszférából. A légkör ezzel a folyamattal jelentős mértékben megtisztul. Egyidejűleg azonban a talaj és az élővilág szennyeződik.

A fenti folyamatokat azonban nem lehet élesen elválasztani egymástól. Pl. az esőcsepp részecske aeroszol részecskékhez ütközik, azt feloldja, majd kimosódik a levegőből.

2.2.2 A szennyező anyag más, esetleg közömbös anyaggá alakul át

A folyamat lehet oxidáció, redukció, fotokémiai reakció. Pl. N-átalakulás ($\text{NO}_2 \rightarrow \text{N}$) (4)

2.2.3 A szennyező anyag koncentrációja hígulással csökken

A szelek turbulens mozgásainak hatására a szennyező anyag hígul. (5)

3 A szmog

A szmog a légszennyező anyagoknak a határértékeket nagy területen és huzamos időn át, jelentős mértékben meghaladó felhalmozódása. (6) Maga a szó angol eredetű, a smoke (füst) és a fog (köd) szavak egyesítésével született, így magyarul füstködnek is szokás nevezni. Az elnevezés találó, mivel ahogy 2. táblázatban látható, a $0,1 \mu\text{m}$ -nél kisebb szemcséből álló elegyet ködnek, ettől nagyobbakból állót pedig füstnek nevezzük. Általában a levegőtisztasági mérések során a PM_{10} -es, vagy annál kisebb $\text{PM}_{2,5}$ -ös határig végzik a méréseket, vagyis a füst és a köd tartományában.

2. táblázat Levegőben előforduló részecskék elnevezése (7)

Szemcse átmérő [μm]	Elnevezés
<0,1	Köd
0,1	Füst
10-100	Por
>100	Szemcse

3.1 A szmog története

A levegő szennyezettsége már az ókorban is okozott problémákat és már a középkorban is feljegyezték London szennyezettségét és igyekeztek ez ellen lépéseket is tenni. Az első szmogok, azonban a 20. századhoz kötődnek. A korábbi magas légszennyezettségű helyzetek, vagy rövid ideig tartottak, vagy kis területre koncentráálódtak, a szmog elsőként az 1850-as években jelentkezett. A füstköd elsőként a szűk, erősen iparosodott völgyekhez kapcsolódott. A Meuse völgyében 1930-ban bekövetkezett szmog katasztrófa 60 halálos áldozatot követelt, amelyet újabb és újabb szmog helyzetek követtek. (8)

Az Egyesült Államokban az első drámai füstköd katasztrófa a Donora-völgyben következett be és mintegy 21 áldozatot követelt, de a megbetegedések száma meghaladta a 6000 főt. Korabeli fényképek és leírások jól jellemezték az akkori szmog helyzeteket. A Donora-völgyben nappal is sötétség uralkodott és a köd olyan mértékben besűrűsödött, hogy az emberek a kinyújtott kezüket sem látták (1. ábra). A legsúlyosabb szmog katasztrófa azonban 1952-ben Londonban következett be, és mintegy 12 000 halálos áldozatot követelt, néhány nap alatt (2. ábra) (9).



1. ábra A szmog növekedése a Donora-völgyben (10)



2. ábra A szmog hatása Londonban (Anglia) 1952-ben és Harbinban (Kína) napjainkban (9) (11)

Láthatjuk, hogy az iparosodás káros mellékhatásainak ilyen látványos és súlyos következményeire akkoriban a legfejlettebbnek gondolt államokban sem voltak felkészülve, és – bár jelentős haladást értünk el e téren- az intenzív iparosodás szakaszát megélő országok, pl. Kína ma sem mondhatja el, hogy tudná kezelni a problémáit (2. ábra).

3.2 Szmog típusok

Két szmog típust különböztetünk meg, a londonit és los angelesit, melyek kialakulásuk körülményeiben és a légszennyezők típusában térnek el. Ahogy láthattuk a londoni szmog az iparosodás és széntüzelés növekedésével alakult ki, míg a los angelesi vagy oxidatív szmog a gépkocsi használat elterjedésének köszönhetően jelent meg a nagyvárosokban.

3.2.1 London típusú szmog

A szmog egyik fajtája az ún. londoni típusú szmog, télen jelentkezik szén- és olajtüzelés esetén. Elégetésükkor nagy mennyiségű korom keletkezik, mely a porral együtt a kondenzációs magok felszaporodását okozza a levegőben, ugyanakkor jelentős mennyiségű kén-dioxid (SO_2) szennyezést is okoz.

Kialakulásának feltételei

- légszennyezés: SO₂, por, korom
- -3 – +5 °C közötti hőmérséklet
- inverzió
- szélcsendes időjárás
- magas légnyomás
- nagy relatív páratartalom

A szmog hajnalban alakul ki az inverzió következtében. Az emelkedő és gyorsan hűlő levegő eléri a telítettségi állapotot, ami a szemcséken kondenzációhoz vezet, ami a SO₂ (kén-dioxid) és az annak oxidációjakor keletkező SO₃ (kén-trioxid) oldódásával savas kémhatású lesz, kénessav, ill. kénsav keletkezik, savas eső, köd képződik. (12) Ha a füstköd a déli órákra sem oszlik el és a meteorológiai körülmények kedvezőtlenek, a füstköd 4-5 napig is eltarthat, ami légszennyezési katasztrófa kialakulásához vezethet.

Először 1989-ben észleltek ilyen típusú szmogot Magyarországon, Miskolcon és Budapesten. (13)

3.2.2 Los Angeles típusú szmog

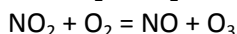
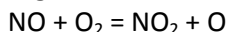
A szmog másik típusát az ún. los angelesi típusú szmog alkotja.

Kialakulásának feltételei:

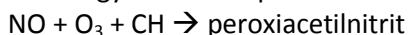
- légszennyezés: NO_x, C_nH_m, CO
- +25 – +35 °C közötti hőmérséklet
- erős napsugárzás (UV-sugárzás)
- gyenge légmozgás
- kis páratartalom

A légszennyezést a gépkocsik kipufogó gázaiból emittált nitrogén-oxidok és szénhidrogének okozzák erős napfény-sugárzás és kis páratartalom esetében.

Nappal a nitrogén-monoxid a levegő oxigénjével ózont képez:

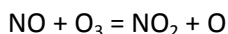


Az ózon és a nitrogén-oxid a gépkocsik kipufogó gázaiban található szénhidrogénekkal ún. peroxiacetilnitrít vegyületeket képez:



Ezek a vegyületek mérgezőek, fojtóhatásúak, a szem és az orr nyálkahártyáját izgatják, nem egy közülük rákkeltő hatású.

Éjjel az ózon elbomlik:



majd reggel a gépkocsiforgalom és a napsugárzás hatására újra megindul az ózon és a peroxiacetilnitrát típusú vegyületek képződése.

A londoni szmoggal ellentétben a los angelesi típusú szmog vagy más néven fotokémiai köd nyáron alakul ki a gépkocsik kipufogó gázaiból. Bár a látótávolság csökkenés inkább a londonira jellemző, a los angelesi típusnál is nagy problémát okozhat (3. ábra).



3. ábra Szmog Los Angeles fölött (12)

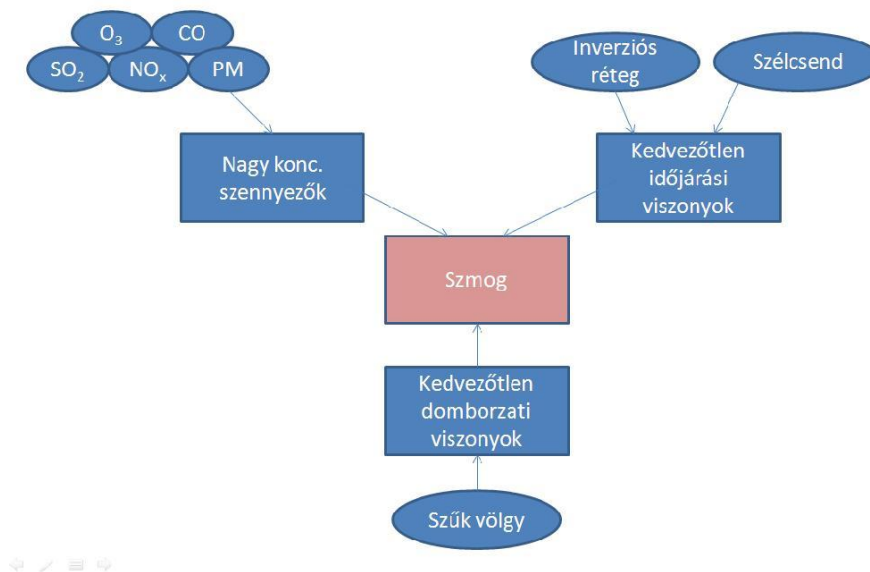
A 3. táblázatban összefoglalt elemek jól mutatják, hogy minden tekintetben eltér egymástól a két típus. Kísérő hőmérsékletük 20-25°C-kal is eltér, hiszen a londoni szmog télen, a los angelesi nyáron alakul ki. Kémiai hatásuk is eltérő. A látási távolság csökkenésében egyeznek, bár a los angelesinél ez ritkábban fordul elő. A légkörben mindkettőnél megjelenik az inverzió, a londoninál talaj menti, míg a los angelesinél magassrétegi, vagy éppen csökkenő. A légköri inverzió tehát fontos elem mindkét szmogtípus esetében.

3. táblázat Szmogtípusok összehasonítása (14)

	Londoni	Los Angelesi
A szennyeződésmaximum jellegzetes időpontja	kora reggel	dél
Jellegzetes kísérő hőmérséklet	-3 - +5 °C	+25 - +35 °C
Relatív nedvesség	magas	alacsony
Kísérő körülmény	köd	általában tiszta égbolt
Légköri stabilitás	talaj menti inverzió	magassrétegi inverzió vagy inverzió csökkenés
Kémiai sajátosság	redukáló	oxidáló
Emberre gyakorolt hatás	légutak ingerlése	szem-kötő és nyálkahártya izgatás
Látási távolság	kimondottan csökkent	általában csökkent

3.3 Szmog kialakulásának feltételei

Általánosságban el lehet mondani, hogy a szmog kialakulásának feltételei a levegőben található nagy koncentrációjú szennyezőanyag mennyiség, a kedvezőtlen időjárási körülmények (szélcsend, inverziós réteg) és a kedvezőtlen domborzati viszonyok. Ezek egymásra hatása katalitikus folyamatot hoz létre, mely fenn áll, míg valamelyik tényező meg nem változik. A London típusú szmognál például a por és korom szemcsék ködöt alkotnak, ami a levegő nedvességétől függően marad a légkörben, ha pedig ott marad, akkor felmelegíti a levegőt, így segíti az inverziót. Ezzel szemben a Los Angeles típusnál a kis páratartalom (levegő nedvesség) segíti a szmog kialakulását. Az 4. ábrán összefoglaltam a szmog kialakulásának feltételeit.



4. ábra Szmog kialakulásának általános feltételei

3.3.1 A szélcsend szerepe a szmog kialakulásában

A napsugár hatására a talajfelszíni levegőrétegek felmelegednek, sűrűségük csökken, ezért ezek a légrétegek felemelkednek. Ennek következtében a hűvösebb területek (vízfelszín, erdők stb.) felől a felmelegedett területekre légáramlás, szél indul meg, ezeknek a pótlására viszont a magasabb levegőrétegekből lefelé áramlik a levegő. Ez a folyamatos mozgás keveri a troposzférát. Enélkül a keverő hatás nélkül tűrhetetlen lenne a nagyvárosok légterének szennyezettsége.

A légszennyező anyagok koncentrációjának csökkenését különösen a 8-10 m/sec-nál nagyobb sebességű szelek segítik elő, mivel ezek turbulenciája már jelentős. A turbulenciát fokozzák a szél irányának változásai (pl. erdő). A diffúzió nem elegendő a szennyező anyagok gyors felhígításához. A turbulens légmozgás százszor-ezerszer hatékonyabb a diffúziónál. A kisebb szelek általában laminárisak és nem segítik elő a levegőben lévő szennyező anyagok felhígulását, legfeljebb elszállításukat segítik elő.

3.3.2 A légnedvesség-tartalom hatása a szmog kialakulásában

A légnedvesség-tartalom a légszennyező anyagokkal való kölcsönhatás miatt jelentős. Abszolút légnedvesség-tartalomnak nevezzük az 1 m³ levegőben lévő vízgőz grammokban kifejezett mennyiségét.

A relatív légnedvesség-tartalom a telítési vízgőztartalom százalékban kifejezett értéke. Nyáron általában 40-60%, télen 60-90% között változik, ködös napokon 100%.

A levegő nedvesség-tartalma stabilizálja a porszennyeződést. Alacsony légnedvesség-tartalom esetén a porrészecskék könnyen aggregálódnak és így kihullnak a levegőből. Nagyobb légnedvesség-tartalom esetén a hidrophil porok körül vékony hidrát burok alakul ki, ami megakadályozza a porrészecskék agglomerizációját, ezáltal az aeroszol stabilizálódik. Gázalakú szennyeződés esetében az egyébként hidrofób porok is hidrophilekké válnak. A stabilizált porszennyeződés elősegíti a ködképződést, ez csökkenti a látástávolságot, ezáltal a forgalom lelassul, a gépkocsik szennyezőanyag kibocsátása nő.

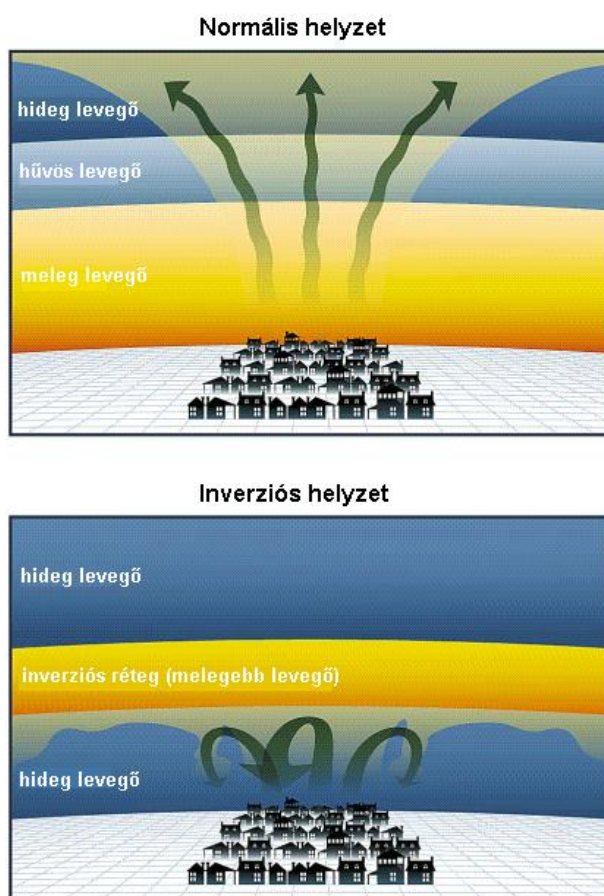
A 10 µm-nél kisebb ködsemcsék felhőket alkotva lebegnek. Ha a ködsemcsék mérete ennél nagyobb ezek már csapadék formájában kihullnak a levegőből. Melegben harmat és eső, hidegben

dér, dara, hó vagy jég keletkezik. A csapadék a levegőt átmossa, így a levegő por és baktérium szegénnyé válik. A kondenzációs hő hatására a levegő felmelegszik. (3)

3.3.3 Az légköri inverzió fajtái és jelentősége a szmog kialakulásában

Hasonlóan a szélcsendes időszakokhoz, az inverzió is kedvezőtlen a légszennyező anyagok terjedése és hígulása szempontjából.

Inverziós rétegnek nevezzük azt a réteget, amely melegebb az alatta fekvő rétegnél. Az inverziós réteg megakadályozza a természetes levegő cirkulációt, a talaj közeli levegőrétegek felemelkedését (nincs sűrűségkülönbség), ahogy az az 5. ábrán látható. A jelenség elnevezése onnan ered, hogy a légrétegek hőmérsékleti gradiense fordítottja (inverze) a normálisnak, ugyanis normális esetben a hidegebb légrétegek vannak felül. (3)



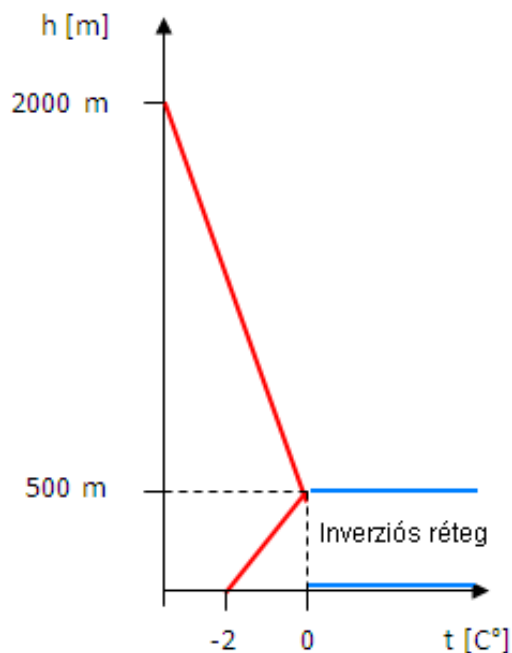
5. ábra Normál és inverziós levegőáramlás (15)

Kialakulásuk körülményei alapján az inverzió fajtái a következők lehetnek.

3.3.3.1 Kisugárzási (talaj menti) inverzió

A földfelületen kezdődik, erős szélben nincs. Amikor éjszaka derült az égbolt, a földfelszín a kisugárzása miatt lehűl. A talaj közelében az érintkező légréteg hőmérséklete alacsonyabb lesz, mint a felsőbb légrétegekben. Magassága több száz méter is lehet (6. ábra). Tavasszal és ősszel talaj menti fagyokkal járhat. A talaj menti köd nem oszlik fel, amíg az inverzió meg nem szűnik. Mivel a földfelszíntől indul, talaj menti inverzióknak is nevezik. Ha a levegő nedvességtartalma kicsi, erős inverzió alakulhat ki. Meleg időszakban aránylag hamar feloszlik, de a téli időszakban tovább tart.

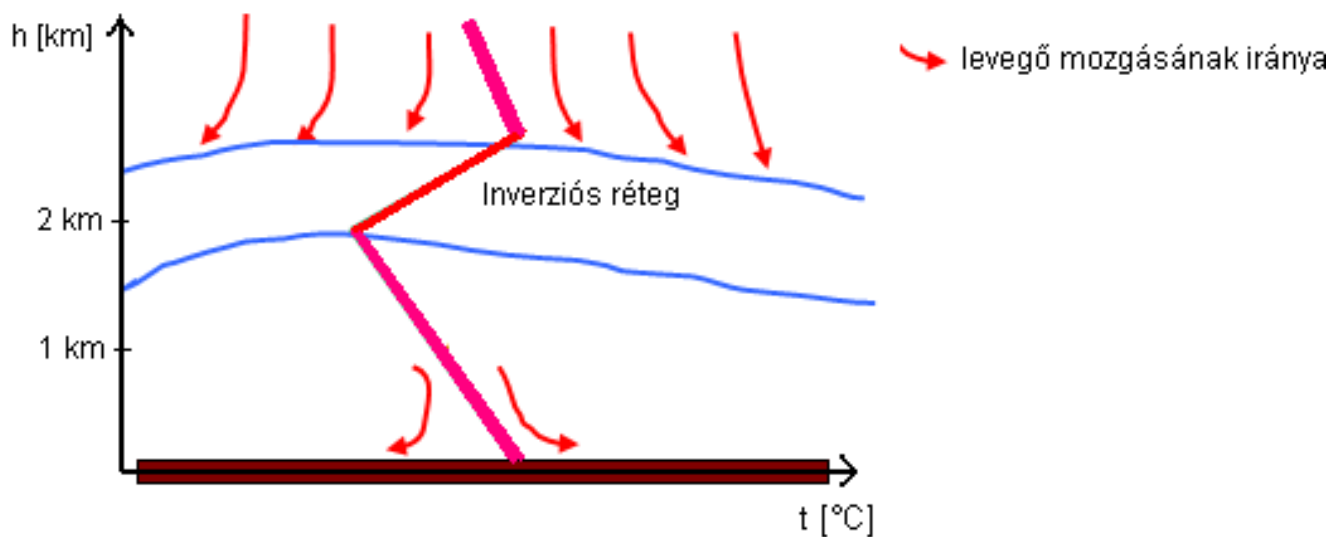
Anticiklonos időjárásban napról-napra erősödik, a hőmérsékletemelkedés 15-20 °C is lehet. Minél nagyobb a felhőzet kiterjedése, minél alacsonyabb a felhőalap, annál gyengébb az inverzió.



6. ábra Kisugárzási inverzió okozta hőmérsékletváltozás (2)

3.3.3.2 Zsugorodási inverzió

A felhőrétegek süllyednek és melegednek. A 7. ábra a kifejlődésének vázlatát mutatja. Anticiklonoknál keletkezik a magasabb rétegekben. A föld közelében a légtömegek szétáramlanak oldalra az alacsony nyomású területre.

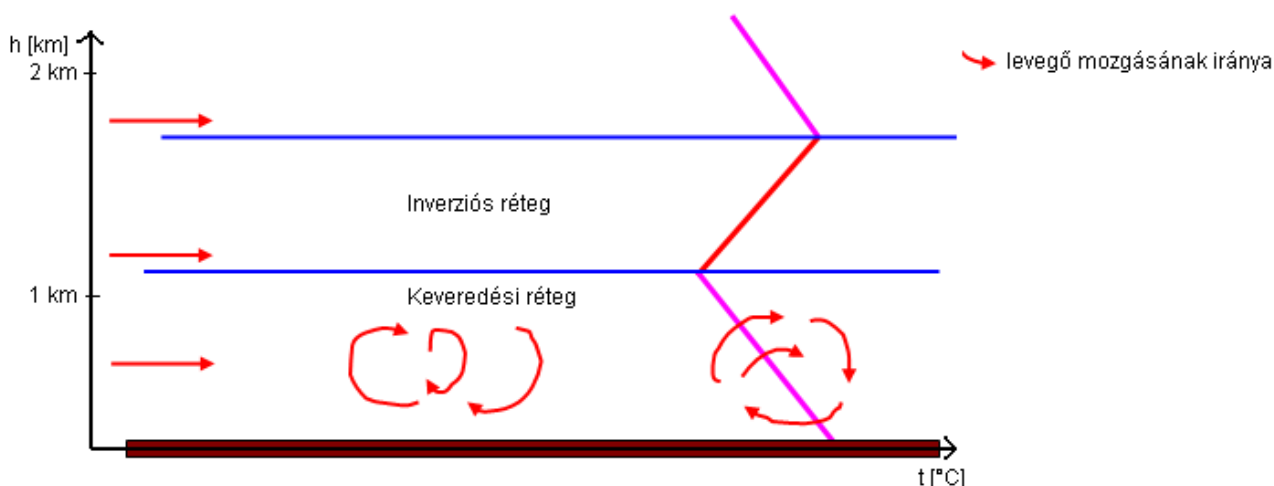


7. ábra Zsugorodási inverzió (2)

Ezért a felhőrétegek lesüllyednek és az összenyomódás következtében felmelegednek. Ez legtöbbször téli jelenség. Előfordulási magassága: 1-2 km. Szoros összefüggésben van az anticiklon fejlődési stádiumaival. Ha az anticiklon gyengül, a leszálló légmozgás is gyengül és csökken az inverzió vastagsága. A zsugorodási inverzió a termikus feláramlásokat lezárja. A kisugárzási és a zsugorodási inverzió együtt is gyakran kialakul.

3.3.3.3 Advektív inverzió (a légtömeg horizontális átvitele)

Az advektív inverziót az hozza létre, hogy a melegebb levegő ráfolyik a hidegebb földfelületre. A földhöz közel lévő légréteg lehűlve hidegebb lehet a feljebb álló légrétegnél, mert az nem érintkezik közvetlenül a hideg földdel. Ennek következtében inverzió jön létre, de nem a földtől kezdődik, hanem bizonyos magasságban. A levegő vízszintes áthelyeződésénél az alsóbb rétegben a földfelület sűrűsödése következtében erős keveredés jön létre (8. ábra). Ezt nevezik dinamikus turbulenciának.



8. ábra Az advektív inverzió kialakulása (2)

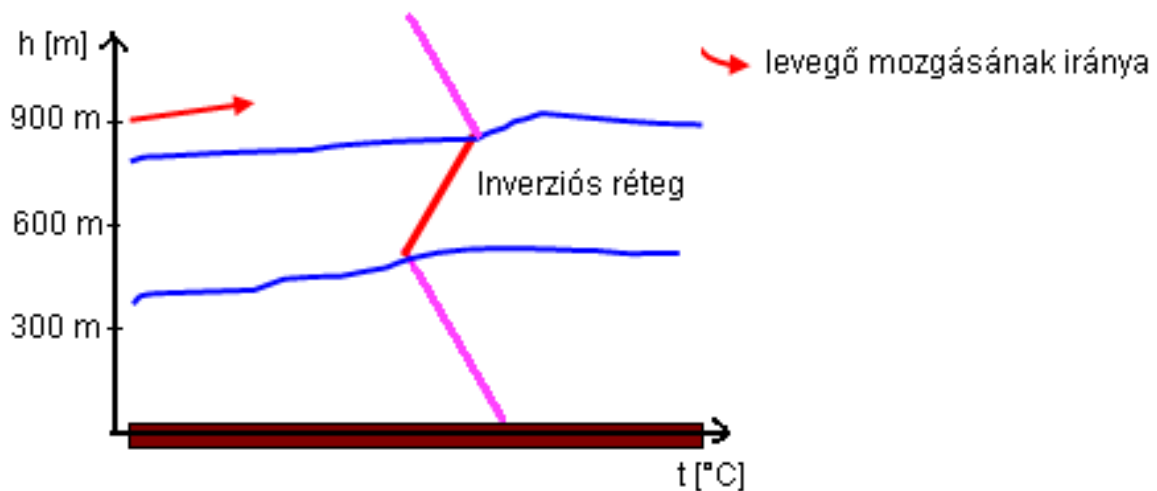
A földfelszínnél a keveredésbe bevont rétegek lehűlnek, de a hidegebb földtől elemelkednek és az adiabatikus tágulás következtében még jobban kihűlnek. Felülről a földhöz új légrések érkeznek, amelyek a keveredés folytán valamennyire felmelegednek. Ahol a keveredés megszűnik, ott van az inverzió.

A földközeli rétegben hőmérsékletcsökkenés figyelhető meg, de fölötté folynak a meleg légtömegek, ezért a keveredés feletti rétegben hőmérsékletemelkedés, vagyis inverzió figyelhető meg.

Megjelenésekor gyakori, hogy alacsony, réteges felhőzet jön létre.

3.3.3.4 Frontális inverzió

A meleg levegő a hideg rétegre folyik rá. Közöttük jön létre a néhány 100 m vastag keveredési réteg. Ezt a réteget frontális szakasznak nevezzük (9. ábra). Ebben a rétegben hőmérsékletemelkedés van, de ennek értéke kicsi, ezért ez inkább izotermiás (állandó hőmérsékletű) réteg (2)

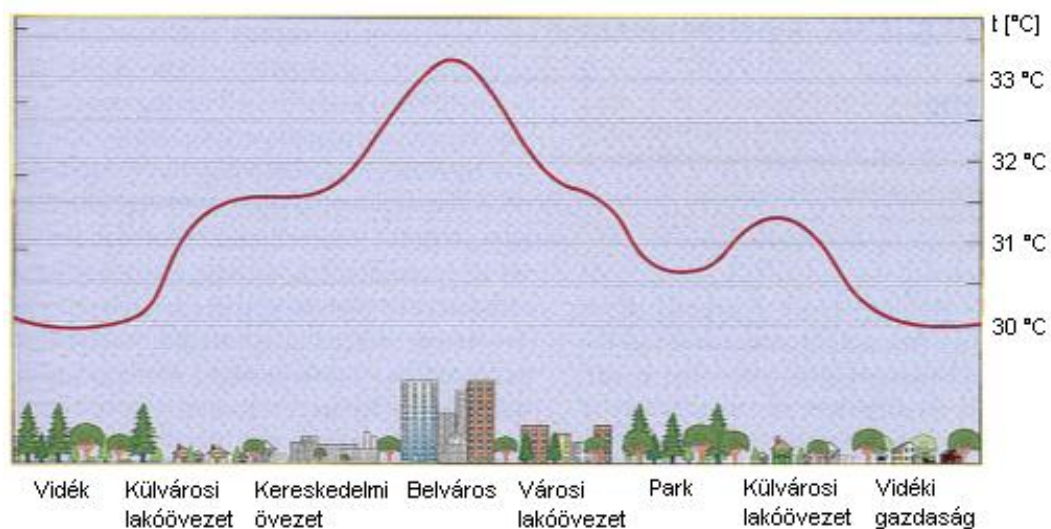


9. ábra Frontális inverzió szerkezete (2)

700 m alatt elhelyezkedő inverziós réteg hatása veszélyes, 300 m alatt pedig kritikus helyzetet eredményezhet. A domborzat és a beépítettség csökkenti a szélesebbéget. A káros turbulens hatások következtében a magas kéményen kibocsátott anyagok is visszakerülnek a földfelszíni levegőrétegbe mielőtt felhígultak volna. Az inverzió kialakulásában jelentős szerepet játszik a felhőzet és a köd, mivel megakadályozzák a talajfelszíni levegőrétegek felmelegedését, illetve felemelkedését.

3.3.4 A beépítettség hatása a szmog kialakulásában

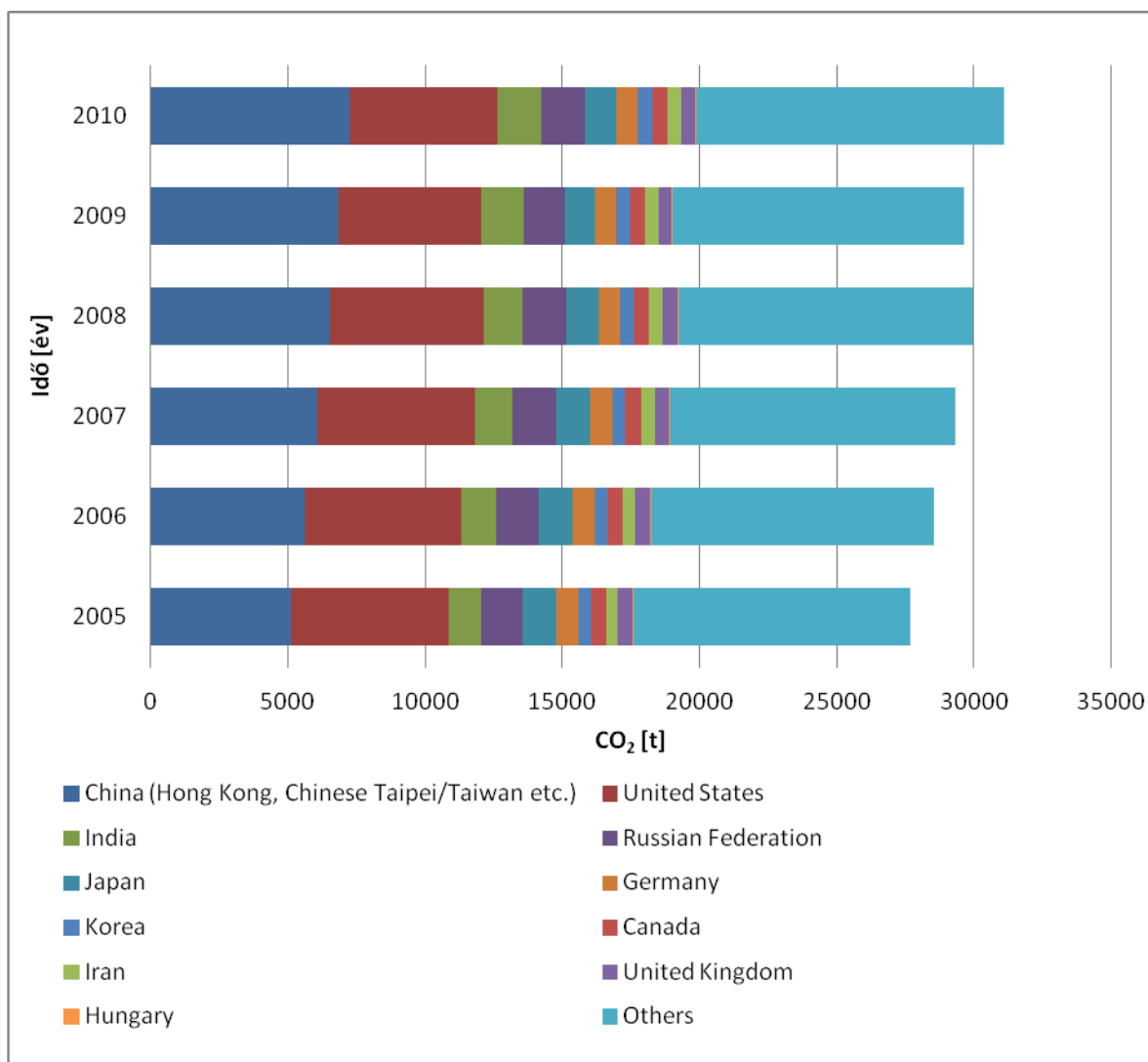
A növények párologtatásával temperálják környezetüket, míg egy nagyváros körül a levegő felmelegszik (10. ábra). Ezzel párhuzamosan, városokban általában a szélesebbéget is csökken. A lakóházak leárnýékolnak, így könnyebben megrekednek a szennyezők, nehezebben tisztul ki a levegő.



10. ábra A beépítettség okozta hőmérsékletváltozás (15)

3.4 A szmog képződés és energiafelhasználás kapcsolata

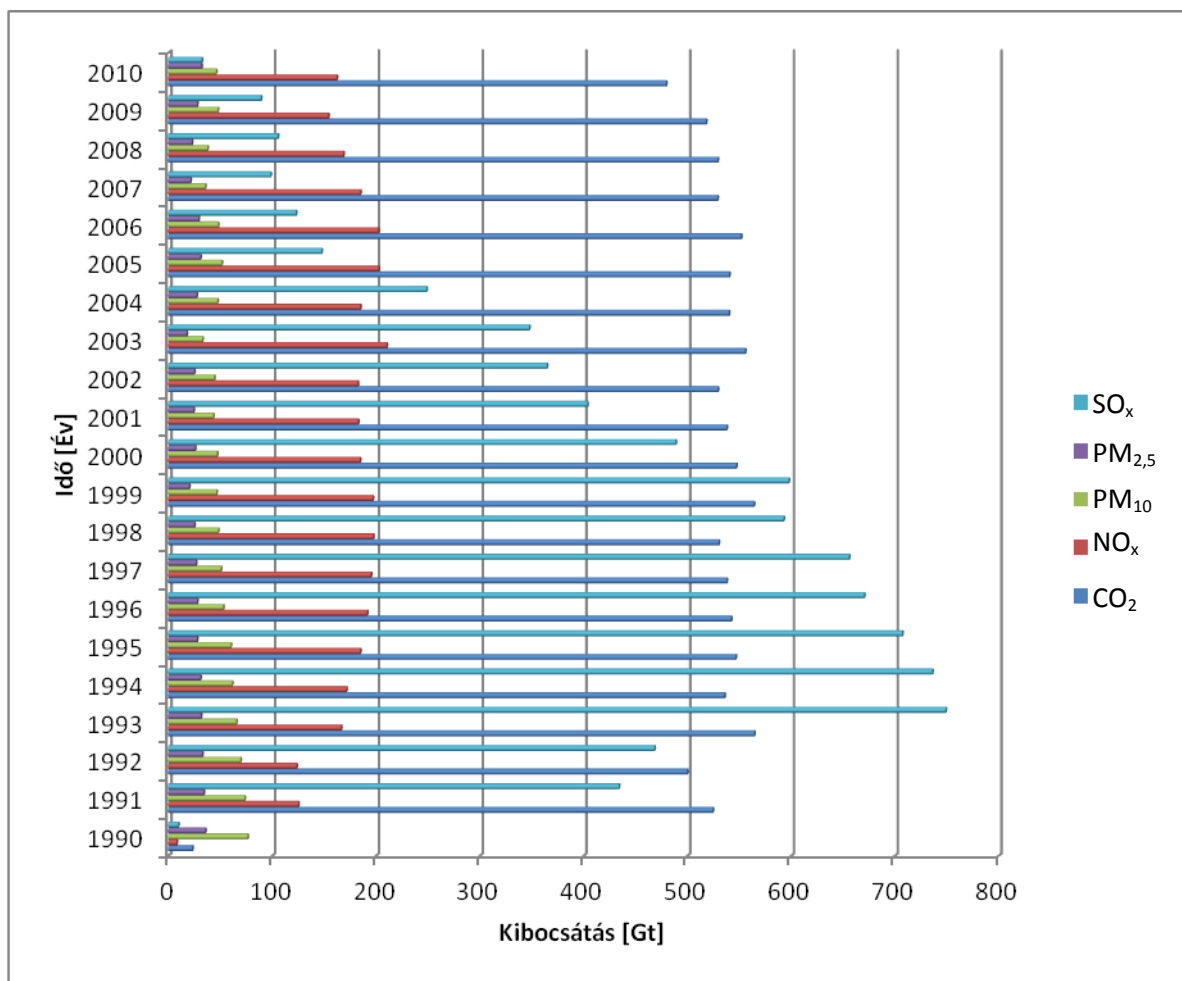
A szmog képződés kialakulásában fontos szerepet játszanak a kibocsátott légszennyezők, amik a különböző körülmények hatására megrekednek az adott térségben. Városokban a kibocsátás túlnyomó része emberi tevékenységhez köthető (antropogén), a nagyvárosi szmogokért ez a felelős. Mindamellet természetes úton (erdőtüzek, vulkánok, erózió, gázkitörések stb.) is kerül a levegőbe szennyeződés. Az antropogén CO₂ kibocsátás, globálisan évről évre növekedik elsősorban két ázsiai, dinamikusan fejlődő ország Kína és India ipari tevékenységének következtében (11. ábra). A természeti erőforrások mértéktelen kihasználása egyre nagyobb egészségügyi problémát okoz, aminek következtében súlyos gazdasági károk is a légszennyezés rovására írhatók.



11. ábra Világ CO₂ kibocsátása (16)

Magyarország igen kis szelet a föld teljes kibocsátásához képest és ahogy láthatjuk kis mértékben csökkenti is azt (12. ábra), köszönhetően elsősorban a szigorú szabályozásnak, valamint az új technológiát megvalósító beruházásoknak. Példaértékű az Európai Unió (és ennek részeként természetesen Magyarország) elkötelezettsége a légszennyezés, elsősorban az üvegházhatású gázok (ÜHG) emisszió-csökkentése mellett. Látnunk kell azonban, hogy mindaddig, míg az összes CO₂ kibocsátás közel feléért felelős négy legnagyobb kibocsátó ország (Kína, USA, India, Oroszország) nem bírhat rá arra, hogy csatlakozzon a korlátozó egyezményekhez, addig az önkorlátozó EU, elsősorban az előírt, igen költséges technológiák alkalmazása miatt egyrészt saját lakosságának megélhetési

költségeit emeli (jelentősen drágulhat az energia), másrészt gazdasága is károsodik a kialakuló jelentős versenyhátrány miatt.

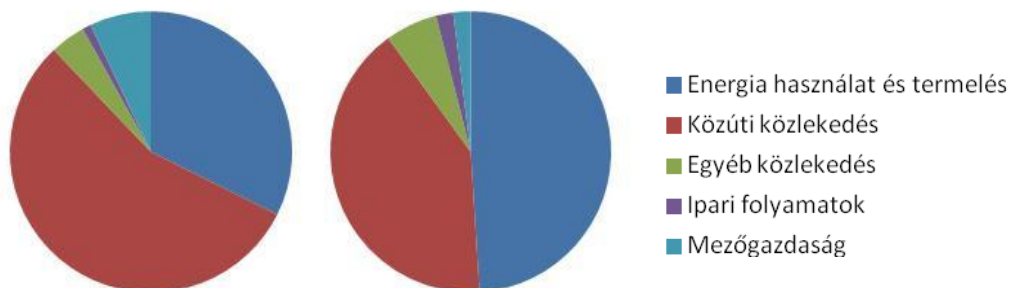


12. ábra Magyarország légszennyező kibocsátása 1990-2010 (17)

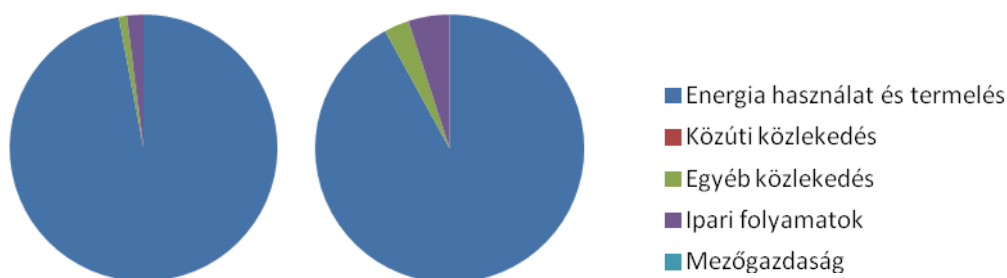
A főbb kibocsátók a hő és villamos energiatermelők, egyedi lakossági fűtések és a közlekedésben részt vevő járművek. Ezen kívül a mezőgazdaság és az ipari technológiák szólnak bele a légszennyezésbe. Magyarország és Európa hasonló kibocsátási eloszlást mutat (4 táblázat). A NO_x kibocsátásban a közúti közlekedésnek nálunk nagyobb szerepe van az átlaghoz képest, ez adódik a előregedett gépjárműparkból. Magyarország nagy mezőgazdasági területekkel rendelkezik, így ez a szektor is kiemelkedik Európa átlagához képest (13. ábra).

4. táblázat NO_x és SO₂ kibocsátások százalékos eloszlása 2010 (17)

	NO _x		SO ₂	
	Magyarország	Európa	Magyarország	Európa
Energia használat és termelés	32%	49%	97%	92%
Közúti közlekedés	55%	41%	0%	0%
Egyéb közlekedés	4%	6%	1%	3%
Ipari folyamatok	1%	2%	2%	5%
Mezőgazdaság	7%	2%	0%	0%



13. ábra NO_x kibocsátás Magyarországon és Európában 2010-ben (17)

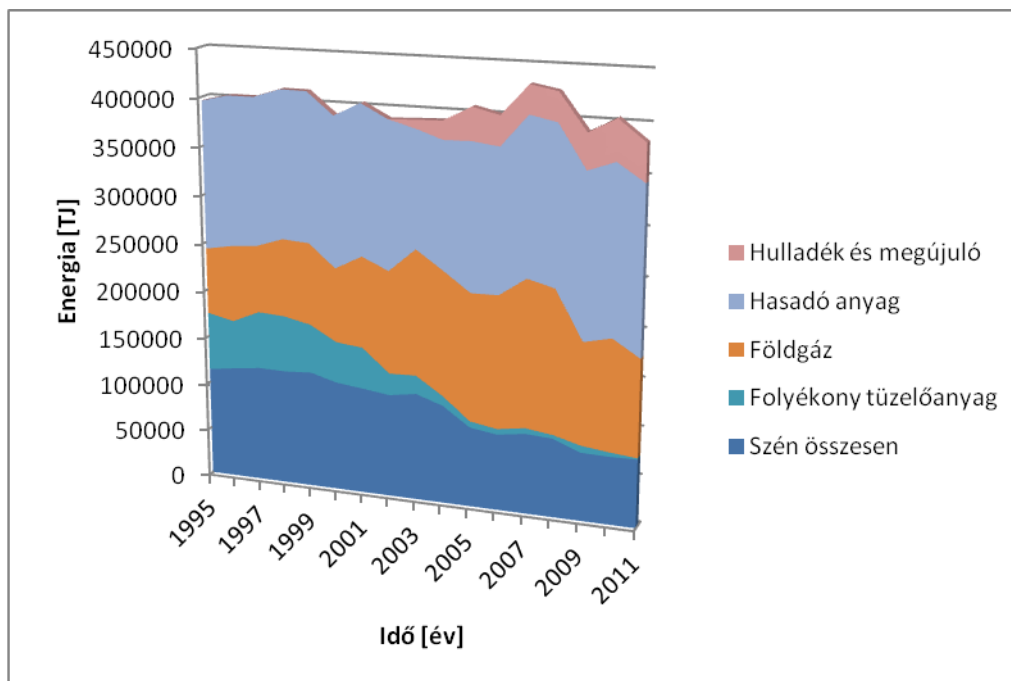


14. ábra SO₂ kibocsátás Magyarországon és Európában 2010-ben (17)

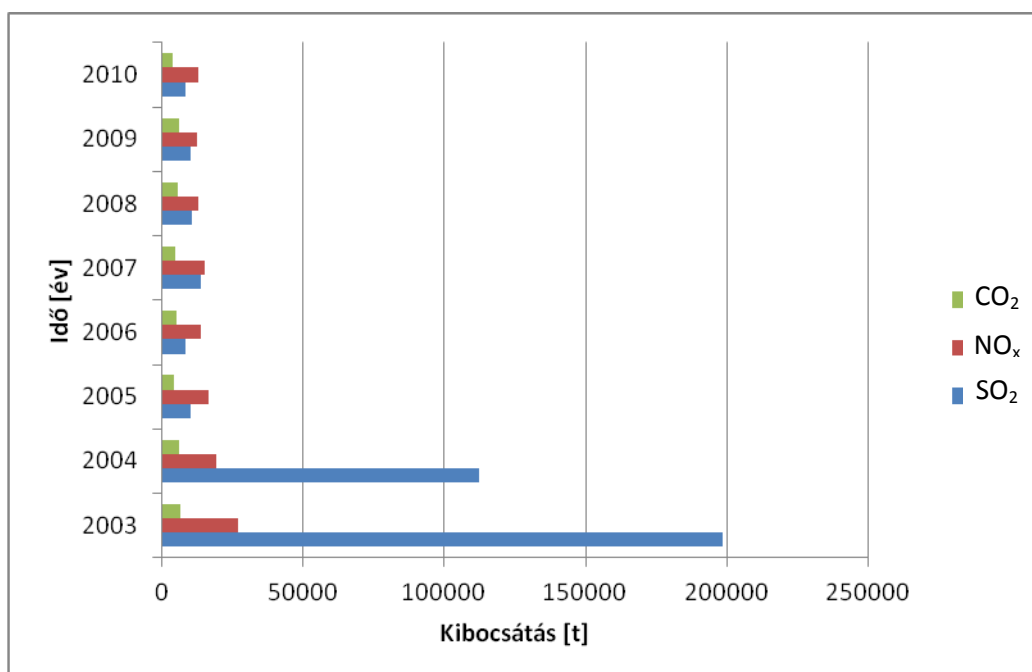
Az SO₂ kibocsátásért a villamos és hőenergia termelés a felelős Magyarországon, épp úgy mint Európában. (14. ábra). Következésképpen ez a széntüzelés alkalmazásának, ill. az energiahatékony technológiák hiányának. A következőkben vizsgálom az energiatermelés, az ipari folyamatok és a közlekedés okozta légszennyezést, főként London kibocsátási adataira támaszkodva. Ezáltal jó képet kaphatunk egy mai modern nagyváros légszennyezettségi helyzetéről.

3.4.1 Energiatermelő egységek

Energiatermelő egységeink a felhasznált energiahordozó típusa szerint lehetnek szilárd (szenek, biomassza), folyadék (olaj) és gáz (földgáz) üzeműek. A felhasznált energiahordozó részben megszabja a tüzelés technológiáját, ami döntő az emisszió szempontjából, másrészt a kémiai összetételénél fogva a kibocsátott szennyező anyagokat. Fontos tényező a hulladékok égetése, mely sok káros anyag kibocsátással járhat. A légszennyezettség szempontjából – normál üzem esetén – legtisztábbnak az atomerőművek tekinthetők, és hasonló a helyzet a megújuló energiák (víz, nap és geotermikus energia) hasznosításával is (15. ábra). Az energiatermelő kapacitás szerint is lényeges a különbség. A korszerű nagy teljesítményű erőművi kazánokban, ipari kemencékben, turbinákban stb. sokkal jobban megvalósítható a tökéletes égés, pernye- és koromleválasztás, mint az elavult háztartási tüzelőberendezésekben. Igaz ez a füstgáztisztításra is, amelyre szigorú szabályozások vonatkoznak, így csökkenhetett olyan drasztikusan például a SO₂ kibocsátás mértéke 2003 óta (16. ábra) a villamos erőművek esetében. A kis és nagy energiatermelők hatása rendkívül különböző a kémények szempontjából is. A tetőszinten kibocsátott szennyező anyagok sokkal veszélyesebbek, mint a magas kéményen kibocsátottak. Vizsgáltam London kibocsátási adatait, melyek alapján belátható, hogy a lakossági fűtésnek jelentős szerepe van a kibocsátásokban, főleg a PM₁₀ esetében (20. ábra), a lakossági tüzelőberendezésekben gyakran alakul ki tökéletlen égés, ami szén-monoxid (CO), korom, por keletkezéséhez vezethet. A nagyerőművi energia- és hőtermelés az NO₂ és SO₂ kibocsátás tekintetében is komoly szerepet játszik (18. ábra és a 19. ábra). Ez nem szerencsés, de még mindig könnyebben kezelhető, mint egy sok pontforrással rendelkező terület. Az erőművi CO₂ kibocsátást a CO₂ semlegesnek tekintett biomassza források felhasználásával igyekeznek csökkenteni.



15. ábra Hazai erőművi energiahordozó felhasználás 1995-2011 (18)



16. ábra Villamos erőművek kibocsátásai 2003-2010 (19)

3.4.2 Ipari folyamatok

Az ipari technológiák is szerepet játszanak a légszennyező kibocsátásokban és a technológiai sokféleség miatt az emissziók összetétele is változatos lehet. Ugyanakkor a környezetvédelmi politikának köszönhetően egyre nagyobb szerepet kapnak a szennyezőket leválasztó berendezések. Az ipari telepek elhelyezkedése is nagyban befolyásolja a mérések adatait. A londoni adatok az olajfinomítói tevékenység és a vas, acél termelés SO_2 kibocsátását mutatják jelentősnek (19. ábra).

3.4.3 Közlekedés okozta légszennyezés

A harmadik fontos csoportot a közlekedésből származó légszennyezők alkotják. Valójában ezen emissziókat akár az energiatermelőkhöz is sorolhatnánk, hiszen itt is tüzelőanyag égetéséről van szó, de környezetvédelmi szempontból ez a helyzet az előzőeknél speciálisabb.

A jellemző eltérések:

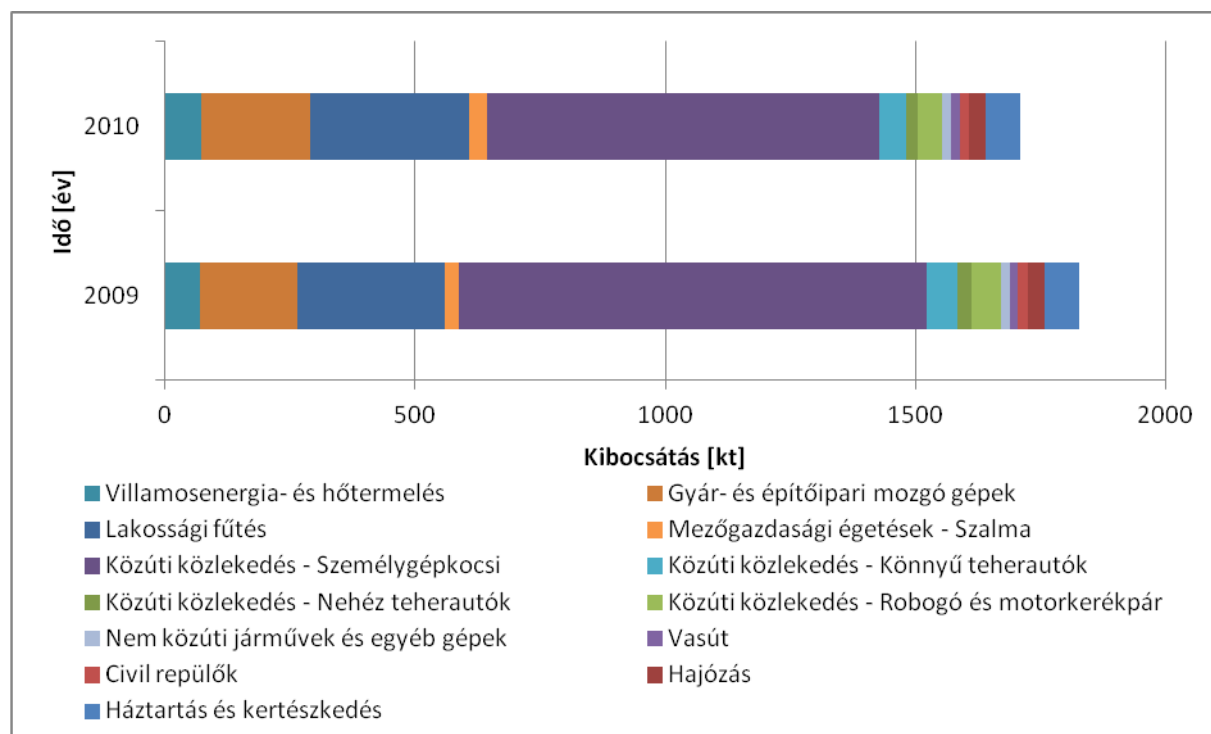
- Mozgó szennyező forrás
- Vonal szennyező forrás
- Talajközeli kibocsátás
- Jellegzetes szennyező komponensek
- Kibocsátás mértéke forgalmi kérdésekkel függ össze

A londoni adatok alapján közlekedési eszközök szerint elemezhető a kialakult helyzet (17.,18. és 19. ábra).

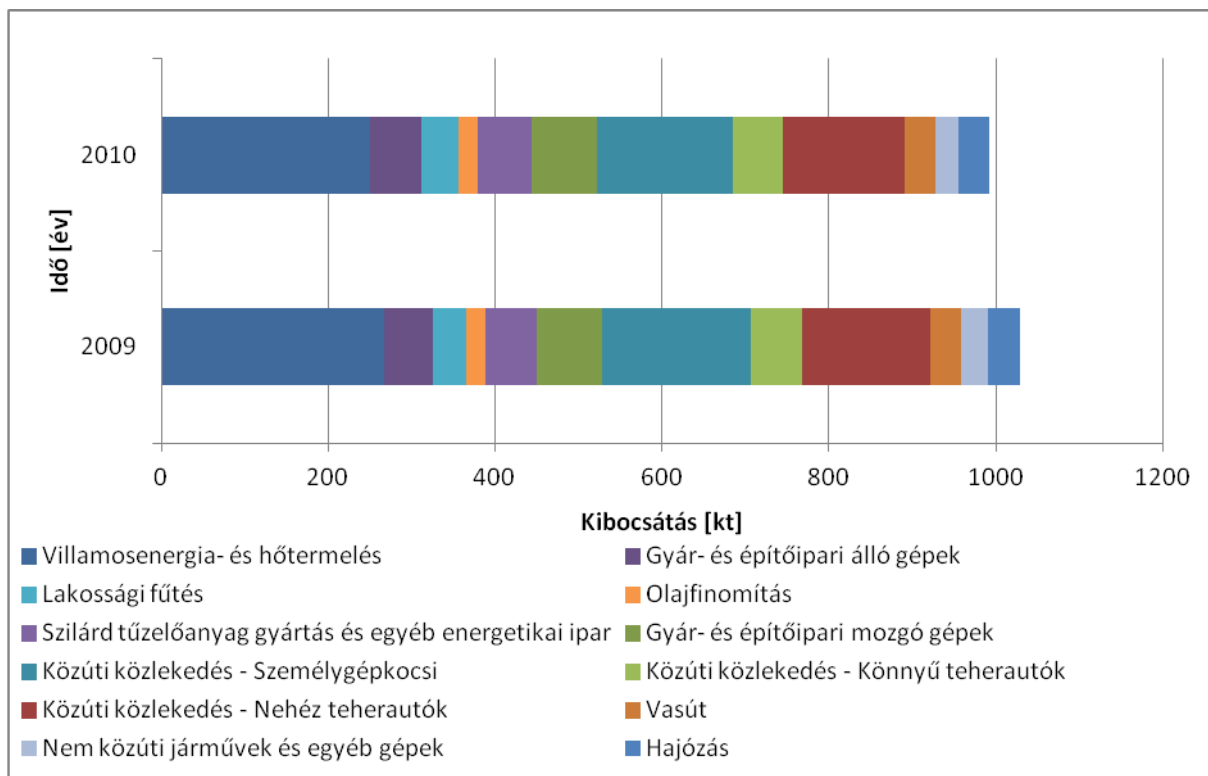
Külön csoportba tartoznak a vasúti pályák, illetve a kibocsátásban legnagyobb szerepet játszó diesel olajat használó mozdonyok.

A hajózás még Londonban sem jelent nagyarányú kibocsátást, Magyarországon pedig minimális. A légi forgalom okozta szennyezés ugyan nem hanyagolható el, de egyértelműen legfontosabb kibocsátó a közúti közlekedés. Az adatok alapján megkülönböztetünk személygépkocsikat, könnyű és nehéz teherautókat, motorkerékpárokat és egyéb járműveket.

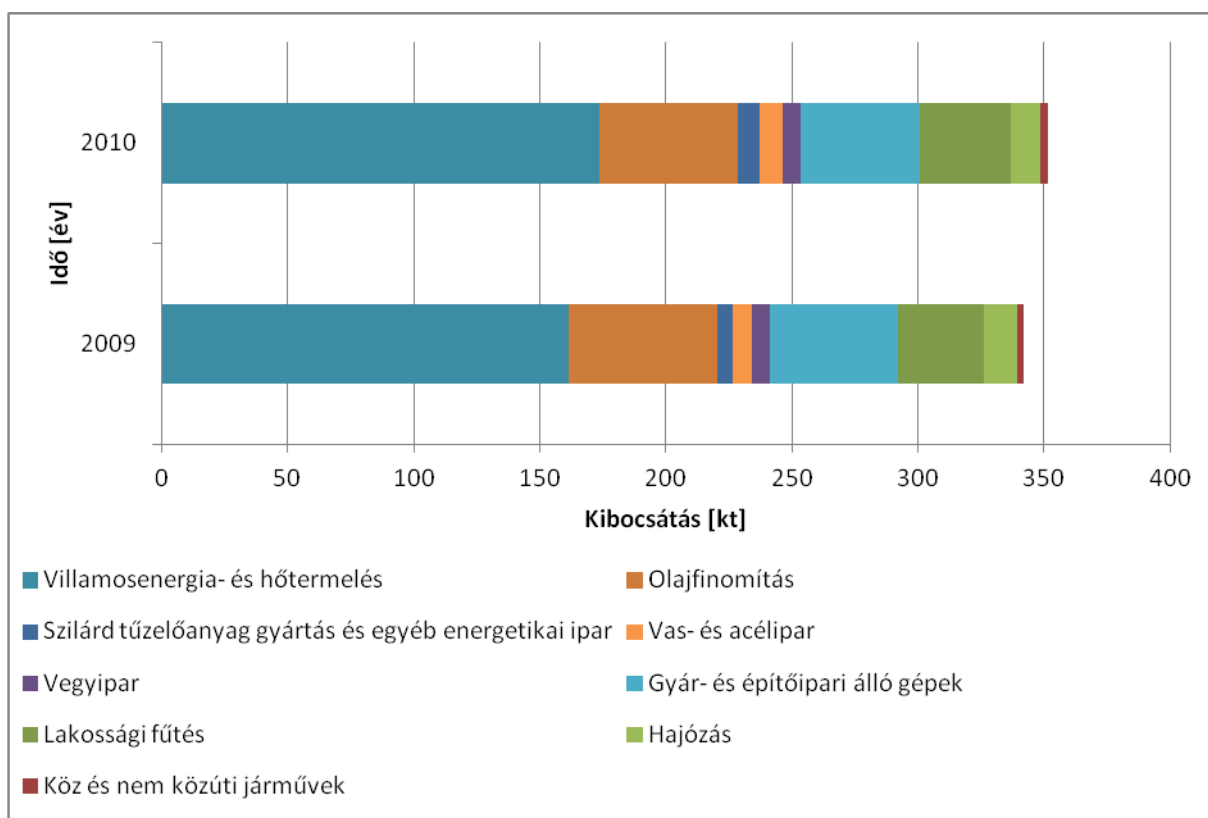
A CO₂ esetében egyértelműen a személygépkocsik a döntő kibocsátók (17. ábra), de a NO₂-nál már a nehéz teherautók kibocsátása közelíti a személyautókéét (18. ábra). A CO₂ kibocsátásnál jelentős a robogók és motorkerékpárok hatása, mely főleg a négyütemű motoroknak köszönhető. A SO₂ mennyiségét pedig alig befolyásolja, a motor hajtóanyag összetételének köszönhetően, melyben nincs kén (19. ábra). A PM₁₀ esetében viszont nem csak a füstgázok játszanak nagy szerepet, hanem a gépjárművek kerekeinek és fékjeinek kopása, valamint az általa használt út abrázív kopása (20. ábra).



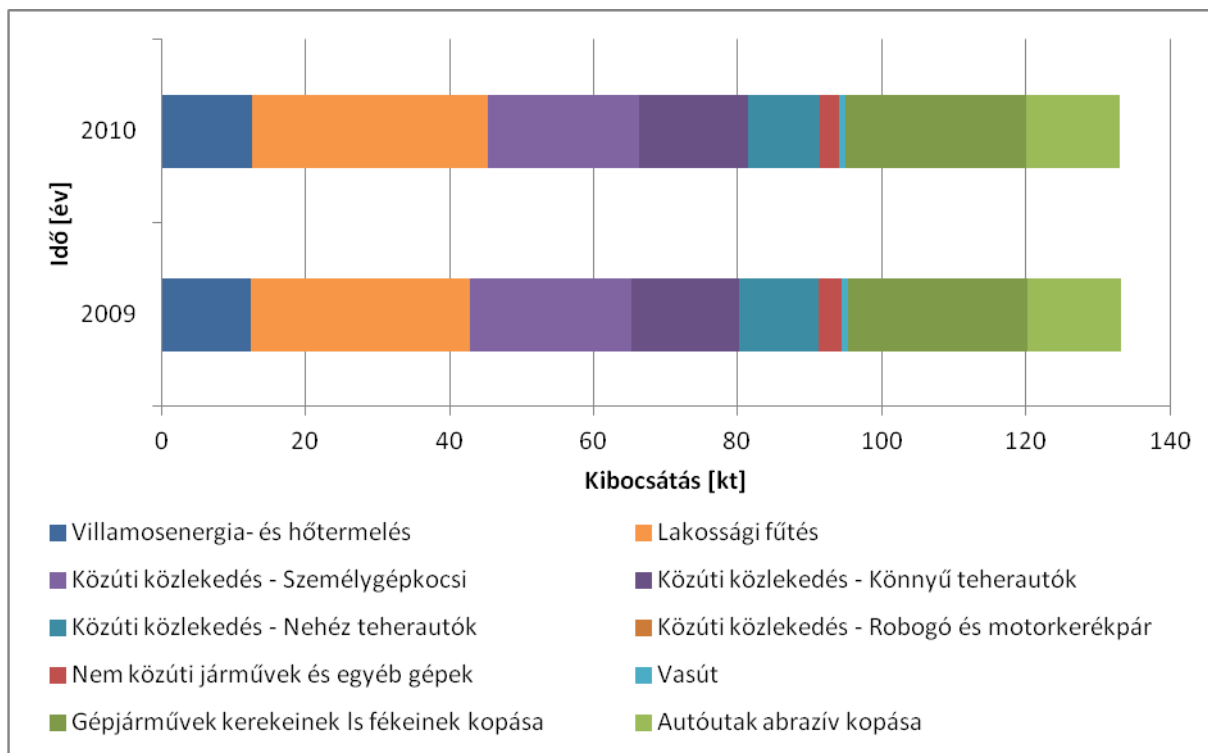
17. ábra London főbb CO₂ kibocsátása 2009-2010 (20)



18. ábra London főbb NO₂ kibocsátása 2009-2010 (20)

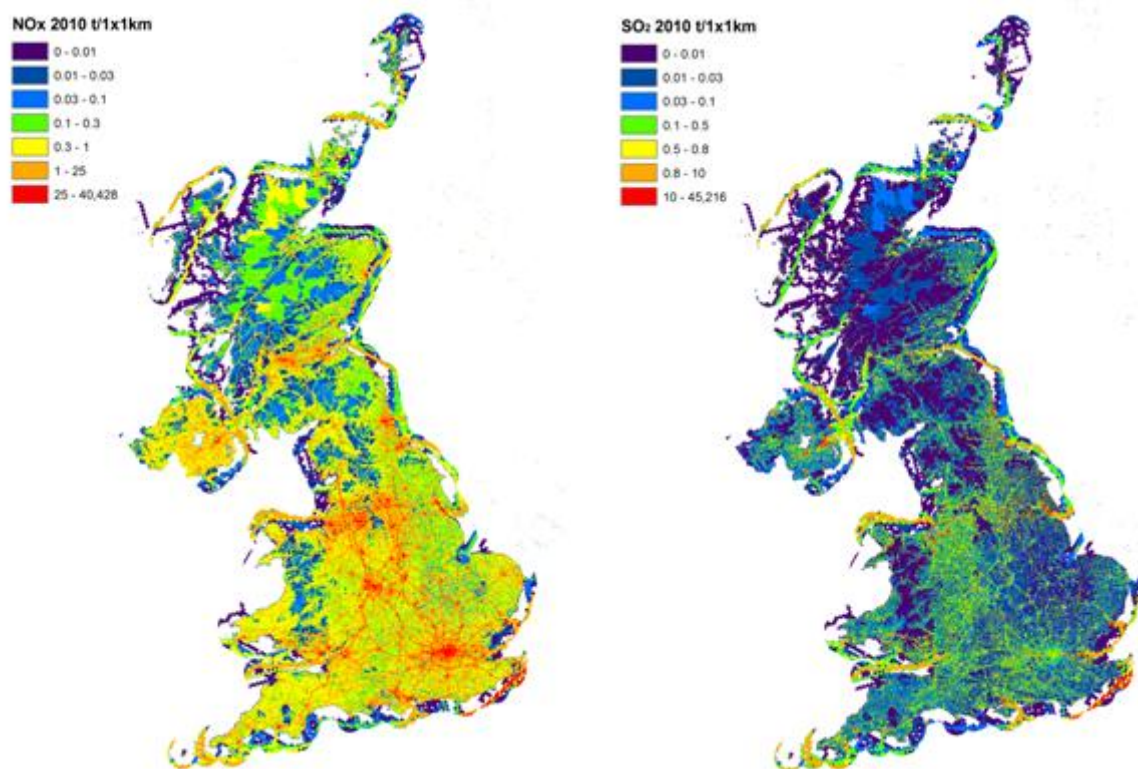


19. ábra London főbb SO₂ kibocsátása 2009-2010 (20)



20. ábra London főbb PM₁₀ kibocsátása 2009-2010 (20)

A 21. ábrán a szennyezők területi eloszlása figyelhető meg. Ahol az Egyesült Királyság NO_x kibocsátása látható, a nagyvárosok kiemelkednek a tájból, akár csak a főbb útvonalak. A SO₂ kibocsátás térképén viszont ezek az útvonalak nagy része eltűnik (vagyis nem jellemző ezekre), és a városokra koncentrálódik.



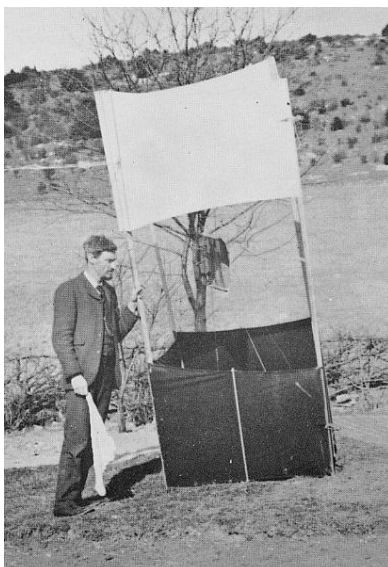
21. ábra Az Egyesült Királyság NO_x és SO₂ kibocsátása (21)

3.5 A szmog kialakulásának mérnöki megközelítése

Mint láthatjuk, a szmog kialakulását sok tényező befolyásolja, ezek meghatározására a meteorológiai mérések és modellek alkalmazása a legmegfelelőbb eszközök. Az alábbiakban bemutatom ezek alkalmazásának lehetőségeit.

3.5.1 Légköri mérések rövid története

A légkör mérése hosszú múltra tekint vissza, Thomas Jefferson már 1784-ben írt a meteorológiai ballonok hasznosságáról. (22) Korábban papírsárkányokkal is próbálkoztak (22. ábra), de jó emelkedésüknek köszönhetően – kb 30 km-ig – a ballonok terjedtek el. Magasabb légrétegek vizsgálatát egyszer használatos rádiós szondával szokták végezni. Az adatokat ennek megfelelően folyamatosan továbbítják, ill. tárolják a szenzorok. Erre épül a nemzetközi magaslégköri mérőhálózat (GCOS Upper Air Network (GUAN)), melynek 67 ország tagja. Az állomások 40%-a egy vagy annál kevesebb rádiószondát bocsát fel naponta. A magyarországi magaslégköri mérések Budapesten zajlanak, korábban napi négy alkalommal, jelenleg kettővel a koordinált világidő szerinti 00 és 12 UTC-kor. (23) (24)



22. ábra Papírsárkány által szállított szenzorok (25)

3.5.2 A légköri inverziós helyzetek előfordulása

Inverziók az év minden szakában előfordulhatnak. Magyarországi (vagyis budapesti) rádiószondás mérések statisztikai adatai alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy csak kevés olyan nap fordult elő, amikor az alsó 3 km-es légrétegben egyáltalán nem észleltek inverziót. A legtöbb inverziós nap általában decemberben, a legkevesebb pedig júniusban volt. Tavasszal és nyáron 34%-kal kevesebb inverzió fordult elő az alsó 3000 méteres légrétegben, mint ősszel és télen.

Ha a felszállások időpontját vizsgáljuk, azt lehet megállapítani, hogy a 00 és 06 UTC-s felszállásoknál az inverziók nagyobb számban és közel azonos gyakorisági értékkel fordultak elő, míg a 12 és 18 órás felszállásoknál lényegesen alacsonyabb az inverziók száma. Tehát az éjszakai órákban, a nyári hónapokban is gyakran keletkezik inverzió - a nyári inverziók elsősorban hajnali inverziók -, amely azonban a Nap besugárzásának hatására általában feloszlik. Ezzel szemben télen nappal is jóval gyakoribbak az inverziók.

Amennyiben megvizsgáljuk az alsó 3 km-es szint 500 méter vastagságú rétegeiben kialakuló inverziók gyakoriságát, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy a talajfelszín és 500 méter között viszonylag ritkán figyelhető meg inverzió, 500 méter fölött ugyanakkor minden rétegben jelentősen megnő az inverziók száma. A talajközeli 1,5 km-es légrétegben közel ugyanannyi inverzió fordul elő, mint a felette lévő 1,5 km-es szintben. A szmoggal kapcsolatban a ritkán kialakuló alacsony (felszín és 500 méter között) inverzió az érdekes.

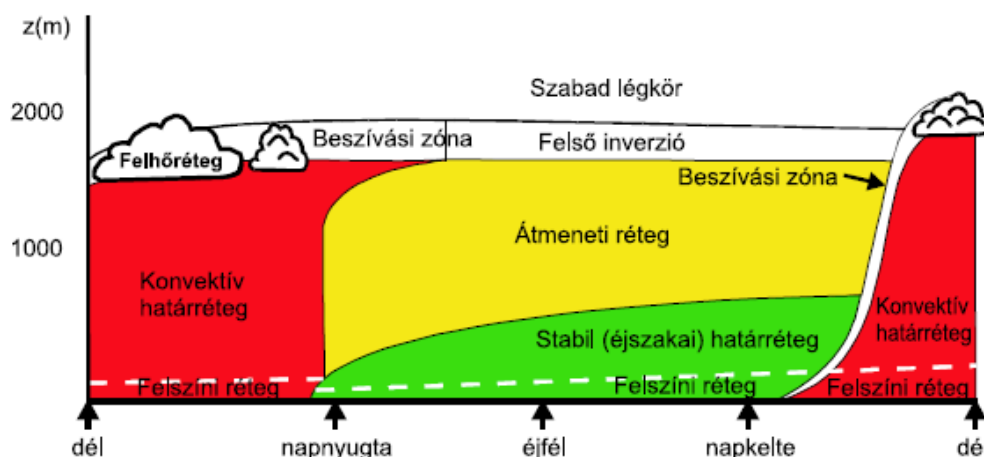
A talaj menti inverziók átlagos vastagsága 300-600 méter. Elég gyakoriak még a 700-900 méter vastagságú inverziók is, azonban ennél vastagabb talaj menti inverzió csak ritkán fordul elő. A talaj menti inverziók a reggeli órákban érik el a maximális fejlettségüket.

A legtöbb talaj menti inverzió élettartama 6-12 óra. Megemlíthető még a 3 periódus (18 óra) élettartamú inverziók viszonylag nagy száma. A csak egy periódusban előforduló inverziók legtöbbször 00 és 06 UTC-kor figyelhetők meg. A két felszállásig tartó inverziók leginkább a 00 és 06 UTC-s, míg a 3 periódus időtartammal rendelkező inverziók általában a 18-06 órás időközben észlelhetők. Leggyakoribbak a csak egy periódusban előforduló inverziók. Ezt követik a 2-3, majd a 4-12 periódus hosszúságú inverziók. Az ennél hosszabb ideig, azaz több mint 3 napig fennálló inverziós helyzetek előfordulása viszonylag ritka, főként a téli időszakban fordul elő. (26)

3.5.3 A keveredési rétegvastagság

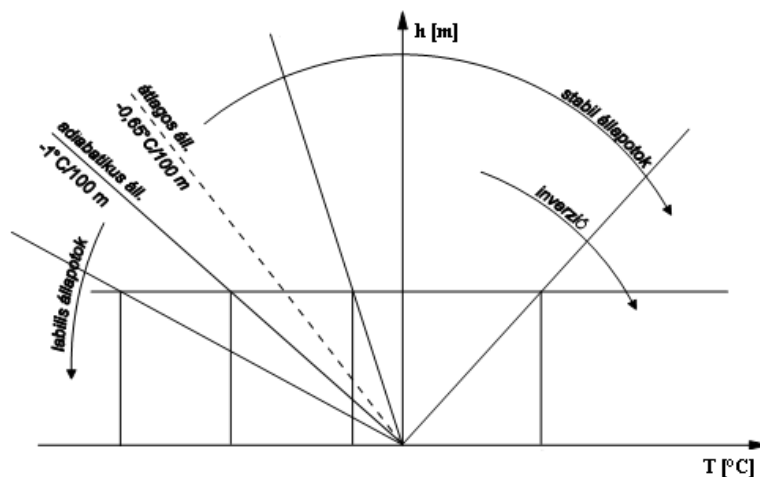
Az előzőekben kiderül, hogy inverzió szinte mindig jelen van időjárásunkban, így a szmoggal kapcsolatban a kérdés az, hogy mennyi ideig és milyen magasságban helyezkedik el, hiszen így befolyásolja az ún. keveredési réteg vagy planetáris határréteg (PHR) vastagságát. Számunkra a keveredési réteg, ill. rétegvastagság elnevezés kézenfekvőbb, hisz ez leírja azt a kb 3000 méterig terjedő réteget, ahol a szennyezőanyagok terjedése ideális esetben néhány óra alatt lezajlik. E fölött már szabadlégkör van, ahol nem érvényesülnek a felszíni erők és folyamatok következtében jelentkező mechanikus és termikus hatások. (27)

A PHR-re ható erők és folyamatok a felszíni sűrűlódás, a párolgás, a hőátvitel, a szennyezőanyag kibocsátás és a felszín áramlás módosító hatása. A turbulencia mechanizmusától függően (termikus és mechanikus) két határréteg rendszer különíthető el: a nappali vagy konvektív, labilis (Convective Boundary Layer: CBL) és az éjszakai vagy stabilis (Stable Boundary Layer: SBL) határréteg. Ezek átlagos napi változását a 23. ábra szemlélteti. (24)



23. ábra Határréteg szerkezete, napi menete (24)

A nappali határrétegre jellemző labilis légrétegződés azt jelenti, hogy a magasság növekedésével a hőmérséklet csökken, míg az éjszakai határrétegre jellemző stabil légréteg hőmérsékleti gradiense ezzel ellentétes, ahogy az inverziós réteggé (24. ábra). Az átlagos gradiens a $0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.



24. ábra Stabilis és labilis légrétegződés jellemző hőmérsékleti gradiensei (28)

A konvektív határrétegben a turbulens folyamatok fő forrása a napsugárzás okozta felhajtóerő. A 23. ábra alapján a konvektív határréteg vertikális szerkezete a nap folyamán a következőképpen változik. A kora reggeli órákban (még stabilis a határréteg) a keveredési réteg kis kiterjedésű, szélcsendes időben néhány tíz, szeles idő esetén néhány száz méteres. A PHR vastagsága lassan indul növekedésnek, mivel a felette elhelyezkedő stabilis éjszakai határréteg nem engedi a turbulens örvények gyors átkeveredését. Ekkor „ég el” az éjszakai határréteg. Délelőttre a hűvös éjszakai levegő felmelegedik az átmeneti réteg hőmérsékletére. Ekkorra megszűnik a keveredési réteget fedő stabilis zóna, vagyis a talaj menti inverzió, így sokkal gyorsabban vastagodik, 100-1000 m/h közötti sebességgel. Amikor a feláramlás eléri a felső inverziós magasságot, a PHR növekedése újra csökken. Ez a harmadik fázis, a keveredési réteg kialakulása, mely a délután folyamán már alig változik. Este, ahogy a nap nyugszik, a termikus turbulencia egyre kevésbé marad fenn a disszipációval szemben, a termikus kényszer hiányában a turbulens folyamatok szinte teljesen megszűnnek, ekkor már átmeneti rétegről beszélhetünk.

A stabilis határréteg esetén a rétegben egyensúlyban vannak a turbulenciát keltő és az azt megsemmisítő folyamatok. A turbulencia gyenge, így hat még a kisugárzásos hűlés, a gravitációs hullámok, az advekciónak, az ülepedés. A szélerősség növekedésével a potenciális hőmérsékleti gradiens képe megváltozik. Ez is bizonyítja, hogy erős talaj menti inverzió kialakulásához szükség van egy optimális, kis szélesebességre is. (24) Amikor gyenge szél jellemző, akkor a szél okozta turbulencia következtében a lehűlés vastagabb rétegre tud kiterjedni, ha viszont szélcsend van, akkor az inverziós réteg vékony marad, hiszen ilyenkor a hő csak vezetés útján terjedhet a stabil rétegződés miatt. Nagy szélesebességek nem kedveznek inverziós helyzetek kialakulásának. (26) Magyarország országos keveredési rétegvastagság átlagait a 5. táblázat tartalmazza. Ez alapján láthatjuk, hogy télen van a legalacsonyabb. Ez ideális időszak a mérés szempontjából.

5. táblázat Átlagos rétegvastagságok Magyarországon (29)

Évszak	A keveredési rétegvastagság	
	Átlagos értékei [m]	Átlagos maximális értékei [m]
Tél (XII–II)	200	500
Tavaszi (III–V)	900	1700
Nyár (VI–VIII)	1000	1900
Ősz (IX–XI)	500	1200
Év	650	1325

3.5.4 Határrétegek vastagságának meghatározása

A határréteg vastagságának meghatározására két mód van. Vagy közvetlen méréssel (melyre kísérletet teszünk) vagy modellalkotás útján, melyhez közvetett mérésre van szükség.

A termikus turbulencia által létrehozott réteg alapegyenletei, melyet az ún. bulk modellben használnak, az alábbiak.

$$\frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial t} = \gamma_{\theta} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \quad (1)$$

és

$$-(\overline{\omega'\theta'})_h = \Delta\theta \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

ahol:

h: Magasság [m]

γ_{θ} : Potenciális hőmérséklet vertikális gradiense a szabad légkörben [K/m]

ω : Függőleges szélesség [m/s]

$(\omega'\theta')_h$: Szenzibilis hőáram értéke az adott szinten [Km/s]

t: Idő [s]

θ : Potenciális hőmérséklet [K]

A potenciális hőmérsékletet a Poisson egyenlet határozza meg, vagyis a nyomás és hőmérsékletváltozás kapcsolata adiabatikus folyamatoknál.

$$\theta = T \left(\frac{1000 \text{ mbar}}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (3)$$

ahol:

T: Hőmérséklet [K]

p: Légnomás [mbar]

R: Az ideális gázállandó száraz levegőre, értéke 287,05 [J/kgK]

c_p : A száraz levegő állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitása, értéke 1,005 [J/kgK]

A mechanikus turbulencia által létrehozott rétegvastagsága számolható a légréteg dinamikai paramétereiből, nem stabilis légállapot esetén

$$h = \frac{c_1 u_*}{f} \quad (4)$$

ill. stabilis légállapot esetén

$$h = c_2 \left(\frac{u_* L_*}{f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

ahol:

c_1, c_2 : Állandók [-]

f: Coriolis paraméter, átlagos értéke 10^{-4} [1/s]

u_* : Súrlódási sebesség [m/s]

L_* : Monin-Obukhov hossz [m]

Az u_* a felszínközeli légrétegben lejátszódó impulzus-szállítás sebesség dimenziójú mérőszáma. A Monin-Obukhov hossz pedig a felszínközeli légréteg stabilitásának hosszúság dimenziójú mérőszáma. A légréteg egyensúlyi helyzete stabilis, ha értéke pozitív ($L_* > 0$) és labilis, ha értéke negatív ($L_* < 0$), indifferens légrétegződés esetén végtelennek tekinthető ($L_* = \infty$). (30)

3.5.4.1 AEROMOD modell

Az amerikai Meteorológiai Társaság indította határréteg kutatás eredményeként született meg ez a modell. A CBL egy egydimenziós energia-egyensúly modellen alapul. A kiindulási egyenlet:

$$h\theta(h) = \int_0^h \theta(z) dz = 1,4 \int_0^t \frac{H(\tau)}{\rho c_p} d\tau \quad (6)$$

ahol:

$\theta(h)$: A potenciális hőmérséklet értéke a keveredési réteg tetején, h magasságban [K]

H: Szenzibilis hőáram a felszínközeli rétegben [Km/s]

t: Idő [s]

z: Magasság [m]

ρ : Sűrűség [J/kgK]

c_p : Fajlagos hőkapacitás [J/kgK]

Az alap egyenlettől eltérően itt a felszín közeli adatok a mérvadóak, hiszen ezt könnyebben tudjuk mérni.

A SBL egyenlete pedig a következőképpen néz ki:

$$h = 0,4 \left(\frac{u_* L_*}{f} \right) \quad (7)$$

Az alapegyenlettel megegyezően, kiegészítve a jellemző állandóval behelyettesítésével. A nappali rétegvastagság meghatározására az SBL és CBL egyenlet adta eredmények közül a nagyobb az elfogadott. (24)

3.5.4.2 A magyar szabvány előírásai a határréteg vastagság meghatározására

A magyar szabvány a COST Action 710 (European Co-operation in the field of Science and Technical Research) project keretében megszületett ajánlás alapján készült. Ez megfogalmazza, hogy amennyiben rendelkezésre állnak a megfelelő eszközök, akkor az adat mérésel határozandó meg. Ha erre nincs lehetőség, akkor az ajánlás a mechanikus és termikus légköri turbulenciára alapuló modell szerinti számolást ír elő, napszakokra lebontva. Akkor alkalmazható a módszer, ha ismertek a felszínközeli réteg dinamikai paraméterei, rendelkezésre állnak a 00 és 12 UTC-s rádiószondás mérések adatai. A vizsgált terület közel sík kell hogy legyen és nem lehet sűrűn beépített az áramlási modellek korlátai miatt. A kapott eredmények legkisebb felbontása 10x10 km². A mechanikus turbulencia által létrehozott keveredési rétegvastagság napszaktól függően számítható. A termikus esetben, nappali időszakokra és labilis légrétegződés ($L_* < 0$) esetére van módszer.

Az általános mechanikus turbulencia és stabilis légréteg egyenlete megegyezik az (5)-ös egyenlettel, ahol a c_2 értéke 0,35. Amennyiben rendelkezésre állnak az éjszakai rádiószondás adatok, akkor az alábbi egyenletet alkalmazzák:

$$h = Ri_c \frac{(\Delta u)^2}{\beta \Delta \theta_v} \quad (8)$$

ahol:

Ri_c : Kritikus Richardson szám

Δu : Szélsősebesség különbség [m/s]

β : Stabilitási paraméter [m/s²K]

$\Delta \theta_v$: A keveredési rétegvastagság és a 2 m-es szint virtuális potenciális hőmérséklet különbsége [K]

A stabilitási paraméter a nehézségi gyorsulás (g [m/s²]) és a réteg átlagos hőmérsékletének (T_r [K]) hányadosa. A számítás iterációval hajtható végre, a magasság fokozatos (10 méterenként) növelésével interpolálják a Δu , β és $\Delta \theta_v$ értékeket. Így számolható az Ri_c , aminek ha értéke eléri a 0,25-öt, akkor az ahhoz tartozó h magasság megegyezik a keveredési rétegvastagsággal.

A mechanikus turbulencia és labilis légréteg egyenlete megegyezik a (4)-es egyenlettel, ahol a c_1 értéke 0,2.

A termikus turbulencia által létrehozott keveredési rétegvastagság időbeli változását pedig egy differenciál- egyenlet adja meg.

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = (1 + 2A) \frac{-u_* T_*}{\gamma_\theta h} + 2B \frac{u_*^3}{\gamma_\theta \beta h^2} \quad (9)$$

ahol:

A: Állandó, értéke 0,2 [-]

B: Állandó, értéke 2,5 [-]

T_* : Dinamikus hőmérséklet [K]

A többi jelzés az előző egyenletekből már ismert.

Az egyenletnek létezik analitikus megoldása, nehézségét a γ_θ meghatározása jelenti. Ez is számítható a következő egyenlet segítségével.

$$\gamma_\theta = \frac{(1+2A)h - \kappa B L_*}{A h^2 - \kappa B L_* h} \Delta \theta_m \quad (10)$$

ahol:

κ : Kármán-konstans, értéke 0,4 [-]

$\Delta \theta_m$: A keveredési réteg felső határára és a szabad légkör közötti potenciális hőmérséklet ugrása [K]

Az eddig ismeretlen, potenciális hőmérséklet ugrás meghatározásához szükség van a $\gamma_{\theta m}$ -re, mely a rádiószondás mérésekből számított potenciális hőmérsékleti gradiens, meghatározott magasságok között. Ezen kívül korrigálnunk kell a kritikus potenciális hőmérséklet ugrásokhoz képest. Ezek után visszaszámolhatjuk a modell potenciális hőmérsékleti gradiensét (γ_θ) a (10)-es egyenlet szerint. Miután minden paramétert ismerünk, megoldhatjuk a (9)-es egyenletet analitikus módszerrel a (11)-es egyenlettel.

$$t_1 - t_2 = \frac{1}{c_s^2} \left[\frac{1}{2} (C h + D)^2 - 2D(C h + D) + D^2 \ln(C h + D) \right]_{h_1}^{h_2} \quad (11)$$

ahol:

$$C = \frac{(1 + 2A)(-u_* T_*)}{\gamma_\theta}$$

$$D = \frac{2B u_*^3}{\gamma_\theta \beta}$$

t_1 : Kiindulási időpont [s]

t_2 : Vizsgálat időpont [s]

h_1 : keveredési vastagság a t_1 időpontban [m]

h_2 : keveredési vastagság a t_2 időpontban [m]

A napi maximális keveredési rétegvastagság számolható egyszerűen. Megegyezik a 00 UTC-s rádiószondás mérésekből meghatározott azon virtuális potenciális hőmérséklet magasságával, ami egyenlő a maximális földfelszíni hőmérsékletből számított virtuális potenciális hőmérséklettel. A virtuális potenciális hőmérséklet a potenciális hőmérséklethez hasonlóan számolható, figyelembe véve a levegő nedvességének keverési arányát (r).

$$\theta_v = T(1 + 0,608r) \left(\frac{1000 \text{ mbar}}{p} \right)^{\frac{K}{c_p}} \quad (12)$$

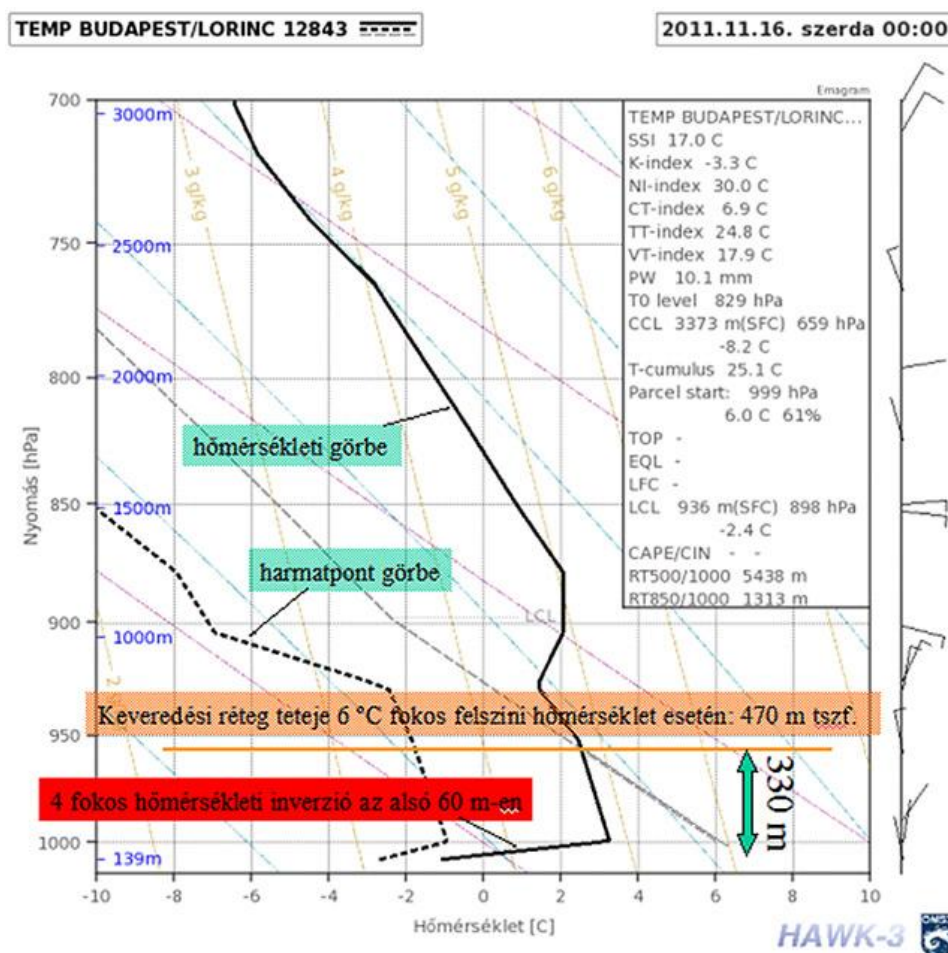
$r = \rho_v / \rho_a$ [kg/kg], vagyis a légkörben lévő vízgőz sűrűségének (ρ_v [kg/m³]) és a száraz levegő sűrűségének (ρ_a [kg/m³]) hányadosa.

A szabvány a fentieken túlmenően korrekciókat is alkalmaz, így pl. a minimális keveredési rétegvastagság 100 méter akkor is, ha a számítás alapján nem is éri el azt. Valamint az inverziós réteg hatását is figyelembe veszi. Ha a 00 és 12 UTC-s mérések alapján számolt keveredési rétegvastagság magasabb, a két időpontban, mérésekből számolt átlagos inverziós magasságnál, akkor az utóbbi lesz

a keveredési rétegvastagság magassága. Ha csak az egyik rádiószondás mérés mutatja az inverziót, akkor a korrekció a mérés időpontjától számított ± 3 órászakra alkalmazható. (24)

3.5.5 Példa a szmoghelyzet rádiószondás mérésen alapuló vizsgálatára

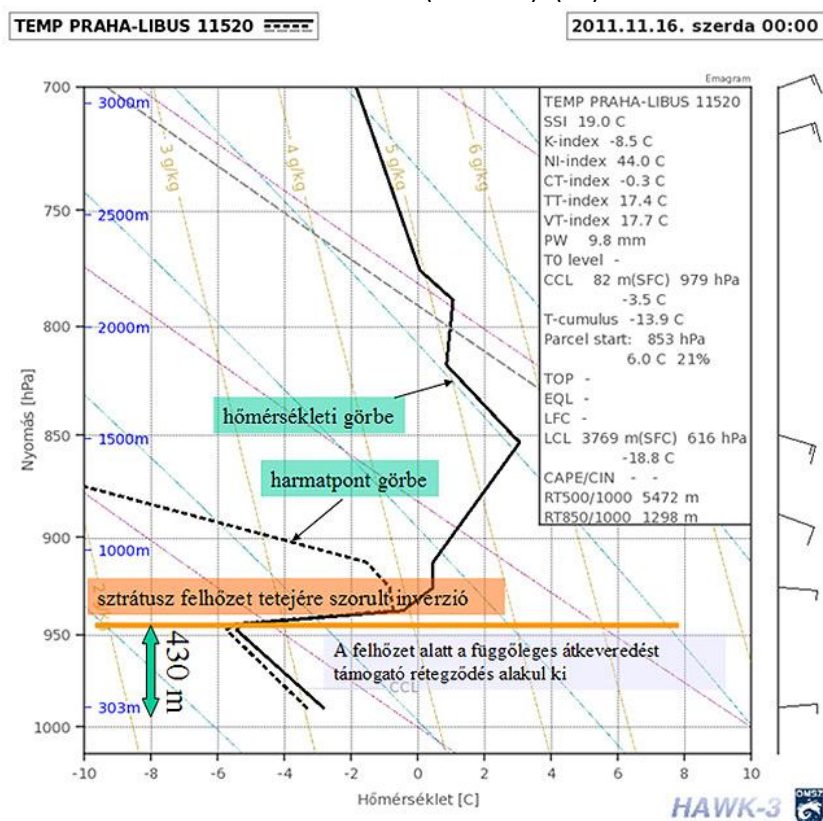
A Közép-Európában uralkodó tartós anticiklon (magas azonos nyomású pontokkal körülhatárolt terület) időjárás a légszennyező anyagok feldúsulásához kedvező meteorológiai feltételeket teremtett. 2011. november 16-án hajnalban Budapesten – a nagy szennyező koncentráció miatt – el kellett rendelni a szmogriadó riasztási fokozatát, mert lényeges időjárás változás nem volt várható. A légszennyező anyagok feldúsulásának fő oka az volt, hogy az éjszakai órákban rendre igen erős inverziós rétegződés alakult ki közvetlen a felszín fölött, ami megakadályozta a függőleges légcserét. A 25. ábra a budapesti rádiószondás mérés eredményeit ábrázolja, a hőmérséklet és harmatpont görbék láthatóak rajta. A forrásokból (főként a hagyományos fűtés) kikerülő füst a felszín közelében terült szét. A nappali órákban ugyan néhány órára pár-száz méteres rétegben "kitágult" a keveredési réteg, de ez nem volt elegendő a levegőminőség lényeges javulásához. A nappali órákban 6°C elérése esetén is mindössze 330 m volt a keveredési réteg vastagsága (25. ábra).



25. ábra Budapesti rádiószondás felszállás 2011. november 16-án éjfélkor (00 UTC) (31)

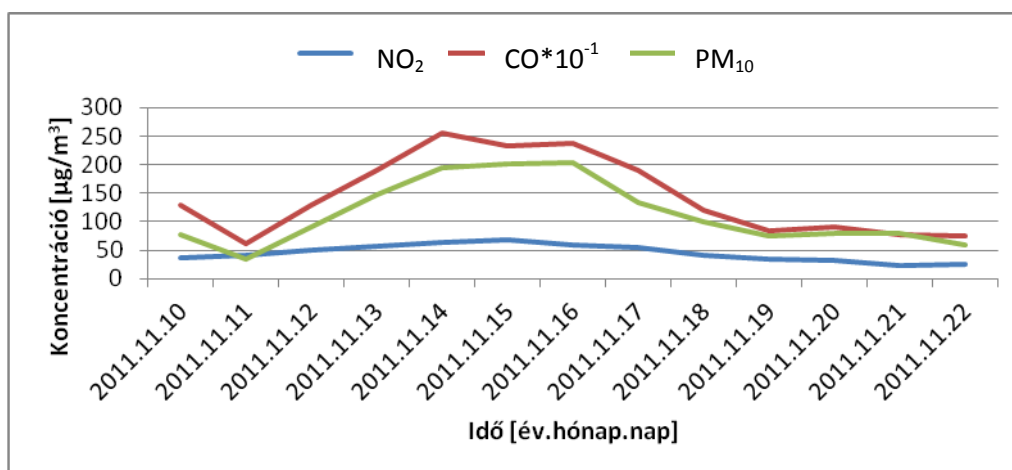
A keleti országrész fölé a kelet-Európai síkság felől időnként hidegebb levegő szivárogott be, ami a légmozgással és a keveredési réteg kitágulásával együtt átmenetileg javította a levegő minőségét. Azokon a területeken, ahol tartós ködtakaró alakult ki, szintén a javult a levegőminőség, ugyanis ekkor a felszín helyett a ködréteg teteje volt kitéve az éjszakai kisugárzásnak és egy megemelkedett rétegben alakult ki erős inverzió. Az inverziós réteg magassága és egyben a keveredési rétegvastagság idővel emelkedhet. Ilyen helyzetekben stabilizálódik az ún. hideg légpárnás időjárási

helyzet, a napi hőingadozás minimálisra csökken és mind éjszaka, mind nappal néhány száz méteres rétegben keverednek el a légszennyező anyagok. Ugyanazon a napon végzett, a térséghez közel eső prágai rádiószondás mérés alapján 430 m vastag az a réteg, ahol a felszín fölött közel 100 méterenként közel 1 fokot csökkent a hőmérséklet (26. ábra). (31)



26. ábra Prágai rádiószondás felszállás 2011. november 16-án éjfélkor (00 UTC) (31)

A 27. ábra segítségével nyomon követhetjük a szennyezők koncentrációjának emelkedését, majd november 16-ával kezdődően a csökkenését.

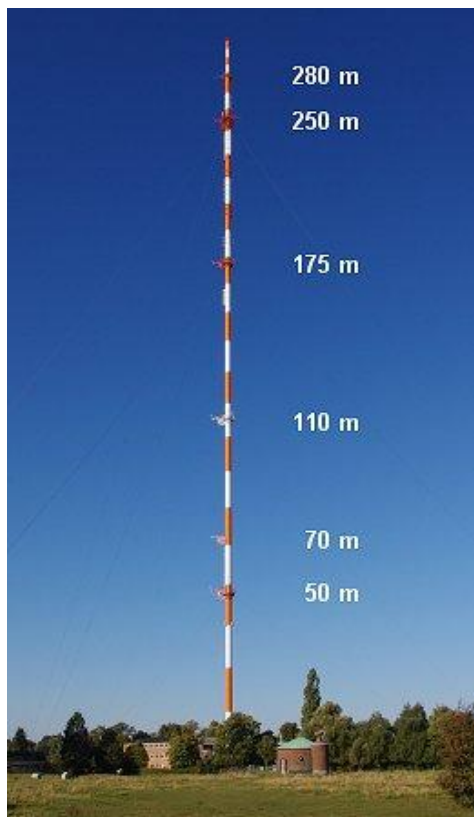


27. ábra A Budapest Csepel mérőállomáson mért napi átlagos koncentrációk (32)

3.5.6 Hamburgi mérőtorony

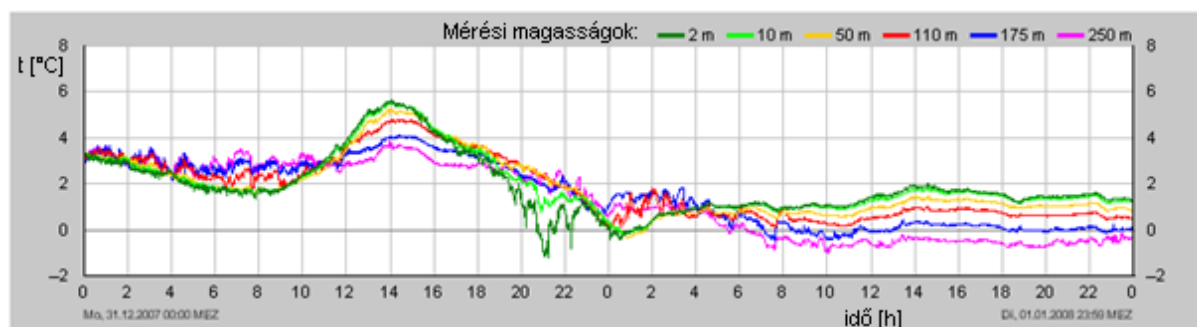
A rádiószondás mérések a mérés időpontjára jellemző adatokat szolgáltatnak, naponta két alkalommal, ami nem elégséges az inverzió változásának megfigyelésére. Hamburgi tanulmányutam alatt megismertem az ottani Institut für Hygiene und Umwelt, vagyis a helyi környezetvédelmi

felügyelőség munkáját. Ekkor szereztem tudomást a Hamburgi Egyetem Meteorológiai Intézetének mérőállomásáról. Ezt az állomást 1967 óta egy 300 m magas, volt rádiótornyon helyezték el (28. ábra)

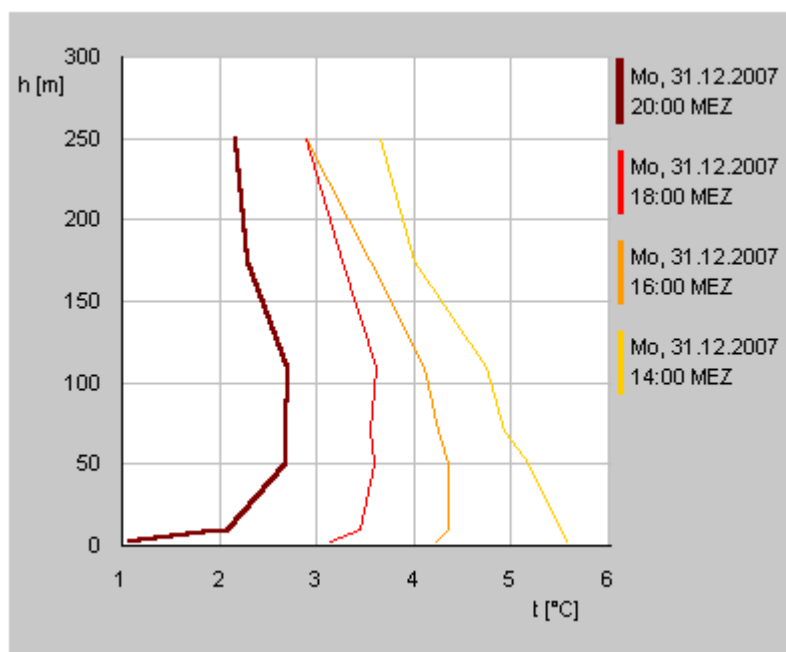


28. ábra A 300 m magas mérőtorony (33)

Több szinten 50, 70, 110, 175, 250 és 280 méter magasságban helyezkednek el mérőberendezések. 250 méterig lift közlekedik, a legmagasabb ponthoz pedig létrán lehet eljutni. Mindegyik szinten mérnek hőmérsékletet, a 70 méteres kivételével pedig az összes szinten van nedvességmérő. Ezek segítségével a talaj menti inverzió könnyen mérhető 280 méterig, valamint változása is nyomon követhető az adatok jelen idejű továbbításának köszönhetően. Így történt ez például 2007. 12. 31 - 2008. 01. 01. között is, mikor szmoghelyzet alakult ki a talaj menti inverzióknak köszönhetően. A 29. ábra mutatja a hőmérséklet változását az adott magasságban a nap folyamán. Láthatjuk, hogy 31-én 19 óra környékén (naplemente után) a talaj közeli 2 méteres mérési ponton a hőmérséklet erősen csökken, míg 250 méter magasan alig, így egy fordított, vagyis inverziós hőmérsékleti profil alakul ki. Ezt a 30. ábra szemlélteti jól, ahol a hőmérsékleti gradiensek változását követhetjük 14 és 20 óra között. 20 órára jellegzetes inverzió alakul ki. Ez tart a hajnali órákig, mikor újra labilis állapot áll be. A légszennyezettségi adatokat tekintve 14 óra körül volt a csúcs, addigra felhalmozódott a PM_{10} koncentráció a térségben.



29. ábra 2007. 12. 31 -2008. 01. 01. hőmérsékleti profilja, különböző magasságokban (34)



30. ábra 2007. 12. 31. hőmérséklet gradiensei különböző időpontokban (34)

Ez a mérési technika kiváló lehetőséget ad az inverzió pontos meghatározására Hamburg területén. El kell mondani, hogy ez a térség mára már csak a közlekedésből származó légszennyezettség problémájával küzd, így a los angelesi típusú szmog a jellemző, melyre a magaslégköri inverzió van hatással. Ennek a toronynak a segítségével azt nem tudják vizsgálni.

A fenti két példával kívántam bemutatni a légköri inverzió mérésének lehetőségeit. A rádiószondás mérés egyszeri alkalmat fed le, naponta csak párszor ismételhető és nagy költségekkel jár. A német állomáshoz csak egyszeri befektetésre és karbantartásra van szükség, de helyhez kötött, így csak az adott térséget lehet vele vizsgálni.

Egy költséghatékonyabb és többszöri mérésre alkalmas eszköz alkalmasabb lenne a légköri inverziós réteg mérésére.

4 Az ÉMI-KTVF mérőhálózata

Miskolcon az Észak-magyarországi Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség (ÉMI-KTVF) üzemeltetésében három automatikus mérőállomás helyezkedik el, melyek óránként szolgáltatnak közérdekű adatokat. Ezen állomások jellemzőit az 6. táblázatban láthatjuk.

6. táblázat Mérőállomások jellemzői (32)

Mérőállomás neve	M4	M5	M6
Címe	Búza tér	Martintelep, Alföldi u.	Görömböly, Lavotta u.
Elhelyezkedése	Központ, autóbusz állomás	Kertváros, közepes beépítettség	Kertváros, közepes beépítettség
Szennyező források	közúti közlekedés, szállítás kereskedelmi, intézményi és lakossági fűtés, tüzelés szolgáltatások	lakossági fűtés, tüzelés közúti közlekedés, vasút	lakossági fűtés, tüzelés ipari technológiák közúti közlekedés, szállítás
Mért szennyezők	SO ₂ , NO, NO _x , NO ₂ , CO, PM ₁₀ , O ₃	SO ₂ , NO, NO _x , NO ₂	SO ₂ , NO, NO _x , NO ₂ , CO, PM ₁₀ , O ₃

A területi légszennyezettséget vizsgáló mérőpontok minimális száma meghatározásának szempontjait a 6/2011. (I. 14.) VM rendelet határozza meg. Nagy és kis léptékű telepítési ajánlások is szabályozzák a mérőállomások telepítését. A nagy léptékű telepítési ajánlások a 6/2011. (I. 14.) VM rendelet és a COM (2005) 447 Európai Parlament és Tanács irányelve alapján a terület típusára (városi, külvárosi, vidéki) és az állomás típusára vonatkozik.

4.1 Az állomás típusok

A vizsgálandó terület, forrás és hatás alapján megkülönböztetünk háttér, ipari és közlekedési állomásokat.

4.1.1 Háttér állomás

A háttér állomások jellemzően nincsenek kitéve közvetett szennyező forrásoknak.

4.1.1.1 Vidéki állomás

A vizsgálat célja a vegetáció és az emberi egészség védelme, ahol agglomerációtól és zónától több mint 20 km-re, vagy pedig egyéb beépített területektől, ipari telephelyektől, illetve autópályáktól több mint 5 km-re helyezkedik el.

A reprezentativitási terület: lehetőség szerint több mint 1000 km².

4.1.1.2 Városi állomás

A vizsgálat célja a háttérszintek vizsgálata, és az emberi egészség védelme, ahol néhány km²-en belül uralkodó emissziós pont- és vonalforrás közvetlen hatásának nincs kitéve az állomás.

A reprezentativitási terület: lehetőség szerint több km².

4.1.2 Ipari állomás

A vizsgálat célja az emberi egészség védelme zónán és agglomeráción belül, ahol az érintett lakosság a kibocsátó forrásokból származó legnagyobb koncentrációnak van kitéve, illetve reprezentatív adatokat szolgáltat az adott terület lakosságát érő expozíció nagyságára.

A reprezentativitási terület: lehetőség szerint 250x250 m.

4.1.3 Közlekedési állomás

A vizsgálat célja az emberi egészség védelme zónán és agglomeráción belül, ahol a közlekedésből származó legnagyobb koncentrációnak van kitéve a lakosság, illetve reprezentatív adatokat szolgáltat az adott terület lakosságát érő expozíció nagyságára.

A reprezentativitási szakasz: a vizsgált útszakasz 100 méteres hossza.

4.2 Telepítési előírások

A COM (2005) 447 szerint vonatkozó kis léptékű telepítési előírások a mérőállomás kialakítására, közvetlen környezetére vonatkoznak az alábbi pontokba szedve:

- A mintavételi szonda bemeneti nyílása körüli légáramlásnak zavartalannak kell lennie (legalább 270°-os szögben legyen szabad) anélkül, hogy a mintavevő készülék közelében a légáramlást bármilyen akadályozó tényező befolyásolná. Általában annyi méterre kell lennie az épületektől, erkélyektől, fáktól és egyéb akadályoktól, amely távolság kétszer akkora, mint amennyivel az akadály a mintavételi szonda fölé magasodik; és legalább 0,5 méterre legyen a legközelebbi épülettől abban az esetben, ha a mintavételi pontok az épület vonalában mérik a levegőminőséget).
- A mintavételi pontok bemeneti nyílását általában a földfelszíntől számított 1,5 m-es (belégzési magasság) és 4 m-es magasság között kell elhelyezni. Egyes esetekben magasabb (legfeljebb 8 méter) elhelyezésére is szükség lehet. A magasabb ponton való elhelyezésekkor is helyénvaló lehet, ha az állomás nagyobb területre vonatkozóan reprezentatív.
- A mintavevő szonda bemeneti nyílását nem lehet a források közvetlen közelébe elhelyezni a környezeti levegővel el nem keveredett kibocsátások közvetlen mintavételének elkerülése érdekében.
- A mintavevő szonda kimeneti nyílását úgy kell elhelyezni, hogy a kibocsátott levegő ne áramolhasson vissza a mintavevő bemeneti nyílásába.
- Mintavevők elhelyezése közlekedési helyszíneken:
 - a) valamennyi szennyező anyagra nézve az ilyen mintavételi pontokat a főbb forgalmi csomópontok szélétől legalább 25 méterre és a legközelebbi forgalmi sáv közepétől legalább 4 méterre kell elhelyezni;
 - b) a nitrogén-dioxid és a szén-monoxid esetében a bemeneti nyílásokat a járdaszegélytől legfeljebb 5 méterre kell elhelyezni;
 - c) a por, az ólom és a benzol esetében a bemeneti nyílásokat úgy kell elhelyezni, hogy az reprezentatív legyen az épület vonalához közeli levegő minőségének vonatkozásában, de ne legyen a járdaszegélytől 10 méterre távolabb.

Az alábbi tényezőket szintén figyelembe lehet venni:

- zavaró források;
- biztonság;
- hozzáférhetőség;
- elektromos áram és telekommunikációs kapcsolat elérhetősége;
- a helyszín láthatósága a környezetéhez képest;
- a lakosság és az üzemeltetők biztonsága;
- annak kívánalma, hogy a különböző szennyező anyagok mintavételi pontjainak telepítése összehangolt legyen;
- tervezési követelmények. (35)

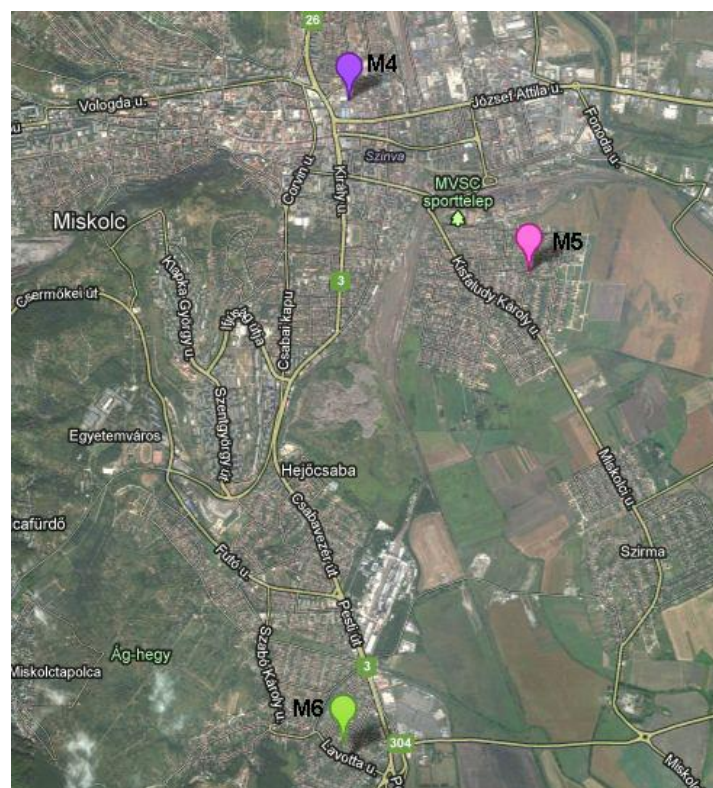
4.3 Automata mérőhálózat

Az ÉMI-KTVF felügyelete alá tartozó automata mérőállomások:

- E2: Eger
- H1: Hernádszurdok
- K1: Kazincbarcika
- M4: Miskolc, Búza tér

- M5: Miskolc, Alföldi u.
- M6: Miskolc, Lavotta u.
- EMI mobil: Mobil mérőállomás (változó helyszín)
- T1: Oszlár
- P1: Putnok
- R1: Rudabánya
- S1: Sajószentpéter
- és Szolnok

Az M4, M5 és M6 állomások Miskolc levegőtisztaságáról jó képet ad, hiszen az M4 a belvárosi, az M5 a külvárosi levegőt méri (6. táblázat). Az M6 eredeti rendeltetése szerint a közeli cementgyár hatását volt hivatott figyelni, mára már inkább külvárosi, lakó övezetnek megfelelő levegőt mér, de az esetleges kiingásokat megfigyelhetjük. A 31. ábra mutatja az állomások egymáshoz viszonyított helyzetét.

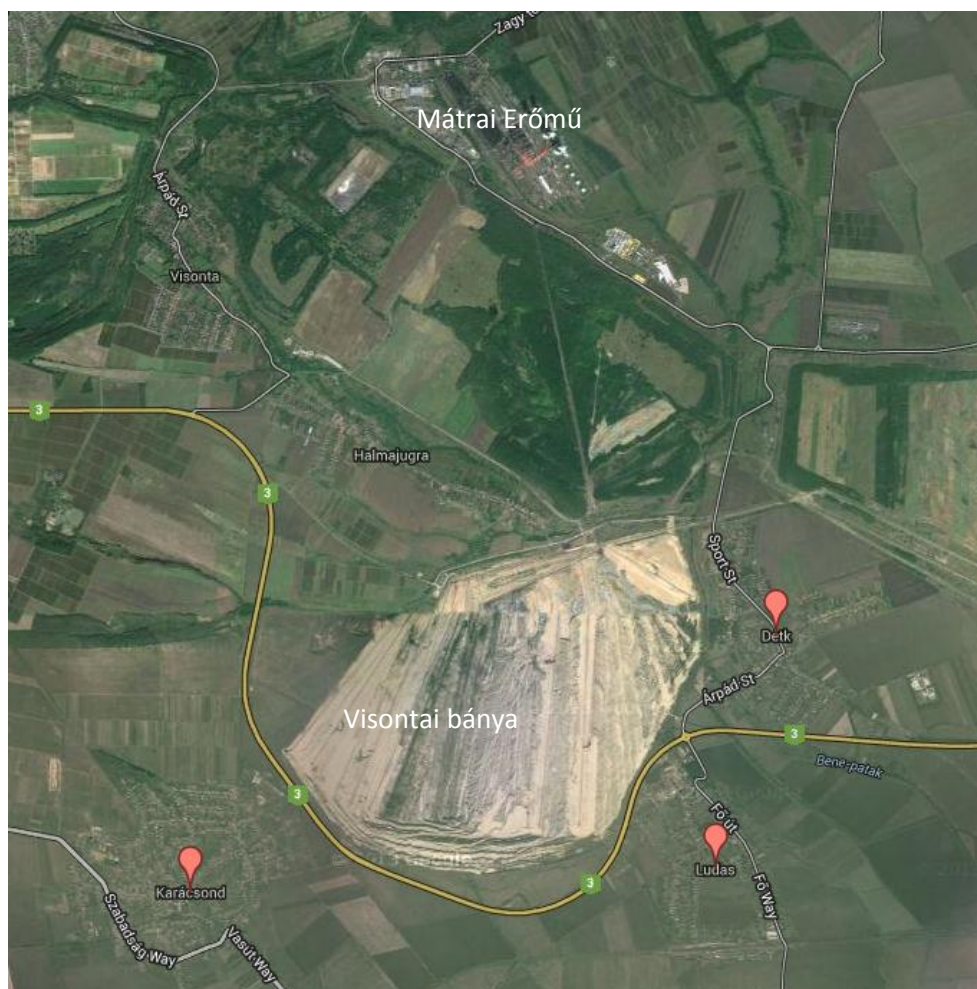


31. ábra Az M4, M5 és M6 állomások elhelyezkedése (33)

4.4 Manuális mérőhálózat

Az automata hálózaton kívül még él az kb. 30 éves múltra visszatekintő RIV (Regionális Immisszió Vizsgáló Hálózat) is. Ez a módszer off-line rendszerben működik, a mérőberendezés 24 órás mintavételt végez 1-1- mintagyűjtőbe. Ez a módszer NO_2 és SO_2 mérésre alkalmas. Hátránya, hogy mindig be kell gyűjteni a mintákat, majd a felügyelőség laboratóriumában bevizsgálni őket. Illetve csak 24 órás átlag értékeket tudunk velük kimutatni, így az időszakos kiugrásokat nem tudjuk nyomon követni. Mindemellett a készüléknek csak hálózati áramra és egy nyugodt, biztonságos helyre van szüksége, így viszonylag mobilisan mozgatható. Az általam megismert RIV állomások helyei: Detk, Gyöngyös, Domoszló, Eger, Tiszaújváros. Ezeket a mintavevő berendezéseket a Kálmán System Kft. gyártotta.

Ezen kívül létezik időszakos por mintavétel. Ez a mérés már egy megszokott eljárás, a Mátrai Erőmű, és a közeli bánya (32. ábra) okozta emisszió mértékét igyekeznek felmérni. Így a közeli települések önkormányzatával egyeztetve telepítik a Digitel berendezéseket, melyeknek elhelyezésénél nagyobb odafigyelésre van szükség. Meg kell oldani a kültéri áramellátást (szigetelés), a vízszintes fekvést. Megfelelően szabad és közeli szennyezőktől mentes környezetet kell biztosítani, hogy a mintavétel reprezentatív legyen. Az általam megismert porminta vevő állomások: Detk, Karácsond, Ludas.



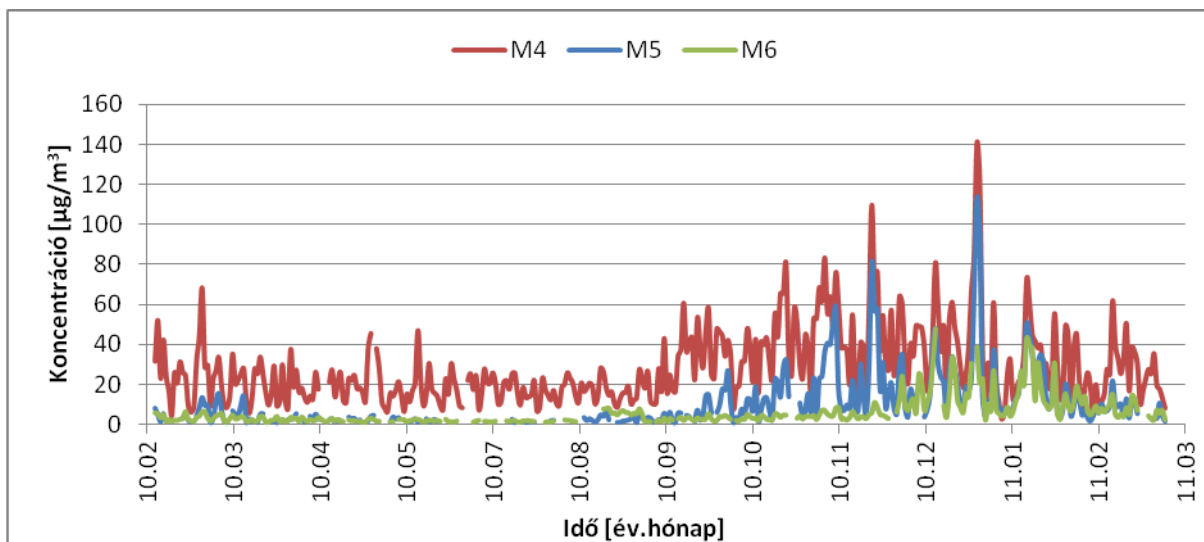
32. ábra A pormérő állomások elhelyezkedése a Visontai bánya környékén (33)

5 Immissziós adatok elemzése

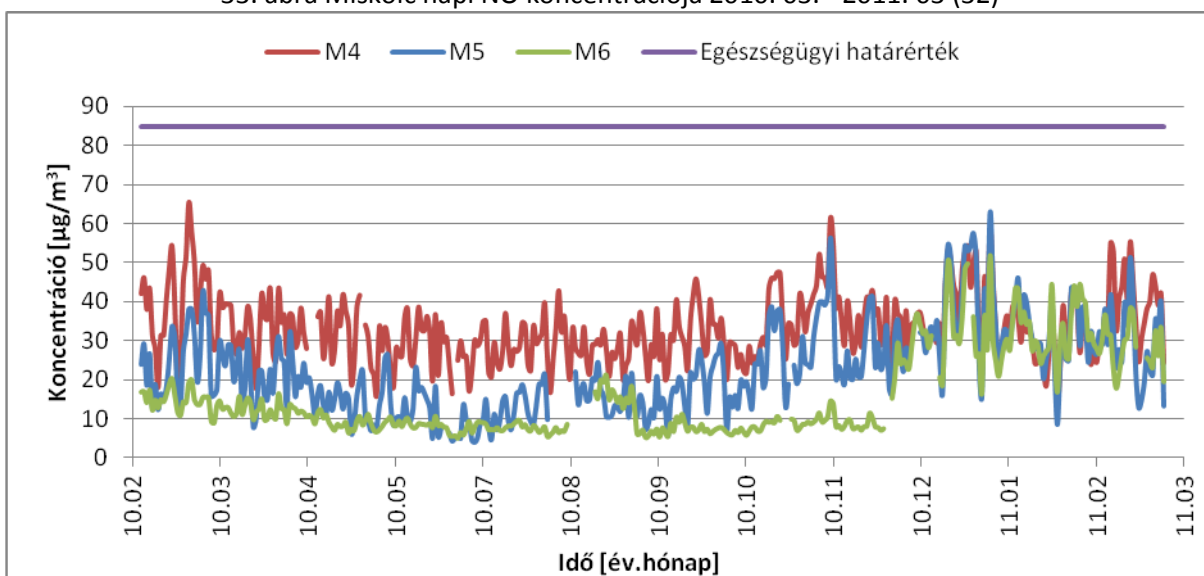
A mérő állomások órás és napi adatai megmutatják az adott térség szennyezettségét. Miskolc és térségének, az elmúlt évekre vonatkozó adatait elemzem az alábbiakban, valamint kitérek az Ársiát sújtó extrém esetekre.

5.1 Miskolci állomások adatainak elemzése

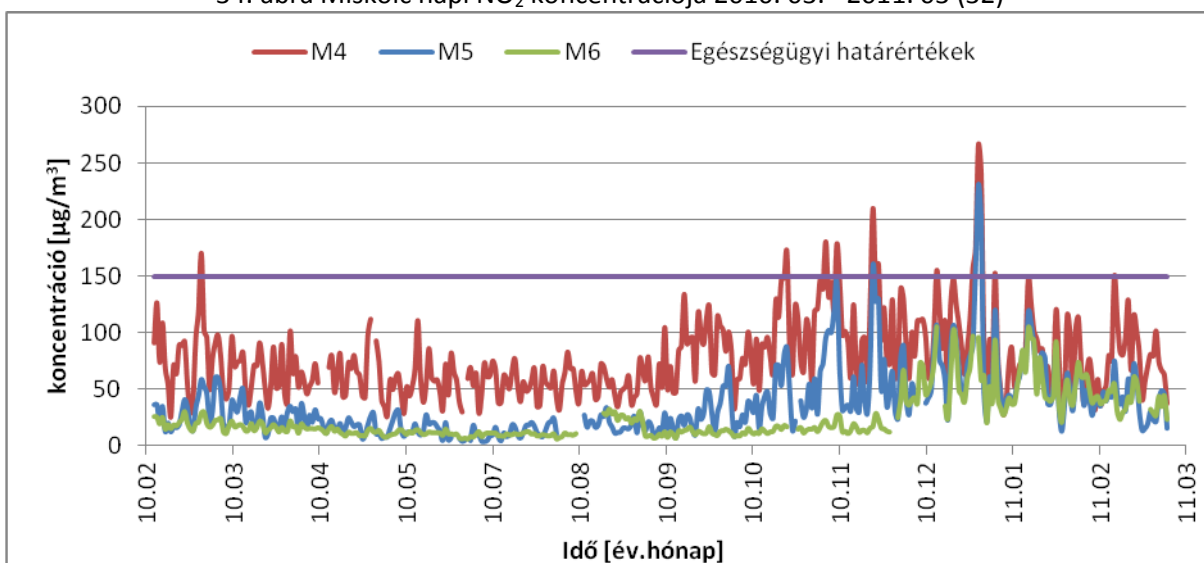
Fontos az állomások elhelyezkedése, hiszen a közeli emissziók befolyásolják a méréseket. Ahogy azt már láthattuk a 31. ábrán az M4-es állomás a város központjában, egy közlekedési csomópont és autóbussz állomás közelében található. Ezért is nagyobb ott a NO, NO₂, NO_x szint a többi mérőállomáshoz képest (33., 34., 35. ábra). Ahol hiányos a vonaldiagram, ott az arra a napra vonatkozó adatok nem állnak rendelkezésünkre, de a tendenciák így is jól megfigyelhetők.



33. ábra Miskolc napi NO koncentrációja 2010. 03. - 2011. 03 (32)

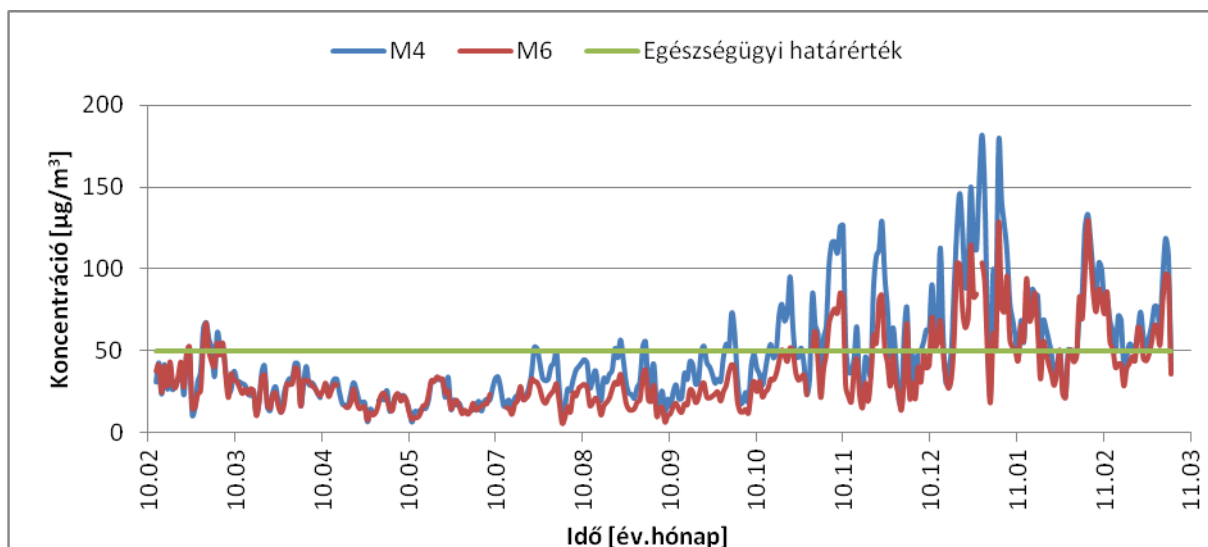


34. ábra Miskolc napi NO₂ koncentrációja 2010. 03. - 2011. 03 (32)



35. ábra Miskolc napi NO_x koncentrációja 2010. 03. - 2011. 03 (32)

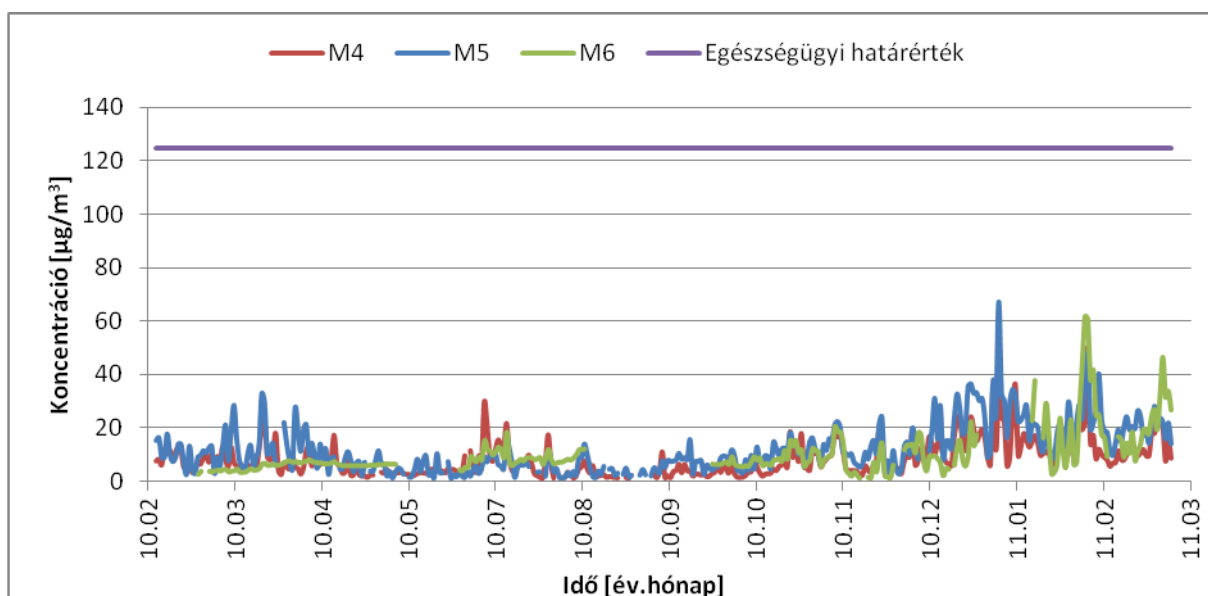
Látható, hogy külön-külön nem, de együtt már jelentős a NO és a NO₂ (33. 34. ábra) mennyisége. Öt nagyobb kiugrást figyelhetünk meg, de 2010 végén, 2011 elején többször közel kerültek a határhoz az NO_x értékek (35. ábra).



36. ábra Miskolc napi PM₁₀ koncentrációja 2010. 03. - 2011. 03 (32)

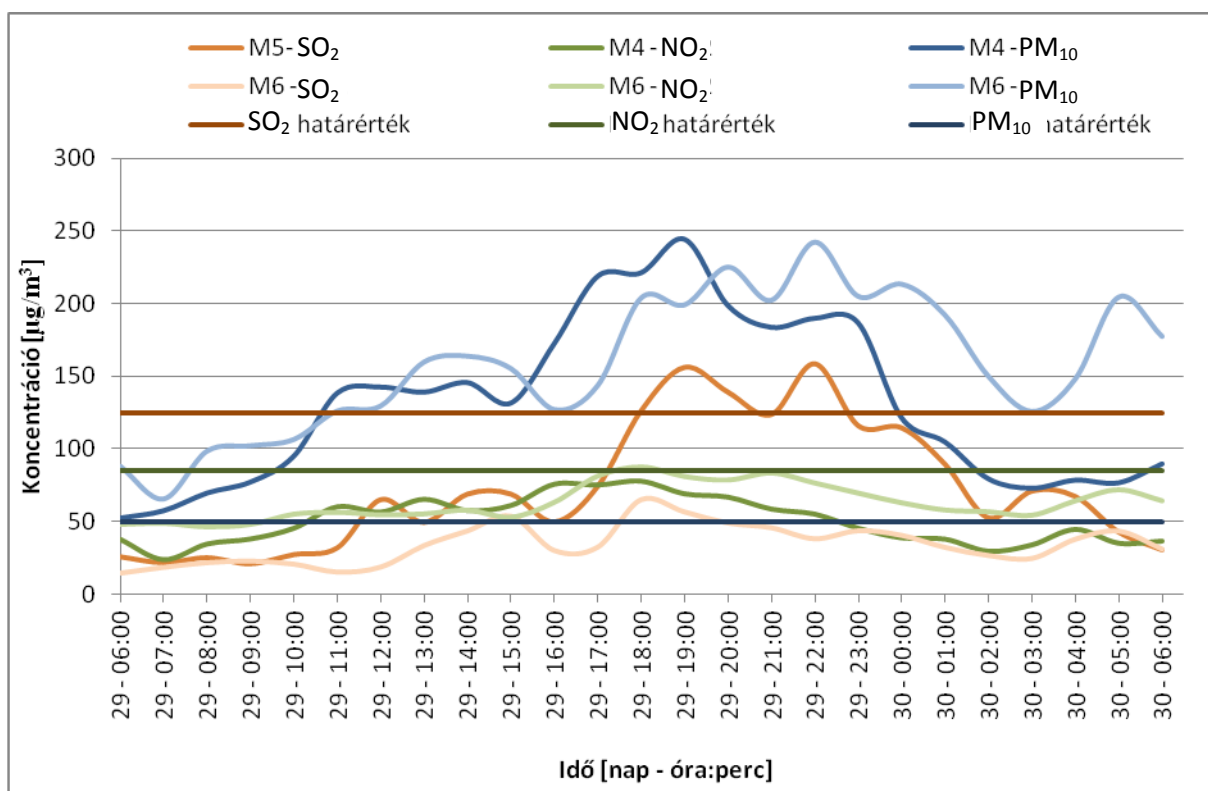
A PM₁₀ értékek elérték és túllépték többször is az egészségügyi határértéket (36. ábra). Ez is a téli időszakban, vagyis a fűtési szezon alatt volt megfigyelhető. Mind a belvárosi M4, mind a külvárosi M6 állomásokon mért adatok alátámasztják a fűtés okozta szennyezés emelkedést. Ugyanakkor a porszennyezés a közlekedésből is származik, így lehetséges az, hogy a belvárosi, kevesebb pontforrásos területen még magasabbak az értékek. A kiugró szakaszok köszönhetőek a kedvezőtlen időjárásnak is. Látható, hogy a legnagyobb egészségügyi kockázatot ez a szennyező okozza Miskolcon. És ez felelős az összes szmogriadóért 2008 óta.

A SO₂ értékeire is igaz ez a tendencia (37. ábra). Szerencsére jóval az egészségügyi határérték alatt maradt a szintje, de a fűtési időszakban ez is megemelkedett. Itt inkább a külvárosi területeken nagyobbak az értékek, mivel ez a szennyező anyag elsősorban a szilárd tüzelőanyag (szén) felhasználással köthető össze és nem a közlekedéssel.



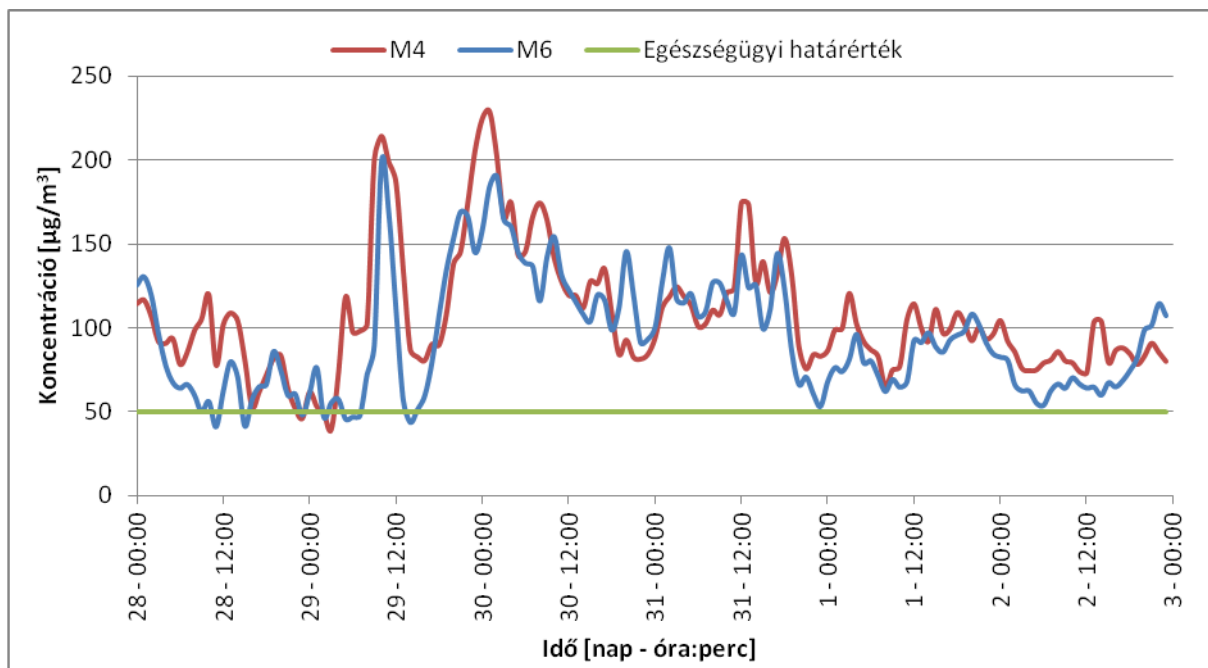
37. ábra Miskolc napi SO₂ koncentrációja 2010. 03. - 2011. 03 (32)

A fenti ábrák a napi átlag kibocsátásokat mutatják. A kiugró 2010. 12. 29 - 30-ai adatokat órák időalapon is megjelenítettem a 38. ábrán. Az M6 és M4 állomások adatait ábrázoltam, ill. a SO₂ adatokat a lakóövezeteket reprezentáló M5 és M6 állomások adatai alapján vizsgáltam. Láthatjuk, hogy a SO₂ értéke többször is átlépte az egészségügyi határértéket, míg a napi érték megjelenítésénél az átlagolás miatt ez nem látható. Megfigyelhetjük, hogy az éjszakai órákban a megnövekedő lakossági fűtés miatt növekszik a PM₁₀ és SO₂ szint is, szinte láthatóak a fűtési szakaszok, ezeket követik a NO₂ értékek is. Plusz a reggeli órákban, a megnövekedett közúti forgalomnak és a fűtés csökkentésének köszönhetően a NO₂ kibocsátás nő, a SO₂ kibocsátás csökken (12.29. 07:00-tól). A forgalom beindulása magával hozza a PM₁₀ növekedését is. Ilyen magas értékek esetében jó eséllyel feltételezhetjük az inverziós réteg meglétét és szélcsendes időszakot. Ezen kívül figyelembe kell venni, hogy az ünnepi időszakban többen tartózkodnak otthon, ezért napközben is jelentős a lakossági füstgáz kibocsátás. Alig hullámoznak az értékek, 29-e délután és 30-a kora hajnalig egy felhalmozódásnak lehetünk tanúi.



38. ábra Az M4, M5 és M6 állomás órás SO₂, NO₂ és PM₁₀ adatai 2010. 12. 29 - 30-a között (32)

Egy másik kiugró részt is kinagyítottam órák időalapra. 2011. 01. 28 és 02. 02. között a PM₁₀-es szint volt szinte végig az egészségügyi határérték fölött. Az M6 és M4 állomások adatai ismertek, így ezeket jelenítettem meg a 39. ábrán. Ilyen magas koncentráció az alacsony hőmérséklet okozta nagy tüzelési hajlandóság és kedvezőtlen időjárási körülmények együttesével jöhet létre. A belvárosi M4 állomás mért adatai nagyrészt nagyobbak, mint a lakossági fűtéssel körülvett M6-os állomás adatai. Így érzékelhető az, hogy az egész városban felgyülemlett a szálló por. A 01. 29-e reggeli csúcs (amely hajnal 3:00-tól növekedett 10:00-ig, 200 µg/m³-ig) is azt mutatja, hogy nem tudott kiszellőzni a város. Ugyanez megismétlődött aznap, a délutáni, esti órákban (növekedés 4:00-tól), de ekkor már az éjszakai fűtés miatt és a szélcsendes időnek köszönhetően nem tudott csökkenni a koncentráció az egészségügyi határérték alá. Így mikor másnap (01. 30.) következett a reggeli fűtési időszak, 100 µg/m³ körül maradt a PM₁₀-es koncentráció. A változatlan időjárási viszonyok miatt 01. 31. 23:00 óráig egyik mérőállomáson sem csökkent 50 µg/m³ közelébe a koncentráció.



39. ábra Az M6 és M4 állomások órás PM₁₀ adatai 2011. 01. 28. - 02. 02. között (32)

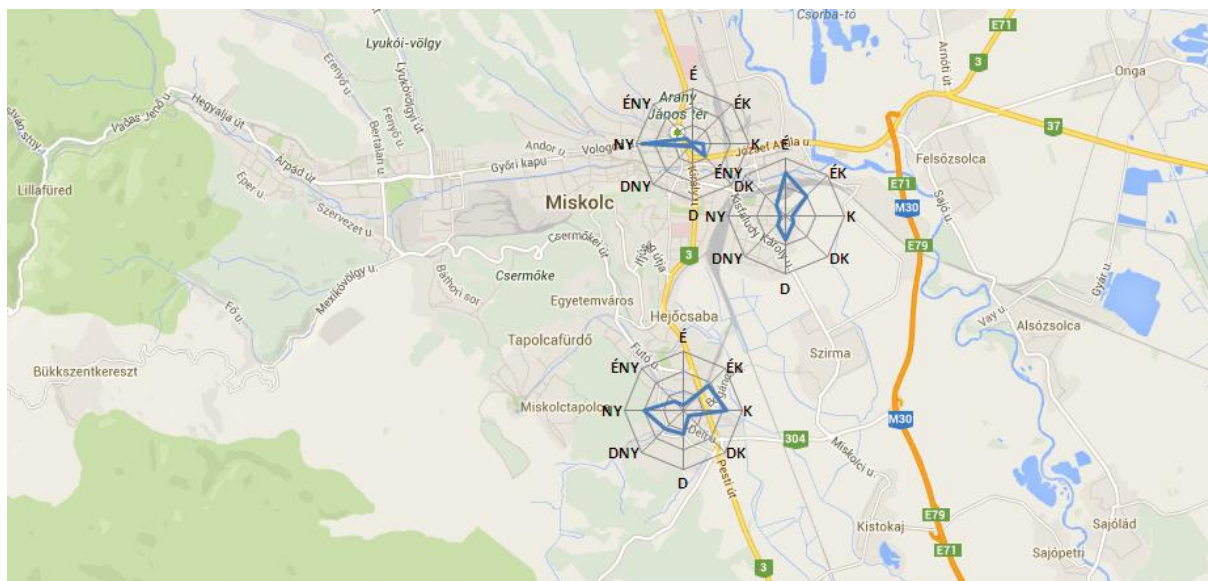
Ezen időszakra esően sikerült beszerezni az Országos Meteorológiai Szolgálat hőmérséklet adatait, mégpedig a Miskolcon és Szentléleken mért egy-egy óra átlagos hőmérsékletet 2011. 01. 26-tól 2011. 02. 03-ig, vagyis a 39. ábrán ábrázolt kérdéses időszakról. A miskolci állomás a tengerszinttől kb. 130 méteren, míg a Szentléleki állomás kb. 700 méteren helyezkedik el. Inverziós réteg megjelenéséről biztosan beszélhetünk, ha a magasabb szinten elhelyezkedő állomáson mért hőmérséklet nagyobb, mint az alacsonyabb, hiszen ha nem lenne inverzió, a magasság változásával arányosan csökkenne a hőmérséklet. A 7. táblázatban jól láthatóak az inverzióval biztosan terhelt órák (piros i jelzéssel).

7. táblázat Az OMSZ adatok alapján kialakuló inverzió

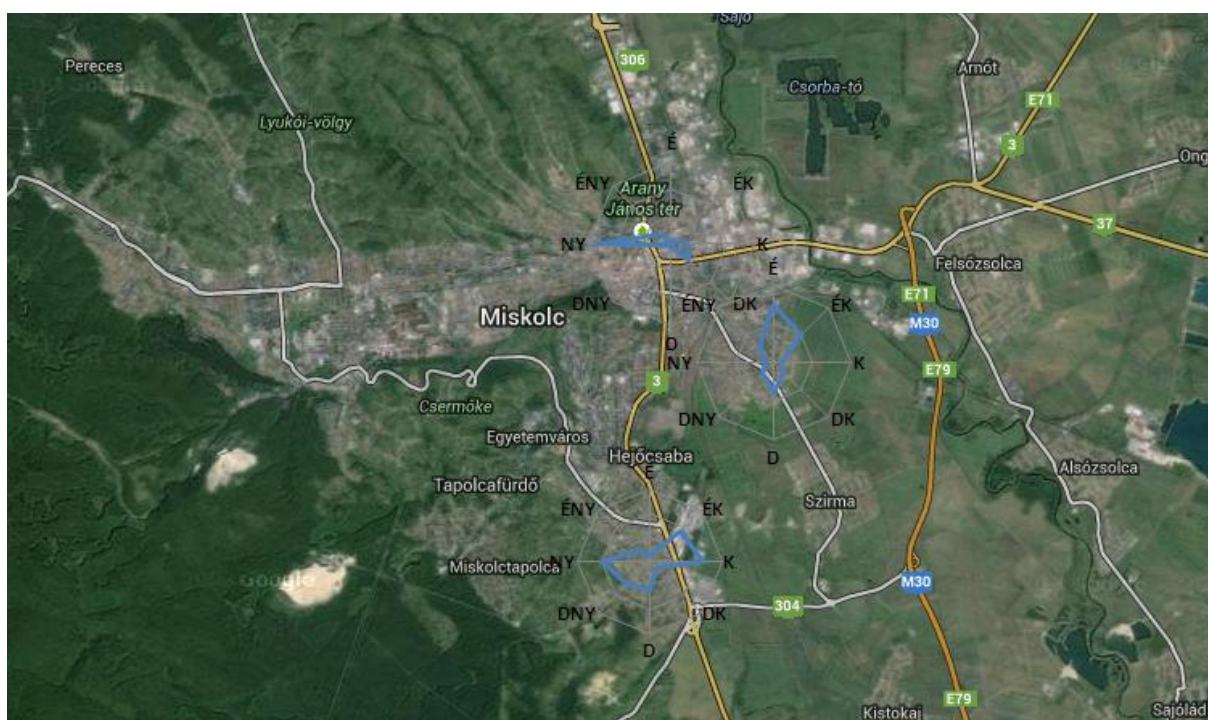
Nap / Óra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2011.01.26	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
2011.01.27	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	i	n	n	n
2011.01.28	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
2011.01.29	n	n	n	n	i	i	i	i	i	i	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	i	i	i	i
2011.01.30	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
2011.01.31	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
2011.02.01	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	n	i	n	i	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
2011.02.02	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
2011.02.03	n	n	i	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
n= Miskolci hőmérséklet > Szentléleki hőmérséklet																								
i= Miskolci hőmérséklet < Szentléleki hőmérséklet																								

Az M4, M5 és M6 állomások szélmérő berendezésekkel is rendelkeznek, melyek alapján a szennyezők forrásának irányára következtethetünk. A 40. ábra az állomások átlagos szélirányait ábrázolja 2012. 01. és 2013. 03. intervallum között. Ez azt jelenti, hogy százalékos eloszlásban mutatkoznak a negyed óránként rögzített szélirányok, a szélerősségtől függetlenül. Az ilyen szélrózsát úgy olvassuk, hogy ha az értékek távol esnek a diagram közepétől, akkor az adott területen az a jellemző szélirány. Ez alapján mindenképp érdekes az M4 állomás, hiszen itt több mint 50%-ban nyugati szél uralkodik, ami

azt jelenti, hogy Miskolcra nyugati irányból érkezik a szennyezők többsége. Ebben az irányban völgy nyúlik el egészen Lillafüredig, így az ott télen keletkező fűtésből eredő füstgázok egyenesen a mérőállomás irányába vándorolhatnak a szél segítségével. Ez a természetes irányítottság jobban látszik a 41. ábrán, ahol a domborzati viszonyokkal együtt láthatóak az átlagos szélirányok.

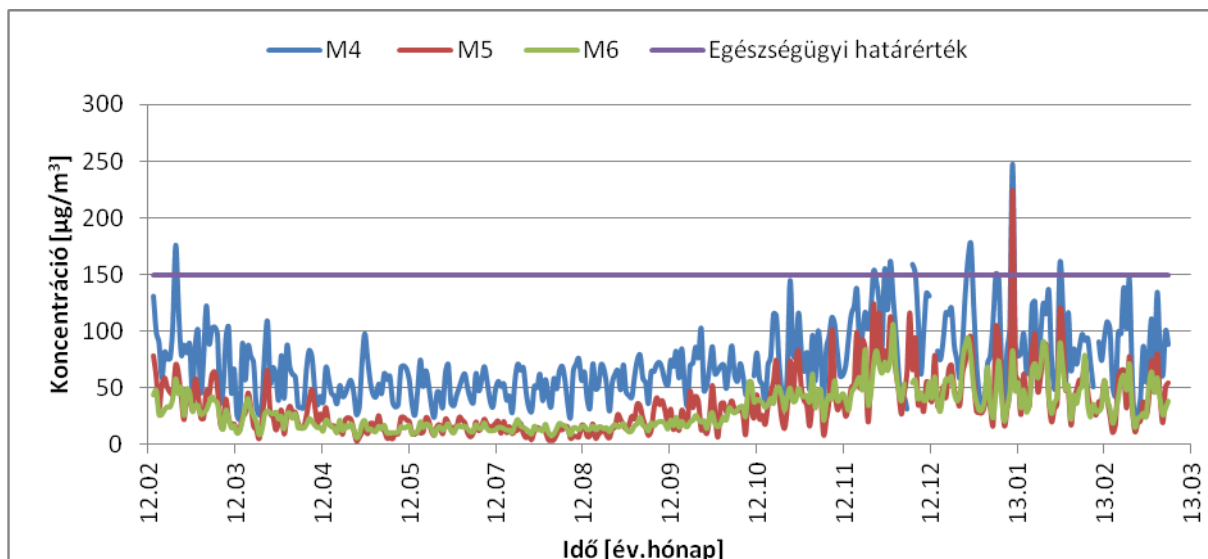


40. ábra Miskolci mérőállomások átlagos szélirány eloszlása 2012. 01 - 2013. 03.



41. ábra Miskolci mérőállomások átlagos szélirány eloszlása 2012. 01 - 2013. 03. domborzati térképen

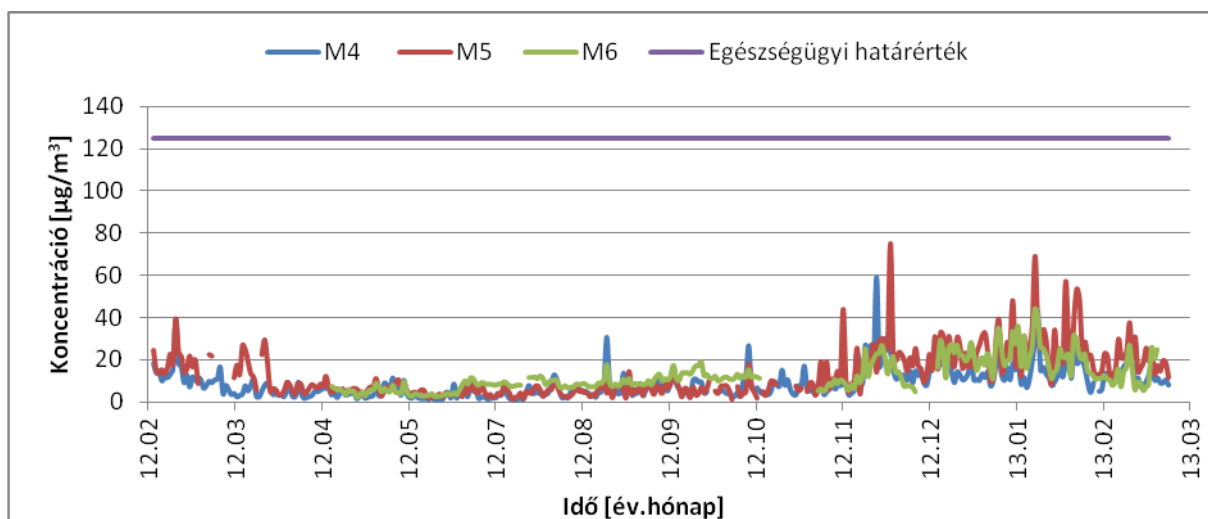
Az alábbiakban ábrázolom a legfrissebb légszennyezettségi adatokat is 2012. 03-tól 2013. 03-ig.



42. ábra Miskolc napi NO_x koncentrációja 2012. 03. - 2013. 03 (32)

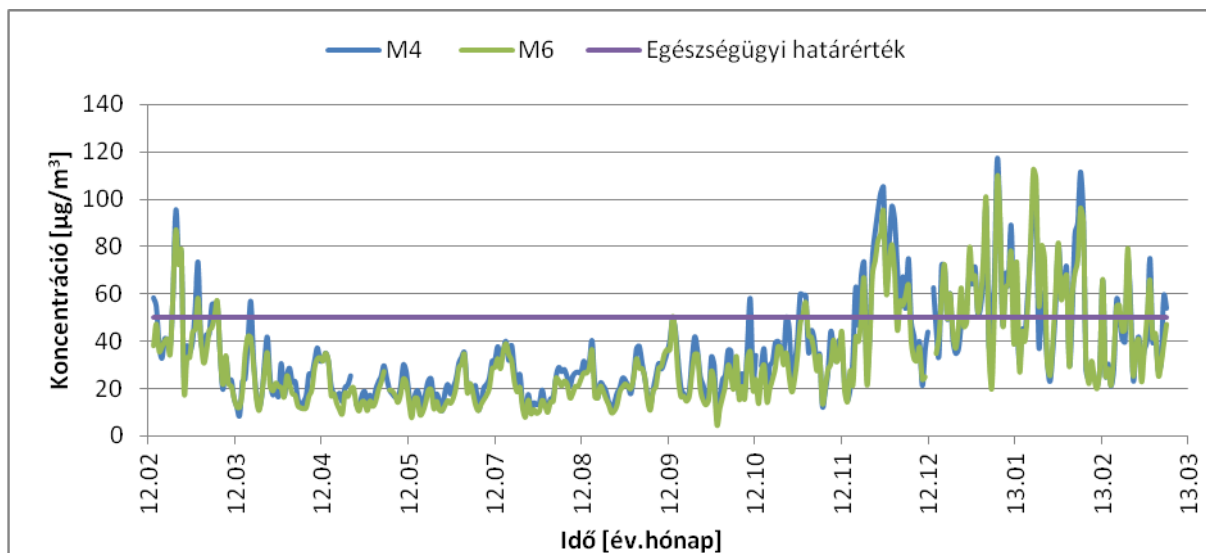
A 2010 - 2011-es adatokhoz képest (35. ábra) kevesebbszer lépte át az egészségügyi határértéket a NO_x Miskolcon 2012-2013-ban (42. ábra). Ettől függetlenül a tendencia megegyezik, márciustól csökken a kibocsátási érték, majd a fűtési szezon indulásakor emelkedik és kitart egészen február-márciusig. Egy jelentős kiugrás van, amit december végén láthatunk. Ekkor jelentkezett a szmog hatás. A szennyezők felhalmozódtak az M4, M5 mérőállomás közelében, hiszen az M6 értéke alacsonyan maradt. Feltehetően a kisebb gépjárműforgalom és kedvezőbb időjárási körülményeknek köszönhetően, hisz ez egy a város szélén, lakóövezetben lévő mérőállomás, ahol nagyobb a tér, így a szélmozgás is szabadabb.

Az SO_2 kibocsátás tendenciája és volumene is hasonló az 2010 - 2011-eshez (37. ábra). Az M5 mérőállomás értékei a legkiemelkedőbbek a fűtési időszakban, de még ezek is jóval a határérték alatt maradtak (43. ábra).



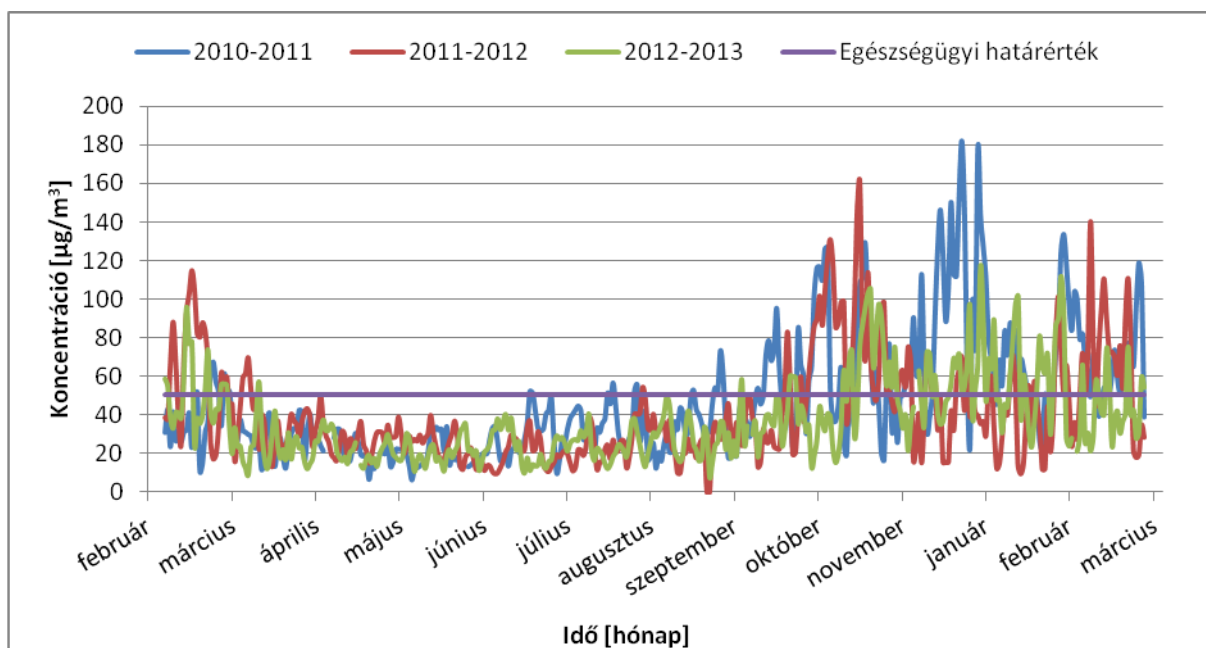
43. ábra Miskolc napi SO_2 koncentrációja 2012. 03. - 2013. 03 (32)

A PM_{10} értékek viszont határozottan alacsonyabbak. Míg 2010 - 2011-ben a decemberi időszakban akár $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ is volt (36. ábra), 2012 - 2013-ban a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t sem érte el (44. ábra). Ez előremutató jelenség lehet, de függ az adott időszakra jellemző hőmérséklettől, fűtési hajlandóságtól vagy akár a tüzelés módjától, tüzelőanyag fajtájának megválasztásától a reprezentatív területen.



44. ábra Miskolc napi PM_{10} koncentrációja 2012. 03. - 2013. 03 (32)

A 45. ábrán láthatjuk összehasonlítva három év PM_{10} értékeit az M4 mérőállomás adatai alapján. Valóban egyre csökkenő tendenciát mutatnak a por, aeroszol volumenek, kisebb megingásokkal. 2011 - 2012 esetében eltolódott a fűtési szezon február-március időszakokra is. 2010 - 2011 kiemelkedő az azt követő évekhez képest. A legutóbbi időszak egy stabilabb, alacsony szintet mutat, nincsenek óriási kilengések, noha az egészségügyi határértéket így is sokszor meghaladták a koncentrációk.



45. ábra A PM_{10} értékek több évi összehasonlítása (32)

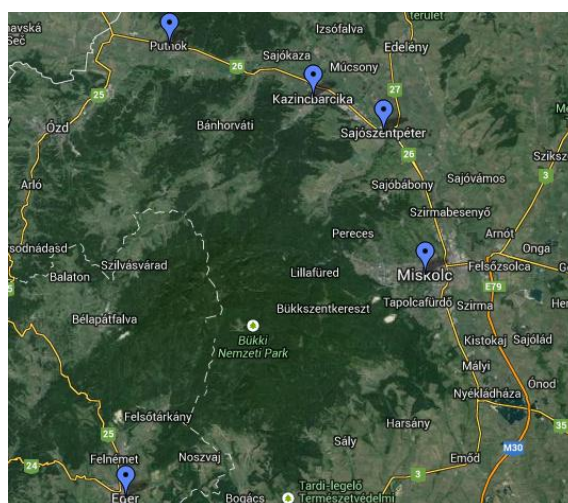
5.2 Sajó völgye PM_{10} koncentrációja

Az ÉMI-KTVF feladata az önkormányzat tájékoztatása a levegőminőségről. A 8. táblázat magába foglalja a PM_{10} koncentrációjára vonatkozó egészségügyi határértéket, a tájékoztatási és riasztási küszöbértéket. Ezen értékek meghaladása esetén beszélhetünk szmogról. Dolgozatomhoz mellékeltem az általam készített riasztási mátrixot, mely magába foglalja a 2008. 11-től 2003. 02-ig

Miskolc Önkormányzatnak küldött tájékoztatási és riasztási napokat. Ez segítheti a kritikus időszakok áttekintését. Az elmúlt majd 5 évre visszamenőleg csak a Sajó- völgyben (Putnok, Kazincbarcika, Sajószentpéter, Miskolc) és Egerben lévő állomásokon mértek tájékoztatási küszöbértéknél nagyobb értékeket. Ezek elhelyezkedését a 46. ábrán láthatjuk.

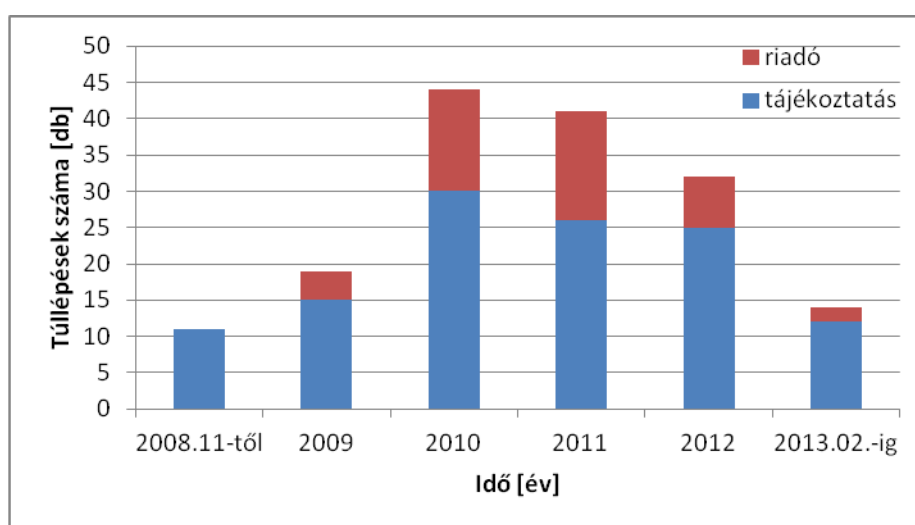
8. táblázat A PM₁₀ határ és küszöbértékei

Egészségügyi határérték		Tájékoztatási küszöbérték	Riasztási küszöbérték
24 órás	éves	24 órás	24 órás
50 µg/m ³ a naptári év alatt 35-nél többször nem léphető túl	40 µg/m ³	75 µg/m ³ két egymást követő napon és a meteorológiai előrejelzések szerint a következő napon javulás nem várható	100 µg/m ³ két egymást követő napon és a meteorológiai előrejelzések szerint a következő napon javulás nem várható



46. ábra A tájékoztatási küszöbértéket túllépett települések (33)

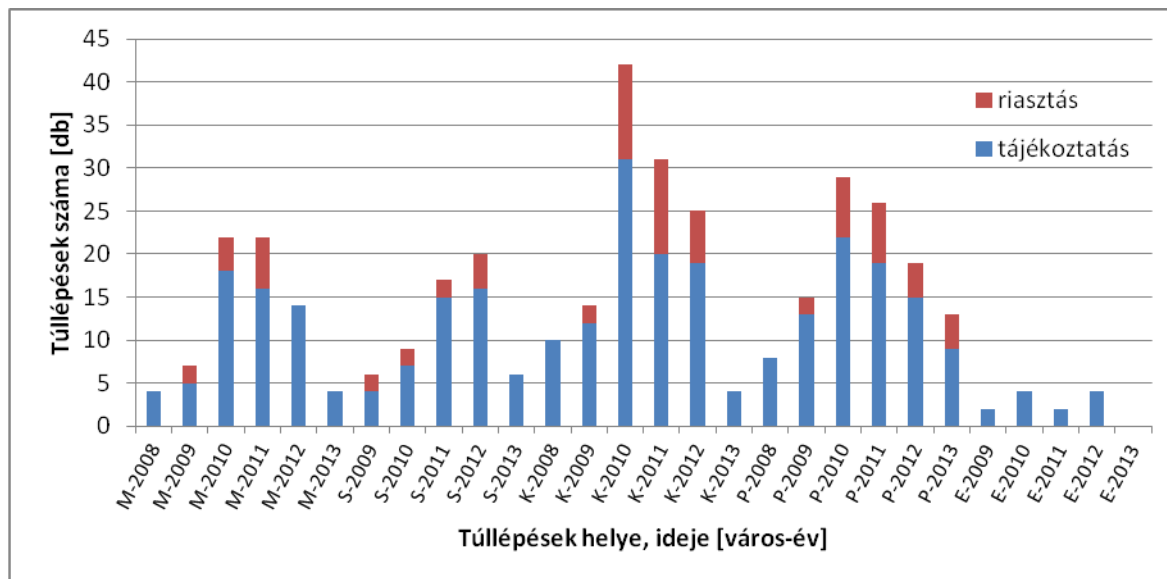
A 47. ábra a küszöbértékek túllépését jeleníti meg 2008. 11-től 2013. 02-ig. Erre az időszakra álltak rendelkezésemre adatok.



47. ábra Küszöbérték túllépések száma összegezve az adott évre

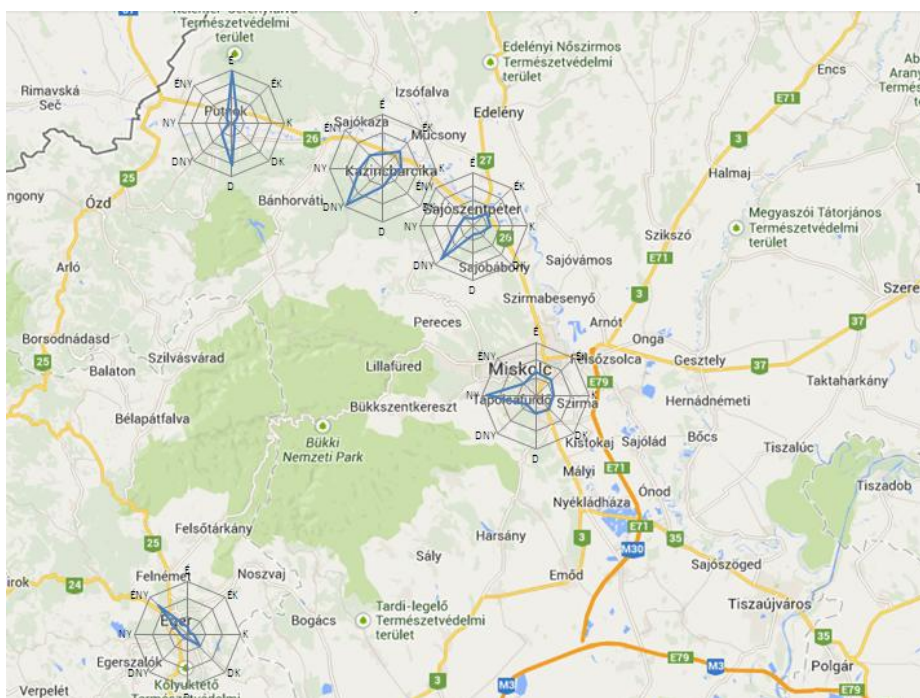
2010-ben volt a legtöbb túllépés, de 2011-ben volt a legtöbb riasztási helyzet. A tendencia mégis látható, az évek elteltével egyre csökkentek a túllépések. A 2008-as és 2003-as adatok nem teljesek.

A 48. ábra településekre lebontva ábrázolja ezeket a túllépéseket. Kazincbarcikán a legkiemelkedőbbek a számok, valamint Putnokon, de a 2010-től csökkenő tendencia itt is megfigyelhető.

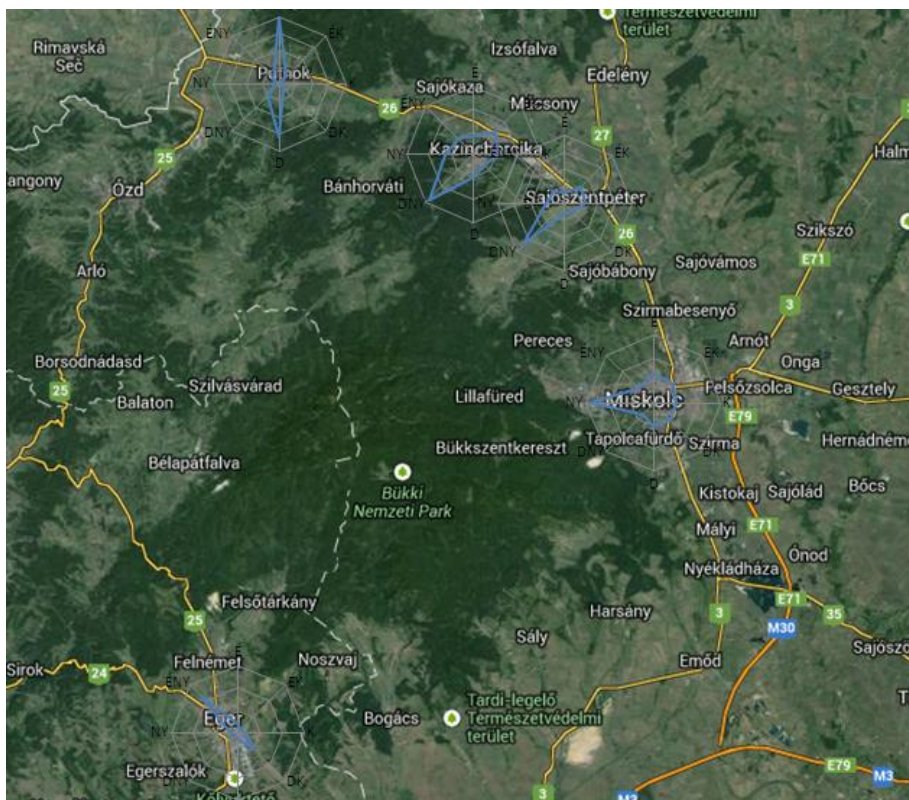


48. ábra Küszöbérték túllépések száma településekre és évekre lebontva

A Sajó-völgyi települések láncolatot alkotnak, hiszen domborzatuk, időjárási viszonyaik nagyon hasonlóak. A településeken lévő mérőállomások széladataiból meghatároztam az átlagos szélirányokat. Ezek alapján mégsem állíthatjuk, hogy a szél hatására egymás területét szennyezik, hiszen a szélirányok főleg a közelükben lévő völgyekre mutatnak (49. ábra). Nagyobb jelentősége van a domborzati viszonyoknak, illetve a fűtési időszakra jellemző szilárd tüzelésnek. A völgyek mentén csak vertikális irányba tud haladni a légköri szennyeződés (50. ábra).



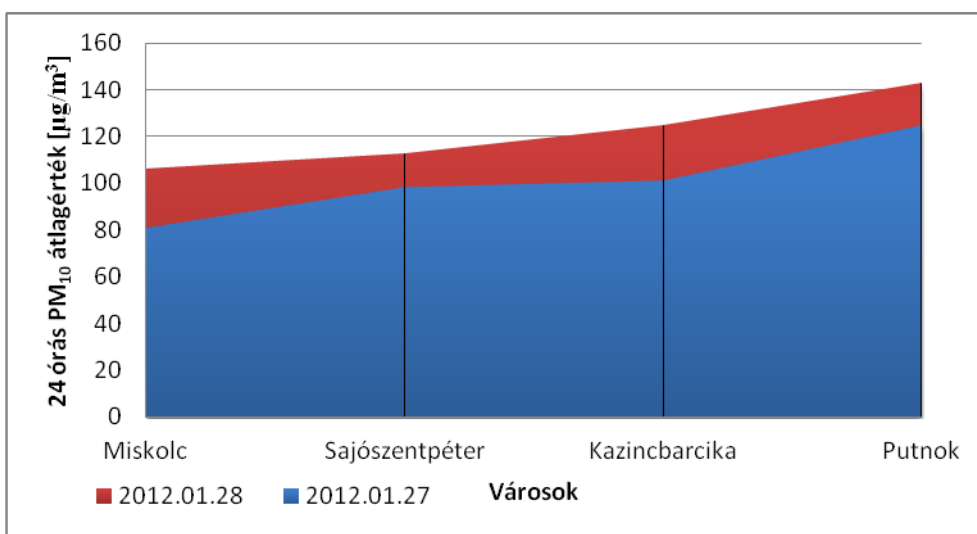
49. ábra Mérőállomások átlagos szélirány eloszlása 2012. 01 - 2013. 03.



50. ábra Mérőállomások átlagos szélirány eloszlása 2012. 01 - 2013. 03. domborzati térképen

A szmog kialakulásában másik jelentős szerepet játszó tényező az inverzió, melynek létrejöttében is közre játszanak a domborzati viszonyok. Ennek a tényezőnek az ismerete hiányos, a térségre vonatkozó jellemző mérések nem történtek.

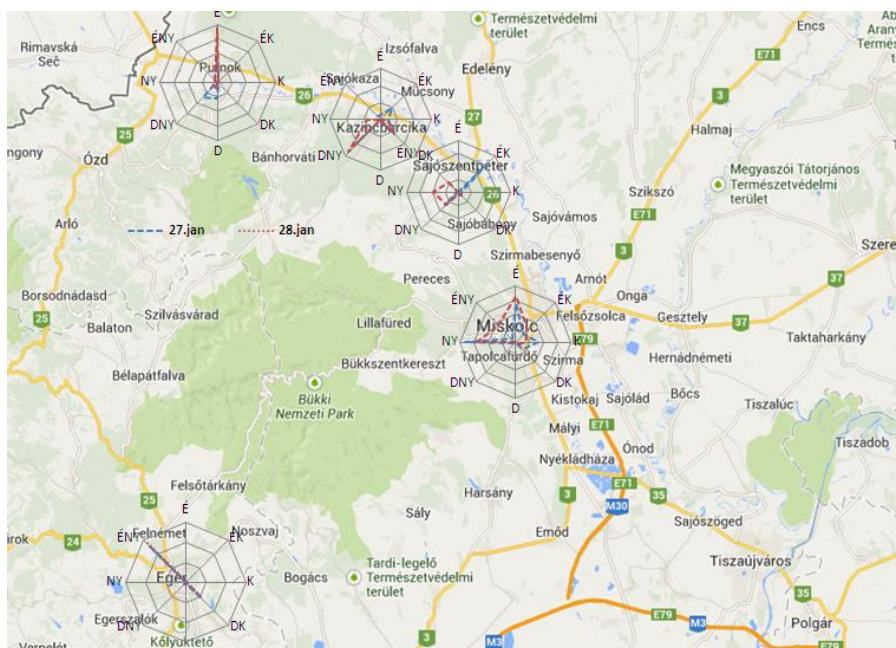
Szmosos időszakokban vizsgáltam, hogy van-e valamilyen tendencia a völgyben. 2012. 01. 27 és 28-án találtam is ilyet (51. ábra). A szálló részecske koncentráció emelkedésének iránya egyértelmű, köszönhetően a kialakult helyi időjárási viszonyoknak (52. ábra). A két nap átlagos szélirányait is megvizsgáltam (53. ábra), de ezek az éves átlaghoz hasonló eredményt adtak, vagyis nem a szennyezők vándorlásáról, hanem a helyi felhalmozódásáról van szó.



51. ábra PM₁₀ értékek 2012. 01. 27 - 28. között (32)



52. ábra PM₁₀ értékek 2012. 01. 27 - 28. között térképre vetítve



53. ábra Mérőállomások átlagos szélirány eloszlása 2012. 01. 27 - 28. napokon

A szmoghelyzetek egy-egy városra jellemzők, melyeket befolyásol az ott kibocsátott szennyezés mértéke, a domborzati és időjárási viszonyok. Ilyenkor, a szélcsendes időnek köszönhetően, mint egy-egy bura telepszik rá a szmog a völgy városaira. Ahogy az inverzió emelkedik és beindul a keveredés, ez szép lassan eloszlik, de a völgy hatása ezt nem segíti elő, így több napos szmogos időszakokra is van példa.

5.3 Ázsiai extrém esetek

Mint korábban már említettem, jelenleg Kína a legnagyobb légszennyező kibocsátó, így ott okozza a legkomolyabb gondot a szmog. Az erőltetett ipari fejlődés folyamatosan nagy és egyre növekvő szálló por koncentrációt okoz, aminek hatása már érezhető is. Idén februárban egy szmogos időszakot követően a pekingi kórházakban 20%-kal nőtt a légzőszervi panaszokkal érkező betegek száma (36). De nem csak a fővárost érinti a fokozódó szennyezés, Kína egész területén találhatunk, ún. rák falukat, ahol kiemelkedően magas a légköri szennyezettség, de a folyók vizét sem kíméli a nagy kibocsátás. (37). Az 54. ábrán láthatjuk az idén márciusban a mérő állomásokon mért $PM_{2.5}$ -ös értékeit.



54. ábra Ázsiai $PM_{2.5}$ érték 2013.03.20. 17:19 (38)
(növekvő színskála: zöld-sárga-piros-lila-bordó)

Az indiai Új-Delhiben mért $300 \mu g/m^3$ -t már a veszélyes kategóriába sorolják, de a piros és lila színek mutatják, hogy Kínában is sok esetben egészségtelen a levegő.

6 A légköri inverzió mérése

A 4-5. fejezetben megismerhettük Miskolc és a Sajó-völgye szmoghelyzetét, mely azt mutatja, hogy a kedvezőtlen domborzati viszonyok és a lakossági szilárd tüzelésű fűtési rendszerek a legjelentősebb okok. A domborzat horizontális irányban egyhelyben tartja a légréteget, a szennyezőkben gazdag tüzelés pedig növeli a szennyező koncentrációt. A légköri inverzió viszont a harmadik, mely mindezt vertikális irányban sem engedi eltávozni. A fűtés korszerűsítésére van lehetőség, de ezt az egyes háztartásoknak kéne megoldaniuk, a domborzat megváltoztatására pedig nincs lehetőség. A légköri inverzió már régóta ismert, kialakulásának megakadályozása nem lehetséges. Viszont, ha valamely módon egy átjárót biztosítunk az alatta és felette lévő hidegebb légréteg között, akkor lehetséges lenne a szennyező anyagok magasabb légkörbe juttatása. Erre irányuló kutatás jelenleg is folyik a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Karán, a lehetséges megoldás szabadalmi eljárása meg is kezdődött. Az inverziós réteg áttörését egy kürtő segítségével oldják meg, melyben áramlást indukálnak, így kiszellőztetve az alsóbb réteget. Ehhez feltétlen szükség van az inverziós réteg helyzetének pontos ismeretére, hiszen tudnunk kell, hogy a kürtőt milyen magasságba kell feljuttatni és mekkora réteget kell áthidalnia. (39) A hatékony működtetéshez egy bárhol elvégezhető és olcsó mérésre van szükség. Láthattuk, hogy a rádiószondák és mérőtornyok mérik az inverziót, de vagy

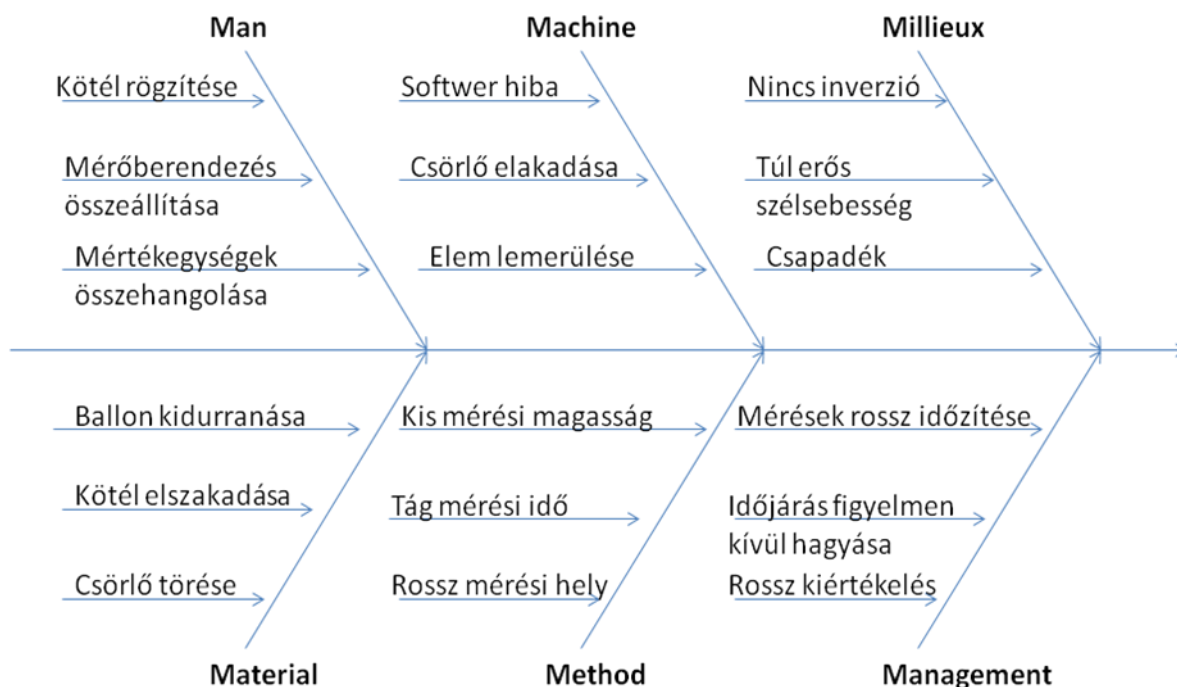
nem szolgáltatnak elegendő információt, vagy nem mozgathatók. A méréseket Nemes Alex, junior kutatóval együttműködve végeztem.

6.1 Mérési módszer

A légköri inverzió kimutatásának legegyszerűbb módja, ha vertikális irányú hőmérséklet profilt veszünk föl. Tehát szükségünk van a magasság és hőmérséklet változásának regisztrálására. Ehhez az egyik legkorábbi mérési módszert alkalmazzuk, a kornak megfelelő modern műszerekkel kombinálva. A módszer lényege, hogy egy ballon segítségével juttatjuk fel a mérő és regisztráló műszert. Ellentétben a magaslégköri mérő ballonokkal, mi az egész szerkezetet a felbocsátás után visszahúzzuk, a rögzített adatokat elmentjük, majd akár rögtön egy következő mérést is indíthatunk.

6.2 Előzetes hibaanalízis

A mérési módszer tervezése során előzetes hibaanalízist végeztem. Ishikawa, vagy halszájka diagram segítségével összegyűjtöttem a lehetséges hibákat, melyek a mérések sikertelenségét okozhatják. A 6M (Man, Machine, Millieux, Material, Method, Management) megközelítést választottam (55. ábra). A hibák magukért beszélnek, közülük csak néhányat emelnék ki. Az első esemény, ami meg is történt, a ballon kidurranása, mely emberi hibának is betudható, egy próbamérést követően a ballont rögzítettük egy háztetőn. Ez nem bizonyult elég biztonságosnak, az éjszakai szélnek köszönhető sok ütdést nem bírta a ballon fala és elszakadt. A mérés időtartama fontos, hiszen az adatrögzítő korlátozott kapacitású. A ballon nem irányítható, ha már magasan jár, így erős szél esetén az egész mérés lehetetlen (nem száll fel elég magasra a ballon, veszélyes környezetére). A csapadék a mérőberendezésnek árthat, bár igyekeztünk a szigetelést legalább minimális módon megoldani. Az üzemeltető elem töltöttségét a műszer figyeli, és ugyancsak rögzíti, így mérések után ezt is ellenőrizni kell.



55. ábra A mérés Ishikawa diagramja

6.3 Eszközök kiválasztása

Az eszközök kiválasztást a mérés költséghatékonysága, mozgathatósága és a projekt anyagi lehetőségei szabták meg.

6.3.1 Emelő szerkezet

Az emelési erőt a levegőnél könnyebb gázzal töltött ballon biztosítja. Egy 3 méter átmérőjűre esett a választás, fala PVC, mely elég strapabíró. A gáz kiválasztásánál szempont volt a költséghatékonyság, így H_2 gáz a töltő gáz, melynek emelési ereje 8,3 kg, ami majdnem egyenlő a He emelőerejével, költsége mégis hatoda annak (9. táblázat). Mivel ismerjük a H_2 gáz robbanás veszélyét, előzetes kísérleteket végeztünk H_2 -nel töltött ballon gyúlékonyságának vizsgálatára. Közvetlen láng esetében sem volt tapasztalható robbanás, a ballon anyagának kilyukadása után is hosszú időnek kellett eltelnie, míg a ballonban lévő gáz a lobbanási koncentrációra hígul. Így csak a ballon töltésekor kell különösen elővigyázatosnak lenni, nyílt láng használatát mellőzve dolgozni.

9. táblázat A He és H_2 gáz összehasonlítása

Tulajdonság	He	H_2
Sűrűség [kg/m^3]	0,178	0,18
Emelőerő [kg]	8,327	8,301
Palack (50 l) ára [Ft + Áfa]	37860	6630

6.3.2 Rögzítő szerkezet

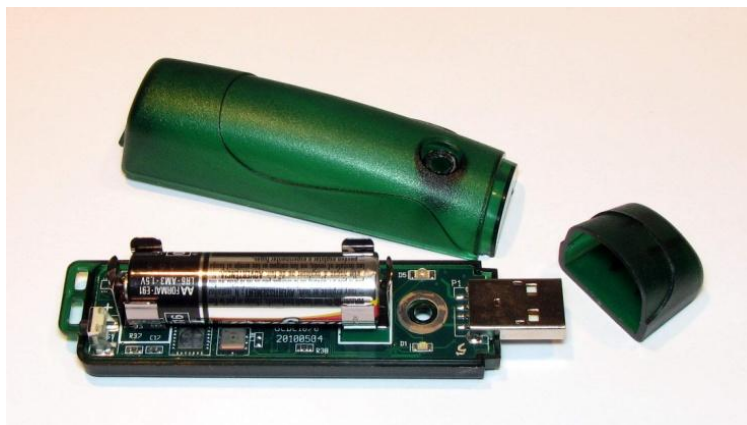
A ballont 6 mm átmérőjű kötéltre kötve engedték fel, melynek vége egy csörlőre van erősítve, így biztosíthattuk az egyenletes emelkedést. A csörlőre 200 méter kötelet erősítettünk így ennyi az elérhető maximális emelkedés. A csörlő egy erős állványzathoz van rögzítve, mely megtartja a ballont így nem kell félni attól, hogy az elszáll (56. ábra).



56. ábra A csörlő állványzattal és kötéllal

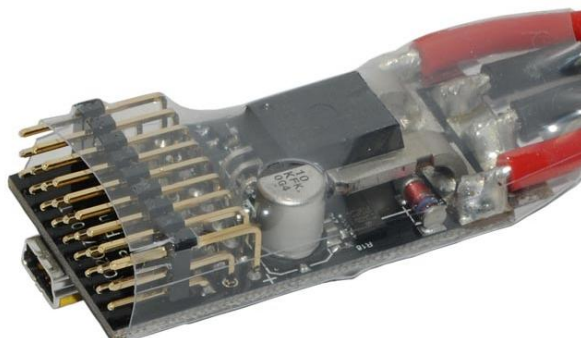
6.3.3 Mérő berendezés

A mérőberendezés kiválasztása során kipróbáltuk a Gulf Coast Data Concepts (GCDC) Barometric Pressure USB Data logger B1100-1 (57. ábra) készüléket. A magasság meghatározására nyomásmérő van elhelyezve benne, valamint egy hőmérsékletmérő szenzor. Hosszú távú és külső adatrögzítésre ajánlják. Legrosszabb pontossága a nyomásmérésre tekintve ± 50 Pa, hőmérsékletmérésre pedig ± 1 °C.

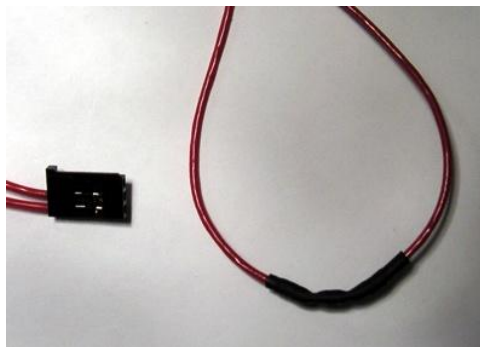
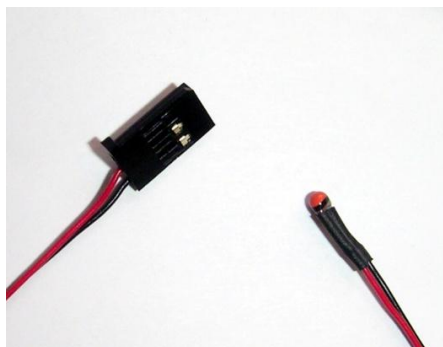


57. ábra GCDC mérőműszer (40)

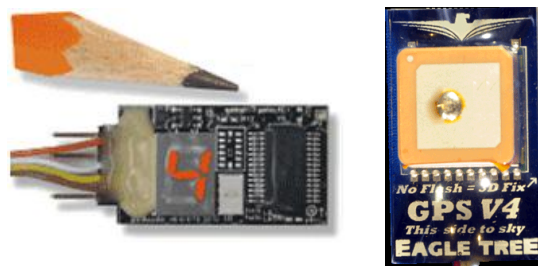
A másik kipróbált mérőberendezés az Eagle Tree - eLogger V4 (58. ábra), melyet - többek közt - repülőgép szimulátorok repülési adatainak rögzítésére fejlesztettek ki. Ez közelebb áll mérési módszerünk által felállított feltételekhez. Több modulból épül fel. A microchip alap tartalmazza a rögzítő egységet, valamint az USB kimenetet. Ezen kívül ide csatlakoztatjuk a hőmérséklet szenzorokat (59. ábra), a barometrikus magasságmérőt, a GPS meghatározót (60. ábra) valamint a tápfeszültséget. Az alap és táp tömege körülbelül 47 gramm. Két hőmérséklet szenzort is csatlakoztattunk, a Temp-Micro 120 °C-ig, míg a Temp-Loop 215 °C-ig mér. A GPS 10 Hz-es frissítéssel működik a gyors helymeghatározás érdekében. A barometrikus magasságmérő pontossága kb. $\pm 0,3$ méter. A GPS segítségével is hasonló pontosságot érhetünk el.



58. ábra Az e-logger V4 mérőműszer alapja (41)

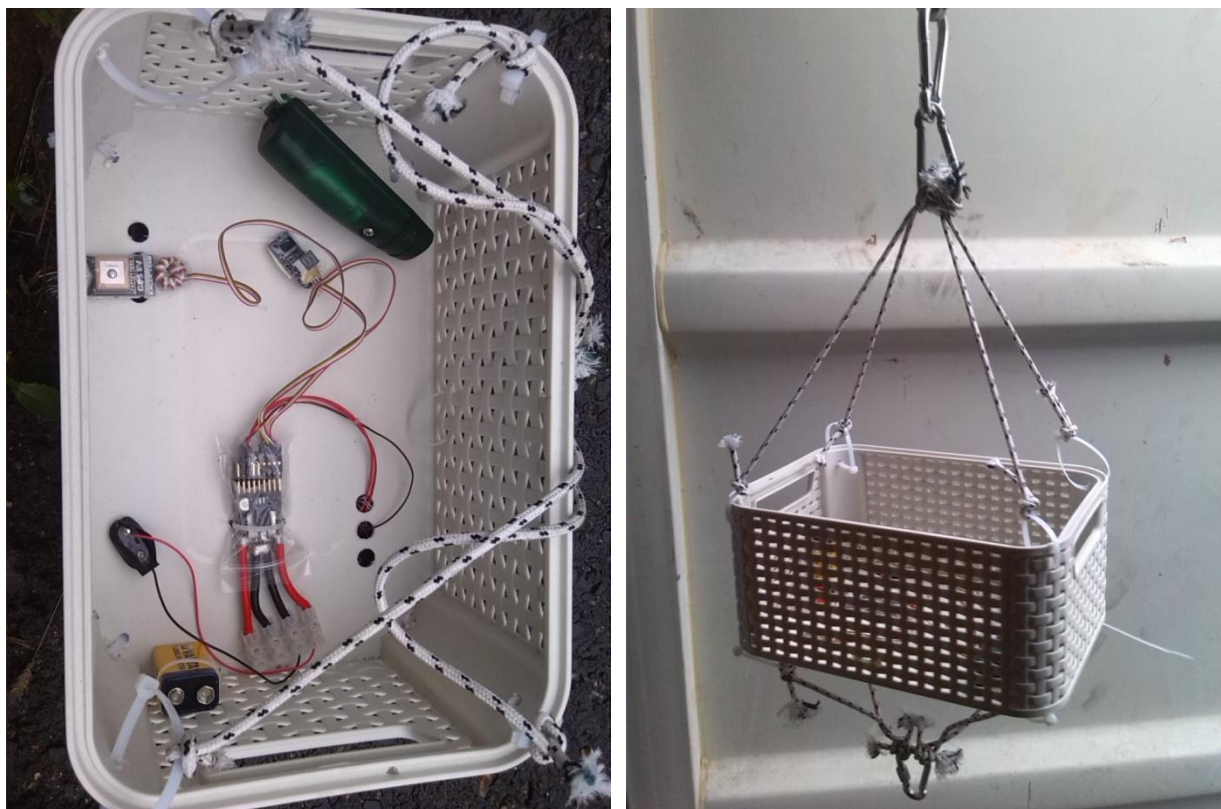


59. ábra Temp-Micro és Temp-Loop szenzor (41)



60. ábra Barometrikus magasságmérő és GPS érzékelő (41)

Az összes mérő berendezést és tartozékot egy kosárban rögzítjük és azt karabinerek segítségével a ballon aljához (61. ábra). A hőmérsékletmérő szenzorokat a kosár alján helyeztük el, érzékelőjükkkel a földfelszín felé irányítva. A microchipen megtartottuk a műanyag borítást a nagyobb vízállóság érdekében.



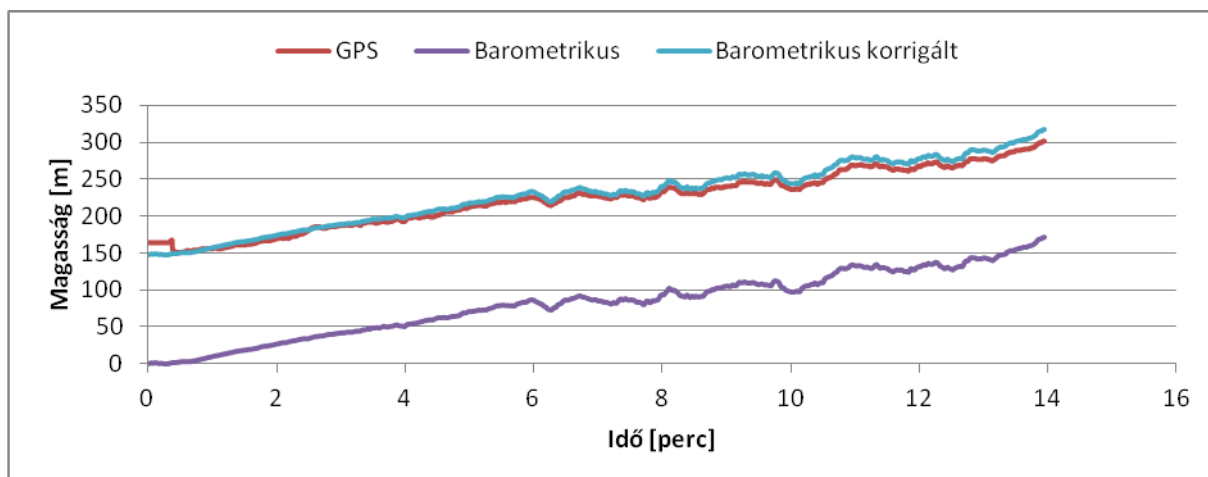
61. ábra A berendezéseket tartó kosár

6.4 Érzékelők matematikai statisztikai ellenőrzése

Mivel a magasságot és a hőmérsékletet is két érzékelő segítségével mérjük, ezek összehasonlítása némi támaszt ad mérésünk hitelességét tekintve. 2013. 01. 24-én tesztmérést végeztünk a Miskolci Egyetem tetőteraszán, nem H_2 , hanem az akkor elérhető, He gázzal töltött ballonnal. Mint látható majd inverziót nem mértünk, de a további éles mérések előtt így módon vizsgálhattuk a berendezést. A GCDC mérőműszer hőmérséklet érzékelője megbízhatatlannak bizonyult, így ennek eredményeit a továbbiakban nem vizsgálom. Csak az e-logger V4 mérési eredményeire támaszkodunk, de a dupla érzékelők segítségével vizsgálhatjuk a mérést.

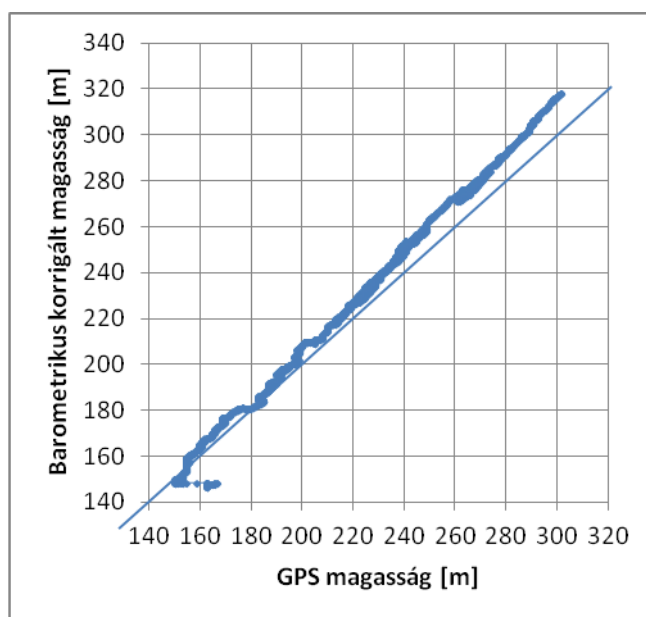
6.4.1 Magasságmérés

A GPS és a barometrikus magasságmérő hasonló pontatlansággal működik. Additív módszeres hibát tapasztalhatunk a két mérés között, köszönhetően annak, hogy a GPS a tengerszint feletti magasságot érzékeli és rögzíti, míg a barometrikus érzékelő 0 méternek tekinti a bekapcsolásakor aktuális magasságot, és a nyomás változását regisztrálja, majd abból számítja az emelkedést. A 62. ábra a mért eredményeket ábrázolja. Láthatjuk, hogy a barometrikus mérés 0 méterről indul. Ezt korrigáltam 147 méterrel, figyelembe véve, hogy a GPS meghatározónak időre volt szüksége, hogy megtalálja a műholdakat, és így kb. fél percre volt szüksége a valós adatok szolgáltatásához.



62. ábra Magasságmérés tesztelési eredményei

A könnyebb átláthatóság érdekében csak az emelkedést figyeltem. Jól látható, hogy míg egyenletes az emelkedés, a két görbe kis zajjal, de együtt emelkedik. Majd a 6. perc elteltével van egy kis visszaesés, ez valószínűleg egy szélleökés következménye volt, hiszen a kötelet igyekeztünk egyenletesen engedni. Itt már van egy kis eltérés, majd ez fokozatosan nő. A nyomásmérő bizonytalanságát nagyobbra becsülöm, mert a magasságot a nyomás alapján számolja, mely elméletileg lineárisan változik a magasság emelkedésével, de az időjárás szeszélyességét nehezen lehet belekalkulálni egy képletbe.



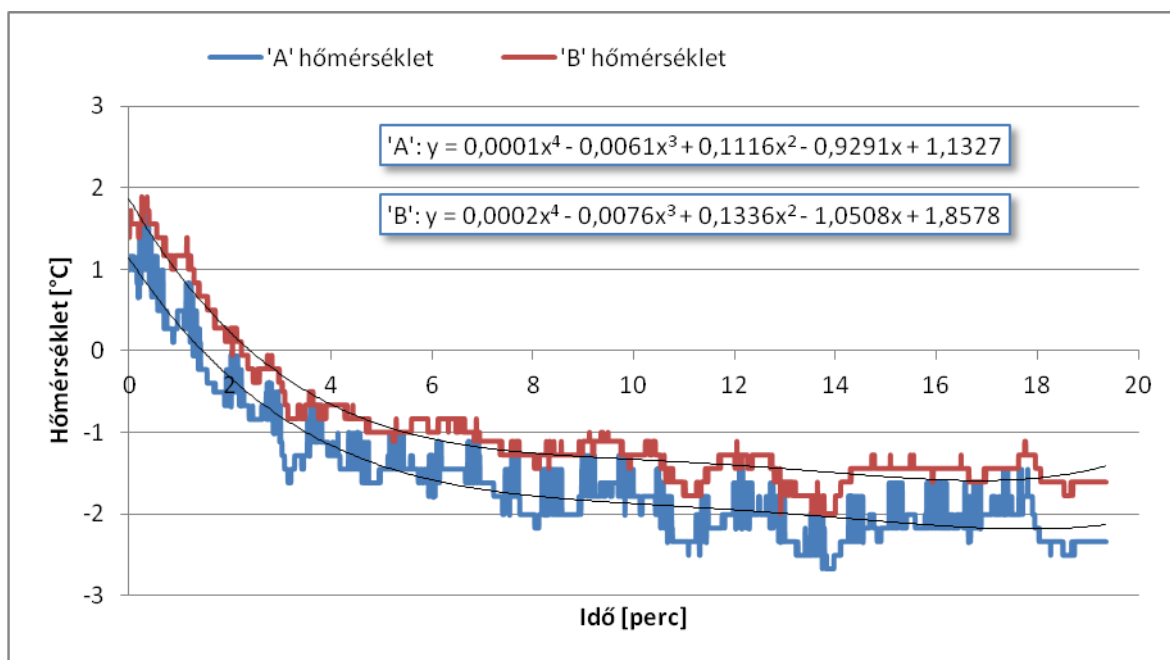
63. ábra A két módszer összehasonlítása

Ez a görbe végén kinyíló eltérés nehezen korrigálható, hiszen a mérőberendezés már a kiszámolt méter dimenziójú magasságot rögzíti és nem a nyomást, így a további korrekció csak bonyolítaná a mérés kiértékelését. A 63. ábra a két módszer mért adatait jeleníti meg egy diagramon. A hibamentes görbe egy 45°-os egyenes lenne. Itt láthatjuk a GPS első kb. fél perces gondolkodását, majd az egyenes egészen közelít a 45°-hoz. Kisebb eltérések vannak, ez a két módszer eltérő érzékenységből adódik, a GPS gyorsabban reagál a változásokra, majd az emelkedés végén, ahogy már a 62. ábra is mutatta, kinyílik a görbe.

Mindkét módszernek megvannak a maga gyengeségei, de az elsődleges eredményként a GPS adatokat tekintem, figyelmen kívül hagyva, amíg beáll a megfelelő műholdakra. Erre külön figyelmet kell fordítani az éles mérések során.

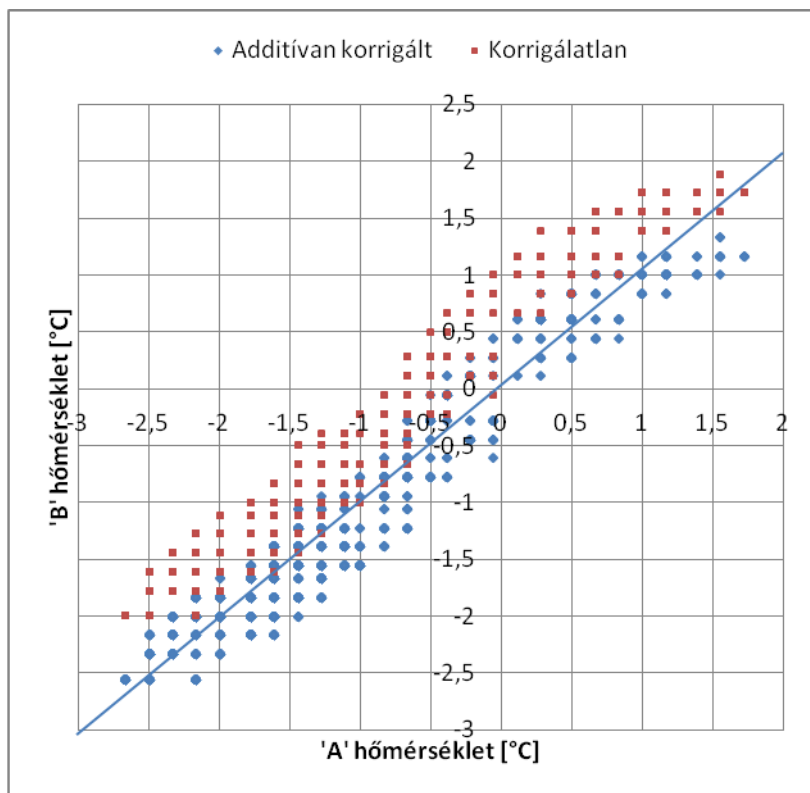
6.4.2 Hőmérsékletmérés

Hasonlóan a magasságméréshez, itt is két mérési eredményünk van, melyek módszere azonos, de értékeiben különböző. A 64. ábra ábrázolja a mért eredményeket, valamint a rájuk illeszthető görbéket. Ezek a trendvonalak 4. hatványú polinomok lettek. Szépen követik egymást, egy additív hiba itt is megjelenik mely átlagosan 0,5568 °C. Ahhoz, hogy megállapítsuk, melyik tér el jobban a valós értéktől, egy referencia hőmérsékletmérésre van szükségünk. Első megközelítésben a két érték átlagát vehetjük értékelhető eredménynek, hiszen lefutásuk nagyon hasonló.



64. ábra Hőmérsékletmérés tesztelési eredményei

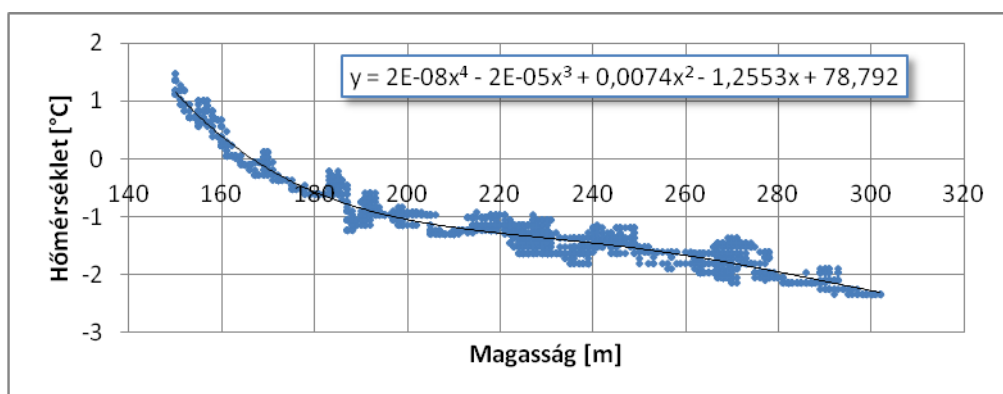
A 65. ábra mutatja a két szenzor által mért érték összehasonlítását. Itt is a 45°-os egyenes lenne a hibamentes mérés. Pirossal a korrigálatlan, kékkel a korrigált ('B' - 0,5569 °C) értékek kapcsolata látható. Talán egy kicsit túl is lett korrigálva, hiszen az ideális egyenes alatt több kék pont van, mint felette. Ezért érdemes lehet csökkenteni azt. A + 1 - 1,5 °C körül van egy kis elhajlás, de ez betudható a mérés kezdetének, amíg a szenzorok felvették a környezeti hőmérsékletet. Így nem csak a GPS miatt, hanem a hőmérséklet szenzorok beállításához is érdemes a műszerek beindítása és az éles mérés előtt várni egy percet.



65. ábra Két hőmérséklet szenzor összehasonlítása

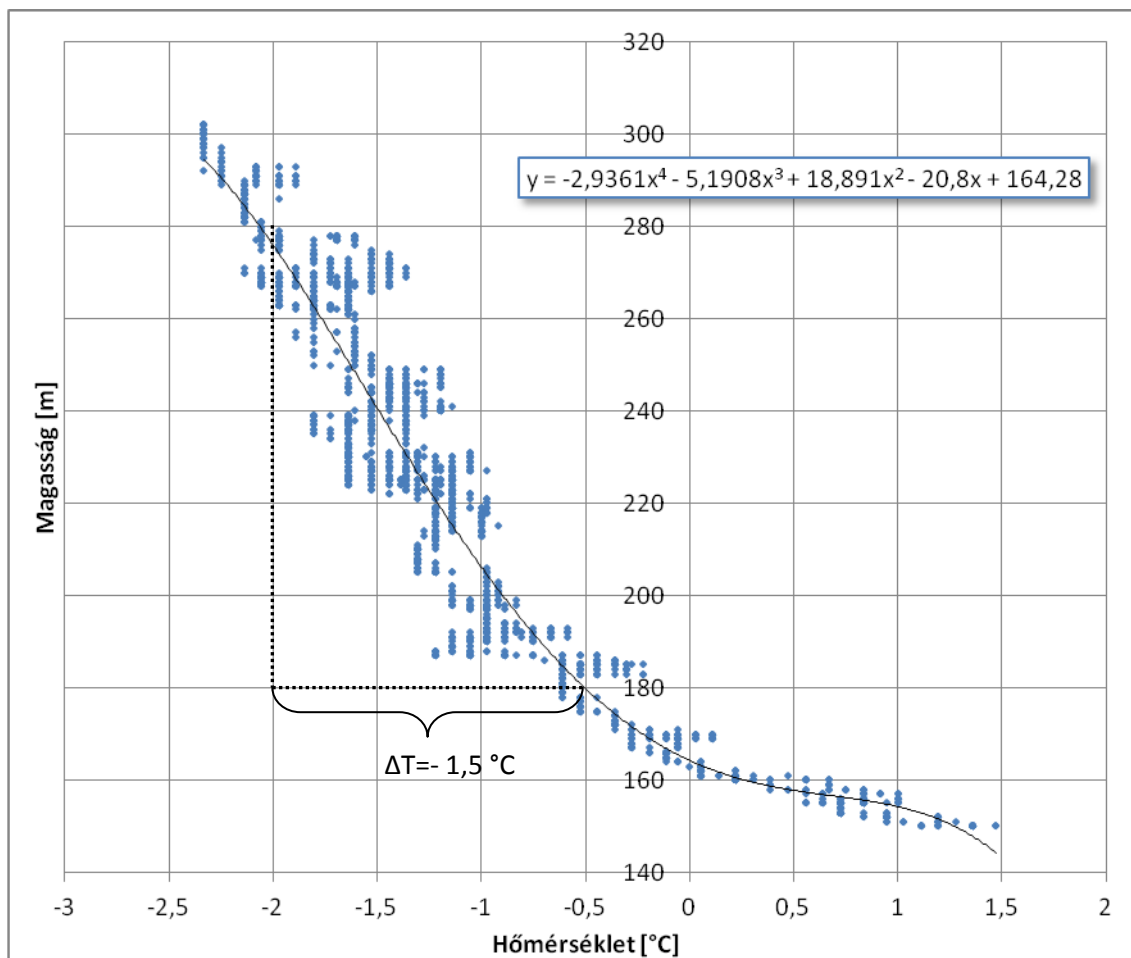
6.4.3 Magasság és hőmérséklet

A mérés célja hogy egy jól látható hőmérséklet profilt kapjunk a magasság függvényében. A teszt mérés adatai alapján egy csökkenő hőmérsékletet mutat. A magasság és hőmérséklet kapcsolatának vizsgálatakor a GPS magassági adatokat és a két hőmérsékletérzékelő adatainak átlagát vettem figyelembe, ügyelve arra, hogy a kezdeti 0,5 perc, míg az érzékelők beállnak, ne legyen ábrázolva. A 66. ábrán látható profilra polinomot illesztettünk.



66. ábra Magasság a hőmérsékletváltozás függvényében

A 67. ábrán a magasság az y tengelyre került, az adatokra polinomot illesztettem. Itt jobban láthatjuk a két szakasz elkülönülését. Van egy kezdeti, lassan emelkedő rész, ezt 62. ábra alapján tudhatjuk, hogy itt egyenletes volt a ballon emelkedése, egy adott magassági szint körül kisebb szórás is mutatkozik.



67. ábra Hőmérséklet a magasságváltozás függvényében

A lassú görbeemelkedés gyors hőmérséklet csökkenést jelen, hiszen majd 20 méter alatt 1,5 °C-ot is csökken a hőmérséklet. Az 170. métertől kezdve viszont gyorsan és egyenletesen emelkedik a polinom görbéje, de a szakirodalomból ismert 0,65 °C/100 m-es hőmérséklet csökkenéstől eltérően kb. 1,5 °C/100 m-es a változás. Nagy szórása van viszont az értékeknek egy adott magasságban, akár $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ is, mely eredhet az érzékelők pontatlanságából, a turbulencia okozta vertikális szélmozgásokból vagy a páratartalom érzékelőkre gyakorolt hatásától. Ezeket a tényezőket nem tudjuk kiküszöbölni, de nincs is szükség rá, hiszen a gradiens így is látható, végig csökkenést tapasztalhatunk haladva fölfelé a légkörben, vagyis inverzió nem volt a mért időpontban.

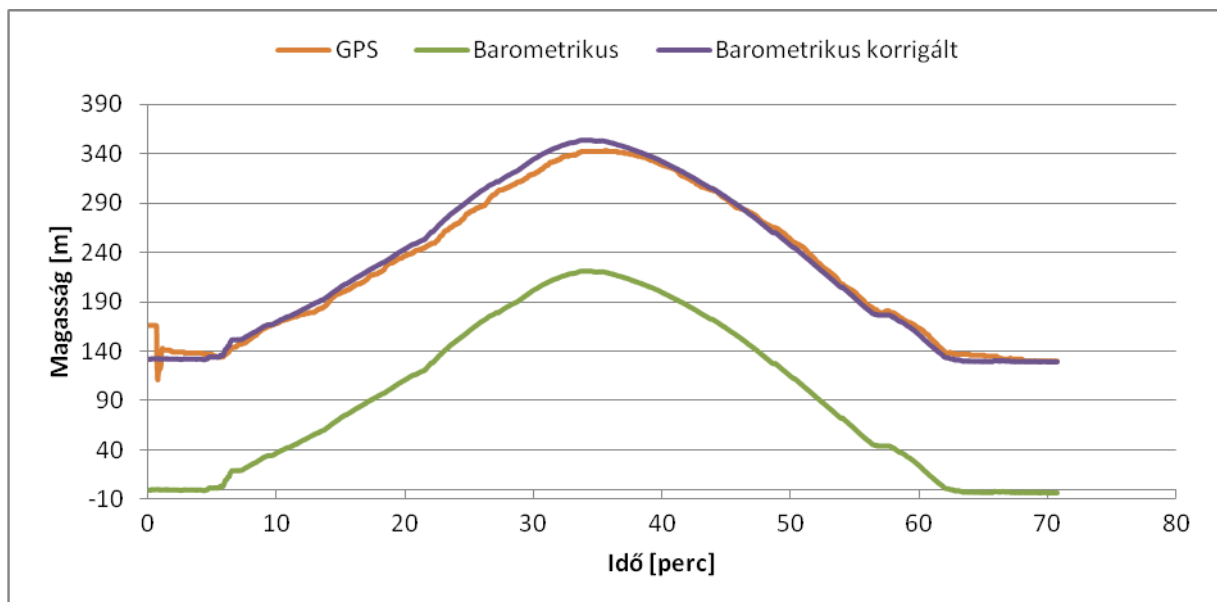
6.5 Mérési eredmények

2013. 11. 01-én hajnali 5:45-kor Nemes Alex segítségével végeztem mérést. Az időpontot az időjárási körülmények (száraz, szélcsendes) határozták meg. Ezen kívül a napfelkelte időpontja, ami az adott napon 6:22-kor volt. A ballon felengedése tehát még napfelkelte előtt kezdődött, a mérés teljes időtartama kb 70 perc volt, így a ballon visszahúzása már a napfelkeltébe nyúlt (68. ábra).



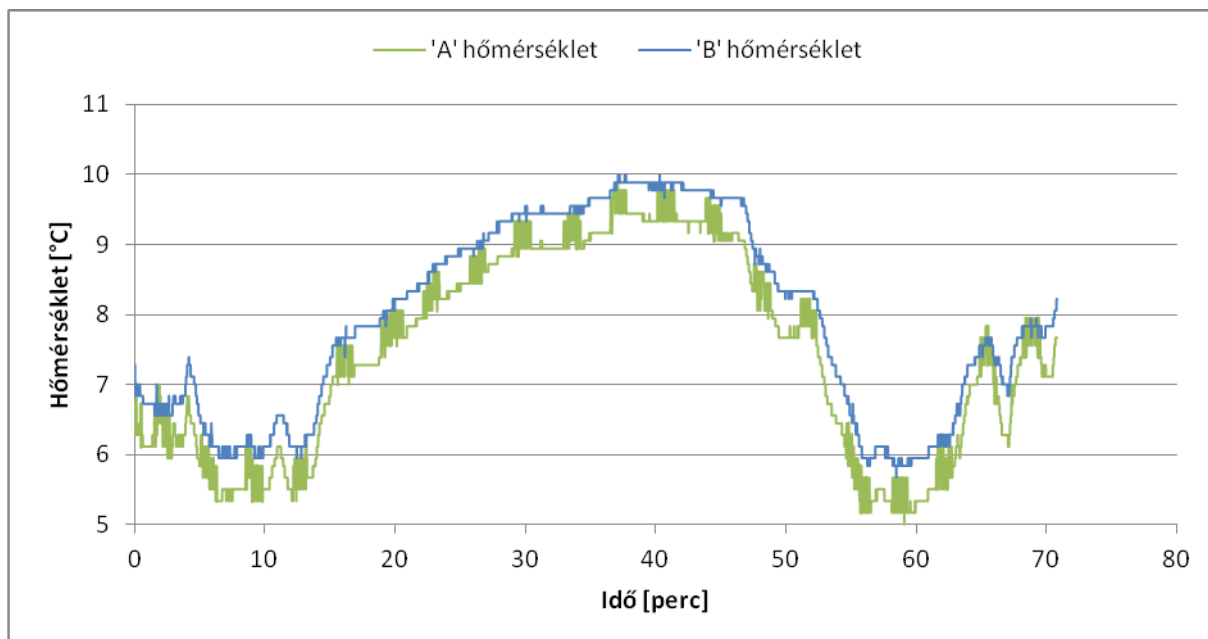
68. ábra A mérés kezdete és vége

A GPS és barometrikus magasság adatokat tartalmazza a 70. ábra. A megismert módon korrigáltam a barometrikus adatokat, de a korrekció bizonytalansága miatt inkább a GPS adatokat használtam a későbbiekben, annak ellenére, hogy az némiképp kisebb felbontást biztosít.



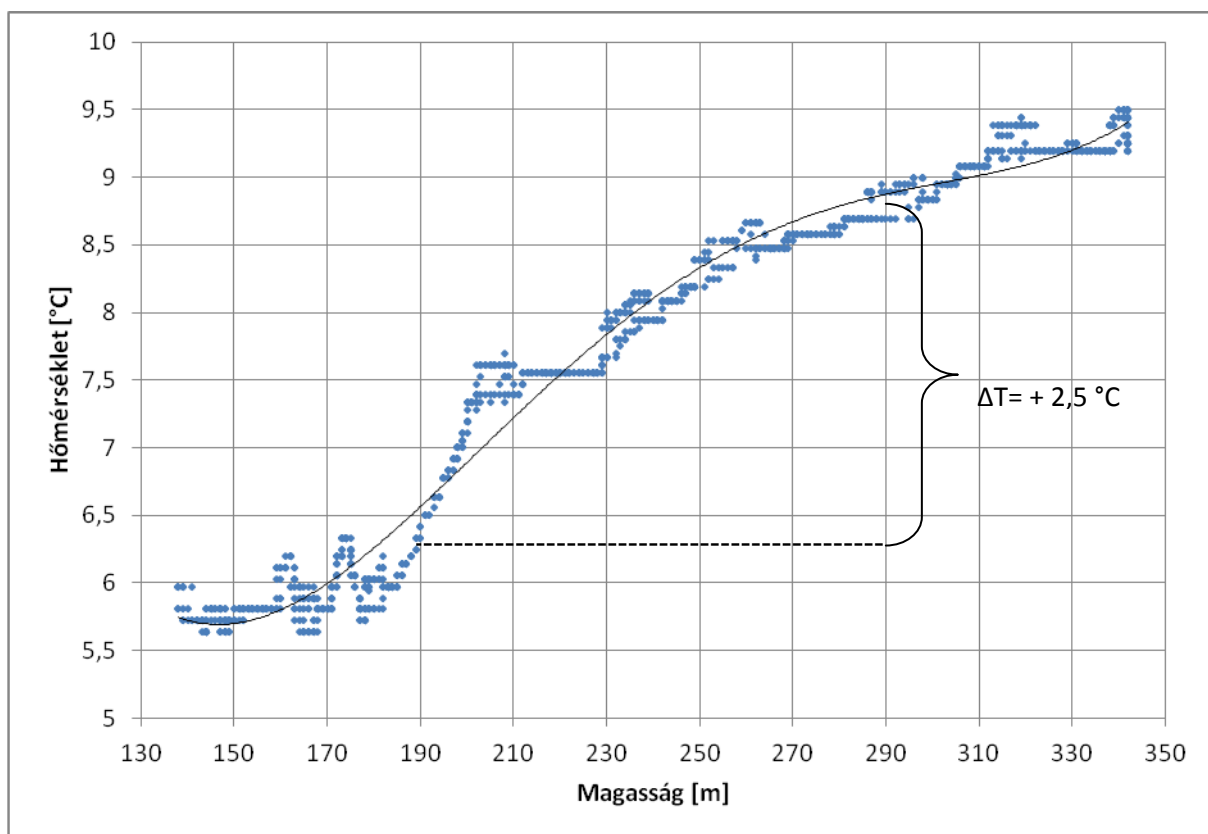
69. ábra Magasságmérés eredményei

A hőmérséklet szenzorok a megismert módon, kis eltéréssel mértek, átlagosan 0,45 °C-kal nagyobb a 'B' értéke (70. ábra). Az 'A' és 'B' hőmérsékletek átlagát használtam fel a későbbiekben.



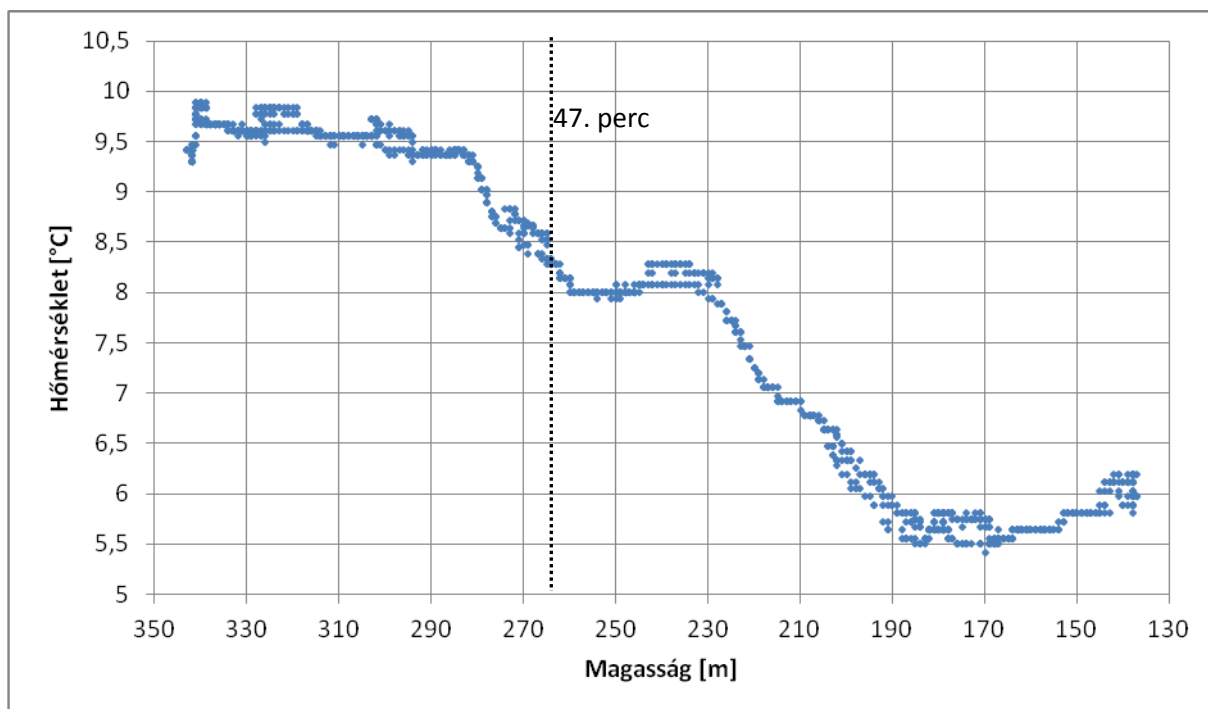
70. ábra Hőmérsékletmérés eredményei

A ballon teljes útját nyomon követhetjük, így a könnyebb átláthatóság kedvéért a hőmérséklet változásának a magasság függvényében való ábrázolását két részre bontottam. A 71. ábra az emelkedést, míg a 72. ábra a süllyedést mutatja. Nincs feltüntetve a teljes rögzített adatállomány, csak a számunkra értékelhető. Mindkét diagramon láthatjuk, hogy stabilis légrétegződés van jelen, vagyis a hőmérséklet nő a magasság növekedésével. Ez megfelel az éjszakai időszak légrétegződési profiljának. A középső, egyenletes szakaszra jellemző hőmérsékleti gradiens a $2,5\text{ °C}/100\text{ m}$ (71. ábra).



71. ábra Az emelkedés magasság-hőmérséklet függése

A ballon süllyedése közben kelt fel a nap, így ezt a periódust már befolyásolta a konvekció. A napfelkelte időpontja kb. a mérés 47. percében történt, ez azt jelenti, hogy a ballon süllyedésének majd felénél. Nem meglepő módon ez után az időpont után törést is szenved a görbénk (72. ábra)



72. ábra A süllyedés magasság-hőmérséklet függése

Mint láthatjuk, a mérés sikeres volt, sajnos több mérésre egyelőre nem volt lehetőség. Kutatásra fordítható összeghez képest egy ilyen mérés drága, de a korábban ismertetett módszerek közül ez a legolcsóbb eljárás az inverziós réteg kimérésére.

6.6 Jövőbeli tervek

A kísérletek igazolták, hogy a mérési módszer alkalmas az inverziós réteg meghatározására, így a későbbiekben lehet vele tervezni. A mérő berendezés megfelelőségét még át lehet gondolni, de a kis súly és rögzítő képesség tulajdonságai miatt nem indokolt a változtatás.

Fontos lenne a nap több időszakában is elvégezni a méréseket, hogy a megfelelő időpontban, időpontokban végezhesük az inverziókutatást. Például közvetlenül a napfelkelte után, azt követően egy órával, valamint a déli és délutáni valamint az naplemente előtti és az azt követő időszakban. Ezen kívül különböző helyszínek vizsgálata is a tervek között szerepel. A sűrűn lakott és kommunális, fatüzelésű fűtőberendezéssel működő házak között szabad szemmel is érzékelhetjük a szálló részecskék felgyülemelését, itt érdemes lenne mérni. Ezen kívül a Magas-hegy, Varga-hegy vonulatairól időnként szabad szemmel is látható a fűtőmű füstjének inverziós réteg alatt rekedése a Vasgyár területén. Itt a kéménymagasság segítségével egy közeli becslést adhatunk az inverzió magasságára, majd módszerünk segítségével akár mérhetjük is. A 73. ábra alapján például a 2011. 11. 10-ei talaj menti inverzió egészen 107-108 méterig terjedt ki. Érdemes megfigyelni, hogy a 20 méter magas kémények füstje teljesen az inverziós réteg alatt marad, a 75 méteresek füstje megemeli azt, a 150 méteres kémény füstje pedig szabadon távozik a magasabb légrétegekbe.



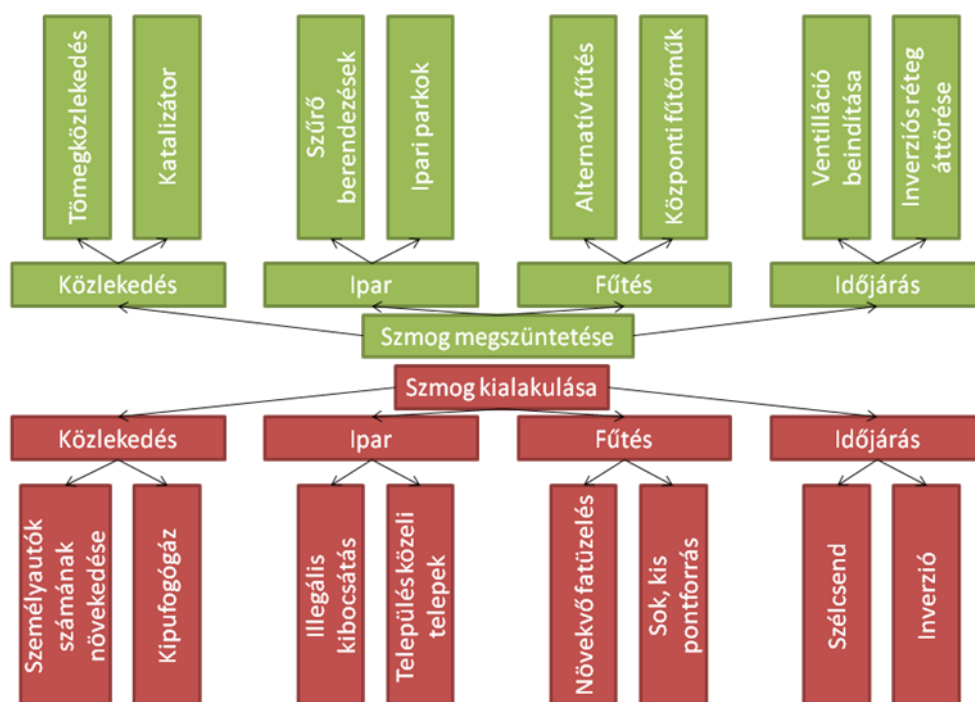
73. ábra Inverziós réteg Miskolcon, 2011. 11. 10-én reggel 6:10-kor a Miskolci Fűtőmű Kft. felett (42)

Ezen kívül, amennyiben elég alacsony az inverzió, a keveredési rétegvastagság meghatározására is módunk nyílik, hiszen tudhatjuk a Monin-Obukhov hosszt. Ehhez a földfelszín közeli súrlódási sebességet is meg kell határozni. A méréshez egy Festo anemométert használhatunk. Az irodalomban további egyenletek (43) is ismertek, melyek segítségével a már kialakult inverziós helyzet alakulását jósolhatjuk meg. Elegendő bemenő adat összegyűjtése esetén numerikus szimulációt is végezhetünk (44). Amíg ezek összegyűlnek, lehetőség van kísérleti labor munkákra, melyek során a légköri rétegződést, vagyis az inverziót modellezhetjük. A levegőt vízzel helyettesítjük, a hőmérséklet és ezáltal a koncentráció különbséget pedig só hozzáadagolásával és feloldásával szimuláljuk. Ezek után színezett vizet vezethetünk be a rendszerbe, szimulálva a szennyezőforrást (45). Az inverziós réteg áttörését pedig valamilyen cső behelyezésével segíthetjük, így vizsgálva, hogy milyen mértékben képes beindulni az áramlás. Hogy mindent láthassunk, plexiüveg tartályban végezzük a kísérletet, melyet folyamatosan rögzítünk, vagy megfelelő időközönként fényképezünk.

7 Összegzés

A szmog keletkezése összetett folyamat, melyben közrejátszik a természet változékonysága és az ember hatása a levegő szennyezettségére. Miskolc adottságai különösen alkalmasak a légszennyezők felhalmozódására, így fontos a lakosság szempontjából ennek megfigyelése. Amennyiben semmitsem teszünk a szmog leküzdésére, komoly egészségügyi problémák üthetik fel fejüket a jelen és a következő generációk körében. A 74. ábra jól összefoglalja a szmog kialakulásának okait, és ezek

leküzdésére irányuló lehetőségeket, ezáltal a szmog megszüntetésének módszereit. Jelen dolgozatban az inverziós réteg áttörésének egyik kiinduló vizsgálatát végeztem.



74. ábra A szmog kialakulása és megszüntetési lehetőségei

Az inverzió mérésének gyakorlati körülmények között költséghatékony és mobilis módját ismerhettük meg, mely hasznos és szükséges része az úgynevezett szmogkémián megvalósíthatósági vizsgálatának. Az inverzió magasságának meghatározása megadja a szükséges kéménymagasságot. A későbbiekben az inverzió mozgását, változását kívánjuk nyomon követni és az irodalomból ismert leírásokkal összehasonlítani. Hasznos lenne az inverziós réteg emelkedésének előrejelzése, ill. teljes felszívódása idejének becslése, így el lehetne dönteni, érdemes-e felállítani a kéményt. Ezzel együtt az alacsony keveredési rétegvastagság meghatározására is alkalmas mérési módszerünk.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani Dr. Palotás Árpád Bencének a kutatási lehetőségért, Nemes Alexnak a módszer kidolgozásában nyújtott segítségével és a közösen elvégzett mérésekért, valamint Dr. Szemmelveisz Tamásnének a szakmai segítségért.

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

8 Irodalomjegyzék

1. **MTI.** HVG.hu. [Online] 2013. 10. 17.
http://hvg.hu/egeszseg/20131017_Hivatalos_hogy_a_legszennyezés_rakkelto#rss.
2. **Merza, Ágnes; Szinell, Csaba.** Meteorológiai alapismeretek. [Online]
<http://www.fsz.bme.hu/mtsz/szakmai/tvok11.htm>.
3. **Pusztai, Borbála, Pusztai, Andrea és Dócs, Nikolett.** 4. TÉTEL. [Online]
http://weblaboratorium.hu/kornyezetvedelem/korny_termved/4.doc.
4. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0032_kornyezetvedelem/ch01s02.html.
[Online]
5. http://www.sze.hu/~buruzs/Kornyezetvedelem/4_Levego.pdf. [Online]
6. **Láng, I.** *Akadémiai lexikonok – Környezetvédelem*. Budapest : Akadémiai Kiadó, 2007.
7. <http://www.ehp.qld.gov.au/air/pollution/pollutants/particles/index.html>. [Online]
8. Szmog, szmogriadó. [Online] <http://legszennyezés.hu/szmog-ismeretek>.
9. <http://www.thefloridastandard.com/2013/02/07/the-london-smog-of-1952/>. [Online]
10. **Guenther, Elizabeth J. H.** Donora Death Fog: The Crisis that Led to Modern Air Pollution Laws.
<http://chenected.aiche.org>. [Online] 2011. <http://chenected.aiche.org/environment/not-john-carpenter%E2%80%99s-%E2%80%9Cthe-fog%E2%80%9D-but-just-as-deadly/>.
11. **Byrnes, Mark.** These Pictures Capture Just How Horrifying China's Smog Situation Is Right Now.
[Online] 2013. máj 23-10. <http://m.theatlanticcities.com/neighborhoods/2013/10/these-pictures-capture-how-horrifying-chinas-smog-situation-right-now/7332/>.
12. Katasztrófa Információs Portál. [Online]
<http://www.katasztofak.abbcenter.com/?id=69503&cim=1>.
13. [Online] <http://tisza.levego.hu>.
14. **Iván, Polgár.** *A levegőtisztaság védelme*. Budapest : Országos Műszaki Könyvtár és Dokumentációs Központ, 1973.
15. <http://kom2008.atw.hu/>. [Online]
16. <https://docs.google.com/spreadsheets/ccc?key=0Aqe2P9sYhZ2ndHFEZkpzR1o0UjNtNkt1Uk5BWDR6dKE#gid=1>.
17. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/air-emissions-viewer-lrtap>.
18. http://www.eh.gov.hu/gcpdocs/attachments/article/134/vezest_k_2010.pdf.
19. http://www.eh.gov.hu/gcpdocs/attachments/article/133/statisztika_bel_2011_web.pdf.
20. http://uk-air.defra.gov.uk/data/data_selector.

21. UK NAEI - National Atmospheric Emissions Inventory. [Online]
<http://naei.defra.gov.uk/data/map-uk-das>.
22. **Goldstein, Mel.** *The Complete Idiot's Guide to Weather*. 2002.
23. **László, Makra.** *Rádiószondák*. 2008.
24. **Kovács, Richárd.** *A keveredési rétegvastagság számítása az új magyar transzmissziós szabványban*. Budapest, 2002.
25. *Handbook of Meteorological Instruments (Part 2: Instruments for upper air observations)*. s.l. : HMSO, 1961.
26. **Cséki, Gergő.** *Inverziós helyzetek kialakulása a Kárpát-medencében*. Budapest : ismeretlen szerző, 2010.
27. **Götz, G. and Rákóczi, F.** *A dinamikus meteorológia alapjai*. Budapest : Tankönyvkiadó, 1981.
28. [Online] meteor.geo.klte.hu/hu/doc/2003lev_2ea.doc.
29. **Fekete, Katalin, Popovics, Mária and Szepesi, Dezső.** *Légszennyező anyagok transzmissziójának meghatározása*. Budapest : OMSZ, 1983.
30. **Stevens, Bjorn.** Bulk boundary-layer concepts for simplified models. *Theor. Comput. Fluid Dyn.* 2007.
31. **Kornél, Kolláth.** *Szmozgelyzet 2011 októberében és novemberében*. 2011.
32. Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat. [Online] <http://www.kvvm.hu/olm/>.
33. <http://maps.google.com>. [Online]
34. [Online] <http://wettermast-hamburg.zmaw.de/Smog20080101.htm>.
35. **Pappné, dr. Ferenczi Zita, et al.** *Az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat mérési programjának és mérőhely elhelyezésének felülvizsgálata*. Győr, 2006.
36. **Service, Indo Asian News.** Beijing hospital admissions go up due to pollution. *Yahoo News*. 2013.
37. **Phillips, Tom.** China admits pollution has caused 'cancer villages'. *The Telegraph*. 2013.
38. <http://aqicn.org/?map>. [Online]
39. **Nemes, Alex és Palotás, Árpád Bence.** *A szmog csökkentésére irányuló módszer*. *Víz-, Gáz-, Fűtéstechika Szaklap*. Budapest, 2012.05..
40. [Online] <http://www.gcdataconcepts.com/b1100-1.html>.
41. [Online]
http://www.eagletreesystems.com/index.php?route=product/product&path=62&product_id=54.
42. **Dr. Szűcs, István fényképe.**

43. **Tennekes, H.** A Model for the Dynamics of Inversion Above a convective Boundary Layer. *Journal of the atmospheric science.* 1973.

44. **Kapás, Nimród.** *Turbulens áramlások modellezése az atmoszférikus határrétegben.*
<http://www.energiamedia.hu/>.

45. **Hágel, Edit.** *A levegőszennyezés előrejelzésének légkörfizikai problémái: empirikus és kísérleti vizsgálat.* 2002.

46. <http://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kornyezettan9/www/out/html-chunks/ch17s02.html>. [Online]

47. What are the causes of air Pollution. [Online] http://uk-air.defra.gov.uk/documents/What_are_the_causes_of_Air_Pollution.pdf.

9 Melléklet

A színezett cellák: tájékoztatási küszöb túllépés

A „!” cellák: riasztási küszöb túllépés

1. 2008. évi költségvetési kiadások felépítése

Év	2008						2009					2010					2011					2012					2013				
Nap	Miskolc						Sajószentpéter					Kazincbarcika					Putnok					Eger									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2009	2010	2011	2012	2013	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2009	2010	2011	2012	2013			
01.01															!							!									
01.02																															
01.03																															
01.04																															
01.05																															
01.06													!																		
01.07													!																		
01.08																			!												
01.09		!						!											!												
01.10		!						!																							
01.11																															
01.12																															
01.13																															
01.14																															
01.15																															
01.16																															
01.17																															
01.18																															
01.19																															
01.20																															
01.21																															
01.22																															
01.23																															
01.24																															
01.25																															

01.26					
01.27					
01.28					
01.29					
01.30					
01.31					
02.01					
02.02					
02.03					
02.04					
02.05					
02.06					
02.07					
02.08					
02.09					
02.10					
02.11					
02.12					
02.13					
02.14					
02.15					
02.16					
02.17					
02.18					
02.19					
02.20					
02.21					
02.22					
02.23					
02.24					
02.25					
02.26					
02.27					
02.28					
03.01					
03.02					
03.03					
03.04					
03.05					
03.06					
03.07					
03.08					
03.09					
03.10					
03.11					
03.12					
03.13					
03.14					
03.15					

//// //	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2009	2010	2011	2012	2013	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2009	2010	2011	2012	2013	
10.23																													
10.24																													
10.25																													
10.26																													
10.27																													
10.28																													
10.29																													
10.30																													
10.31																													
11.01																													
11.02																													
11.03																													
11.04																													
11.05																													
11.06																													
11.07																													
11.08																													
11.09																													
11.10																													
11.11																													
11.12																													
11.13																													
11.14																													
11.15																													
11.16																													
11.17																													
11.18																													
11.19																													
11.20																													
11.21																													
11.22																													
11.23																													
11.24																													
11.25																													
11.26																													
11.27																													
11.28																													
11.29																													
11.30																													
12.01																													
12.02																													
12.03																													
12.04																													
12.05																													
12.06																													
12.07																													
12.08																													
12.09																													

