

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Meteorológiai Tanszék

# Tartósan magas PM10 koncentráció meteorológiai körülményeinek vizsgálata és el rejelzése



## DIPLOMAMUNKA

Készítette: **Hoffmann Lilla Orsolya**

Meteorológus mesterszak

El rejelz szakirány

Témavezet k: **Ferenczi Zita és Kolláth Kornél**

Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens: **Dr. Pongrácz Rita**

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

**Budapest, 2014.**

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés .....</b>	<b>4</b>
<b>2. PM10 légköri jelenléte és jellemzése .....</b>	<b>6</b>
2.1 Eredete, forrása: .....	9
2.2 A légszennyezés és a klímaváltozás kapcsolata.....	10
2.3 Egészségügyi hatások .....	12
2.4 Európai helyzetkép.....	13
2.5 Magyarországi helyzetkép .....	14
2.6. Intézkedések a csökkentésre .....	15
2.6.1 Göteborgi Jegyz könyv .....	15
2.6.2 Magyarországra vonatkozó intézkedések .....	15
2.7. Szmogriadó .....	16
<b>3. Levegő minőség és időjárás .....</b>	<b>18</b>
3.1. PM10 légszennyezettség időjárással való kapcsolata a téli félévben .....	20
3.2. Hideg légpárna .....	23
<b>4. Adatfeldolgozás .....</b>	<b>28</b>
4.1 Stagnation-index .....	28
4.2 PM10 adatsorok elemzése és összevetése az egyes meteorológiai paraméterekkel és a Stagnation-indexszel .....	31
4.2.1. A 2007-2008-as félévi időszak elemzése .....	31
4.2.2 A 2008-2009-es félévi időszak elemzése .....	34
4.2.3 A 2009-2010-es félévi időszak elemzése .....	36
4.2.4 A 2010-2011-es félévi időszak elemzése .....	38
4.2.5 A 2011-2012-es félévi időszak elemzése .....	40

4.2.6 A 2012-2013-as f tési id szak elemzése .....	42
4.2.7. Adatsorok elemzéseib l levonható következtetések.....	44
<b>5. Tipikus légszennyezettségi epizódok Magyarországon .....</b>	<b>46</b>
5.1. Északkelet-Magyarország 2014. február 3-5. ....	46
5.2. Hideg légpárna 2013. december 13-18 .....	50
5.3. Száraz anticiklon 2011. november 18-21.....	53
5.4. Alacsony h mérséklet 2009. január 10-11.....	57
5.5. Gyenge hidegfront 2011. február 4. ....	59
5.6. Sivatagi por 2008. szeptember 7. ....	62
<b>6.Összefoglalás.....</b>	<b>65</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>68</b>
<b>Köszönetnyilvánítás.....</b>	<b>73</b>

# 1. Bevezetés

Napjaink egyik legjelentősebb globális méretű problémája a levegő szennyezés. A tiszta, oxigén dús levegő a földi élet alapja, amelynek megóvása mindannyiunk feladata. Az ipari forradalom óta az ipar és a technika fejlődésével a szennyező anyagok kibocsátása jelentősen megnövekedett. Eleinte a széntüzelés, majd a személygépkocsik- és az egyes háztartási berendezések elterjedése mind-mind szennyezik a levegőt. Ahhoz, hogy ez a probléma megoldódjon, nekünk is tennünk kell. Gyűjtjük szelektíven a hulladékokat, nyáron a légkondicionálókat kevésbé használjuk, inkább menjünk vízpart közelébe, személyautók helyett pedig válasszuk a kerékpárt.

A légszennyezésről az Egészségügyi Világszervezet<sup>1</sup> szerint akkor beszélünk, ha a légkörben található nyomanyagok hosszú ideig, nagy mennyiségben megmaradnak és ez kihat a környezetre, a természet élővilágára, a gazdaságra, a mindennapi életünkre és az anyagi javakra (Anda et al., 2011). A légszennyezés oka lehet természetes és antropogén eredetű. Az előbbihez tartoznak a vulkánkitörések gázai, az erdőtüzekből származó aeroszolok, míg az utóbbihoz a közlekedésből, a fűtésből és az ipari tevékenységekből származnak. Az antropogén kibocsátásokból származó szennyező anyagok közé tartoznak többek között a szén-dioxid, a metán, az ózon, a különböző nitrogén-oxidok, a halogénezett szénhidrogének, valamint a kisméretű aeroszol részecskék. Ezek az anyagok számos világméretű problémát okoznak. A globális klímaváltozásért leginkább a szén-dioxid és a metán tehetnek felelőssé. Az ózonréteg csökkenését és elvékonyodását elsősorban a freonok okozzák. A téli félévben a szmog kialakulásáért leginkább az aeroszol részecskék felelősek. Kémiai összetételüktől függően a 10 µm-nél kisebb mérettartományú levegő aeroszol részecskék (PM10) a tüdő mélyebb rétegeibe kerülve súlyos egészségügyi kockázatot is jelenthetnek.

Hazánkban a Budapest Főváros szmogriadó-tervével szóló 69/2008. XII. 10. F. v. Kgy. rendeletben meghatározott szmogriadót szinte kivétel nélkül a téli félévben előforduló magas PM10 koncentráció és annak tartós megnövekedése miatt adják ki, ugyanis ennek a szennyező anyagnak a koncentrációja lépi át a különböző levegőminőségi határértékeket. A szmogriadó elrendelése, fenntartása a mért értékek mellett a várható időjárási körülményektől, a levegőminőségre vonatkozó várható

---

<sup>1</sup> WHO: World Health Organization – Egészségügyi Világszervezet

tendenciáktól is függ. Az igényeknek megfelelő elrejelzések elkészítése nagy kihívást jelent.

Az utóbbi években az operatív gyakorlatban is egyre elterjedtebb, hogy a numerikus modellekhez olyan levegőkémiai modul csatolnak, melynek kimenetele közvetlenül is felhasználható a különféle légszennyező komponensek elrejelzéséhez. Budapest levegőminőségére vonatkozóan az Országos Meteorológiai Szolgálat is operatíván készít ilyen típusú számszerű elrejelzéseket (Ferenczi, 2013). A modellezett folyamatok összetettsége miatt azonban a rácspontra elálló számszerű PM10 esetén sok a hibalehetőség. Az eredmények értelmezésekor hasznos viszonyítási pontot, mintegy kontrollt jelenthet, ha az időjárás levegőminőségre hatással lévő legfontosabb tényezőt valamilyen leegyszerősített módszerrel külön is megvizsgáljuk.

A célkitűzéseinknek megfelelően a dolgozat legfontosabb témái a következők:

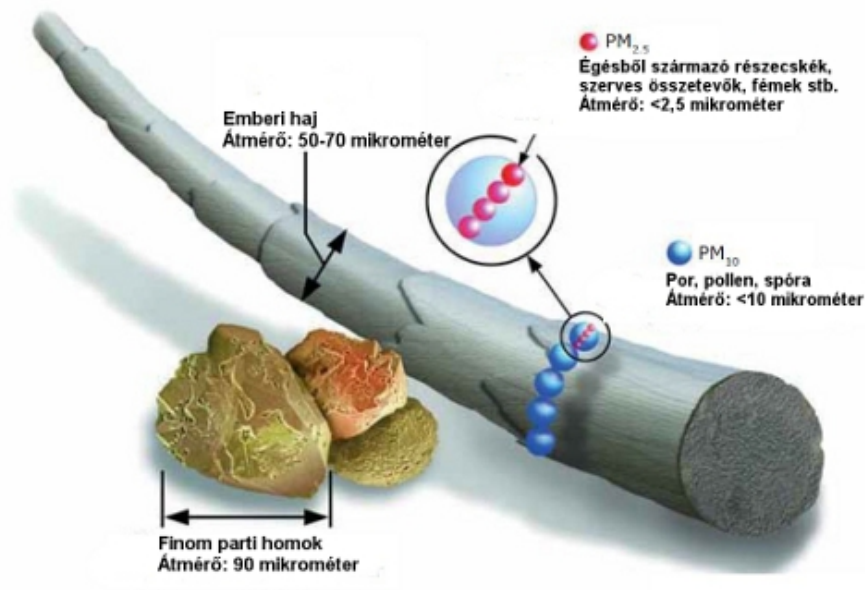
- Az elmúlt évek fűtési szezonjaira vonatkozóan az időjárás tükrében áttekintést nyújtunk a PM10 szennyezettség alakulásáról.
- Az időjárás levegőminőséget befolyásoló két legfontosabb paraméterét, a szél és a függőleges légcseré együttes hatását egy komplex mérőszámban, az úgynevezett Stagnation-indexben (Holst, 2008) egyesítve vizsgáljuk. Első sorban kvalitatív kapcsolatokat keresünk az index értéke és a valós légszennyezettség mértéke között.
- A meteorológiai háttér elemzésével bemutatunk tipikus magyarországi szcenáriókat a tartósan magas PM10 szennyezettség epizódhelyzeteire. Az anticiklon centrumában lezajló forgatókönyvekkel és ennek keretében a levegőminőség és az ún. hideg légpárnás helyzetek kapcsolatával kiemelten foglalkozunk.
- Javaslatokat teszünk, olyan napi gyakorlatban alkalmazható térképes, grafikus produktumok operatív használatára, melyek az elrejelzések, de akár a végfelhasználóknak is támpontot adhatnak a légszennyezettség tendenciáira vonatkozóan.

## 2. PM10 légköri jelenléte és jellemzése

A légköri aeroszolok nem másak, mint a levegőben finoman eloszlott szilárd és folyadék halmazállapotú részecskék, melyek 0,001-100 µm-es aerodinamikai átmérővel rendelkeznek. Ez alapján lehet csoportosítani őket (Muránszky, 2011):

- durva tartomány:  $d > 1 \mu\text{m}$
- akkumulációs tartomány:  $d = 0,1 - 1 \mu\text{m}$
- Aitken tartomány:  $d = 0,01 - 0,1 \mu\text{m}$
- nukleációs tartomány:  $d < 0,01 \mu\text{m}$

Az aeroszol részecskék döntő többsége – közelít leg 86%-a – természetes forrásból ered (Seinfeld és Pandis, 1997). Ez alapján megállapítható, hogy a PM10 a durva tartományú aeroszol részecskék közé tartozik. A PM az angol Particulate Matter szavak rövidítése, ami magyarul kisméretű részecske szennyezést jelent. Több, különböző frakciójú szállóport különböztetünk meg, – PM10, PM2.5, PM1 – ahol a számok a részecske aerodinamikai átmérőjének nagyságát jellemzik µm-ben kifejezve. Tehát a PM10 kategóriába azokat a levegőszemcséket soroljuk, amelyek aerodinamikai átmérője kisebb 10 µm-nél. Azért fontos hangsúlyozni a méreteket, mert minél kisebb a részecske, annál inkább eljutnak a felső légutakba, illetve a tüdőbe, és ezáltal egyre nagyobb lesz az egészségkárosító hatásuk. A 2.1 ábra szemléletesen azt mutatja be, hogy mekkora a PM10 és a PM2.5 nagysága egy hajszálhoz vagy egy homokszemhez képest.

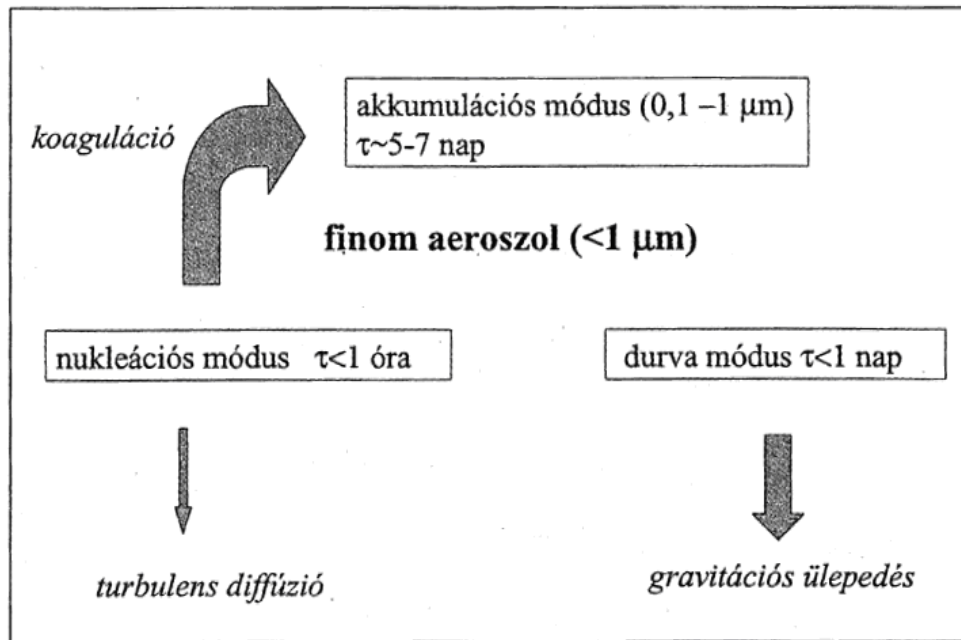


2.1 ábra: A különböző frakciók összehasonlítása

(Forrás: Vidékfejlesztési Minisztérium, 2014)

Ezek a kis mikrométernyi átmérőjű részecskék nemcsak az élővilágra és a klímaváltozásra vannak hatással, hanem az emberi egészségre is ártalmasak, hiszen különböző légúti és érrendszeri megbetegedéseket okoznak (Guerrerio et al., 2013). Annak érdekében, hogy a lakosság tisztában legyen a légszennyező anyagok következményeivel és egészségügyi hatásaival, ahhoz ezen anyagok minél pontosabb elrejelezhetőségére van szükség. A szennyezés mértékét befolyásolja az időjárás, a város mérete, földrajzi elhelyezkedése, fejlettsége és iparosítása. Továbbá figyelembe kell venni a nagytávolságú transzport által elidézett szennyeződést is. Ugyanis minél tovább tartózkodik az aeroszol részecske a légkörben, annál nagyobb távolságokra tud advektálódni. Az aeroszolok tartózkodási idejét a részecske mérete határozza meg. A 0,1 µm-nél kisebb aerodinamikai átmérőjű aeroszolok mozgását a turbulens diffúzió határozza meg, amely száraz ülepedést idéz elő. Ezen aeroszolok száma a termikus koagulációnak, valamint a már említett turbulens diffúciónak köszönhetően jelentősen és gyorsan csökken. Az 1 µm-nél nagyobb részecskék esetében pedig a gravitációs ülepedés hatására csökken a számuk, így nagy részük pár óra alatt távozik a légkörből. A 0,1 és a 1 µm közötti részecskék tartózkodnak legtávolabb a légkörben, – 5-7 napot – mert az elnyelési folyamatok sebessége ezeknek a legkisebb (2.2 ábra). Ebbe a mérettartományba eső aeroszolok részecskék fontos felhőkondenzációs magvakként szolgálnak, ezáltal jelentős szerepet vállalnak a

felh képzésben. Bekerülve a felh cseppekbe a csapadék által nedves ülepedés hatására jutnak ki a légkörből (Gelencsér, 2004).



2.2 ábra. Az aeroszol részecskékre ható folyamatok és következményeik, ahol a részecskék tartózkodási idejét jelöli. (forrás: Gelencsér, 2004)

A PM10 szennyezettségét leginkább két tényező határozza meg: az emisszió és az időjárási helyzet (Ferenczi, 2009). A PM10 leginkább az őszi és a téli időszakban okoz gondot. Ilyenkor ugyanis gyakran alakulnak ki olyan időjárási helyzetek, amelyek koncentrációnövekedést eredményeznek. A helyi forrásokból kikerülő légszennyező anyagok koncentrációjának feldúsulásához az alábbi három tényező kedvez leginkább:

- korlátozott vertikális légcseré
- gyenge légmozgás
- csapadékmentes időjárás

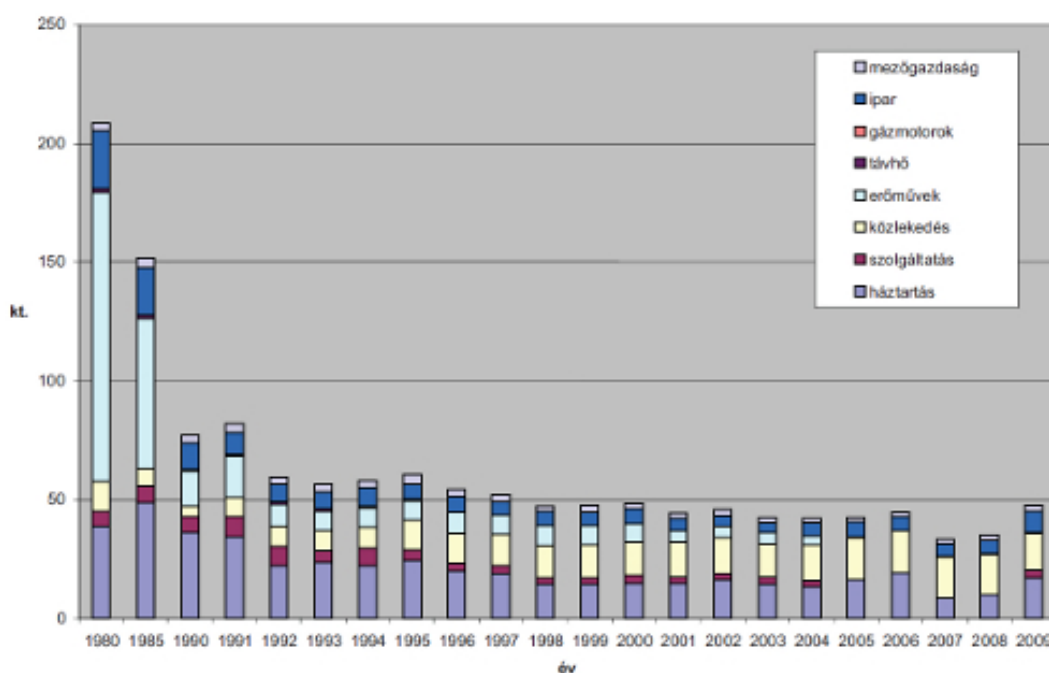
A szennyező anyagok kibocsátása a meteorológiai paraméterek közül a hőmérséklettel állnak közvetlen kapcsolatban. Alacsonyabb hőmérséklet esetén megnövekszik a lakossági fűtéshez társuló kibocsátás mértéke. Hozzá kell tenni azonban, hogy ebben nem feltétlenül következik a koncentrációbeli növekedés. Ezt az előbb említett meteorológiai tényezők befolyásolják.



## 2.1 Eredete, forrása:

A PM10 keletkezése alapján megkülönböztetünk elsődleges (primer) részecskéket és másodlagos (szekunder) részecskéket. Az elsődleges részecskék közvetlenül felszíni forrásokból kerülnek a légkörbe, mint például a korom. A másodlagos részecskék leginkább gázokból és illékony vegyületekből keletkeznek a légkörben nukleáció és kondenzáció során, például a szulfát- és nitrát aeroszolok. (Guerreiro et al., 2013). Nukleációnak nevezzük azt a fázisátalakulást, amikor a légkör gázfázisú összetevői fotokémiai oxidációjuk során szilárd vagy folyékony halmazállapot megjelenését idézik elő (Németh, 2011). A PM10 szennyező anyag származhat természetes és antropogén forrásokból (2.3. ábra):

- szén- és fatüzelésekből keletkező égéstermékek, lakossági tüzelés,
- belső égésű motorok, autók kipufogóiból származó termékek,
- utak felületének kopása a gépjárművek által, illetve a felvert por újbóli átkeveredése,
- pollenek, vulkáni hamu



2.3. ábra: A PM10 kibocsátásának forrásonkénti megoszlása.

(Forrás: Vidékfejlesztési Minisztérium, 2014)

Az aeroszol részecskék döntő többsége – közelít leg 86%-a – természetes forrásból ered (Seinfeld és Pandis, 1997). A PM10 koncentrációjának feldúsulását viszont nemcsak az adott város emissziója válthatja ki, hanem a nagytávolságú transzport is (Bergin et al.,

2005). Az esetek döntő többségében ilyenkor a különböző országok iparvidékei által emittált szennyező anyag advektálódhat több kilométeren keresztül más, olyan területek felé, ahol semmi nem indokolná ezen szennyező anyag koncentrációjának emelkedését. Leginkább Lengyelország és Románia járul hozzá hazánk PM10 szennyezettségéhez (Ferenczi és Kolláth, 2013). El fordulhatnak viszont olyan helyzetek, amikor nem egy iparvidék felől szállítódik a szennyező anyag. Ez esetben a levegő minőségét akár a saharai por is ronthatja, ami nem csak a mediterrán térséget, hanem a Kárpát-medence területét, de esetenként még Észak-Európát is eléri (Ansmann et al., 2003). Ez szintén hozzájárul a koncentráció napi átlagának további növekedéséhez.

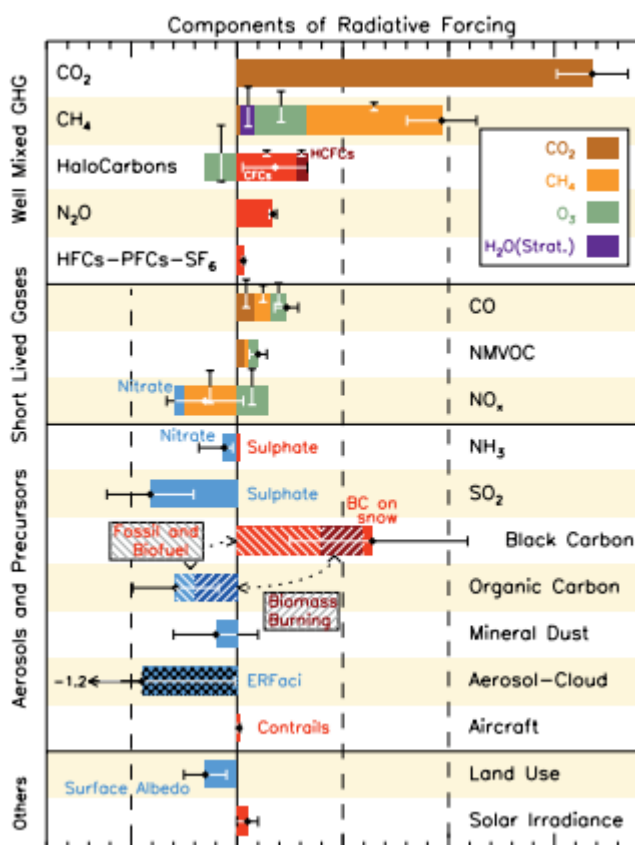
## 2.2 A légszennyezés és a klímaváltozás kapcsolata

A légszennyezés és a klímaváltozás szorosan kapcsolódnak egymáshoz. Csak úgy, mint a légszennyezés, a klímaváltozás is káros hatással van az emberek- és más élőlények egészségére, valamint az ökoszisztémára. A klímaváltozás helyi és melegebb periódusok váltakozásából tevődik össze, amely akár globális méreteket is ölthet. A klímaváltozással kapcsolatban a leggyakrabban a globális felmelegedés jut eszünkbe. A globális felmelegedésért az üvegházhatás a felelős, melyet az ún. üvegházgázok váltanak ki. Az üvegházhatás nem más, mint a légkör hő megtartó képessége. A Napból érkező elektromágneses sugárzás mintegy 30%-a visszaverődik a világűr felé, a többi része azonban elnyelődik a légkörben, illetve a felszínen. A felszín által emittált hosszuhullámú kisugárzás egyrészt melegíti a légkört, másrészt hűti a kibocsátó felszínt. Az üvegházhatású gázok egy ún. elszigetelt réteget képeznek a földfelszín és a magasabb légrétegek között, melynek hatására nem engedik át a felszín felől érkező sugárzást. Ezzel tehát a troposféra melegedését idézik elő. Ilyen üvegházgázok közé sorolható a vízgőz, a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid, valamint a különböző aeroszol részecskék. Nem véletlenül ezek a gázok okozzák az üvegházhatást. Ugyanis a légkörben való tartózkodási idejük – több hét, több év – ezeknek a gázoknak a legnagyobb. A 2009-es évben az EPA<sup>2</sup> által kiadott Tiszta Levegő Törvényben megállapításra került, hogy az üvegházhatású gázok jelentős része felelős a levegő szennyezettségéért (U.S. EPA, 2012). A 2.4. ábrán látható, hogy egyes aeroszol részecskék az éghajlat melegedéséért felelősek, például a

---

<sup>2</sup> EPA: Environmental Protection Agency – Amerikai Környezetvédelmi Hivatal

fekete szén és az ásványi sók, míg a biomassza égetésből származó részecskék, valamint a szulfátok inkább a hóléshoz járulnak hozzá. A fekete szén egyik komponense a korom részecskék, amelyek ráakódhatnak a havas, jeges felszínre, valamint a gleccserekre. Ezáltal módosítják a felszín fényvisszaverő képességét, így egyfajta melegedési folyamat indul meg, melynek hatására az olvadás is felgyorsul. Ez leginkább a sarkvidéki és alpesi régiókra jellemző. A szulfátok kis mértékben ugyan, de az éghajlat hólését okozzák. Ez leginkább annak köszönhető, hogy a szulfát részecskék nagy albedóval rendelkeznek a többi részecskékhez képest, így tehát a napsugárzás jelentős részét visszaverve megváltoztatják a felhő szerkezetét, módosítják az élettartamát és ezzel befolyásolják a csapadéktermékenységet. Ezek ott alakulnak ki, ahol jelentős a szulfát- és nitrát tartalmú anyagok kibocsátása. Összességében tehát az mondható el, hogy az aeroszol részecskék együttes hatását nagy bizonytalansággal lehet becsülni, ezért további kutatások szükségesek (Forster et. al., 2007).



2.4. ábra. Egyes aeroszolok és a klíma kapcsolata

(Forrás: IPCC, 2013)

## 2.3 Egészségügyi hatások

Különböz vizsgálatok kimutatták (Dockery et al., 1993), hogy a PM10 részecskék koncentrációja és mérete, illetve a különböző egészségügyi megbetegedések között közvetlen kapcsolat van. Els sorban gyulladást okozhat, de akár szív-, ideg- és érrendszeri, fels légúti megbetegedések súlyosbodásához vezethet, kiváltó oka lehet az asztmás rohamoknak, hiperaktivitásnak, valamint csökkentik a tüd kórokozókkal szembeni ellenállását (WHO, 2000). Mint minden aeroszol részecske, így a PM10 is leginkább légzés által kerül be a szervezetünkbe. Ezek a mikrométernyi részecskék könnyen bekerülhetnek a tüd be és a véráramba, amelyek fokozhatják az allergia kialakulását és hosszú ideig a szervezetben maradva, akár rákos megbetegedést is okozhatnak (Guerreiro et al., 2013). Ezért, ha magas az egyes szennyez anyagok koncentrációja, akkor érdemes minél kevesebb idő tölteni a szabadban, f leg idő skorúaknak és azoknak, akik ilyen betegségben szenvednek, valamint a kisbabáknak. Epidemiológiai vizsgálatok kimutatták, hogy a PM10 tömegkoncentrációjának  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  növekedésével hozzávet legesen 0,5-1,5%-kal növeli a napi halálozások várható számát (Wilson és Spengler, 1996). A 2.5. táblázat a PM10 által okozott járulékos halálozási adatokat mutatja be hazánk nagyobb városaiban. Szuhi (2010) az adatokat a Központi Statisztikai Hivatal Tájékoztatási adatbázisa<sup>3</sup> alapján állította össze a 2007-es évre vonatkozóan. Ez alapján Budapesten a PM10-zel kapcsolatba hozható elhalálozások száma majd háromezerre és a többi nagyobb városban is több száz nagyságrendre tehető. A megvizsgált 22 település halálozási adatai alapján a kisméret részecske szennyezés közvetlen hatása miatt közel ötezer ember halt meg a 2007-es évben.

Város	Népességszám (2007)	Halálosetek száma/év
Budapest	1 702 297	2958
Debrecen	205 084	259
Miskolc	171 096	323
Szeged	167 039	310
Pécs	156 664	155
Győr	128 808	160

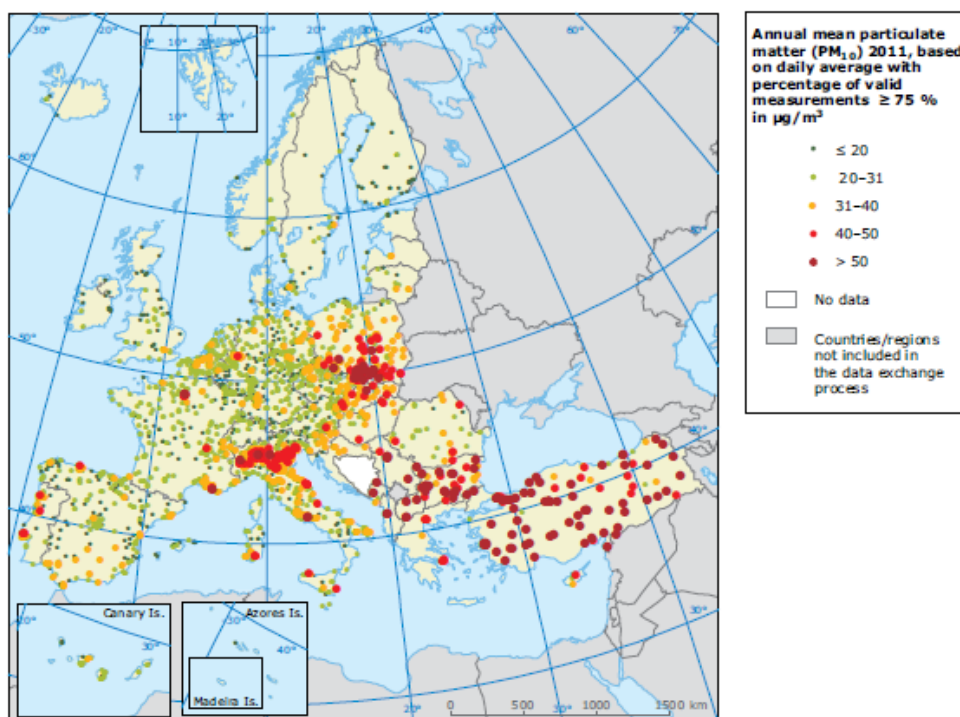
2.5. táblázat: A PM10 okozta halálosetek száma éves bontásban

(Forrás: Szuhi: A szálló por okozta járulékos halálozás 22 hazai városban, 2010)

<sup>3</sup> Központi Statisztikai Hivatal Tájékoztatási adatbázisa:  
<http://statinfo.ksh.hu/Statinfo/themeSelector.jsp?&lang=hu>

## 2.4 Európai helyzetkép

A kisméretű részecske szennyezés egész Európában gondot okoz. A 2011. évi PM10 koncentrációjának átlagos éves eloszlását mutatja be a 2.6. ábra a mért európai napi átlagok adatai alapján. A legszennyezettebb területek közé tartozik Olaszország északi része, a Pó-folyó mentén, illetve Lengyelország déli területén található iparvidék. Ezekben a régiókban a különböző ipari tevékenységek és a gyárak által okozott PM10 szennyezés a gyakran kedvezőtlen meteorológiai feltételek miatt meghaladja éves szinten az  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t. A Földközi-tenger keleti medencéjében szintén meghaladja a PM10 ezt az értéket. Ezeken a területeken elsősorban nem az antropogén emisszió váltja ki a levegő minőségének romlását, hanem a nagytávolságú transzporttal érkező saharai por, kisebb mértékben pedig a tengeri só. Az is megfigyelhető, hogy a nagy-britanniai iparvidékeken a PM10 koncentrációja alig haladja meg a  $30\text{--}35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t éves átlagban. A szigetországok elhelyezkedéséből adódóan ez elsősorban az óceáni éghajlattal és az óceán felől érkező tiszta levegő hatásával magyarázható. A csapadékos napok száma éves szinten meghaladhatja akár a 150 napot is, ezzel elősegítve a szennyező anyagok nedves ülepedését és a levegő tisztulását. Összességében elmondható, hogy egyes ipari régiók és mediterrán térségek kivételével az európai országok nagy része éves szinten az egészségügyi határ –  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – alatt marad az átlagos PM10 koncentráció.



2.6. ábra: PM10 koncentráció átlagos éves eloszlása

(Forrás: Guerreiro et al., 2013))

## 2.5 Magyarországi helyzetkép

Magyarország légszennyezettségének jelentős hányadát leginkább a gépkocsiforgalomból, az ipari tevékenységekből és a fűtésből származó szennyező anyagok adják. Hazánk Európa középső részén helyezkedik el, ezáltal minden irányból szennyezett levegő tiszta szél. Hazánkban leginkább három olyan terület található, melyek szennyezettsége többször átlépi az Európai Unió által, törvényekben megfogalmazott egészségügyi határértékeket. Ilyen területek például:

- a Sajó-völgye
- az Alföld északkeleti régiója
- Budapest (Becker et. al., 2011).

A Sajó-völgye esetében különösen a medence jellegű fakadó szélcsendesebb időjárás, valamint a lakossági fűtés mellett az ipari tevékenység is szerepet játszik a levegő minőségének romlásában. A téli szezonban a fagyos területeken a fűtésből származó aeroszol részecskék nagymértékben hozzájárulnak a PM10 növekedéséhez. Az ország keleti, északkeleti területein – leginkább Nyíregyháza és Debrecen környéke – az ország más részeihez viszonyítva szintén a gyengébb légmozgás segíti a szennyező anyagok koncentrációjának feldúsulását. Budapest területén több tényező együttes hatása váltja ki a levegő szennyezettségét. A nagy létszámú lakosság miatt fokozódik a közlekedésből és a lakossági fűtésből származó szennyező anyagok mennyisége. A város és az épületek sűrű beépítettsége miatt a légmozgás is gyengébb a felszín közelében, továbbá a különböző szint légrétegek is általában nehezebben tudnak átkeveredni egymással.

## 2.6. Intézkedések a csökkentésre

### 2.6.1 Göteborgi Jegyz könyv

Az Egyesült Nemzetek Szövetségének Európai Gazdasági Bizottsága által készített, a nagy távolságra jutó, országhatárokon áterjed légszennyezés csökkentésére szolgáló Genfi egyezményt 1979. november 13-án írta alá 34 európai ország, köztük Magyarország is. Ratifikálására viszont csak egy évre rá, 1980. szeptember 22-én került sor (Vidékfejlesztési Minisztérium, 2014). Ezen egyezmény végrehajtását szolgálja a Göteborgi Jegyz könyv, amely 1999. november 30-án lépett hatályba, amelyet hazánk 2006. november 16-án hagyott jóvá. A jegyz könyv a felszín közeli ózonszennyezés, az eutrofizáció és a savasodás problémája mellett, különböző szennyez anyagok – a kén-dioxid, nitrogén-dioxid, különböző szerves vegyületek – kibocsátásának problémájával és csökkentésével kapcsolatos intézkedésekkel foglalkozik. Az első Göteborg egyezmény megújítására 2012-ben került sor, amely már a PM<sub>2.5</sub>-re vonatkozóan is emisszió csökkentést ír el a tagországok számára. Az egyezmény értelmében Magyarországnak 2020-ig 22%-kal kell csökkentenie a PM<sub>2.5</sub> kibocsátását a 2005-ös értékhez képest (Guerreiro et al., 2013).

### 2.6.2 Magyarországra vonatkozó intézkedések

Hazánkban 1987 óta történik a PM<sub>10</sub> részecske vizsgálata és meghatározása (Becker et al., 2011). Az Európai Unió 2005-től a környezeti levegő minőségéről és a tisztább levegő Európának elnevezésű program – 2008/50/EK Irányelv – keretén belül a következő egészségügyi határértékeket határozták meg a PM<sub>10</sub>-re vonatkozóan:

- Évi: 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Napi: 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A napi átlagra vonatkozó határérték éves szinten harmincöt-ször léphet át (Putaud et al., 2003). Budapesten az ezredforduló idején az átlagos éves PM<sub>10</sub> koncentráció 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a napi határérték túllépés pedig 18 nap volt, amely a fent említett határérték alatt maradt. A 2006-2007-es évek átlagai azonban kimondottan magasak voltak, hiszen nemcsak elérték, de meg is haladták a 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -t (Páldy et al., 2009). 2006-ban a napi határérték átlépések

száma 82, míg 2007-ben 44 nap volt. 2010 és 2012 között 40 és 50 nap közé estek, míg 2013-ban a PM10 koncentrációjára vonatkozó túllépések éves száma 28 nap volt. Mivel a határértékeket több éven keresztül nem sikerült betartani, ezért különböző intézkedéseket kellett tenni a levegő minőségének javítása érdekében. A 2003-2008 közötti időszakra vonatkozóan kiadásra került a második Nemzeti Környezetvédelmi Program (NKP), melynek keretén belül figyelembe veszik és célul tűz ki a közlekedésből és energiatermelésből származó kibocsátások nagymértékű csökkentését, valamint a levegő minőségének javulását. Az NKP legfontosabb törekvéseit három akcióprogram tartalmazza (Pomázi és Szabó, 2008):

- 1., Éghajlatváltozás Akcióprogram, melynek keretén belül a különböző üvegházgázok, valamint az energiatermelésből származó légszennyező anyagok emissziójának csökkentése.
- 2., Környezet-egészségügyi és Élelmiszerbiztonsági Akcióprogram, amelynek feladata a bel- és kültéri légszennyezés által előidézett egészségügyi hatások csökkentése.
- 3., Városi Környezetminőség Akcióprogram, melynek célja a városi levegő szennyezés redukálása.

Magyarország nemcsak modernizálta az addig használt levegő minőség mérő hálózatot, de ki is bővítette. Így közel hatvan mérő állomás, kétszáz manuális mintavételezési pont és hat buszra felszerelt mobil mérő rendszer áll rendelkezésre, melyek többek között a 10 µm-nél kisebb aeroszol részecskékre is gyűjtenek adatokat, információkat (Pomázi és Szabó, 2008).

2012-ben megalakult a PM10 Tárcaközi Bizottság. Fő feladata az ágazatközi intézkedési program figyelemmel kísérése és a különböző intézkedések végrehajtása. Az intézkedési program abból a célból jött létre, hogy a különböző kibocsátásokból származó légszennyező anyagok koncentrációja ne haladja meg az Irányelv által meghatározott éves és a napi határértékeket. A PM10 Tárcaközi Bizottság minden évben jelentést készít az Európai Bizottság részére (Vidékfejlesztési Minisztérium, 2013).

## **2.7. Szmogriadó**

Az egyes szennyező anyagok a koncentrációjuk növekedésével, meghaladhatnak bizonyos küszöbértékeket és emiatt elérhetnek különböző riasztási fokozatokat. Ez az állapot akár tartósan, több napig is fennállhat. Ha a PM10 koncentrációja két napon



keresztül három mér állomáson a napi átlagérték eléri a  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t vagy a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, akkor elrendelik a szmogriadót, melyet a fő polgármester adhat ki és szüntethet meg. Ilyenkor érdemes az autók helyett a tömegközlekedést választani, az asztmás betegek és a légúti megbetegedésben szenvedők kerüljék a szabadban való tartózkodást.

Az Európai Unió 2008/50/EK levegőminőségi irányelvében megtalálható a PM10 koncentráció napi átlagaira vonatkozó levegőminőségi határértékek, melyek a következők (Vidékfejlesztési Minisztérium, 2014)

- egészségügyi határérték:  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- tájékoztatási küszöbérték:  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- riasztási küszöbérték:  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Budapest Főváros Közigazgatásának 69/2008. (XII. 10.) önkormányzati rendelete Budapest Főváros szmogriadó-tervéről szóló rendelet alapján a következők jellemzik az egyes határértékeket. Az *egészségügyi határértéket* elérve a szennyező anyagok még nem okoznak tartós egészségkárosodást, azonban túllépése esetén veszélyesnek tekinthető a légszennyezettség. *Tájékoztatási küszöbérték* esetén a légszennyezettség rövid időn belül veszélyes lehet az emberi szervezetre, de leginkább az erre érzékenyek számára. Ebben az esetben a tájékoztatási fokozathoz tartozó intézkedéseket elzáró nap 18 óráig ki kell hirdetni és felhívni az emberek figyelmét az esélyes veszélyekre. *Riasztási küszöbérték* elérését rövid időn belül veszélyt jelent az adott térségen élők egészségére. Ilyenkor azonnali intézkedéseket kell elrendelni, melyek között az autósforgalom korlátozását, illetve a szabadban tartózkodás idejét tartalmazza.

### 3. Levegő minőség és időjárás

A levegő szennyezettsége az év különböző szakaszaiban eltérően alakul. Nyáron a lakossági tüzeléssel származó szennyező anyagok koncentrációja csak nagyon ritkán emelkednek az egészségügyi határérték felé, ami egyrészt annak köszönhető, hogy a lakossági források nem szerepelnek a források között, másrészt instabilabb a rétegződés a légkör felső tartományában, így az intenzívebb és mélyebb vertikális légcseré nagyban hozzájárul a szennyező anyagok átkeveredéséhez. Ebben az időszakban azonban vannak olyan szennyező anyagok is – például az ózon – melynek koncentrációja különböző fotokémiai folyamatok miatt dúsulhat fel. Nyáron és télen elsősorban a lakossági források által növekedhet meg a szennyező anyagok koncentrációja. Ilyenkor gyakran alakulnak ki olyan időjárási helyzetek, amelyek kedveznek a szennyező anyagok koncentrációjának feldúsulásában.

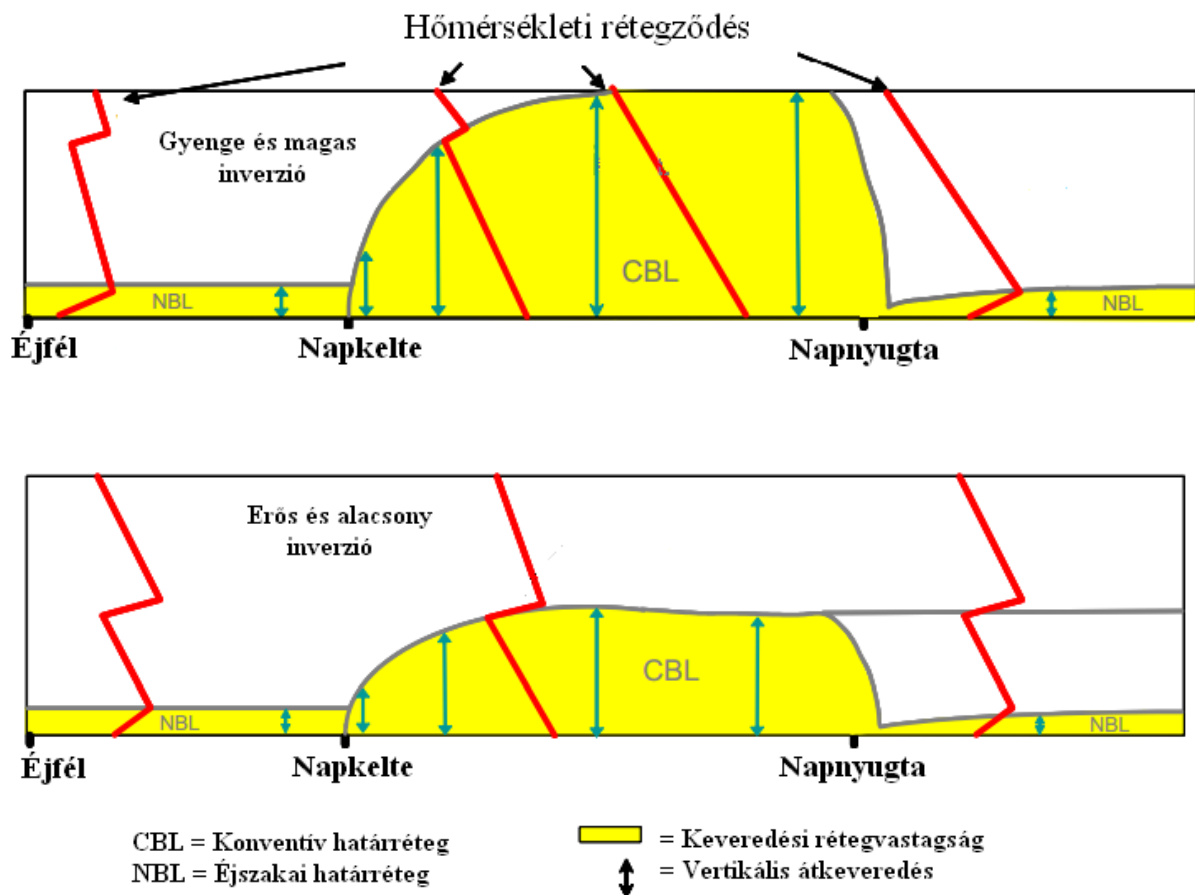
A forrásból kikerülve a szennyező anyagok koncentrációját a következő tényezők befolyásolják:

- *légmozgás*: ciklonális helyzetben a nagy nyomási gradiens miatt erősebb lehet, míg anticiklon centrumában a kisebb gradiens miatt gyengébb
- *csapadék*: ciklonokban a frontrendszerhez köthető csapadékkeletkezés gyakoribb, mint anticiklon idején
- *függőleges légcseré*: ezt leginkább a keveredési rétegvastagság határozza meg. Ennek a folyamatnak az időjárási helyzettel való függése a legbonyolultabb, ezért ezt ebben kifejtjük.

A szennyező anyagok koncentrációjának változása leginkább attól függ, hogy vertikálisan mekkora az a réteg, ahol a részecskék elhelyezkednek. Keveredési rétegnek azt a felszín feletti légréteget értjük, ahol a felszín közelében az emittált szennyező anyagok a turbulens mozgások hatására függőleges irányban átkeverednek (Baranka et al., 2013). A vertikális kiterjedése 100 és 3000 méter közé tehető (Kovács, 2002). A keveredési réteg magasságát befolyásolhatják többek között a napszak, a felszín érdességének – fák, épületek – elhelyezkedése, nagysága, egymástól való távolsága, a szélesség és a hőmérsékleti rétegződés (Baranka et al., 2013). Más a határreteg kiterjedése nappal és más éjszaka, továbbá figyelembe kell venni azt, hogy alacsony vagy magas nyomású képződmény befolyásolja az időjárást. Ugyanis anticiklon esetén vékonyabb lesz ez a bizonyos réteg, míg ciklonális helyzet esetén kiterjedtebbé válik (Kovács, 2002) és minél nagyobb ez a

réteg, annál jobban fel tudnak hígulni a szennyez anyagok és minél kisebb, annál kevésbé tudnak elkeveredni. Fontos figyelembe venni a napi menetét is. Nappal ugyanis a besugárzás és az általa indukált konvekció hatására megnövekszik, míg éjszaka általában lecsökken a magassága.

A 3.1. ábra az inverzió és a határréteg vastagsága közötti kapcsolatot írja le két különböző esetre. A fenti ábrán az látható, hogy ha magasabb rétegben alakul ki egy gyengébb inverzió, akkor a nappali/konvektív határréteg a beérkező rövidhullámú sugárzásnak köszönhetően szinte pár óra leforgása alatt kiterjedtebbé válik és ezáltal nagyobb lesz a vertikális átkeveredés. Ennek hatására pedig a szennyez anyagok is jobban fel tudnak hígulni. Ebben az esetben derült, felh mentes időjárást feltételezünk. Napnyugtá után pedig hasonló helyzet alakul ki, mint napkelte előtt. Ilyenkor a határréteg vastagsága sokkal kisebb, mint nappal, mivel éjszaka, besugárzás híján a konvektív folyamatok mértéke sokkal gyengébb, valamint az erős hosszuhullámú kisugárzás miatt hamarabb lehűl a felszín közeli légréteg, mint a magasabb légrétegek. Az alsó ábra olyan helyzetet mutat be, amikor egy erősebb inverzió alakul ki alacsonyabb rétegekben. Ez leginkább felhős, borús időjárásra, valamint hideg légpárnás helyzetekre jellemző. Ilyenkor napközben is megmarad az inverziós rétegzés és a határréteg magassága alacsony marad. Ez gyenge vertikális átkeveredéssel jár és ilyenkor a szennyez anyagok kevésbé tudnak felhígulni, megmaradnak a felszín közeli rétegekben, így a levegő minőségbeli romlása várható.



3.1. ábra. Az inverzió és a határréteg alakulásának kapcsolata két különböző esetben.  
(Forrás: Abraczinskas et al., 2003)

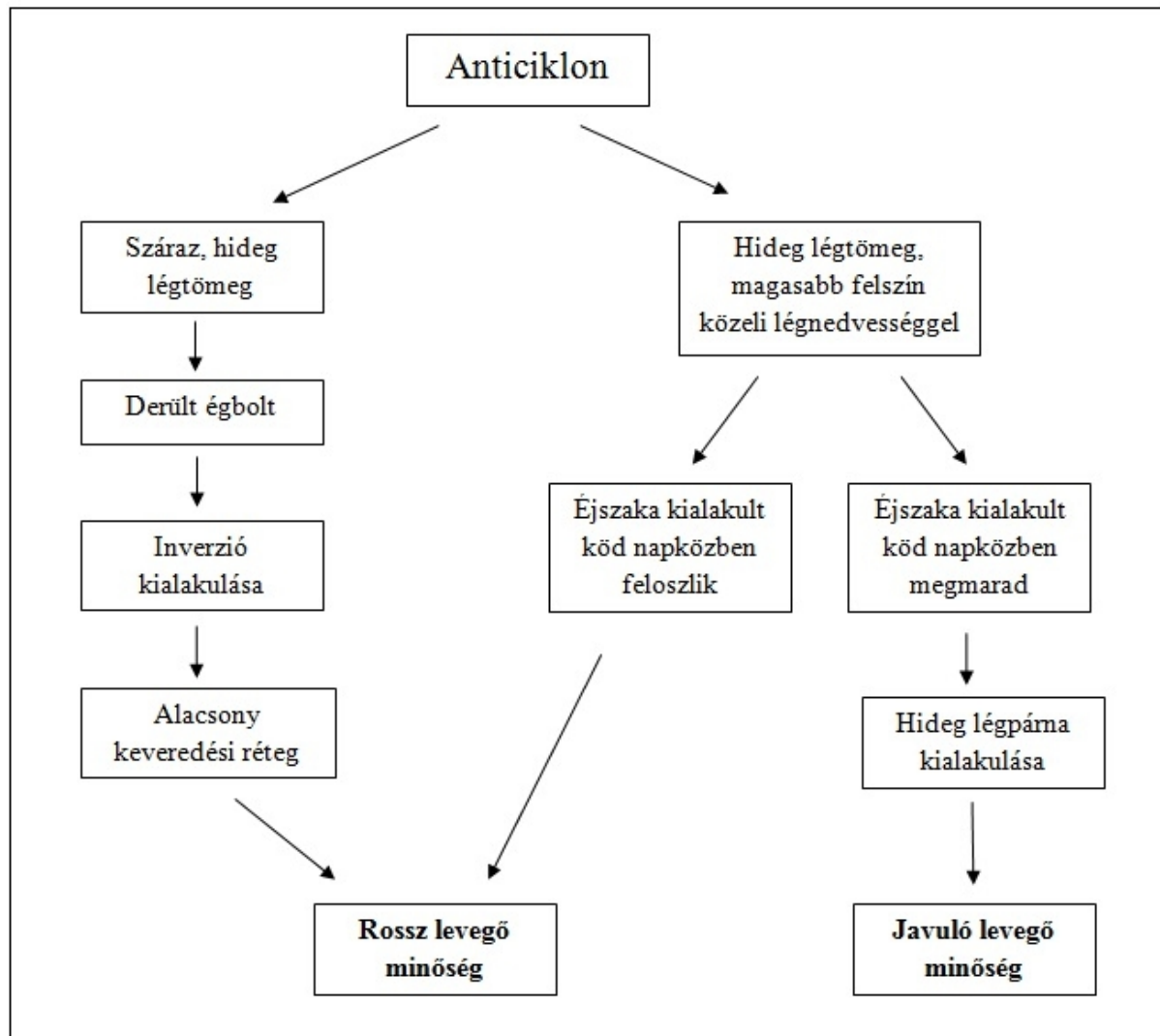
### 3.1 PM10 légszennyezettség időjárással való kapcsolata a téli félévben

Az Országos Légszennyezettségi Mérés hálózat<sup>4</sup> több éves méréseit megvizsgálva az mondható el, hogy a magas PM10 általi szennyezettség leginkább az őszi és a téli hónapokhoz köthet. A PM10 koncentrációja elsősorban a lakossági forgalom miatt növekedhet meg. Ehhez azonban olyan meteorológiai helyzeteknek, körülményeknek kell kialakulniuk, amelyek megakadályozzák ezen aeroszol részecskék koncentrációjának felhígulását és a nedves ülepedését. Ilyen helyzeteknek kedvez többek között az inverziós hőmérsékleti rétegződés és általában a sekélyebb keveredési rétegvastagság, továbbá a szélcsendes és a csapadékmentes időjárás. Mindezek pedig nagyban függenek, nemcsak a

<sup>4</sup> OLM: Országos Légszennyezettségi Mérés hálózat: <http://www.kvvm.hu/olm/>

Kárpát-medence térségét alakító nyomási képződményt, hanem a helyi adottságoktól és a mezometeorológiai körülményektől is.

A 3.2. ábra azt mutatja be, hogy hogyan alakul a levegő szennyezettsége anticiklon esetén. Ebben az esetben csapadékmentes és szélcsendes időjárást feltételezünk. Jól látható, hogy száraz, hideg légtömeg esetén leginkább a levegő minőségbeli romlása várható. Ilyenkor éjszaka – de akár napközben is – felhőmentes égbolt jellemző, amely elősegíti a felszín közeli inverzió kialakulását és ebben adódóan alacsony lesz a keveredési rétegvastagság. A felszín közeli alacsony rétegvastagság következtében a szennyezőanyagok koncentrációja megnövekszik és a talaj közelében a levegő szennyezetté válik. Magasabb nedvességtartalom esetén éjszaka köd is kialakulhat. A levegő minőség szempontjából fontos, hogy az éjszaka képződött köd napközben feloszlik vagy megmarad. Abban az esetben, ha napközben feloszlik, szintén rosszabb levegő minőségre számíthatunk, hiszen ilyenkor újra kialakulhat a felszín közelében az inverziós rétegrés. Abban az esetben, ha a köd megmarad napközben is, akkor a hidegléggárna kialakulásával, és annak megemelkedésével a keveredési réteg valamelyest nagyobb lesz és ezáltal a szennyezőanyagok jobban el tudnak keveredni, így a levegő minőségében javulás várható.



3.2. ábra. Anticiklon hatása a légszennyezettségre.

A levegő szennyezettségét nagyban befolyásolja a hőmérséklet *inverziós rétegzése*. Inverciónak nevezzük azt a hőmérsékleti eloszlást, amikor a levegő hőmérsékleti gradiense invertálódik, azaz felfelé nem csökken, hanem nő a hőmérséklet. Ilyen helyzetben nem tudnak kialakulni a konvektív folyamatok. Az inverzió kialakulását nagyban befolyásolja a felhőzet. Éjszaka derült égbolt esetén erős a kisugárzás, így a felszín közeli réteg jobban lehűl, mint a felette lévő rétegek, így nagy valószínűséggel inverzió alakulhat ki.

Az inverzió kialakulása szempontjából megkülönböztetünk kisugárzási és zsugorodási inverziót, valamint hideg légpárnát. *Kisugárzási inverzióról* akkor beszélünk, amikor derült, szélcsendes éjszaka a felszín közelében erőteljesebb lesz a lehűlés, mint a magasban. Ez leggyakrabban az őszi és a téli időszakokra jellemző. Az inverziós réteg vastagsága általában több száz méter, de elérheti akár az egy kilométert is, attól függően,

hogy milyenek a felh zeti- és szélviszonyok. A téli helyzetekben a rövid nappalok miatt csak korlátozott vastagságú keveredési réteg tud kialakulni, amely csak néhány órán keresztül képes javítani a leveg min ségén. Megkülönböztetünk az inverzióknak egy másik típusát, az úgynevezett *zsugorodási inverziót*. Ez általában a légkör magasabb szintjein – körülbelül 1-3 kilométer között – figyelhet meg. Fként anticiklonokban található, ahol a tartós leáramlások, leszálló légmozgások hatására alakulnak ki, amelyek lokális melegedést okoznak. Leginkább a konvektív mozgások gátlásában játszik f szerepet, ezzel egyfajta záró réteget képez a felh zet kialakulásának szempontjából.

### 3.2. Hideg légpárna

Az inverzió egyik speciális esete a *hideg légpárna*. A téli félévre jellemz , a Kárpát-medence egyik szinoptikus sajátossága, amely általában előreged anticiklonban alakul ki. Kialakulását el segíti a medence jelleg, a stabil h mérsékleti rétegz dés, valamint az, hogy ne legyenek az átkeveredést el segít horizontális és vertikális mozgások. Általában lassan alakulnak ki és több napig, akár hetekig is fennmaradhatnak. A hideg légpárna kifejezésben a hideg szó abból ered, hogy ilyenkor az alsóbb rétegek hidegebbé válnak, mint a légkör magasabb rétegei. Ilyenkor a felszín közelében hideg és nyirkos állapotok uralkodnak, míg a magasban enyhébb, szárazabb leveg áramlik (Cséki, 2010). Sok esetben köd kialakulásával és ezáltal a látástávolság romlásával, csökkenésével jár. Hideg légpárna kialakulásának kedvez, ha hidegfront után egy anticiklon épül ki a Kárpát-medence területére. Ez általában derült id járást okoz, amely kedvez a kisugárzásnak, valamint a talaj közelében kialakuló inverzióknak. Ha a leveg h mérséklete harmatpontig csökken, akkor kialakulhat a köd. Az id el rehaladtával azonban az éjszaka kialakult felszín közeli inverzió egyre tovább marad meg, mivel a hajnalban képz dött köd egyre inkább lerövidíti a felszín felmelegedésének id szakát, hiszen a beérkez rövidhullámú sugárzás rövid ideig éri el a talajt. Ezáltal a felszín közelében egyre inkább lecsökken a h mérséklet. Amikor a hajnalban képz dött köd már napközben sem tud feloszlani, akkor beszélhetünk hideg légpárnáról. A köd teteje veszi át a kisugárzási felszín szerepét. Közvetlen a köd teteje felett lév légréteg is telít dhet a h mérséklet csökkenésével. Összességében eleinte a köd fokozatos vastagodása, majd a telített réteg megemelkedése játszódik le a hideg légpárnás sztrátusz felh zet kialakulásakor. (Cséki, 2010). Ilyenkor a felszín közelében javul a leveg min sége.

Feloszlását el idézheti:

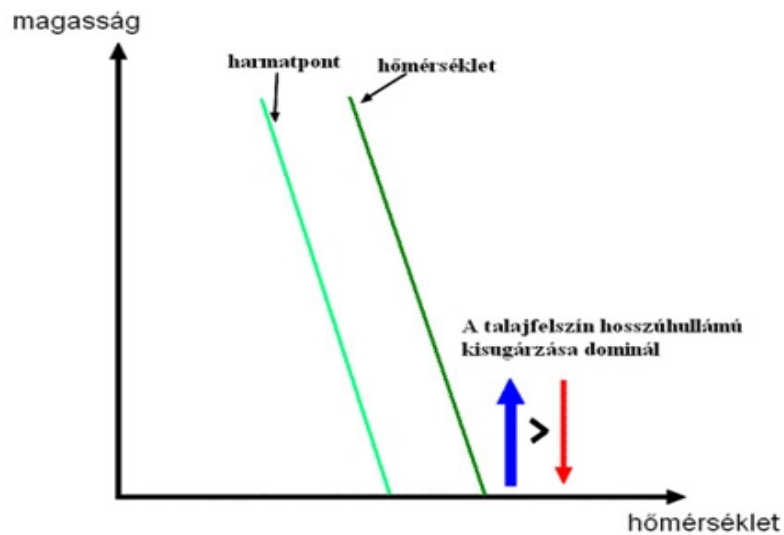
- egy erőteljes, markáns hidegfront
- magassági hidegcsepp
- száraz levegő bezúdulása az alacsonyabb légrétegekben
- hideg advekciónál okozott labilis rétegzés (Gyöngyösi et. al., 2013).

A következő ábrákon (Kolláth, 2011) a felszín közelében kialakult köd megemelkedését és sztrátusz felhőzeté alakulását mutatom be.

A 3.3. ábrán egy anticiklon uralta időjárás esetén, a téli félévben kialakult rövidhullámú besugárzást és a hosszúhullámú kisugárzást mutatja be derült égbolt esetén. A felhők meglétének hiányában, valamint azt a tényt is figyelembe véve, hogy télen a nappalok hossza rövidebb, azt engedni következtetni, hogy ilyenkor a felszín hosszúhullámú kisugárzása jelentősebb a nappali besugárzásnál. Ez pedig kedvez a már korábban is említett kisugárzási inverzió kialakulásának. Majd a kisugárzásnak köszönhetően a felszín közeli légréteg hőmérséklete nagymértékben csökkenni kezd addig, amíg el nem éri a telítettséget. Ilyenkor gyakran képződik a talaj közelében (3.4. ábra). A köd kialakulásával már nem a felszín játssza a kisugárzási felszín szerepét, hanem a köd teteje. Ilyenkor a köd és a talaj közötti réteg hőmérsékletéről az mondható el, hogy csak csekély mértékben, szinte alig hűl tovább. A ködtakaró felett az inverzió tovább erősödik. Ez jól megfigyelhető a 3.5. ábrán. A köd belsejében az addigi inverziós hőmérsékleti rétegzést egy ún. izotermikus – azaz a magassággal állandó hőmérséklet – rétegzés váltja fel. Ezután a felszín közeli rétegben a nedvességtartalom csökkenni kezd, a köd lassú feloszlása megkezdődik és a hőmérsékleti profil visszaáll a magassággal csökkenő rétegzésre. Mindeközben a ködtakaró felsőbb rétegének hőmérséklete továbbra is csökken és fokozódik a túltelítettsége is. Az anticiklonra jellemző – a magasban kialakult konvergencia és az alacsonyszint divergencia miatt – leáramlás hatására a köd feletti felsőbb rétegek adiabatikusan melegedni fognak, amely az inverzió további erősödését eredményezi (3.6. ábra). Végül a köd felszín közeli része teljesen megszűnik, míg a felsőbb rétegei megemelkednek, amely a sztrátusz felhőzet kialakulásához vezet. Ekkor a sztrátusz tetejének kisugárzási hőlése és a magasban történő leáramlás által meghatározott zsugorodási inverzió tulajdonképpen összekapcsolódik egymással. A felhőzet függőleges rétegeiben egy egyfajta egyensúlyi állapot következik be, amely a különböző diffúziós és sugárzási folyamatok egyensúlyából adódik. A talaj közelében és a felső rétegekben



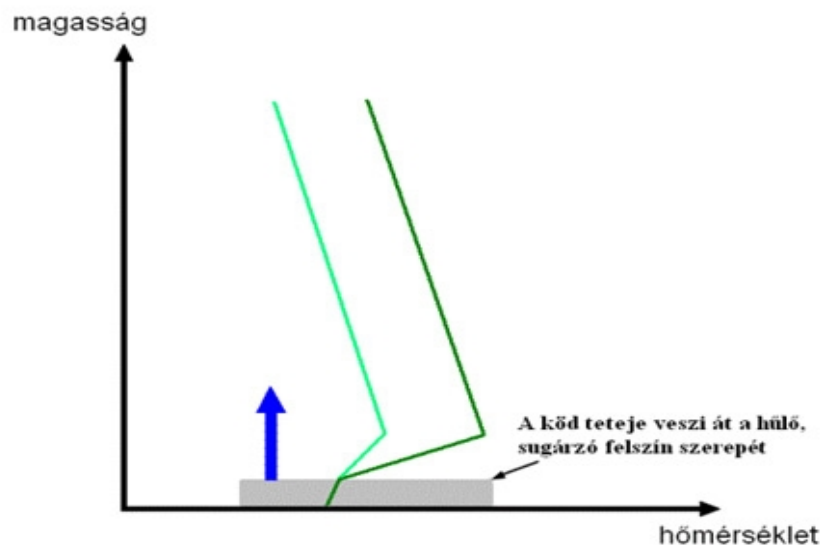
adiabatikus a rétegzés, míg a köztük egy nagyon keskeny zónában egy igen erős inverzió figyelhető meg, amely tovább már nem erősödik (3.7. ábra). A Kárpát-medencében általában 1000 méter alatt alakulnak ki ezek az egyensúlyi felhőzetek.



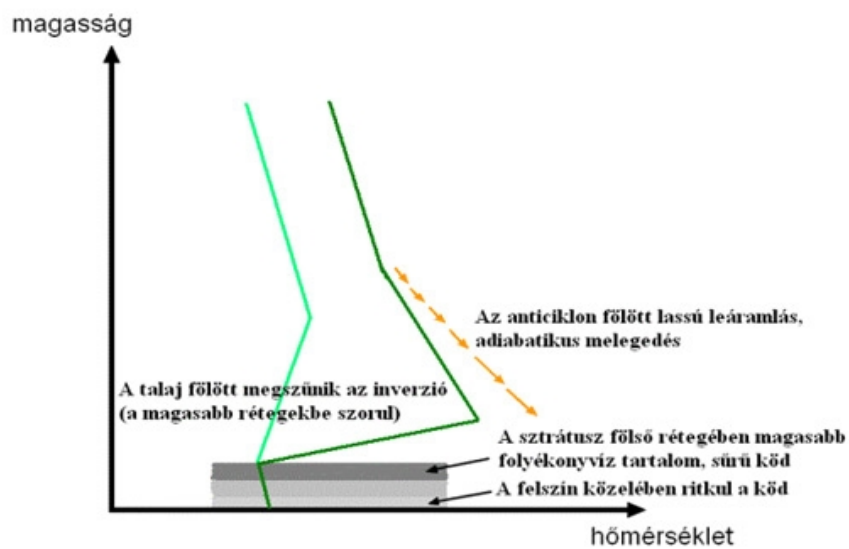
3.3. ábra. Derült égbolt esetén a felszín hosszuhullámú kisugárzása jobban dominál a beérkező rövidhullámú sugárzással szemben



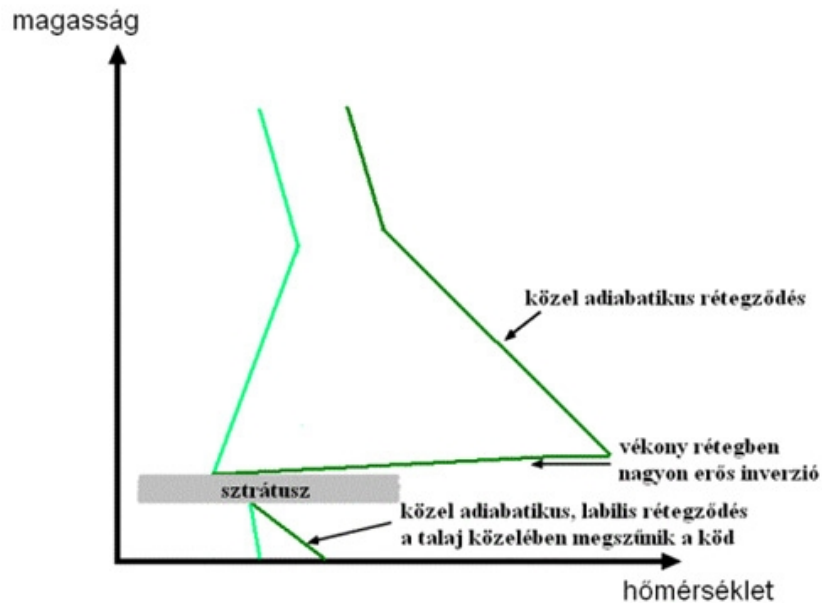
3.4. ábra. A felszín közeli réteg hőmérséklete miután elérte a harmatpontot, kialakul a köd a talaj felett.



3.5. ábra. Napközben egyre később szűnik meg a köd, így kiterjedtebbé válik. Így már nem a talaj, hanem a köd teteje válik a sugárzási felszínné



3.6. ábra. A köd emelkedése miatt az alsóbb rétegek látásviszonyai egyre inkább javulnak.



3.7. ábra. A megemelkedett köd már napközben is megmarad és kialakul a sztrátusz felhőzet

Ugyancsak kedvező hatással van a koncentráció megnövekedése szempontjából a *gyenge talaj menti szél*, vagy a szélcsend. Ez leginkább az előbb említett inverziós rétegződés esetén, anticiklonokban fordulnak elő, valamint egy-egy melegfront átvonulása után pár nappal is számíthatunk arra, hogy gyengébb lesz a légmozgás. Ilyenkor a szennyező anyagok könnyen megmaradhatnak és feldúsulhatnak az adott emissziós forrás közelében, hiszen a légmozgás nélkülözésével a transzmissziós folyamatok sem tudnak hatékonyan megködni. Viszont egy erős teljes hidegfront átvonulásnak köszönhetően – ami mögött gyakran megélnékül az északnyugati szél – a szennyező anyagok sem fognak megrekedni az alsó légrétegben, így várható a levegő egyfajta minőségbeli javulása.

A következő kulcsfontosságú meteorológiai paraméter a *csapadék*. Jelentős csapadékhullás elősegíti az aeroszolok nedves ülepedését. Korábbi évek csapadék viszonyait megvizsgálva és összevetve a PM10 koncentrációjával, arra a következtetésre jutottam, hogy napi átlagban az 5 millimétert meghaladó csapadékmennyiség esetén nem várható koncentrációbeli növekedés. Fontos azonban, hogy mikor és mennyi ideig hullik a csapadék. Elfordulhatnak olyan helyzetek, amikor nagy csapadékmennyiség esetén nem csökken, hanem növekszik a PM10 koncentrációja. Ilyenkor meg kell vizsgálni a csapadékmennyiség napi menetét. Elfordulhat, hogy csak egy adott időszakban történik csapadékhullás, amely a napi csapadékösszeget adja, de előtte és utána a PM10 koncentrációja magas lehet. Így a PM10 napi átlaga – annak ellenére, hogy a csapadékhullás alatt csökkent a koncentrációja – nem csökken.

## 4. Adatfeldolgozás

### 4.1 Stagnation-index

Dolgozatomban a levegő szennyezettségét egy komplex mér számmal, az ún. Stagnation-indexszel (SI) közötti kapcsolatot keressük. Ez az index az időjárás paramétereinek együttes hatását veszi figyelembe. Az SI index számszerű prognózis helyett egy empirikusabb jellegű elrejelzést tesz lehetővé, ahol egy bizonyos küszöbérték alatt és felett válik a levegő minősége kedvezőtlené illetve kedvezőtlené.

Vizsgálataimhoz az ECMWF ERA INTERIM adatbázisát használtam, Budapest rácspontjára (19°E, 47,5°N) vonatkozó értékekkel. Az adatbázisból elsősorban a határréteg vastagság, a csapadékmennyiség, a hőmérséklet és az u és v szélkomponens adatokat dolgoztam fel a 2007-2013 közötti fűtési időszak<sup>5</sup> vonatkozóan FORTRAN és Grads programok segítségével. Először az u és v szélkomponensekből állítottam a szélsősebességeket, majd a 00, 06, 12 és 18 UTC-re vonatkozó adatokból elkészítettem a napi átlagokat. A napi átlag szélsősebességekből és az ERA INTERIM +12 és +24 órás elrejelzéseiből készített napi átlag határréteg vastagságokból – az adatbázisban nem voltak analízis adatok a határrétegre vonatkozóan, csak forecast adatok – pedig egy komplex mér számmal, a Stagnation-index napi átlagait állítottam elő. Ezután az SI-kezt, valamint a hőmérséklet- és csapadékértékeket vettem össze a PM10 több éves mérési adataival, amelyeket az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat oldalán értem hozzá, majd azokat táblázatos formában jelenítettem meg. A mérési adatok mindegyike Budapest, Gilice téri mérőállomására vonatkoznak.

A Stagnation-index meghatározásában (Holst et al., 2008) a határréteg vastagság (*PBL*) és a szélsősebesség (*v*) napi átlagai szerepelnek.

$$SI = \sqrt{\frac{10^6}{PBL \cdot |v|}}$$

Holst et al. (2008) a képlet megkonstruálását nem indokolták a fordított arányosság említésén kívül mélyebben. Tehát az index és a paraméterek között fordított arányossági

---

<sup>5</sup> Fűtési időszak: adott év október 1-jétől következő év március 15-ig.

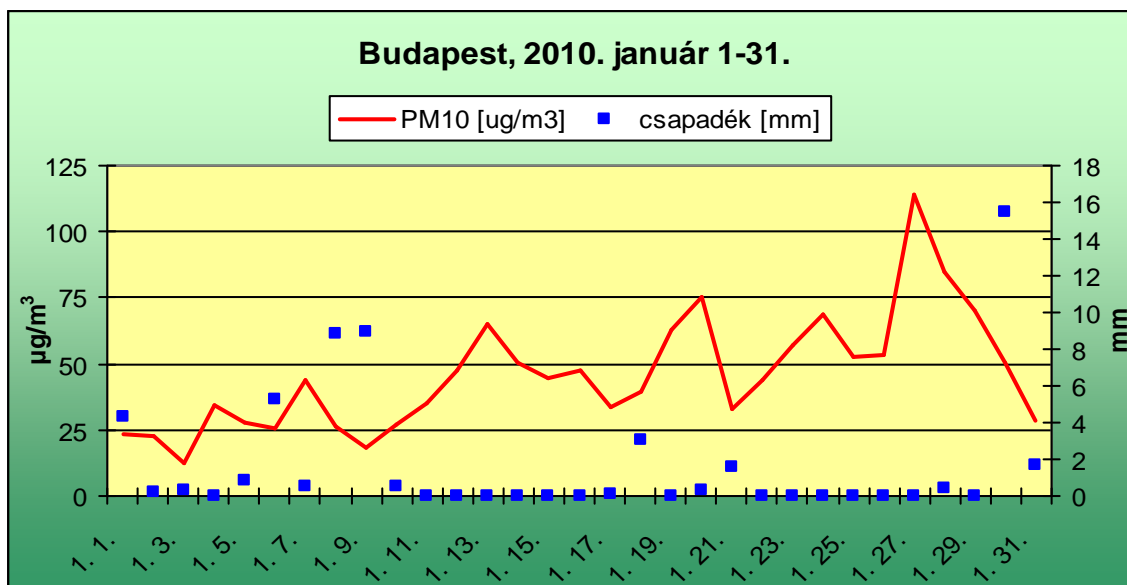
kapcsolat van, ami azt jelenti, hogy ha minél nagyobb a határreteg vastagság és a szélesség, – tehát minél jobban el tudnak keveredni a részecskék – annál kisebb lesz a SI értéke és minél inkább csökken a határreteg vastagság és a szélesség, annál nagyobb lesz az SI értéke és várhatóan a szennyez anyagok koncentrációja is. Ahhoz viszont, hogy pontosabb legyen a PM10 szennyezettségének becslése az SI index mellett, figyelembe kell venni a h mérsékleti- és a csapadékviszonyokat. A több éves meteorológiai adatsorokat megvizsgálva, összeállítottunk egy ún. döntési mátrixot (4.1. táblázat), amely a szmog várható alakulását mutatja be Budapesten adott SI és napi átlag h mérsékleti értékek mellett. Jól látható, hogy ha a napi átlag h mérséklet 0°C felett alakul, akkor nagyon kicsi az esély a szennyezett leveg kialakulására, függetlenül attól, hogy az SI értéke a 100-as küszöbérték alatt vagy felett alakul. Ha a napi átlag h mérséklet alacsonyabb 0°C-nál és a Stagnation-index is a kritikus érték felett alakul, akkor szinte majdnem minden esetben rossz leveg min ségre lehet számítani.

	SI <100	SI >100
Napi átlag h mérséklet >0°C	16%	15%
Napi átlag h mérséklet <0°C	43%	90%

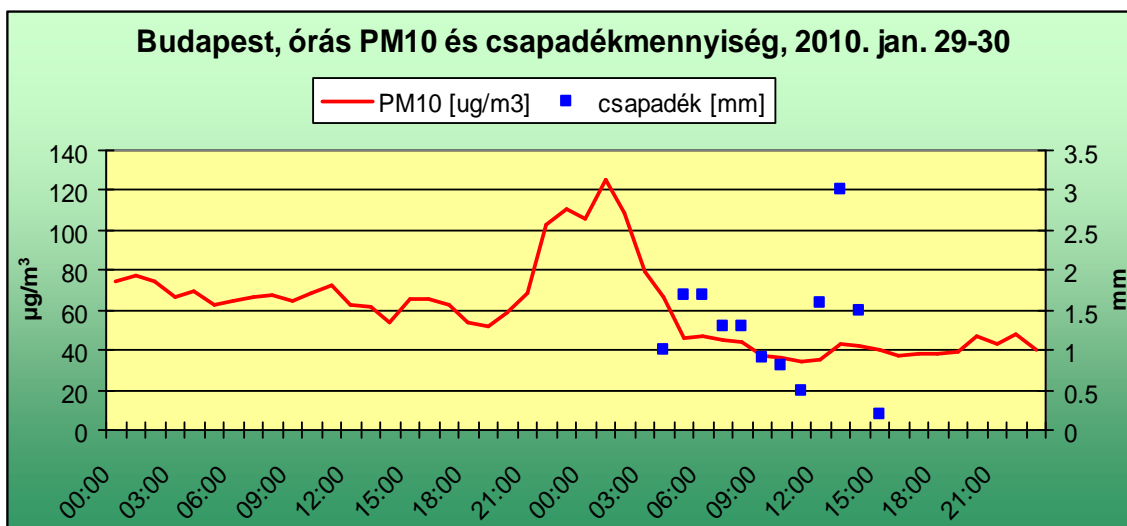
4.1. táblázat. Adott SI és napi átlag h mérsékleti kritériumok mellett mekkora valószínűséggel haladja meg a PM10 koncentrációja az egészségügyi határértéket.

A csapadékhullás idejének kérdésköre már sokkal összetettebb. Természetesen itt is igaz, hogy csapadékhullás idején javul a leveg min sége. A problémát els sorban az okozza, hogy mikor és mennyi ideig hullik csapadék, tehát milyen a napi eloszlása. Hiszen, ha adott nap hullott csapadék, akkor az a napi mennyiségben látszani fog és ilyenkor a leveg min ségbeli javulására lehetne számítani, azonban nem minden esetben igaz ez, ezért meg kell vizsgálni a csapadékmennyiség napi eloszlását is. Erre példa a 2010. január 30-i eset, amikor a napi csapadékösszeg meghaladta a 15 mm-t, azonban a PM10 az egészségügyi határérték felett alakult (4.2/a ábra). Ha megvizsgáljuk azonban órák bontásban az adott nap csapadékmennyiségét és összevetjük a PM10 menetével (4.2/b ábra), akkor azt láthatjuk, hogy a hajnali órákban érte el a maximumát a PM10 koncentrációja, – amely a riasztási határérték felett alakult – amikor nem hullott csapadék. A reggeli, valamint a kora délutáni órákban hullott csapadéknak köszönhetően javult a leveg min sége és a szennyezettség az egészségügyi határérték alatt maradt. Tehát a nagy napi csapadékmennyiség ellenére – valamelyest csökkent a PM10 értéke – is küszöbérték felett maradt a leveg szennyezettsége. Ez a példa is jól tükrözi, hogy a

PM10 elrejelzése mennyire bonyolult és összetett folyamat. Tehát a szennyezettség szempontjából nem elég elrejelezni a csapadék mennyiségét a következő napokra, hanem fontos lenne tudni annak napi eloszlását is.



4.2/a ábra. A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével



4.2/b ábra. PM10 és a csapadék kapcsolata órás bontásban.

## 4.2 PM10 adatsorok elemzése és összevetése az egyes meteorológiai paraméterekkel és a Stagnation-indexszel

Ahogy már a korábbiakban bemutattuk a Stagnation-indexszel szeretnénk megbecsülni a PM10 által okozott szennyezettséget. El ször meg kell vizsgálni, hogy milyen kapcsolat áll fenn a két paraméter között. Emiatt fontos, hogy mindkettőt egyszerre szerepeltessük a táblázatokban. A grafikonokon a napi átlagos PM10 (mikrogramm/köbméterben kifejezve) és a napi átlagos SI (dimenzióatlan) értékét a baloldali tengely, míg a meteorológiai paraméterek értékét – h mérséklet, csapadék – a jobb oldali tengely mutatja. Látni fogjuk, hogy az esetek többségében követi az SI a PM10 menetét, azonban el fordulnak olyan helyzetek, amikor különböző meteorológiai okok miatt eltérnek egymástól. Ezeket az eltéréseket többek között kiválthatja az alacsony napi átlag h mérséklet és az ebből adódó magas PM10 szennyezettség, valamint a Stagnation-index érzékenysége a határreteg vastagságára, de akár maga a modellbizonytalanság is hordozhat némi differenciát. A keveredési rétegvastagság okozta érzékenységet rádiószondás felszállásokkal magyarázzuk meg, melyeket a Wyoming Egyetem archívumában<sup>6</sup> lehet megtekinteni.

El ször mindig az adott időszakhoz tartozó PM10, SI és h mérséklet adatokat mutatom be és elemzem azokat az adott időjárási helyzetek függvényében, figyelembe véve a napi csapadékmennyiség értékeit.

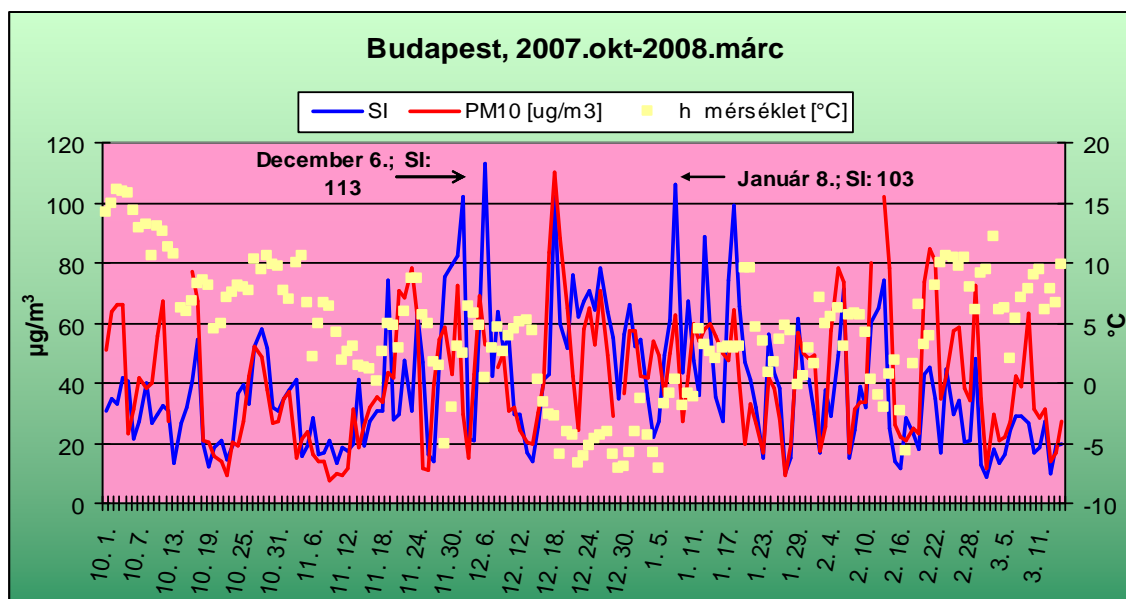
### 4.2.1 A 2007-2008-as f téli időszak elemzése

A 4.2.1 ábra a PM10 és a Stagnation-index kapcsolatát mutatja be a h mérséklet függvényében a 2007-2008 közötti f téli időszakra vonatkozóan. Néhány esetet kivéve megfigyelhetjük, hogy a PM10 és az SI szinte együtt mozognak. Ugyanakkor a h mérséklet jellegzetes téli féléves menete is jól kirajzolódik. A h mérséklet ősszel és kora tavasszal szinte mindig meghaladta az 5°C-os napi átlagértékeket, míg december-január időszakban jobbra 0°C alattiak az értékek. Továbbá megfigyelhetjük az is, hogy amíg magasak ezek az átlagok, addig nem romlott érdemben a PM10 szennyezettsége. Ha azonban 0°C alá esett a h mérséklet, azt azonnal meg lehetett figyelni mind a PM10-nél, mind az SI-nél is. Csapadék esetében az mondható el, hogy amikor jelentősebb mennyiségű csapadék hullott

---

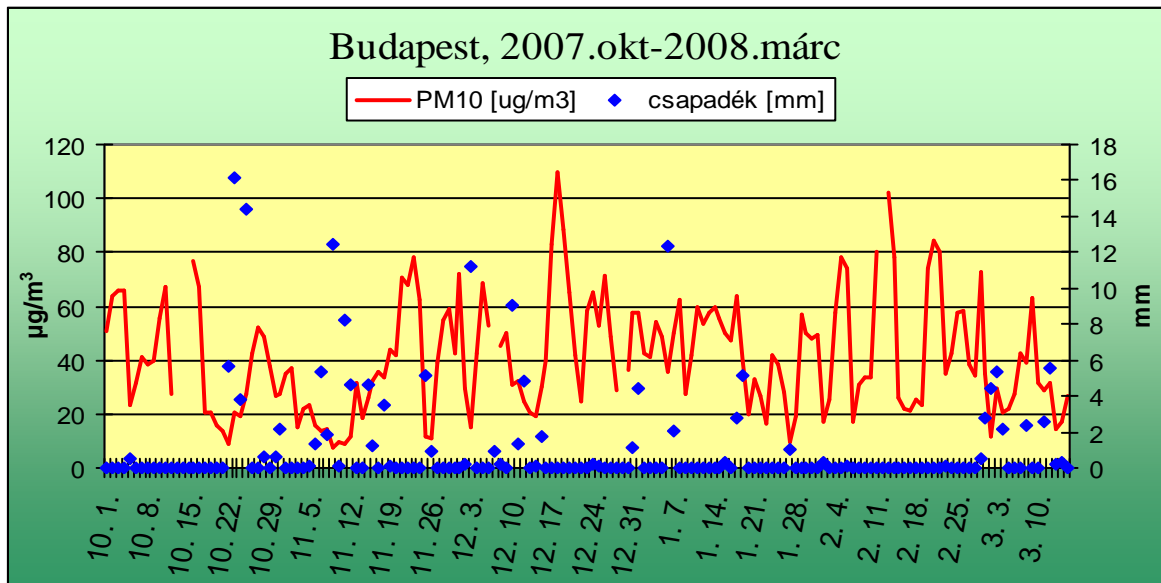
<sup>6</sup> Wyoming Egyetem honlapja: <http://weather.uwyo.edu>

– 3 mm, vagy azt meghaladó – akkor csökkent a szennyezettség értéke (4.2.2. ábra). Ilyen esetekre példa a november 6-12 közötti időszak. Ebben ez egy hétben a PM10 koncentrációja nagyon alacsony volt, a napi átlag egyszer sem haladta meg a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -es értéket. A december első két hetében lehullott jelentős mennyiségű csapadék – mintegy 30 mm – hatására koncentráció csökkenést lehetett tapasztalni és ezáltal jelentősen tisztult a levegő. December 6-án azonban jelentős különbség adódott a PM10 és a Stagnation-index között. Az SI több mint a duplájára emelkedett, ezzel szemben a PM10-re nem ez volt jellemző. Az SI megugrása annak köszönhető, hogy ezen a napon a légkör alsó, pár száz méteres rétege kiszáradt, felszín közeli inverzió alakult ki és ezáltal kicsi volt az a réteg, ahol a szennyező anyagok el tudtak keveredni (4.2.3. ábra). A január 8-ai eltérés is ugyanezzel indokolható. Február 14-e és 17-e közötti időszakban észak felől egy hidegfront érte el a Kárpát-medence térségét, amit erős, olykor viharos szellőkések kísérték. Ennek köszönhetően egyre inkább javult a levegő minősége, annak ellenére, hogy a hőmérséklet jelentősen lecsökkent.

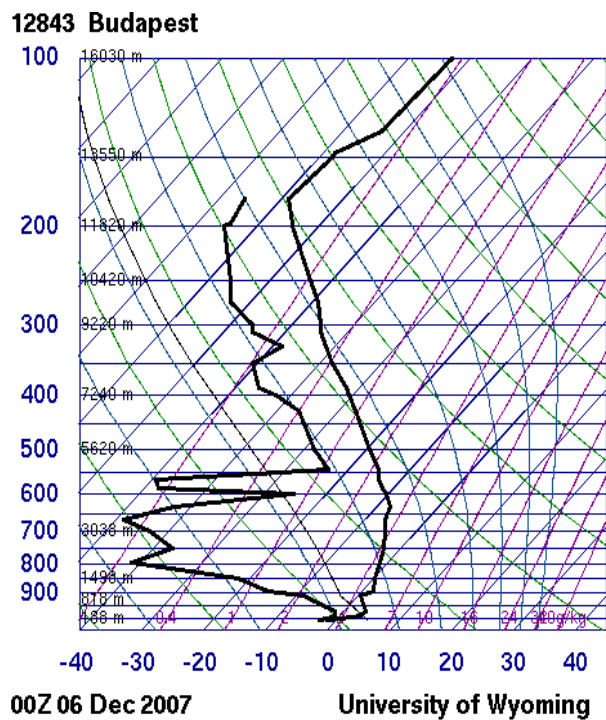


4.2.1 ábra. Szmogos helyzet alakulása a napi átlaghőmérséklet függvényében, 2007-2008





4.2.2. ábra A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével, 2007-2008



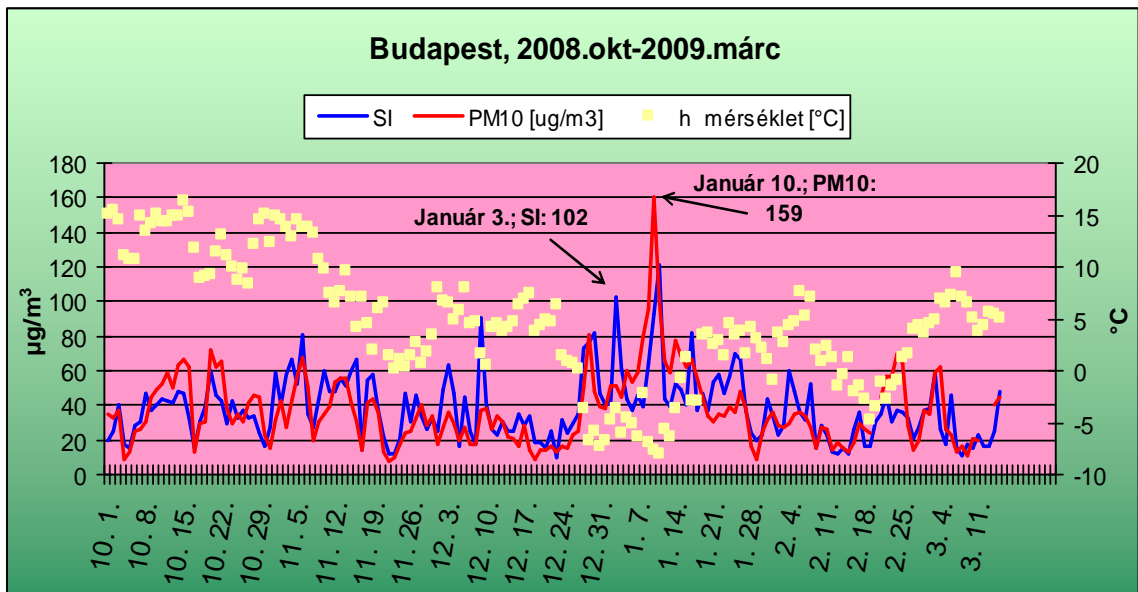
4.2.3. ábra. 2007.december 6. 00 UTC-re vonatkozó rádiószondás felszállás.

(Forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

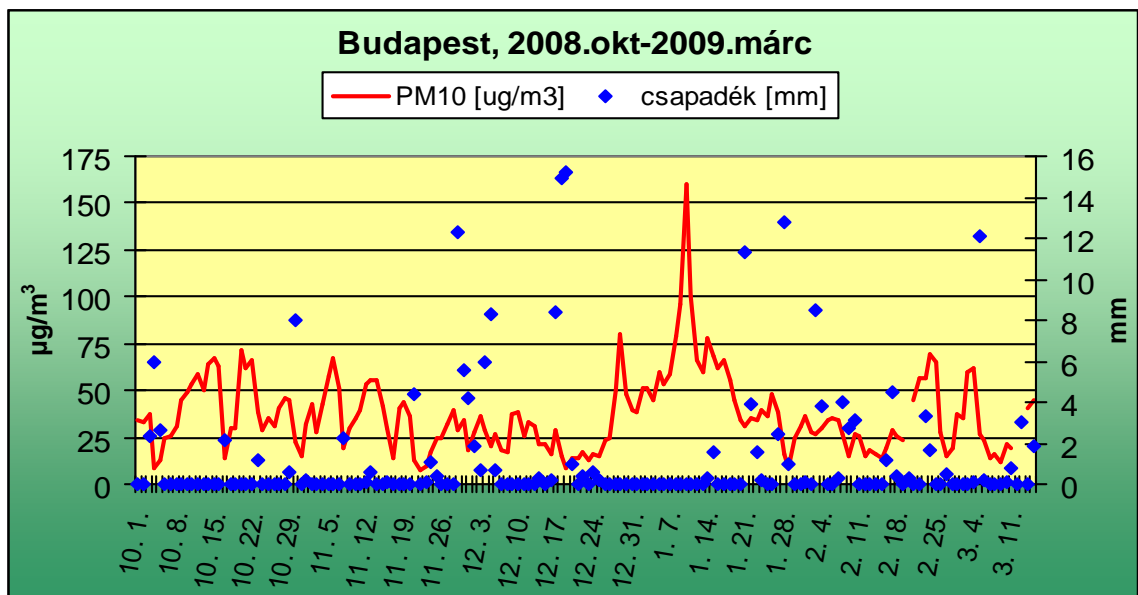
#### 4.2.2. A 2008-2009-es f tési id szak elemzése

Ebben az id szakban jól látható, hogy a PM10 koncentrációja csak ritkán haladta meg a tájékoztatási- és az egészségügyi határértéket (4.2.4. ábra). Több érdekes esetet is megfigyelhetünk ebben az id szakban. Az els ilyen esetet október 16-17-én tapasztaltuk, amikor a koncentráció értéke  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -r  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re csökkent. A 4.2.5. ábrán látható, hogy az aznapi kisebb mennyiség csapadék hullás is szerepet játszhatott a levegő min ségbeli javulásában, azonban ez nem okozta ekkora mérték csökkenést. A csökkenés legf bb kiváltó oka a hazánkon el z nap átvonuló hidegfront és a mögötte érkező nagy erejű, 10-15 m/s-os szélökések voltak. December végétől január közepéig  $0^\circ\text{C}$  alatt maradt a napi átlag hőmérséklet és ennek megfelelően növekedett a koncentráció értéke. Január 3-án szintén eltérés tapasztalhattunk a Stagnation-index és a PM10 között. A magyarázatot az aznapi 00 UTC-s rádiószondás felszállást (2.4.6. ábra) kielemezve kapjuk, ugyanis a felszín közeli légrétegben inverzió alakult ki. A PM10 és ezzel együtt az SI is január 10-én érte el a maximumát a teljes id szakra vonatkozóan, amely az alacsony hőmérséklet tartós megmaradása okozta. Ezután, ahogy növekedett a levegő hőmérséklete, úgy fokozatosan javult a levegő min sége is. A  $0^\circ\text{C}$ -ot meghaladva már az egészségügyi határérték alatt maradt a szennyezettség értéke.

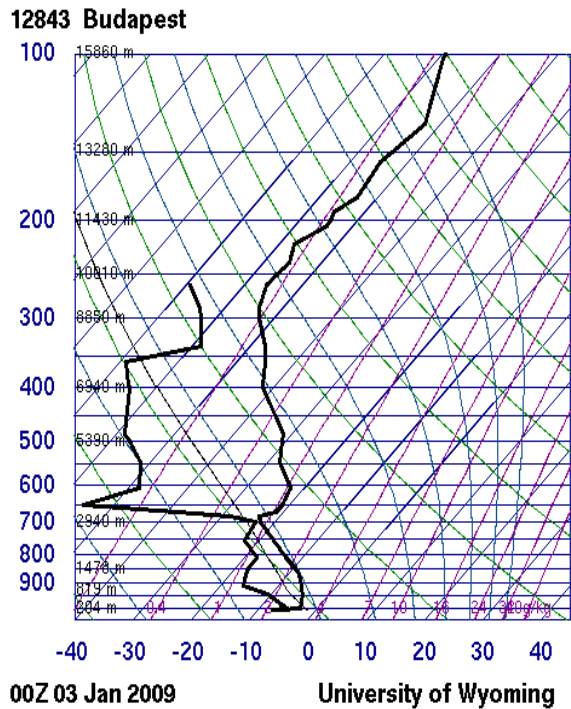
Ahogy az a 4.2.5. ábra is szemlélteti, a PM10 koncentráció csökkenése az esetek többségében a csapadékos id szakokhoz köthet k. Ilyen helyzetek többször is előfordulnak a vizsgált id szakon belül. Október elején a három napos csapadék hullásnak köszönhetően  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -r  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re, míg október 17-én közel 75%-kal csökkent az előző naphoz képest. A december 17-19 közötti id szakban viszonylag sok, csaknem 40 mm csapadék hullott, ezáltal még inkább tisztult a levegő. A december végi január közepi intervallum meglehetősen száraznak és hidegnek bizonyult. A PM10 szennyezettsége közel két héten át minden nap meghaladta az egészségügyi határértéket, január 10-én és 11-én pedig a riasztási határértéket. Érdekes helyzetnek tekintik azonban a február végi id szak. Csapadék hullás ellenére nemcsak az egészségügyi határérték feletti értékeket, de emelkedő tendenciát is tapasztalhattunk. Ez a csapadék napi menetével magyarázható. A 23-án délelőtt, míg 24-én a kora délutáni órákban hullott le az a csapadékmennyiség, ami a napi átlagban is szerepel. Éjszakára azonban egy szárazabb légtömeg hatására megszűnt a csapadék, gyenge volt a légmozgás, valamint a felszín közelében inverzió is kialakult, amelyek mind-mind a kiválthatták a koncentráció-növekedést.



4.2.4. ábra. Szmogos helyzet alakulása a napi átlagh mérséklet függvényében, 2008-2009



4.2.5. ábra. A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével, 2008-2009.



4.2.6. ábra. 2009.január 3. 00 UTC-re vonatkozó rádiószondás felszállás.

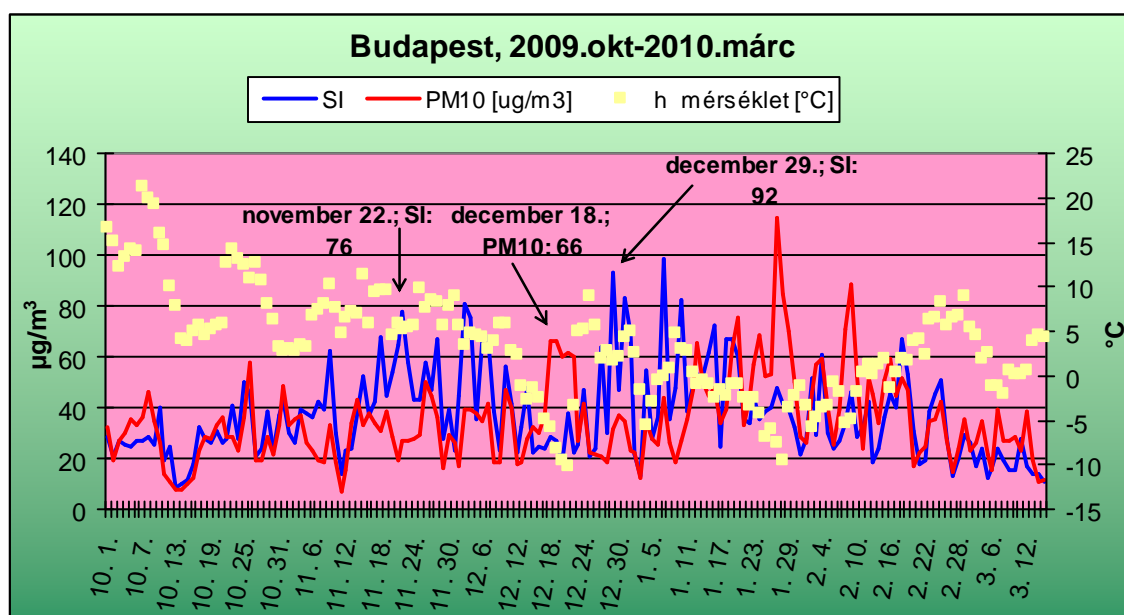
(Forrás: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

#### 4.2.3. A 2009-2010-es f tési id szak elemzése

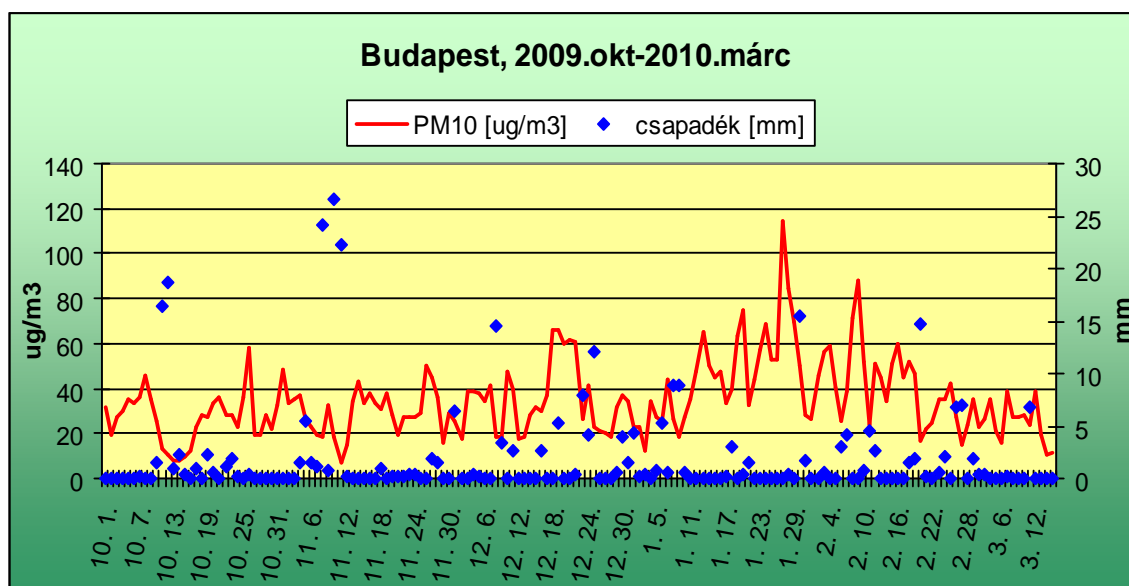
A 2009-2010-es f tési szezonra vonatkozó szennyezésbeli értékek, valamint annak becslése többször is eltérést mutatnak (2.4.7. ábra). Az id szak elejétől nagyjából egy hónapig együtt halad a napi menetük. Az első lényeges eltérés november 22-én tapasztalható, amikor a Stagnation-index felülbecsülte a szennyezettség átlagos értékét, míg a PM10 koncentrációja az egészségügyi határérték alatt maradt. Az SI megnövekedését a hajnalban kialakult felszín közeli inverziós rétegzés, az alacsony határreteg és a gyenge légmozgás váltotta ki. Ekkor hazánk idjársát már több napja anticiklon befolyásolta. Magas nyomású rendszerek uralta terület alatt kisebb lesz az a réteg, ahol a szennyezésanyagok át tudnak keveredni, így ez is hozzájárul az index értékének növeléséhez.

December közepén a hőmérséklet folyamatos csökkenésével hasonló arányban növekedett a szennyezettség mértéke, azonban az SI meglehetősen alacsony értékeket mutatott. A PM10 koncentrációjának emelkedése – az alacsony hőmérsékletből adódóan – a

háztartások f téseib l származott. A napi átlagh mérsékletek több napon keresztül -5 °C alatt maradtak. Az alacsony SI valószínűleg a nagyobb keveredési rétegvastagságnak, valamint a megélénkül szélnek volt köszönhető. December végén emelked tendencia tapasztalható mind a PM10-nél, mind az SI-nél, csak a változás mértéke volt eltér. December 29-én az index értéke közelítette a 100-as nagyságrendet, míg a PM10 jóval az egészségügyi határérték alatt maradt. Az aznapi átlagos határréteg vastagság elég kicsi volt, még napközben sem tudott jelentősen átkeveredni az alsó és a felső réteg, ezért az index értéke meglehetősen nagy lett. A PM10 koncentrációja pedig a csapadékhullás (4.2.8. ábra) okozta nedves ülepedés hatására alacsony maradt. A január végén a PM10 értéke meghaladta a riasztási fokozatot, amely nemcsak lokális forrásból ered, hanem a lengyel iparvidék által emittált szennyezettségből is (Ferenczi és Kolláth, 2013). A január 30-i helyzet rávilágít arra, hogy nagyobb mennyiségű csapadék hatására mennyivel képest javulni a levegő minősége. Ebben az esetben a 15 mm-t meghaladó csapadékmennyiség hatására 70 µg/m<sup>3</sup>-ról 150 µg/m<sup>3</sup>-re csökkent a koncentráció értéke. Február 12-én ugyan a 3 mm csapadék hullott, de ennek ellenére növeked tendenciát figyelhettünk meg a PM10 menetében, sőt át is lépte az 50 µg/m<sup>3</sup>-es küszöbértéket. Ez ugyancsak a csapadékmennyiség napi eloszlásával magyarázható. A hajnali, reggeli órákra lehullott a csapadék jelentős része, így a nap hátralévő részében kedvezőek voltak a meteorológiai körülmények a koncentráció növekedés szempontjából. Ezután mindkettő napi menete hasonlóképpen alakul.



4.2.7. ábra. Szmogos helyzet alakulása a napi átlagh mérséklet függvényében, 2009-2010



4.2.8. ábra. A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével, 2009-2010

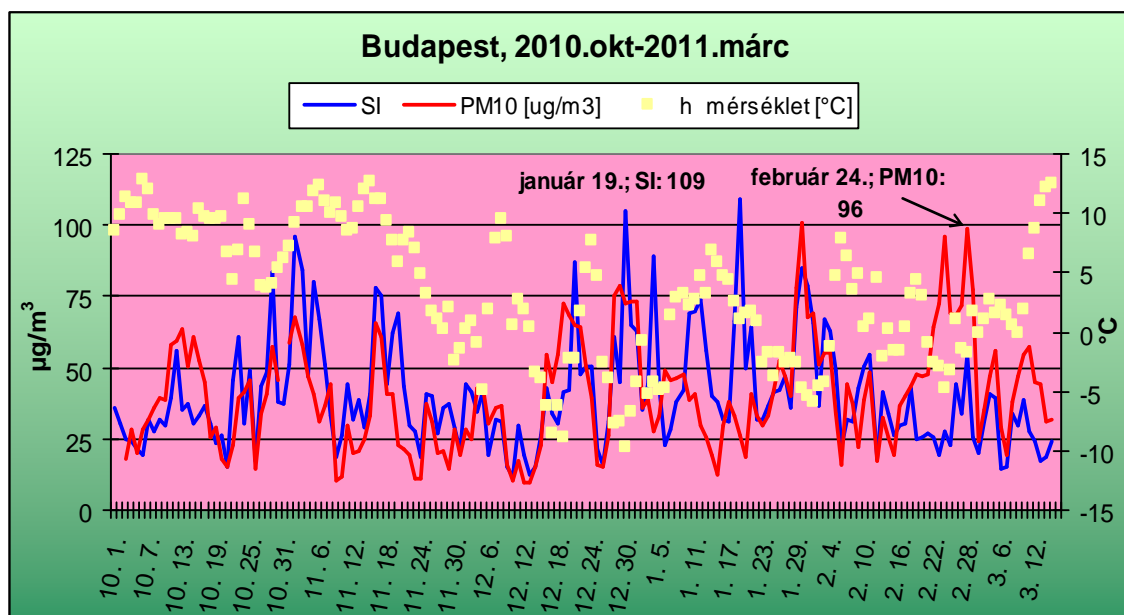
#### 4.2.4. A 2010-2011-es f tési id szak elemzése

A következ id szak szennyezettségét (4.2.9. ábra) megvizsgálva az tapasztalható, hogy a Stagnation-index – néhány esett l eltekintve – jól meg tudta becsülni a PM10 várható alakulását. Jól látható, hogy a szennyezettség értéke többször meghaladta az egészségügyi határértéket. Ehhez nagyban hozzájárult, hogy ez az id szak jórészt száraz volt és viszonylag kevés alkalommal hullott csapadék. A legcsapadékosabb id szak november vége és december eleje volt, amikor több mint 50 mm csapadék hullott (4.2.10. ábra). Ebben az id szakban volt a PM10 koncentrációja a legalacsonyabb, annak ellenére, hogy a napi átlagh mérséklet többször is 0 °C alatt alakult.

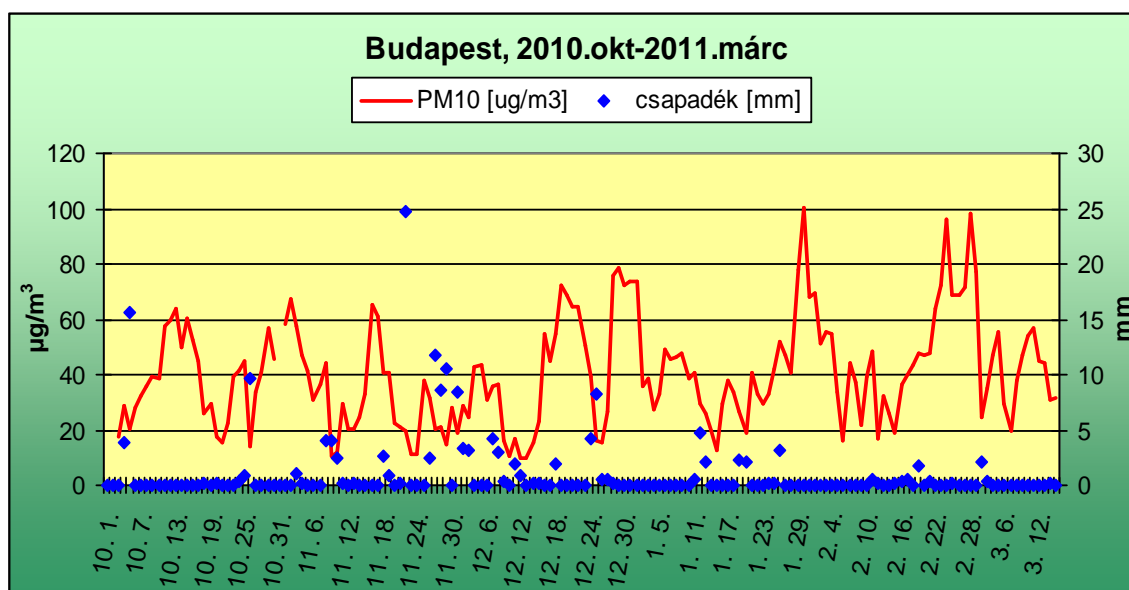
A legszembet n bb különbség január közepén figyelhet meg. A januári id járáshoz képest a sokkal magasabb h mérsékleti értékek miatt, a szennyezettség jelent sen az egészségügyi határérték alatt maradt. Hazánk id járását eleinte anticiklon alakította, majd napközben egy frontálzóna haladt el. Ekkor felh s volt az égbolt, amely gátolta a beérkez rövidhullámú sugárzást és így a nagyobb átkeveredést is. A PM10 koncentrációja azonban nemcsak emiatt növekedett meg, hanem attól is, hogy a felszín közelében nagyon gyenge szél fújt. Ugyanakkor az átlagh mérséklet 0 °C felett alakult, ezáltal a f tésb l származó szennyez dés nem volt jelent s mérték . Ezután jól látható,

hogy az SI és a PM10 teljesen együtt mozog, a h mérséklet csökkenésével mindkét érték növekedett. Január végén a koncentráció értéke két napnál is tovább meghaladta a tájékoztatási határértéket, ezért ezekben az id szakokban szmogriadót rendeltek el (Ferenczi, 2009), a 2008-ban elfogadott levegőminőséggel kapcsolatos kormányrendelet szerint.

A február végi helyzet az eddigiektől annyiban tért el, hogy itt nem az SI, hanem a PM10 koncentrációja növekedett meg, ezzel szemben az index értéke alulbecsülte a szennyezettséget. Látható, hogy a koncentráció emelkedését a h mérséklet csökkenéséből származó szennyezőanyagok okozták. Ezt az értéket, ha összevetjük a január végén mért h mérsékletekkel, akkor láthatjuk, hogy sokkal kisebb h mérsékletcsökkenés váltotta ki ugyanazt a koncentrációbeli értéket. Ez valószínűleg a több napig tartó 0°C alatti napi átlagh mérsékletnek köszönhető. A kialakult nagy átlagos keveredési réteg pedig alacsony indexértéket eredményezett. A fenti néhány eseménytől eltekintve azonban az látható, hogy viszonylag jó becslést adott a Stagnation-index a PM10 általi szennyezettségre.



4.2.9. ábra. Szmogos helyzet alakulása a napi átlagh mérséklet függvényében, 2010-2011



4.2.10. ábra. A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével, 2010-2011

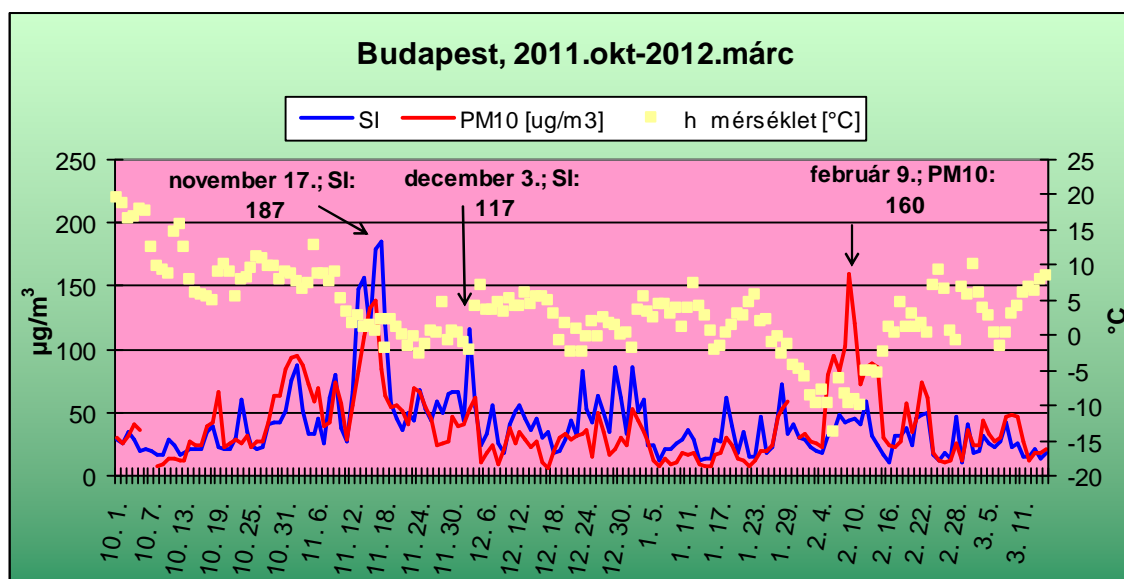
#### 4.2.5 A 2011-2012-es f tési id szak elemzése

A 2011-2012 f tési szezonra vonatkozó légszennyezettséget (4.2.11. ábra) elemezve az állapítható meg, hogy az id szak elején és végén szoros a kapcsolat a kisméter részecske szennyezettség és a Stagnation-index között, míg az id szak közepén az SI érték néhány esetben valamelyest túlbecsülte a tényleges PM10 koncentrációt. Az 4.2.12. ábra legszembet n bb része az, amikor november közepén az index értéke megközelítette a 200-as nagyságrendet. Ez alapján arra számíthatunk, hogy a leveg szennyezettsége igen veszélyes szintet ér el. A csapadék havi eloszlását (4.2.12. ábra) tekintve látható, hogy október végét l november végéig tartó id szak nagyon száraznak bizonyult. Ebben az id szakban a PM10 értéke is jelent s mértékben megnövekedett, több napon keresztül meghaladta a riasztási küszöbértéket. Ekkor szintén szmogriadót rendeltek el Budapesten. A meteorológiai háttérét megvizsgálva és az abból levont következtetések alapján már nem is olyan meglep ez a hosszan tartó szmogos helyzet. Hazánk id járását ekkor már több napja anticiklon uralta és az ezzel járó derült égbolt, valamint az éjszakai hosszúhullámú kisugárzás hatására, jelent s kiszáradás tapasztalható a felszínközeli rétegekben. Ennek következményeként több, napon keresztül elég er s felszín közeli inverzió és alacsony keveredési réteg alakult ki. Ezek mellett a gyenge légmozgás is el segítette a PM10 koncentrációjának feldúsulását és az SI index értékének

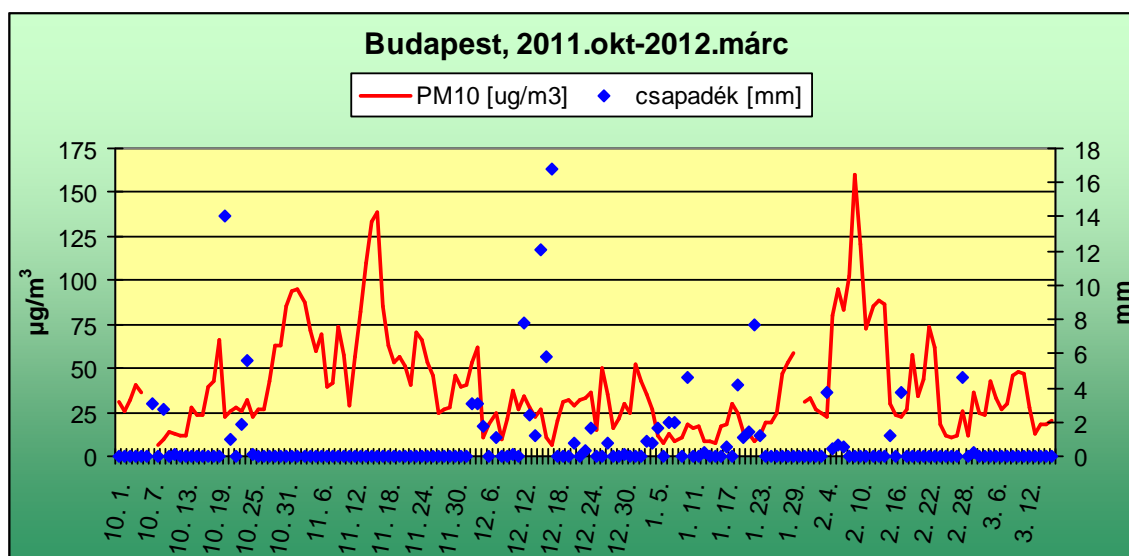


megnövekedését. Ezután az tapasztalható, hogy az index elég jól közelítette a szennyezettség valós értékét. December 3-án azonban az index értéke valamelyest túlbecsülte a PM10 napi átlagának értékét. Megvizsgáltam az aznapi rádiószondás felszállást és azt tapasztaltam, hogy nagyon alacsony volt a keveredési határréteg, melynek köszönhetően megugrott az SI értéke. A PM10 koncentrációja pedig azért nem mutat olyan mértékű növekedést, mint az SI, mert aznap 3 mm-t meghaladó csapadék hullott. Megfigyelhető, hogy december hónapban jelentős mennyiségű csapadék lehullott, mivel gyakoriak voltak a frontátvonulások és ezek miatt kiváló volt a levegő minősége, egyszerűen sem haladta meg az egészségügyi határtétet.

Végül egy olyan helyzetet emelnék ki, amikor az index alulbecsülte a PM10 koncentrációját. Ilyen időszakokra példa a február első egy, másfél hete. A jelentős koncentráció növekedést a hosszantartó alacsony napi átlag hőmérséklet miatt megnövekedett lakossági fűtési emissziójával magyarázható. Több napon keresztül nem csak a hőmérsékleti minimumok, hanem a napi átlagok is jelentősen 0°C alatt alakultak. Az egész fűtési szezont tekintve február 9-én érte el a legnagyobb értéket – 160 µg/m<sup>3</sup>-t – a PM10 koncentrációja. Közel egy héten át a tájékoztatási küszöbérték felett alakult a szennyezettség napi átlaga. Továbbá megfigyelhető, hogy a hőmérséklet emelkedésével egyre inkább csökkent a szennyezettség.



4.2.11. ábra. Szmogos helyzet alakulása a napi átlag hőmérséklet függvényében, 2011-2012



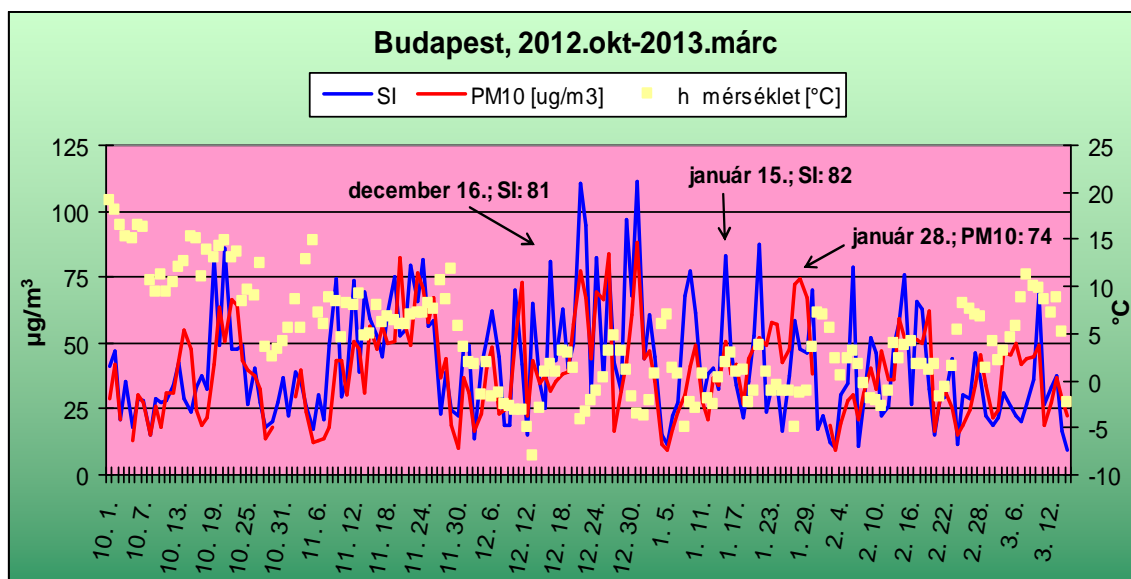
4.2.12. ábra. A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével, 2011-2012

#### 4.2.6 A 2012-2013-as f tési id szak elemzése

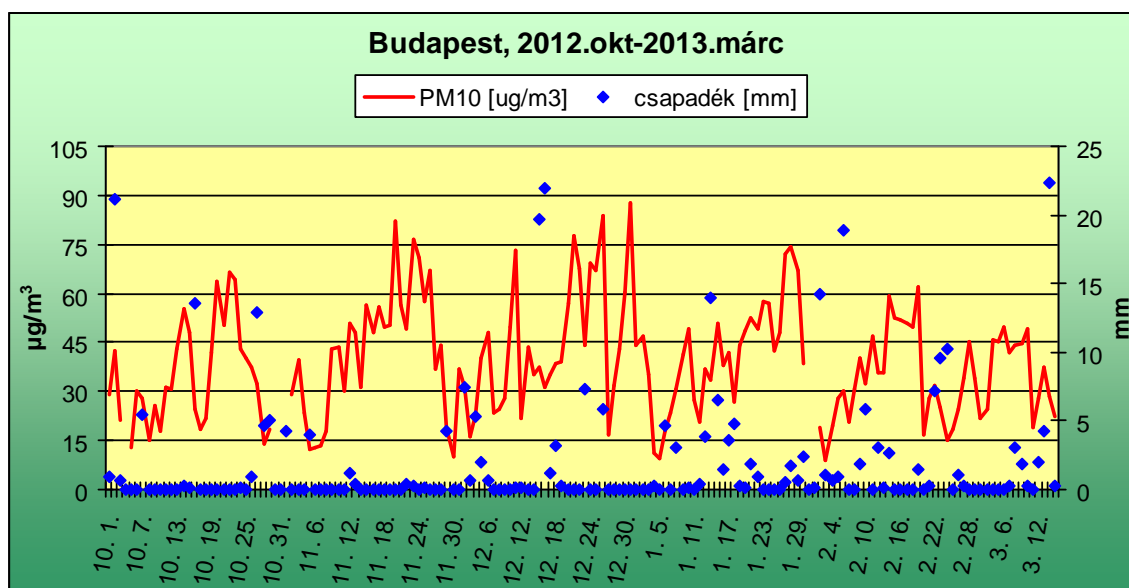
Végül a 2012-2013-as id szakot szennyezettségét vizsgáltuk meg (4.2.13. ábra). Jól látható, hogy a f tési szezon teljes id szakára vonatkozóan, az index teljesen jól követi a PM10 napi menetét és ezáltal nagy pontossággal tudta megbecsülni az általa kiváltott szennyezettséget. A teljes id szakra vonatkozóan az mondható el a PM10 koncentrációjáról, hogy viszonylag kedvez en alakult a leveg , hiszen egyszersem lépte át a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t meghaladó riasztási küszöbértéket. Ezt a tény az is alátámasztja, hogy a PM10 koncentrációja csak néhány alkalommal haladta meg az tájékoztatási értéket. A PM10 és a Stagnation-index napi menetében észrevehet különbségeket az adott nap hullott csapadék okozta, melyet a 4.2.14. ábra mutat be.

Az els ilyen példa a december 15-16-ai eset. Ekkor hazánkat egy hidegfront érte el, melyet jelent s csapadékmennyiség, de ugyanakkor gyenge légmozgás kísért. Ez alatt a két nap alatt mintegy 40 mm csapadék hullott, amely megmagyarráza a PM10 koncentrációjának csökkenését. Január 15-én és február 6-án tapasztalható koncentráció-SI index eltérést szintén az aznapi csapadékhullás okozta. Az el bbi esetben 6 mm-t meghaladó, az utóbbinál pedig majd 20 mm es esett. Csupán néhány olyan esetet tapasztaltunk, amikor az index értéke alulbecsülte a napi átlag PM10 koncentráció értéket. Január 28-án a PM10 koncentrációja megközelítette a tájékoztatási határértéket, azonban az index értéke nem ugrott meg annyira. Ez a helyzet azért érdekes, mert ekkor hazánk

felett egy hidegfront vonult át, amely csapadékhullással és a vertikális mozgásoknak köszönhetően, nagyobb keveredési rétegmagassággal is járt, de ennek ellenére növekedett a PM10 koncentrációja. Megfigyelhető azonban, hogy a napi hőmérsékleti átlagértékek több napon keresztül 0°C alatt maradtak, ebből adódóan a lakossági fűtési szén-dioxid szórásból származó aeroszol részecskék növelték meg a koncentráció értékét. Az index alacsony értéke a nagyobb keveredési rétegvastagságnak köszönhető. Megfigyelhető, hogy a hőmérséklet jelentős csökkenésével mind a koncentráció, mind az indexérték együttes növekedése tapasztalható. Jól látható, hogy a PM10 koncentrációja akkor érte el a magasabb értékeket, amikor tartósan, több napon keresztül száraz idő szak jellemezte a hazánk időjárását. Továbbá az is látható, hogy az 5 mm-t meghaladó csapadékmennyiség esetén, a szennyezettség értéke egyszerre éri el vagy haladja meg az egészségügyi határértéket. Összességében tehát az mondható el, hogy egy-két eset kivételével jól meg tudta becsülni a Stagnation-index a kisméretű részecske általi szennyezést. Emellett, ha hozzávesszük a többi meteorológiai paramétert, akkor ténylegesen, jó közelítéssel előre lehet vetíteni a PM10 koncentrációjának jövőbeli alakulását.



4.2.13. ábra. Szmogos helyzet alakulása a napi átlaghőmérséklet függvényében, 2012-2013



4.2.14. ábra. A PM10 napi átlagának alakulása a csapadékviszonyok figyelembe vételével, 2012-2013

#### 4.2.7. Adatsorok elemzéseib l levonható következtetések

Több év f tési szezonját megvizsgálva összeségében az mondható el, hogy a Stagnation-index az esetek jelent s részében jól követte a PM10 koncentráció értékét. Azt tapasztaltuk, hogy amikor hazánk id járást több napon keresztül anticiklon befolyásolta és emellett a napi átlagh mérséklet tartósan  $0^{\circ}\text{C}$  alatt maradt, akkor a PM10 koncentrációja emelked tendenciát mutatott és ezáltal a leveg min sége romlott. Az 5 mm-t meghaladó napi csapadékösszeg esetén már a leveg min ségbeli javulását lehetett megfigyelni. El fordultak olyan helyzetek is, amikor az éjszaka képz dött köd napközben már nem oszlott fel és a hideglégpárna kialakulásával, majd megemelkedésével szintén javult a leveg min sége. Természetesen mindig figyelembe kell venni az adott szinpotikus helyzeteket. El fordultak olyan esetek is, amikor nem a helyi forrásból adódott a leveg min ségének romlása, hanem a nagytávolságú transzport által advektálódott szennyezettségnek volt köszönhet . Fontos megjegyezni, hogy ez az index nem számszer en jelzi el re a szennyezettséget, hanem egyfajta becslést ad a leveg min ségének jöv beli változásáról. A 4.2. táblázatban a legszennyezettebb napokat mutatom be, az id járási viszonyokat figyelembe véve a vizsgált id szakokban:

<b>Id</b>	<b>PM10 (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Id járási helyzet</b>
2009.01.10.	160	Derült, száraz idő, majd beálló sztrátusz felhőzethez társuló javulás
2012.02.09.	160	Száraz, hideg idő, nappal feloszló köddel, majd mediterrán ciklon közeledésével, a felhőzet megnövekedéséhez társuló javulás
2011.11.16.	139	Száraz idő, nappal feloszló köddel, majd hidegpárna hatására javulás
2010.01.27.	114	Lengyelország felől transzportálódó légszennyezettség
2007.12.18.	110	Száraz, derült idő, majd hidegpárna hatására javulás
2008.02.13.	102	Száraz, nappal feloszló köd, majd észak felől hidegfront javulást eredményez
2011.01.30.	101	Vékony köd, majd beálló hidegpárna

4.2. táblázat. A vizsgált időszak legszennyezettebb, riasztási küszöbértéket elérő periódusainak időjárási háttere és a levegőtisztaság javulásának oka.

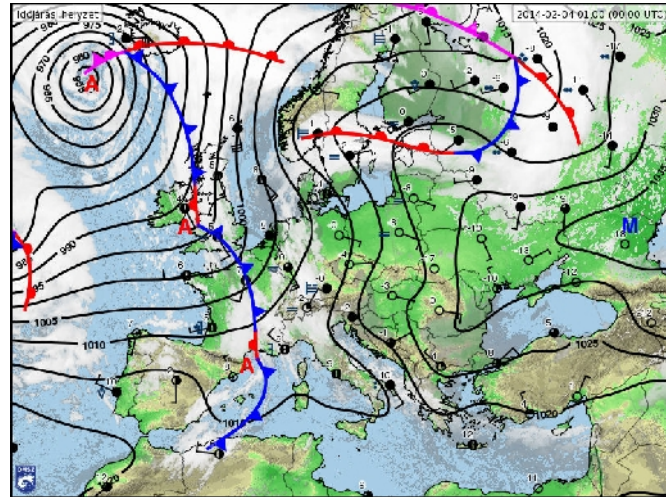
## 5. Tipikus légszennyezettségi epizódok Magyarországon

### 5.1. Északkelet-Magyarország 2014. február 3-5.

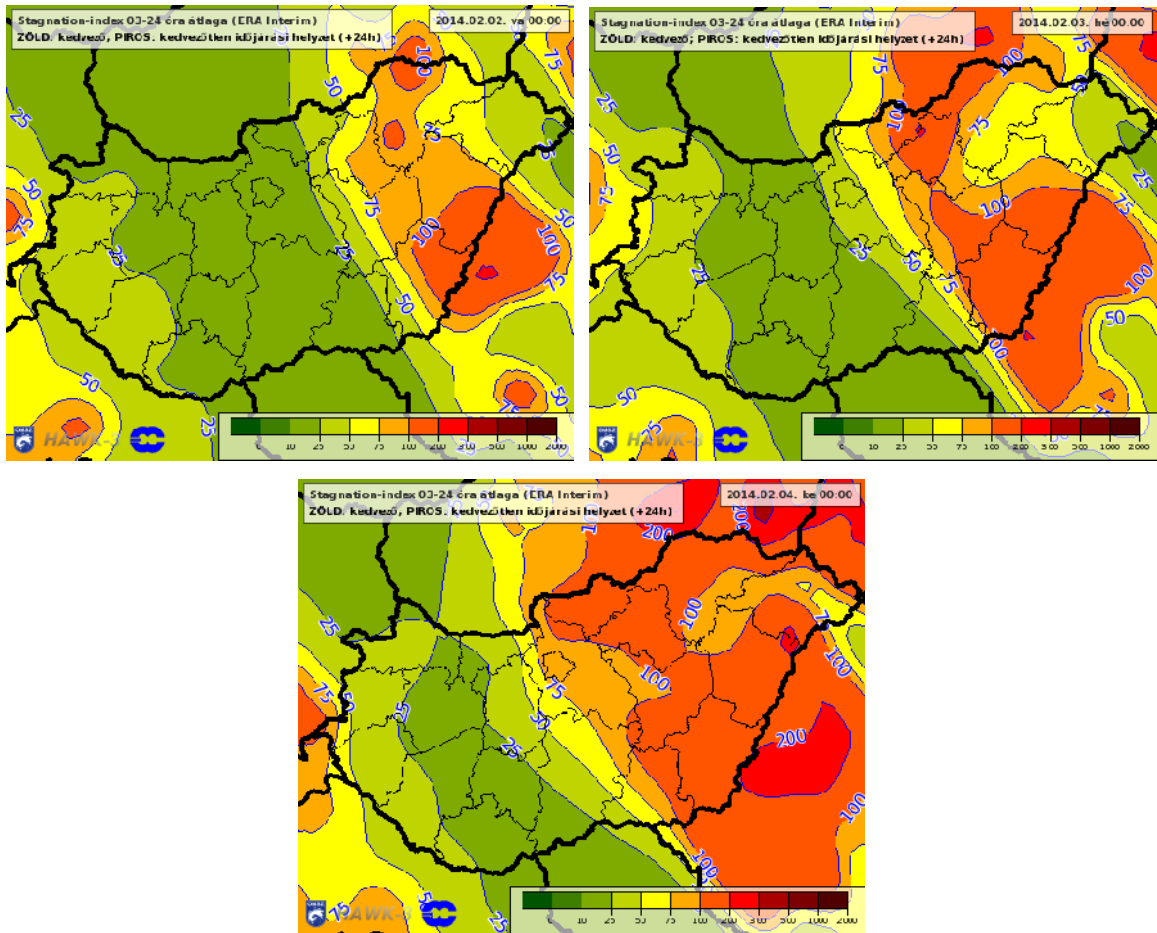
A levegő nagymértékű szennyezettsége nem feltétlenül terjed ki az egész országra. Gyakran előfordul, hogy csak egy-egy régió felett emelkedik meg a szennyezett anyag koncentrációja, melyet első sorban a helyi hatások, helyi források váltanak ki. Az ilyen helyi hatásokra visszavezethető szmogos helyzetek kialakulása leggyakrabban az északkeleti területeken alakulnak ki. Itt több tényező együttes hatása játszik szerepet az ilyen helyzetek kialakulásában, többek között a medence jelleg, a gyenge légmozgás és az ipari tevékenység. Az elmúlt években rengeteg példát lehetne felhozni, amikor az ország nagy részén megfelelő volt a légszennyezettség állapota, de a Sajó-völgyében vagy a Nyíregyháza-Debrecen térségben jelentősen megemelkedett a szennyezett anyagok koncentrációja. Hazánk északkeleti része gyakran szélárnyékosabb térséget képvisel. Hidegfrontok mögött az északnyugati áramlást az Északi-Kárpátok árnyékolja, míg például a Déli-Kárpátok vonulatai a délkeleti áramlást szorítják inkább a Duna-Tisza-köze és a Dunántúl irányába. A Sajó-völgye még az északkeleti országrészen belül is olyan orientáltsággal rendelkezik, ami ritkán engedi meg a szeles időjárást.

Egy ilyen helyzetre példa a 2014. február eleji helyzet. Hazánk időjárását ekkor anticiklon alakította (5.1. ábra), melyet száraz, derült idő jellemzett. A legalacsonyabb napi minimum- és a napi átlagos mérséklet mellett a leggyengébb légmozgás is a keleti, északkeleti országrészben alakult ki (5.1.2. ábra). Ennek hatására pedig a szén- és fatüzelésből származó szennyezett anyagok jelentős mértékben hozzájárultak a levegőminőségbeli romlásához. A térképeken a Stagnation-index napi átlag értékei láthatóak (ERA-Interim elrejelzés). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok közötti 24 órás periódusokra vonatkoznak. Az egyes színekhez különböző index értéktartományok tartoznak, melyek a szennyezettség mértékét reprezentálják. Az 5.1.1. ábrán jól látható, hogy a keleti régióban a Stagnation-index értéke napról napra növekedett. Február 5-én a Sajó-völgyében, Miskolcon és Nyíregyháza környékén volt a legszennyezettebb, ott az index a 100-as értéket is meghaladta. A napi átlagos mérséklet értékek itt voltak a legalacsonyabbak, mindhárom nap jelentősen 0°C alatt maradt. Az 5.1.3. ábrán jól látható, hogy a miskolci mérőállomáson nagyobb PM10 értékeket mértek, mint a budapesti mérőállomáson. Emellett megfigyelhető, hogy az időszak végén Miskolcon a

PM10 értéke szinte végig a riasztási küszöbérték felett alakult, míg Budapesten a PM10 általi szennyezettség sokkal kisebb volt.



5.1. ábra. Id járási helyzet 2014. február 4. 00 UTC

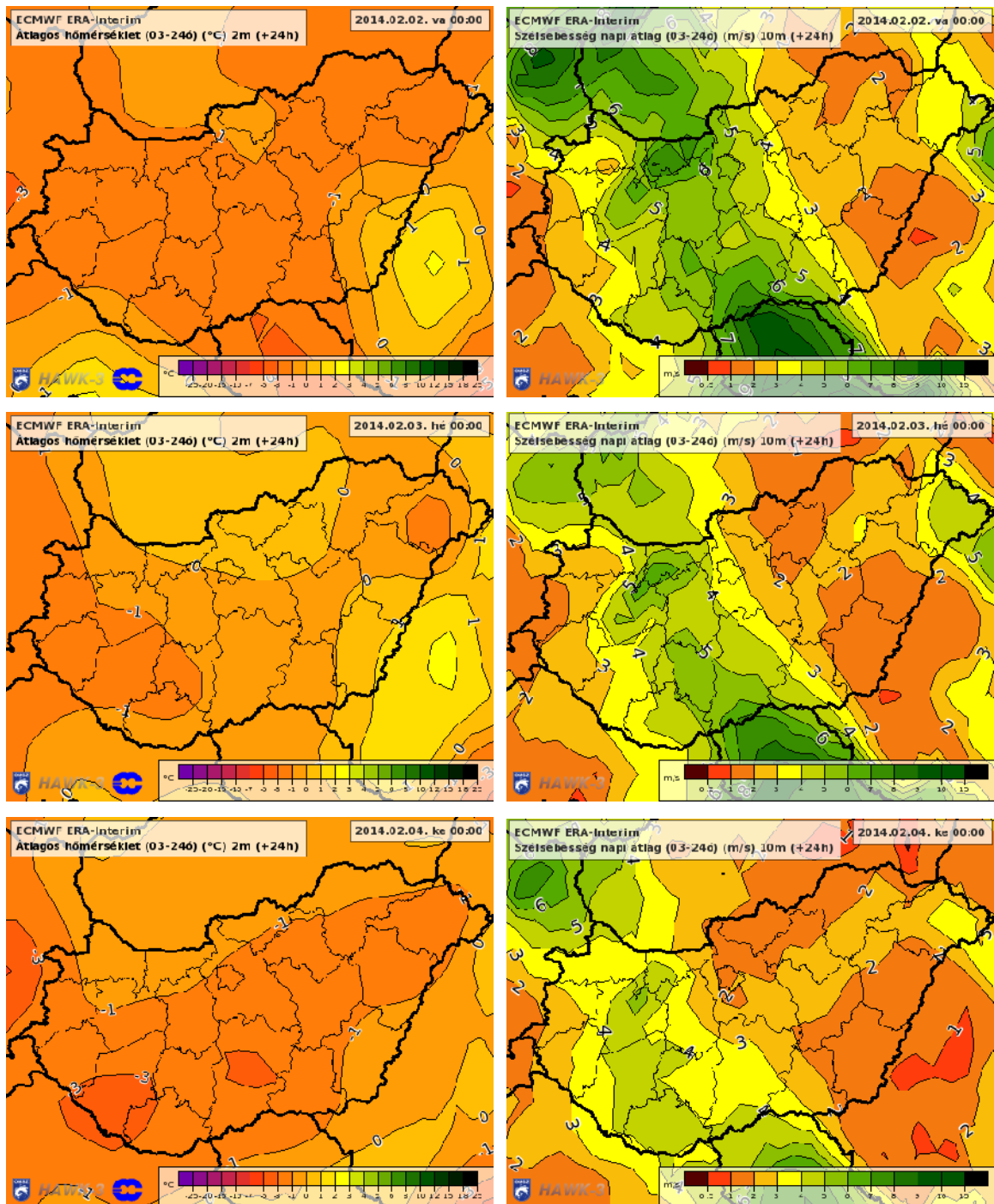


5.1.1. ábra. A Stagnation-index napi átlagos értékének eloszlása.

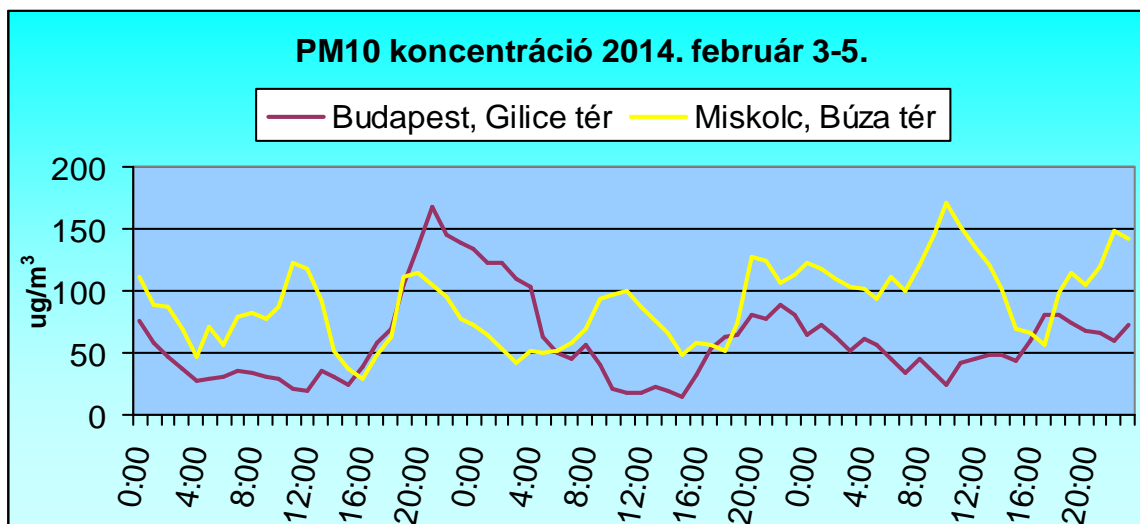
(ERA-Interim elrejelzés)

A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok eltti 24 órás periódusokra vonatkoznak. (2014. február 3-5.)





5.1.2. ábra. A napi átlag hőmérséklet és szélsébség értékei 2014.február 3-5. (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok eltti 24 órás periódusokra vonatkoznak.

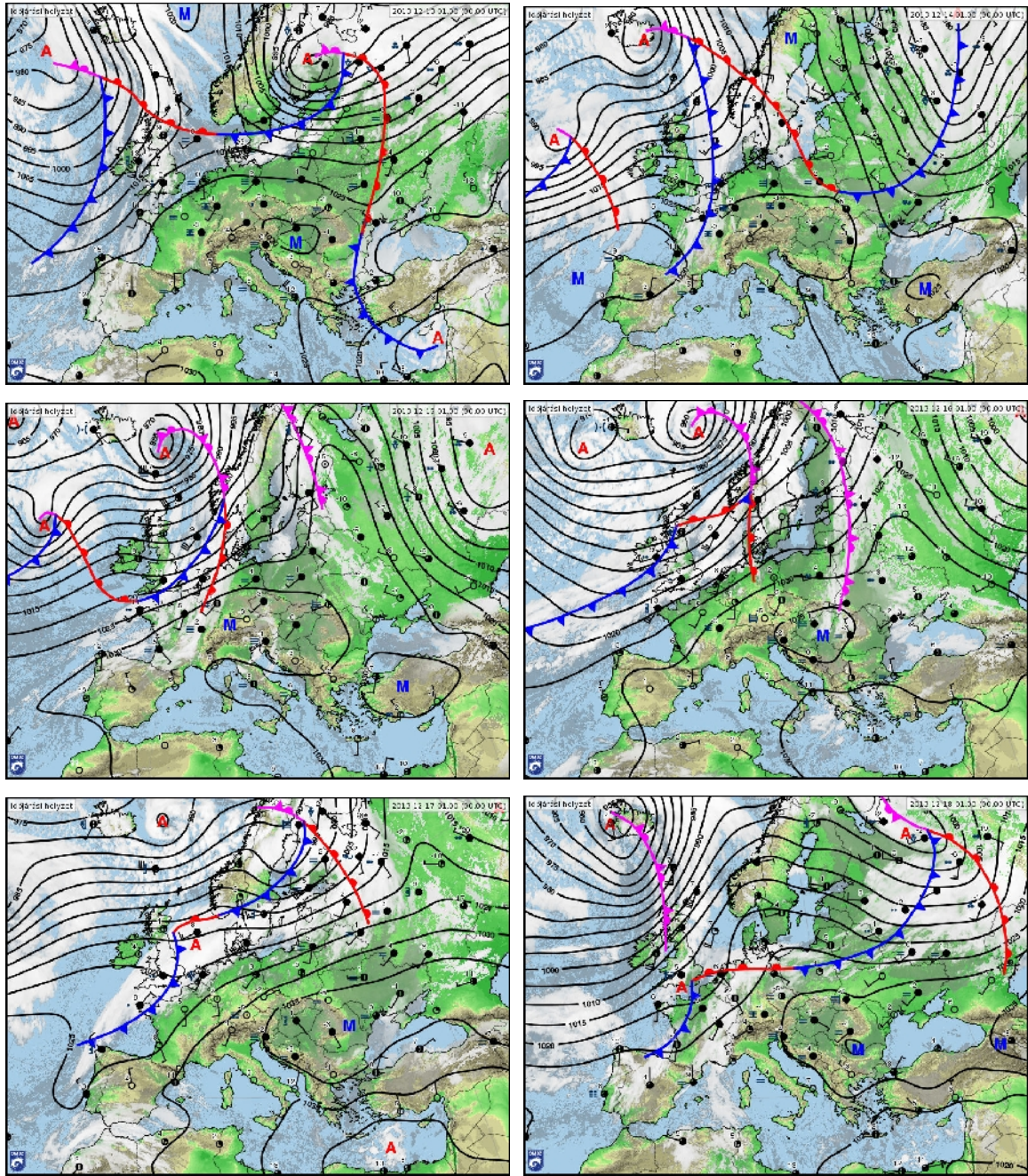


5.1.3. ábra. A PM10 koncentráció az északkeleti országrészben magasabb, mint Budapesten.

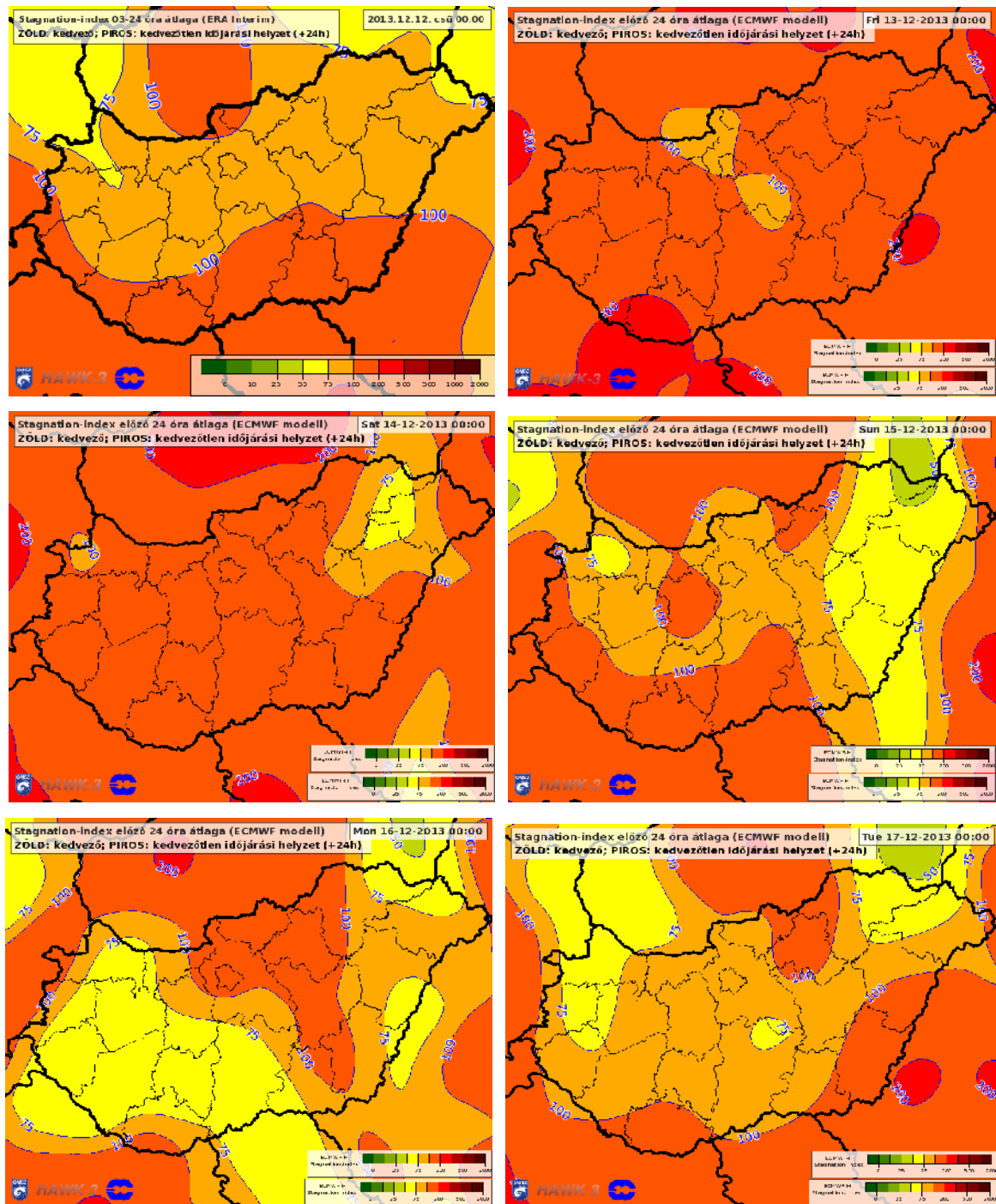
## 5.2. Hideg légpárna 2013. december 13-18.

A 2013. december 13-18 közötti időszak tipikus példája annak, hogy a hideg légpárna beálltával a levegő minősége valamelyest javul az előző napokhoz képest. Egy hidegfront átvonulása után hazánk felett egyre inkább anticiklon kezdett kiépülni (5.2. ábra), amely száraz, de borús időjárás és gyenge légmozgás jellemzett. Ennek hatására hajnalban ködképződést lehetett megfigyelni, ami napközben feloszlott. A felhős égboltnak köszönhetően a nappali átkeveredés is csekélynek bizonyult. Az 5.2.1. ábrán látható, hogy eleinte a nagy volt a szennyezettség országsszerte, az SI értéke mindenhol elérte 100-as értéket. Majd az éjszaka képződött köd már nem tudott nappal feloszlani, megemelkedett, ezzel nagyobb keveredési réteget biztosítva a szennyező anyagoknak és ezzel kialakult a hidegpárna. Jól megfigyelhető, hogy december 16-tól kismértékben ugyan, de javult a levegő minősége. Majd az időszak utolsó napjait tekintve az látható, hogy az ország nagy részén már nem olyan mértékű a szennyezettség, mint az időszak közepén, melyet a mért PM10 értékek is alátámasztanak (5.2.2. ábra).



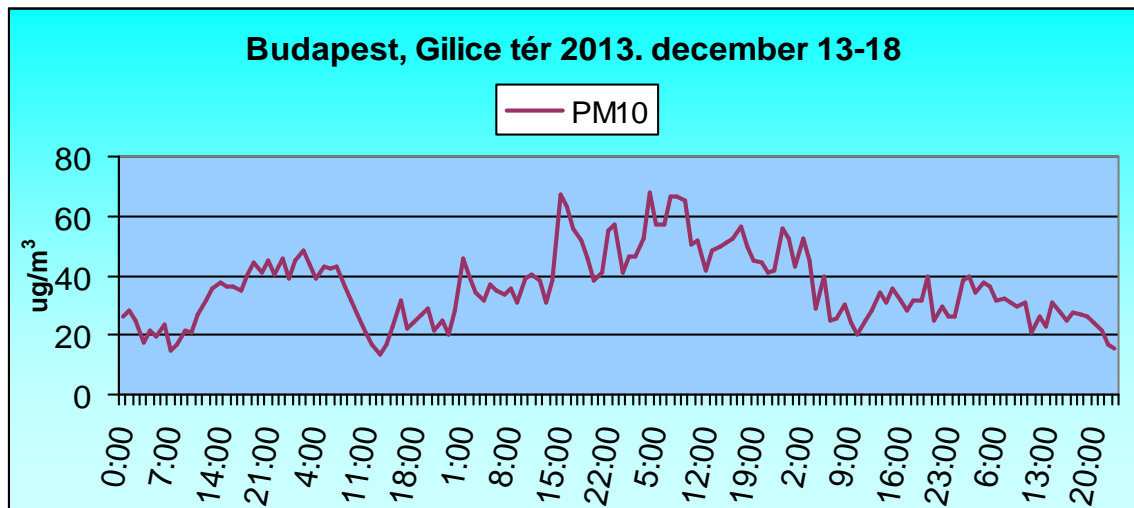


5.2. ábra. Id járási helyzet 2013. december 13-18. 00 UTC



5.2.1. ábra. A feloszló köd miatt eleinte nagy szennyezettség, majd a hidegpárna beálltával javuló tendencia 2013. december 13-18. (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok előtti 24 órás periódusokra vonatkoznak.



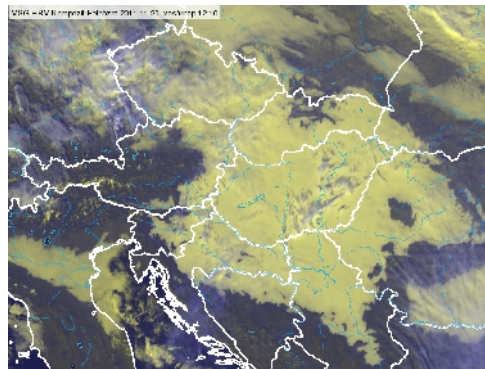
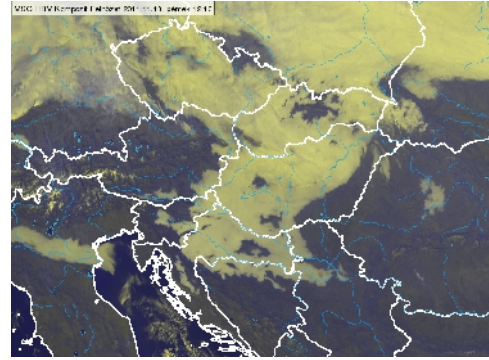
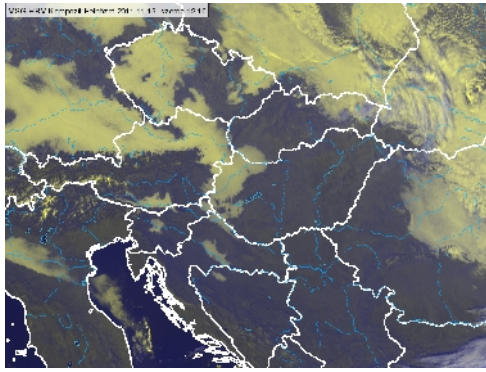


5.2.2. ábra. A napközben feloszló köd miatt magasabb PM10 értékek, majd hidegpárna kialakulásával csökken tendencia figyelhető meg 2013. december. 13-18.

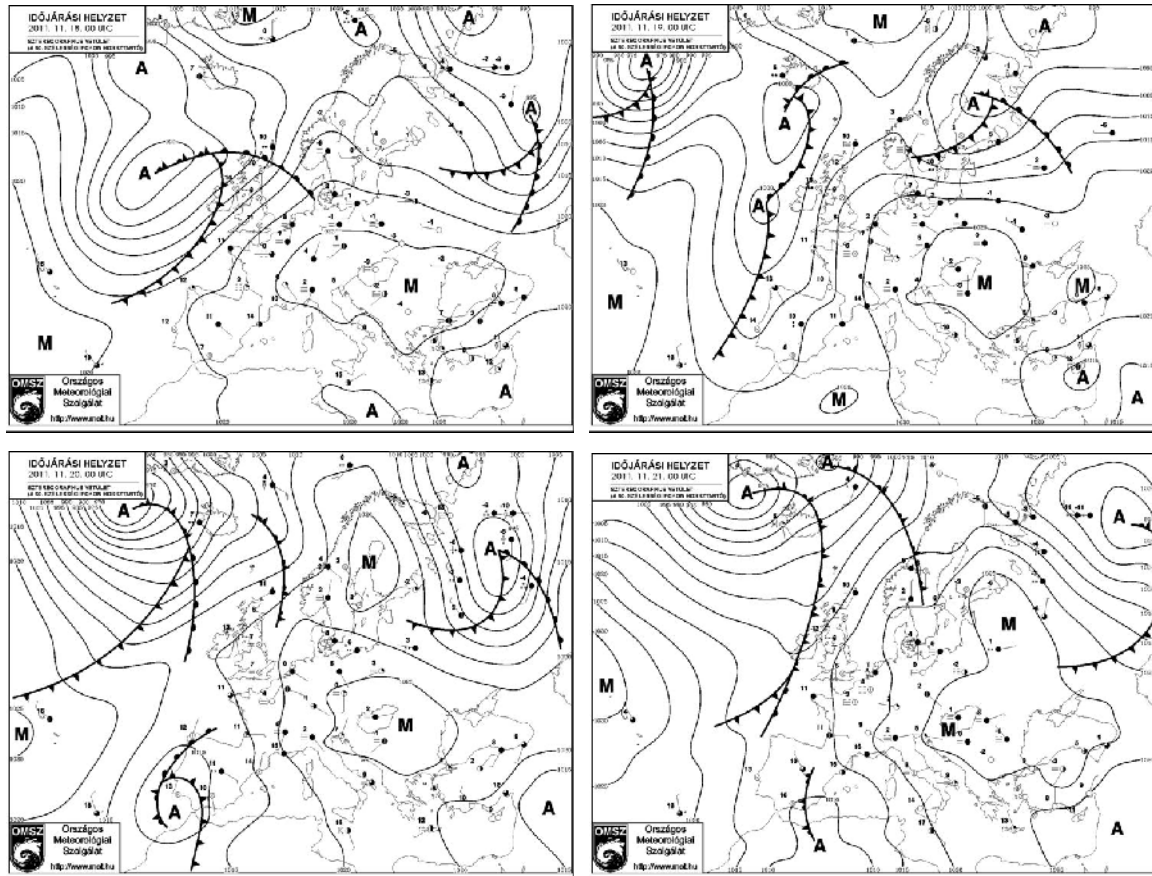
### 5.3. Száraz anticiklon 2011. november 18-21.

A 2011. november 18-21. közötti időszakban anticiklon alakította hazánk időjárását (5.3. ábra). Ez az időszak azért is érdekes, mert nagyon hosszú időnek kellett eltelnie ahhoz, hogy a hideg légpárna kialakuljon. Több napon keresztül az éjszaka képződött köd a reggeli órákban feloszlott, majd napközben jellemzően derült, csapadékmentes időjárás és gyenge légmozgás jellemezte ezt a periódust. Az éjszaka kialakult alacsony felszín közeli inverziós réteg és a gyenge szél hatására napközben is megmaradt. Emiatt több napon keresztül alacsony volt a keveredési rétegvastagság, amely kedvezett a szennyezőanyagok koncentrációjának feldúsulásában.

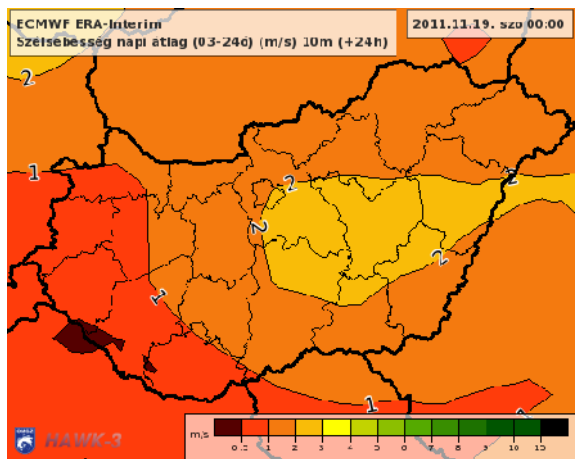
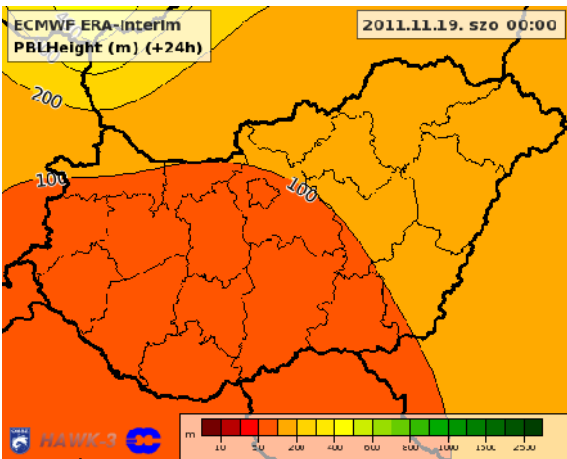
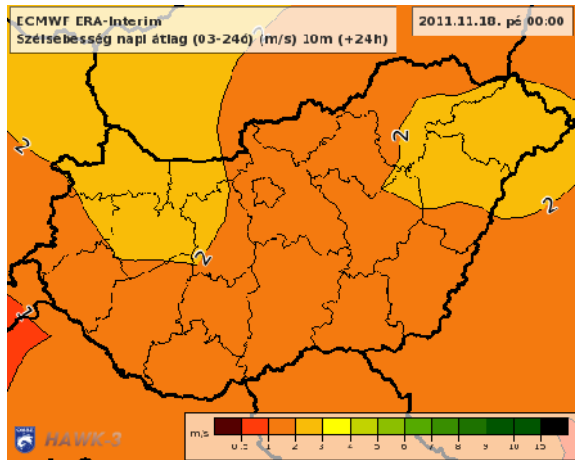
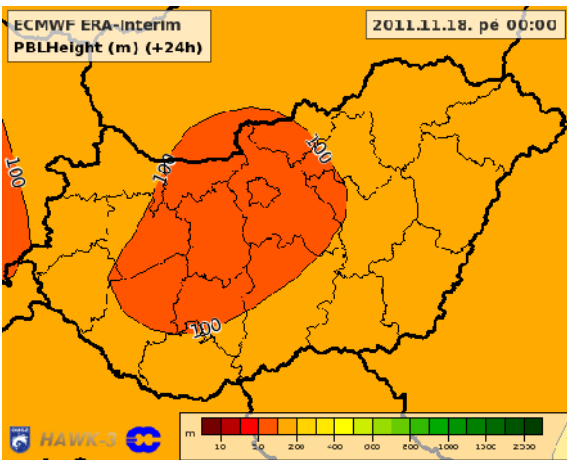
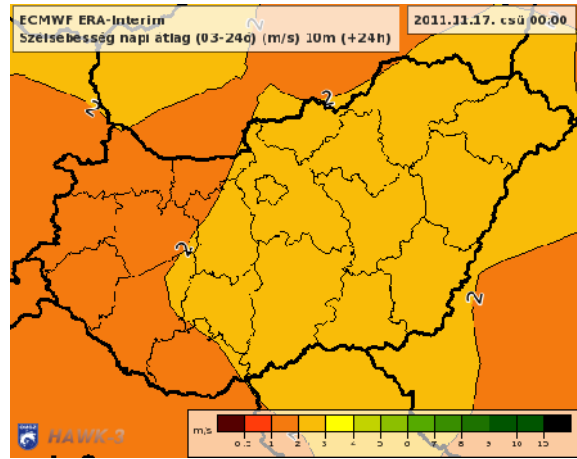
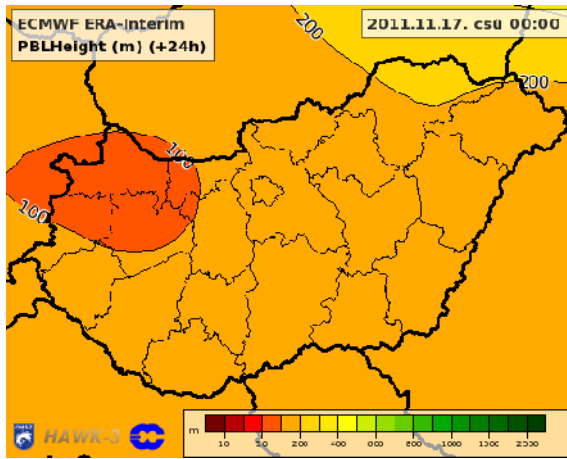
Az 5.3.2. ábrán azok a napi átlag hátérréteg magasság és a napi átlag szélesség értékek szerepelnek, melyek alapján meghatároztuk az SI értékeit. A szennyezettségi térképen (5.3.3. ábra) jól látható, hogy ebben az időszakban országszerte tartósan magas volt az SI értéke. Pár nap elteltével a köd nem szűnt meg napközben, hanem fokozatosan megmaradt. Először a Kisalföld területén, majd egyre inkább kiterjedt az egész országra, majd kialakult a hidegpárna (5.3.1. ábra). A szennyezettségi térképen is jól látható, hogy 20-án még magas az SI értéke, de másnap a megemelkedett hideg légpárnának köszönhetően valamelyest javult a levegő szennyezettségének állapota. Az 5.3.4. ábrán a PM10 értékek láthatóak órás bontásban, melyen szintén jól megfigyelhető, hogy a koncentráció értéke a hidegpárna kialakulásával valamelyest csökkent.

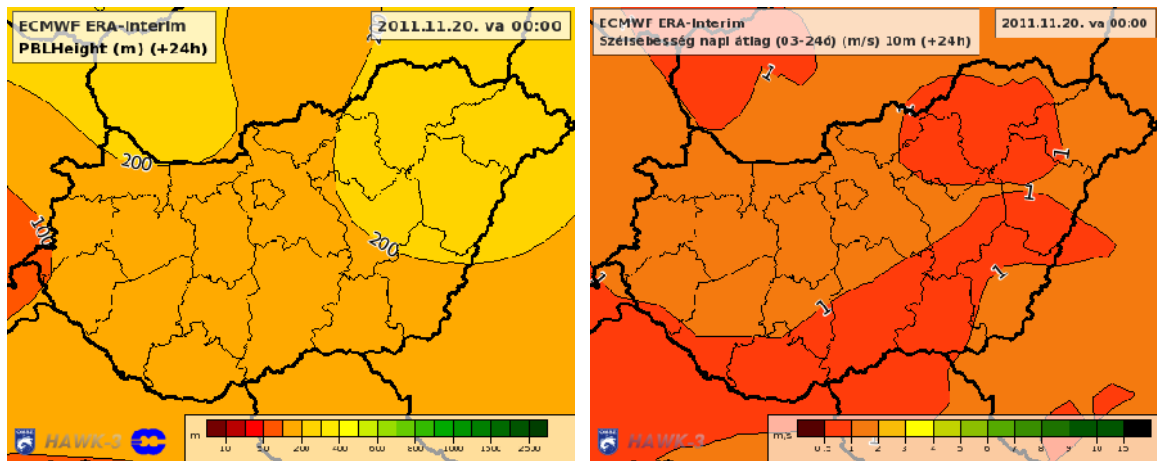


5.3.1. ábra. Köd képződése először a Kisalföldön, majd országszerte, végül kialakul a hideg légpárna (2011. november 16-21.)

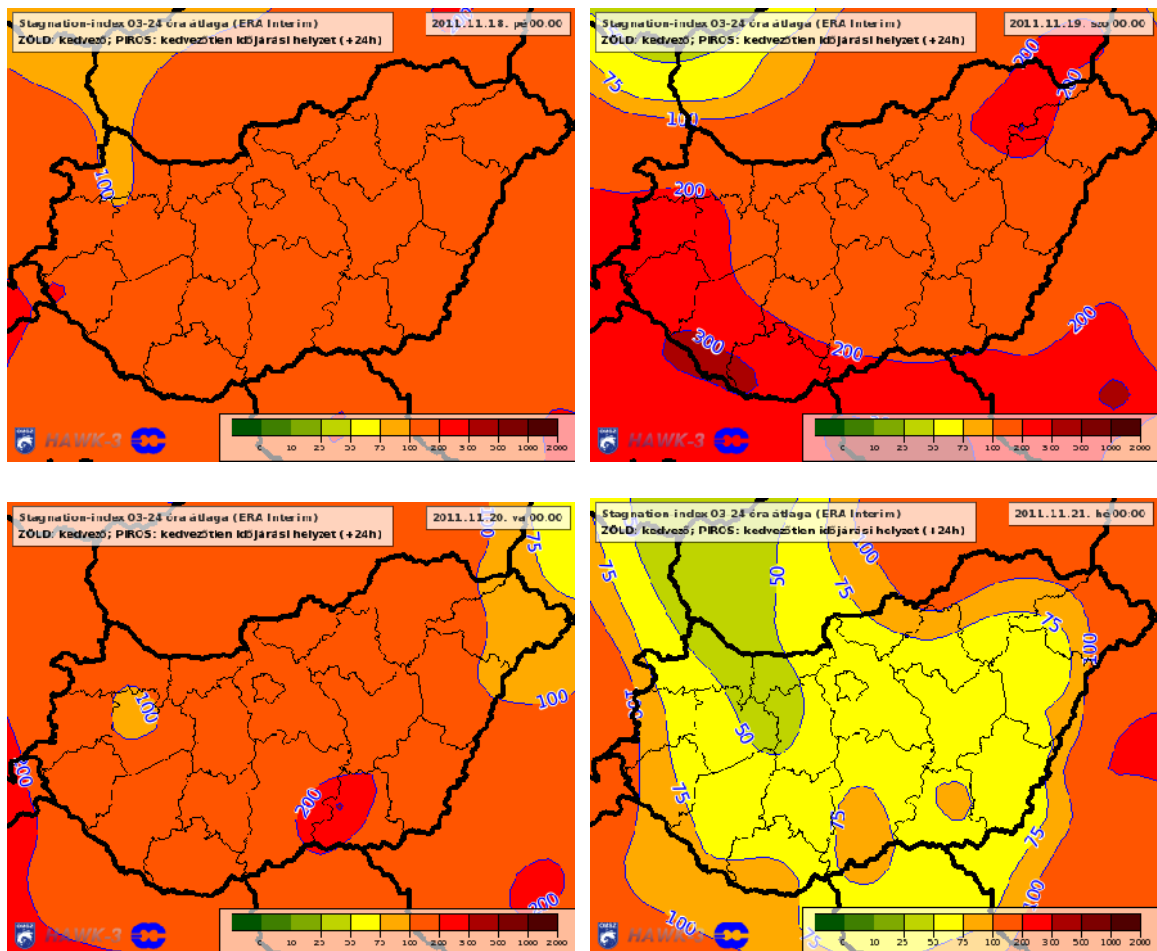


5.3. ábra. Idjárás helyzet 2011. november 18-21. 00 UTC.



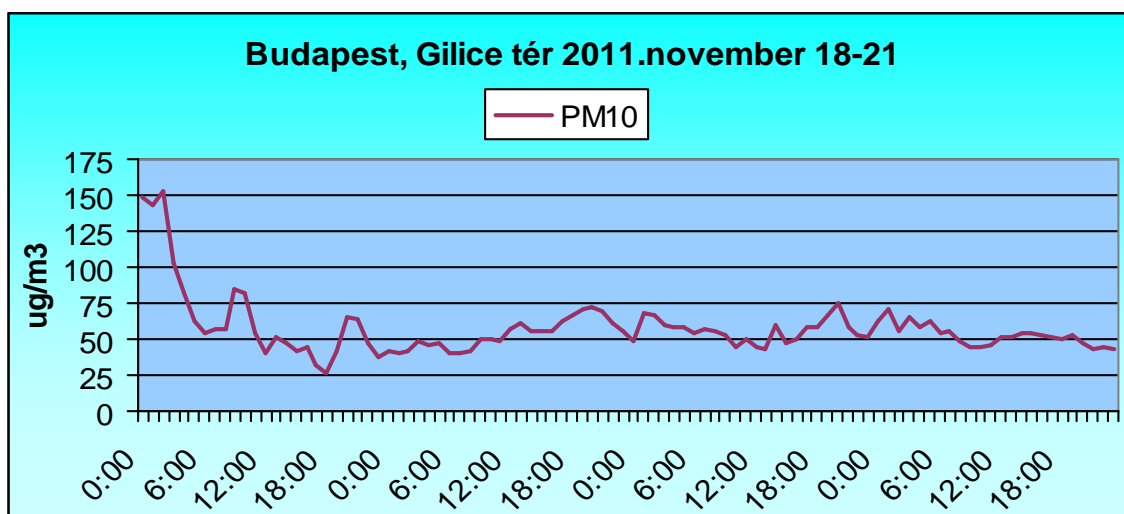


5.3.2. ábra. Napi átlag határréteg magasság és szélsőséesség, melyek meghatározták az SI index értékeit (2011. november 18-21.) (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok előtti 24 órás periódusokra vonatkoznak.



5.3.3. ábra. A napközben feloszlott köd miatt nagy volt a légszennyezettség, majd a hideg légpárna beálltával valamelyest javult a levegő minősége (2011. november 18-21.) (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok előtti 24 órás periódusokra vonatkoznak.

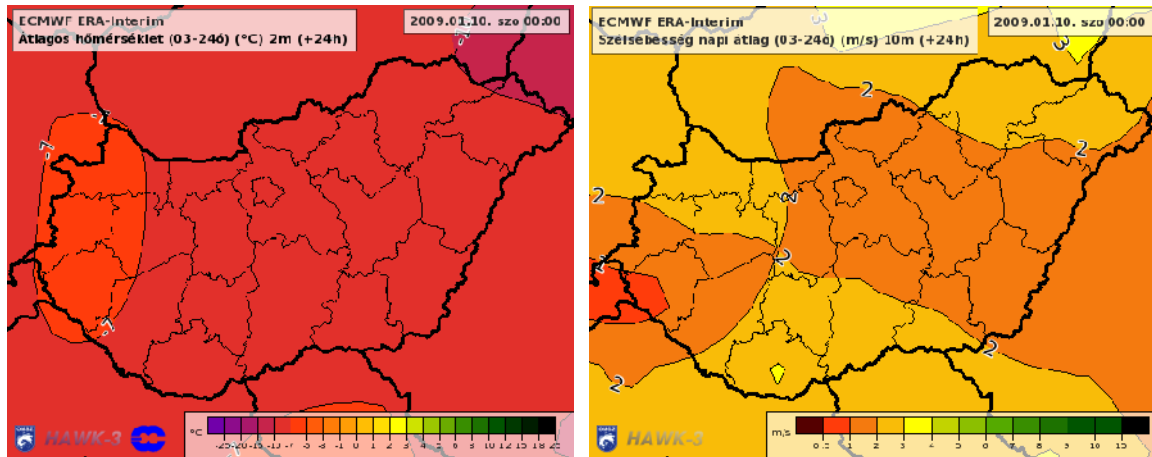




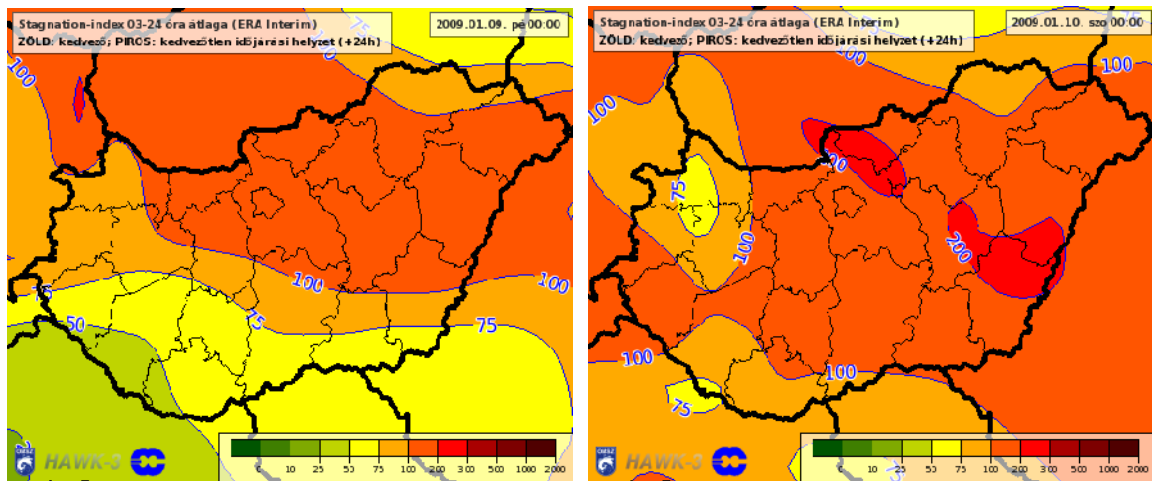
5.3.4. ábra. Hidegpárna kialakulásával a PM10 általi szennyezettség valamelyest csökkent.

#### 5.4. Alacsony h mérséklet 2009. január 10-11.

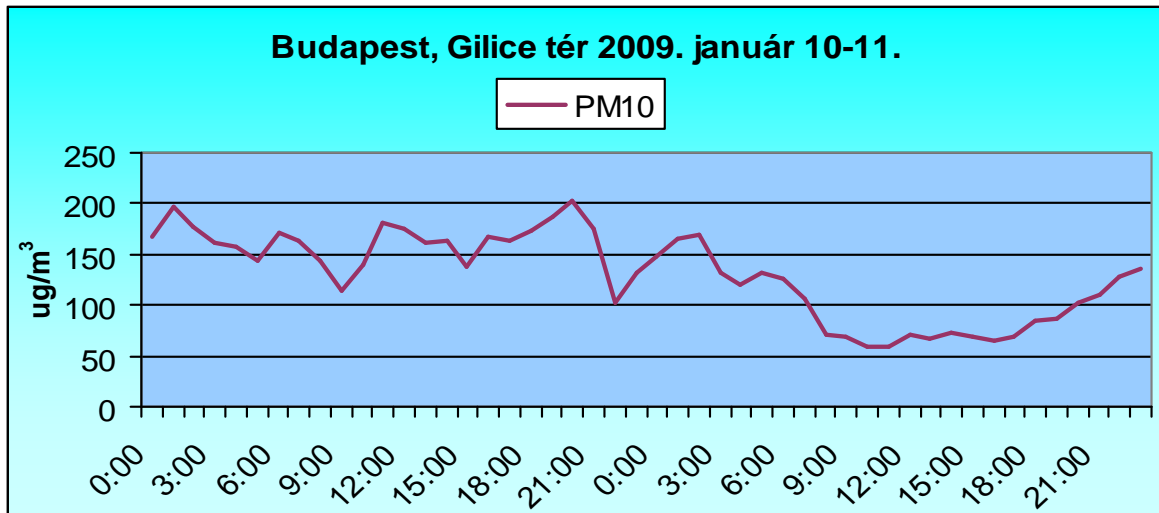
A szennyez anyagok koncentrációjának feldúsulásában ugyancsak nagy szerepe van az alacsony h mérsékletnek. A téli hónapokban gyakran el fordul, hogy a napi átlagh mérséklet több napig 0°C alatt alakul. Ilyenkor a lakossági f tésb l – els sorban a fa- és széntüzelésb l – származó aeroszol részcskék koncentrációja jelent sen megnövekedhet. A leveg min ségbeli romlását mégjobban segíti, ha ilyenkor gyenge a légmozgás és csapadékmentes az id járás. A több éves adatsorok elemzése alapján azt tapasztaltam, hogy a -5°C vagy az alatt alakul a napi átlagh mérséklet, akkor szinte biztos, hogy szennyezett lesz a leveg . A 2009. január 10-11-i id szak tökéletes példája ennek. Ekkor anticiklon határozta meg hazánk id járását, melyet száraz id járás és gyenge talajmenti szél jellemezett. A h mérsékleti értékek országszerte fagypont alatt alakultak. Ennek köszönhet en a f tésb l származó szennyezettség nagymértékben megnövekedett. Az 5.4.1. ábrán láthatók január 11-i napi átlagos h mérsékleti és napi átlagos szélesség értékek. Jól megfigyelhet , hogy aznap az ország nagy részén -7 °C alatt volt a napi átlagh mérséklet, emellett pedig nagyon gyenge légmozgás volt jellemz . Ennek hatására a szennyez anyagok koncentrációja jelent sen megemelkedett. A PM10 napi átlaga ezen a két napon a riasztási küszöbérték felett alakult, emellett a PM10 órás értékei is dönt en 100 µg/m<sup>3</sup> felett alakultak (5.4.3. ábra). A szennyezettségi térképen (5.4.2. ábra) is jól látható, hogy az SI értékeke is rendszerint 100 felett, s t, egyes területeken a 200-as értéket is meghaladta.



5.4.1. ábra. A napi átlag hőmérséklet és szélsébség alakulása 2009. január 11-én. (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok előtti 24 órás periódusokra vonatkoznak.



5.4.2. ábra Az alacsony hőmérséklet hatására kialakult nagymértékű szennyezettség (2009. január 10-11.) (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett időpontok előtti 24 órás periódusokra vonatkoznak.

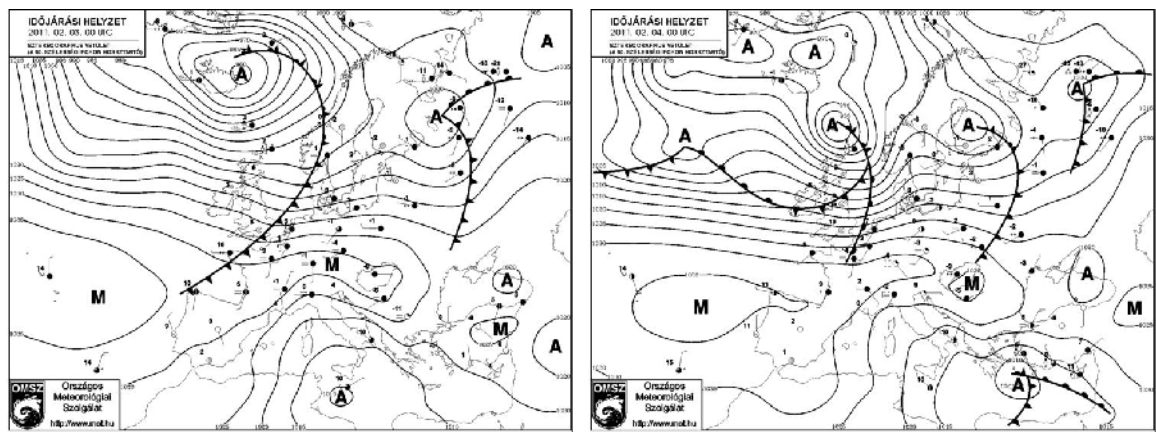


5.4.3. ábra. Alacsony hőmérséklet hatására a nagymértékű lakossági emisszió miatt magas PM10 értékek alakultak.

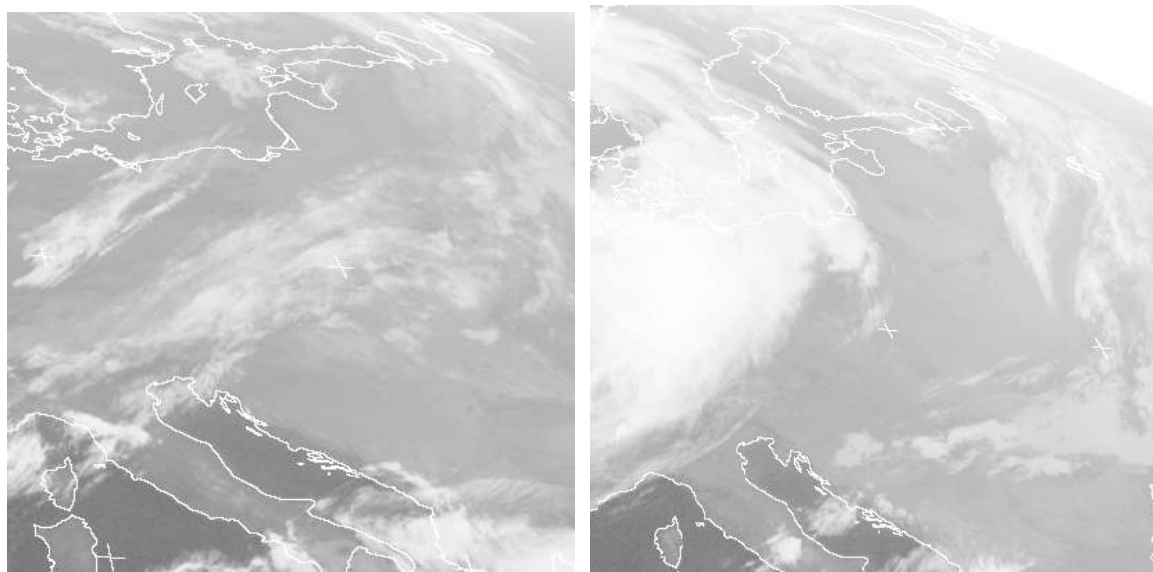
## 5.5. Gyenge hidegfront 2011. február 3-4.

A szennyez anyagok koncentrációjának hígulását elősegítheti egy markáns hidegfronti betörés, amely jelentős csapadékkal és erős, olykor viharos szellőkéséssel jár. Olyan hidegfront esetén, melyet rövid ideig tartó erősebb légmozgás és csapadékmentes időjárás jellemez, éppen az ellenkezője valósulhat meg. Ilyenkor a hidegfront mögötti ÉNY-i szél felszakítja a felhőzetet, mely a felszínközeli inverziós rétegzésnek és ezáltal alacsonyabb keveredési réteg kialakulásának kedvez. Ilyen esetre példa a 2011. február 4-i helyzet. Előző nap még anticiklon harátozta meg hazánk időjárását, majd 4-én egy gyengébb hidegfront vonult át hazánk felett a délutáni órákban (5.5. ábra). Ennek hatására megszűnt az addigi felhőzet, melyet az infravörös tartományban készült műholdképen is jól láthatjuk (5.5.1. ábra). A nap második részében azonban, a gyenge légmozgás és az alacsony keveredési réteg miatt a szennyez anyagok nem tudtak felhígulni. Az 5.5.2. ábra baloldalán az a február 3-i és 4-i napi átlag határreégeit, jobboldalán ezen két nap napi átlag szélességeit ábrázolja. Jól látható, hogy a hidegfront átvonulása után a határreteg magassága, csökkent az előző naphoz képest. Ezek alapján pedig a Stagnation-index is növekedett, melyet az 5.5.3. ábra mutat be. Látható, hogy az előző naphoz képest valamelyest egyes területeken emelkedett az index értéke. Ezt az értéket összevetettük a tényleges, mért órás PM10 értékekkel (5.5.4. ábra) és az látható, hogy a hidegfront átvonulása után a koncentráció értéke fokozatosan növekszik a nap folyamán, és rövid

ideig meg is haladta a tájékoztatási küszöbértéket. Emellett az is megfigyelhet, hogy az el z naphoz képest is kismértékben ugyan, de növekedett a PM10 koncentrációja. Tehát azt lehet elmondani, hogy nem minden hidegfront átvonulása esetén várható javulás a szennyezettség terén, függ a hidegfront jellegét l, valamint attól, hogy jár-e csapadékhullással vagy sem.

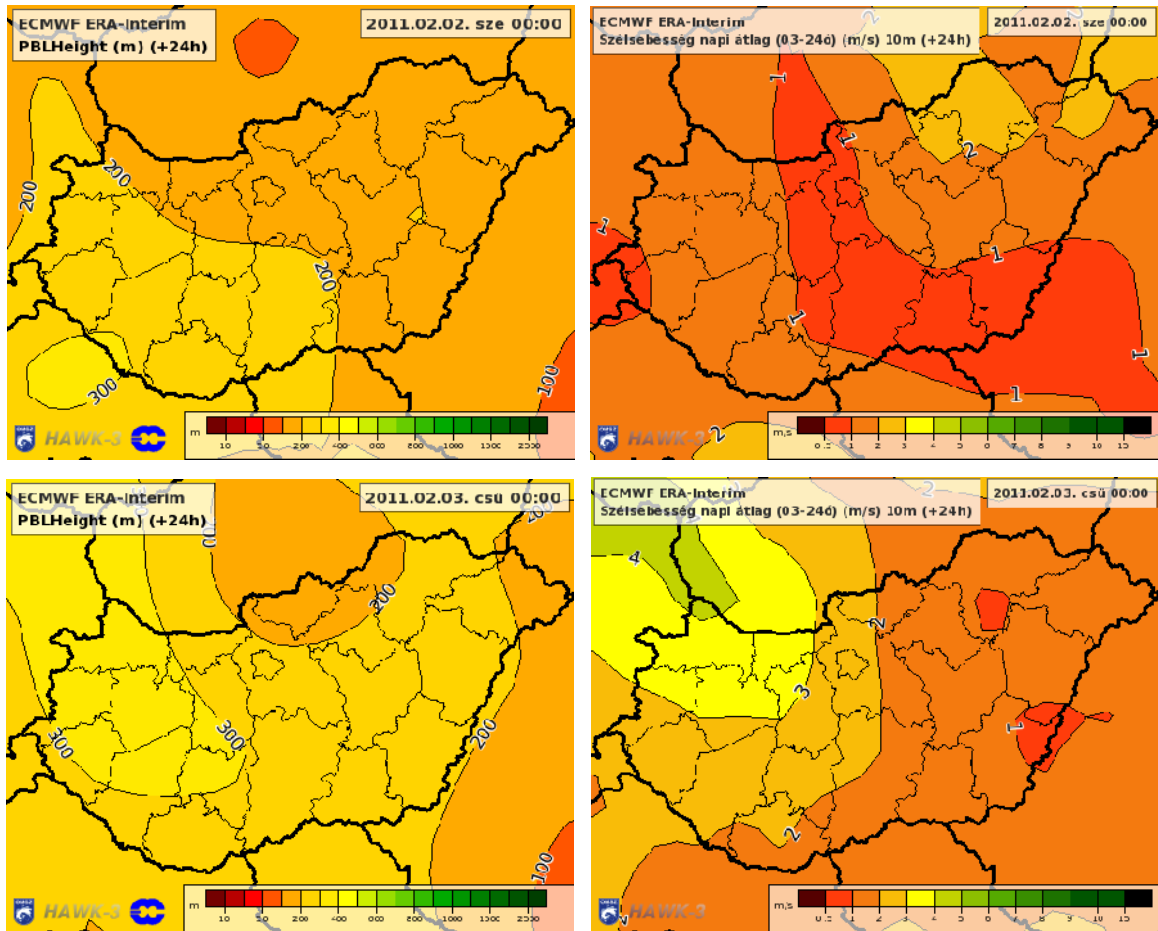


5.5. ábra. Id járási helyzet 2011. február 3-4. 00 UTC.

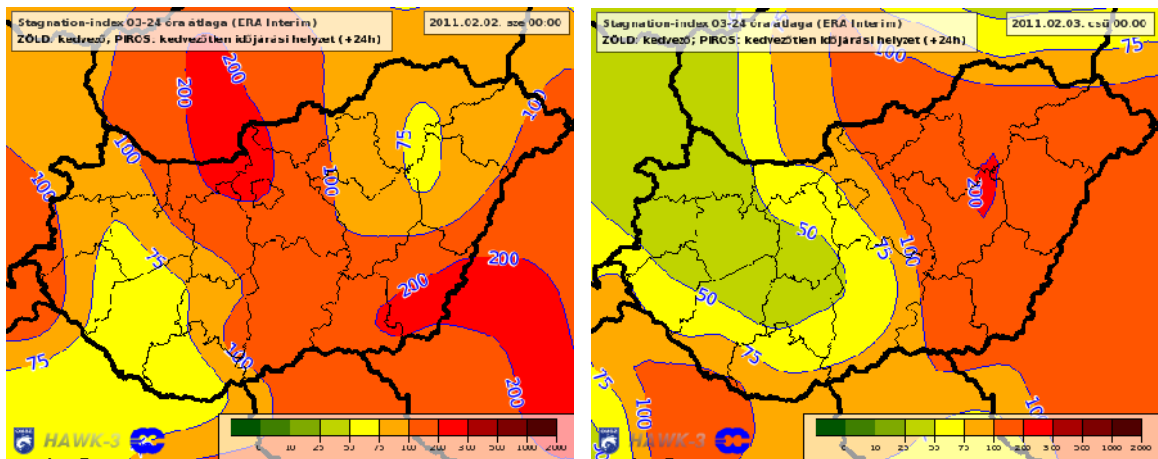


5.5.1. ábra. IR m holdkép 2011. február 3. 18 UTC és február 4. 06 UTC.

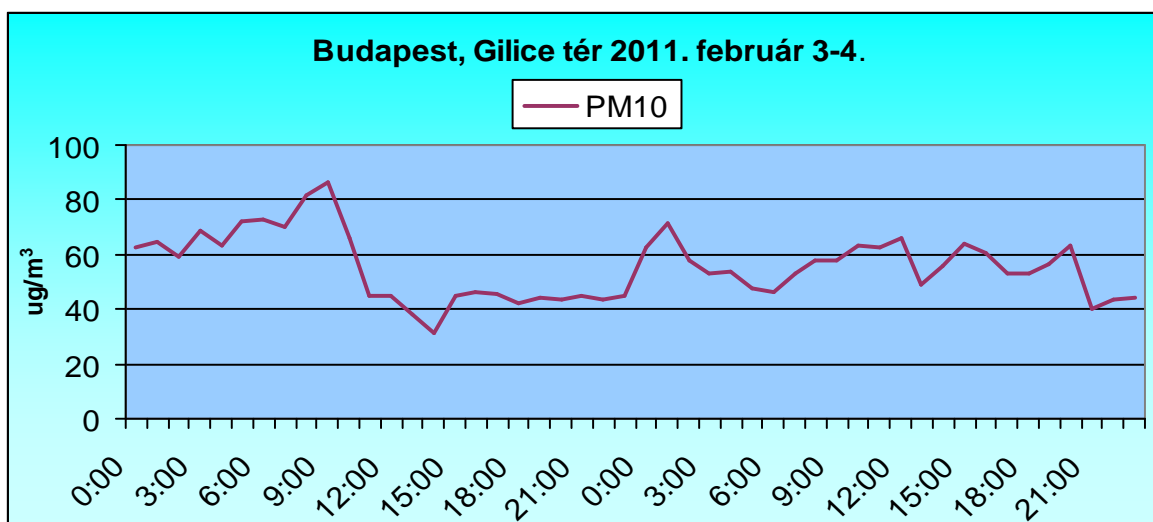
(forrás: <http://www.sat.dundee.ac.uk>)



5.5.2. ábra. Február 3-4 napi átlag határréteg és szélsébség. (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett id pontok el tti 24 órás periódusokra vonatkoznak.



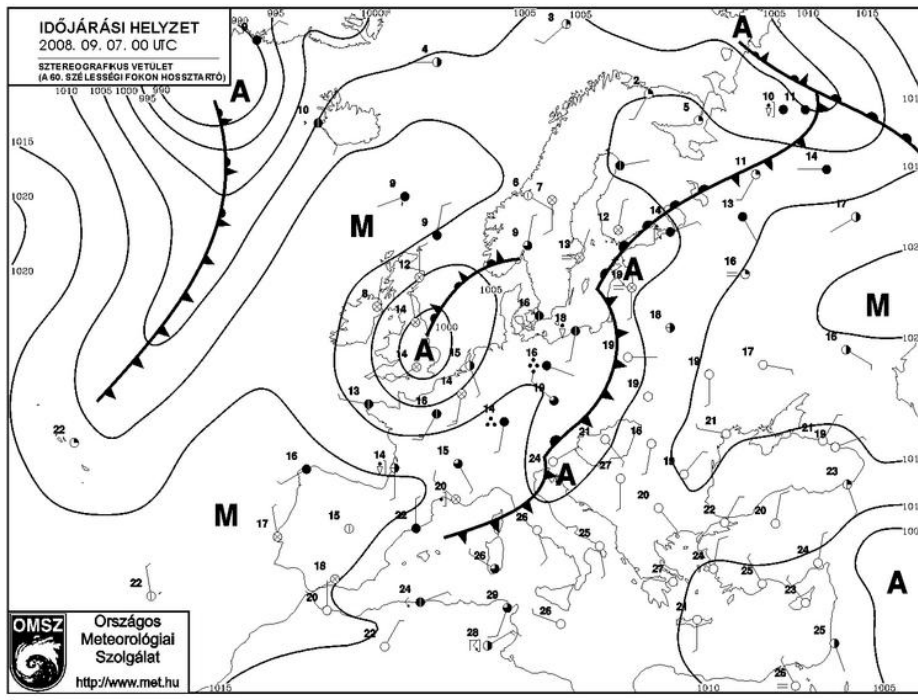
5.5.3. ábra. Hidegfront átvonulása után növekv szennyezettség tapasztalható (2011. feburár 3-4.) (ERA Interim). A napi átlagok a térképeken feltüntetett id pontok el tti 24 órás periódusokra vonatkoznak.



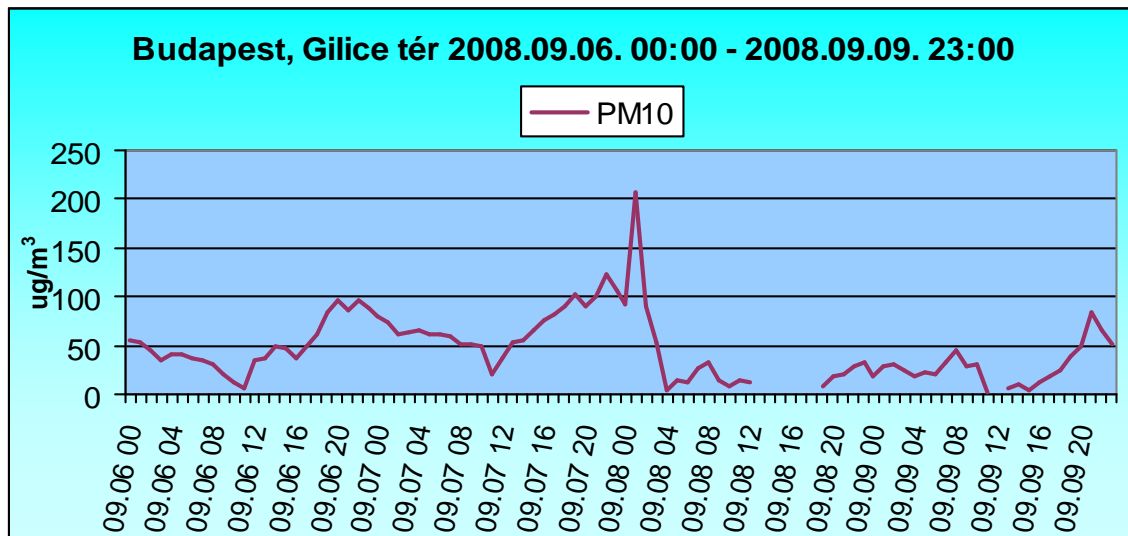
5.5.4. ábra. PM10 koncentrációjának napi menete, mely egy gyengébb hidegfront átvonulása után emelkedő tendenciát mutat.

## 5.6. Sivatagi por 2008. szeptember 7.

El fordulnak azonban olyan helyzetek, amikor olyan időjárási helyzet alakul ki, amikor nem várnánk, hogy a szennyező anyagok koncentrációja megemelkedik. A 2008. szeptember 7-én hazánk felett a reggeli órákban egy mediterrán ciklon hidegfrontja vonult végig (5.6. ábra), melyet jelentős csapadékhullás és mérsékelt szélökések kísértek. Ezek alapján arra lehetne következtetni, hogy kitisztul a levegő. Általában ez így is van, de el fordulhat, hogy egy több napja fennálló, déli, délnyugati áramlásnak köszönhetően a saharai por egészen Magyarország területéig húzódik, amely hatással van a PM10 koncentrációjára. A saharai por általában magasabb rétegekben tartózkodik, azonban a hidegfront átvonulása miatt nagyobb lett a vertikális átkeveredés és ennek hatására a por az alsóbb rétegekben is megjelent. Az 5.6.1. ábrán megfigyelhető, hogy a PM10 koncentrációja a hajnali órákban meghaladta a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t, melyet a saharai por jelenléte okozta. Napközben továbbra is megmaradt az erős szél és emiatt a PM10 koncentrációja jelentősen lecsökkent. Az 5.6.2. ábrán a BSC/DREAM modellrel jelezése látható 2008. szeptember 7. 00 UTC-re vonatkozóan. Jól látható, hogy a saharai por az egész ország felett megjelent, és a délnyugati áramlásnak köszönhetően továbbterjedt Ukrajna és Oroszország egyes területeire is. Az MSG Kompozit képen (5.6.3. ábra) is jól megfigyelhető hazánk felett a halvány rózsaszín szín, amely a saharai port ábrázolja.

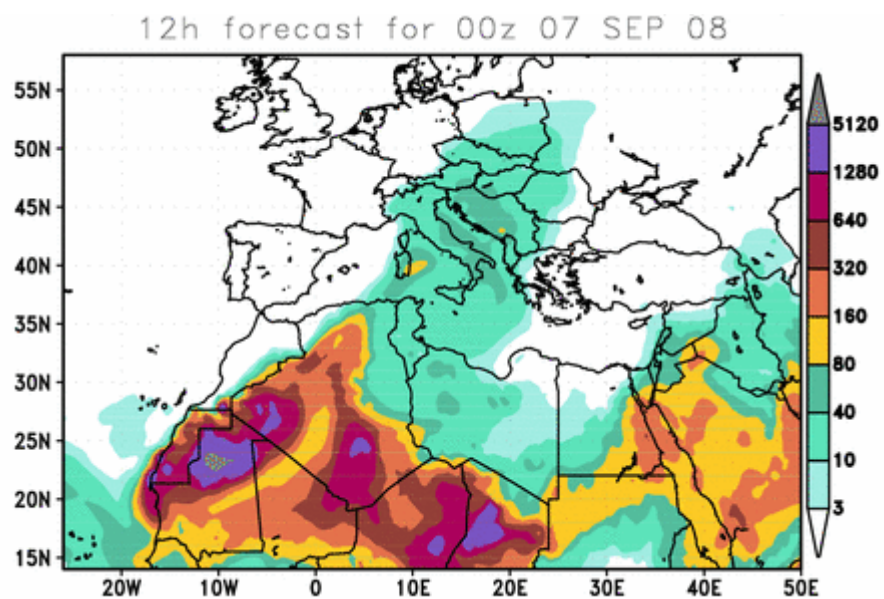


5.6. ábra. Id járási helyzet 2008. szeptember 7. 00 UTC

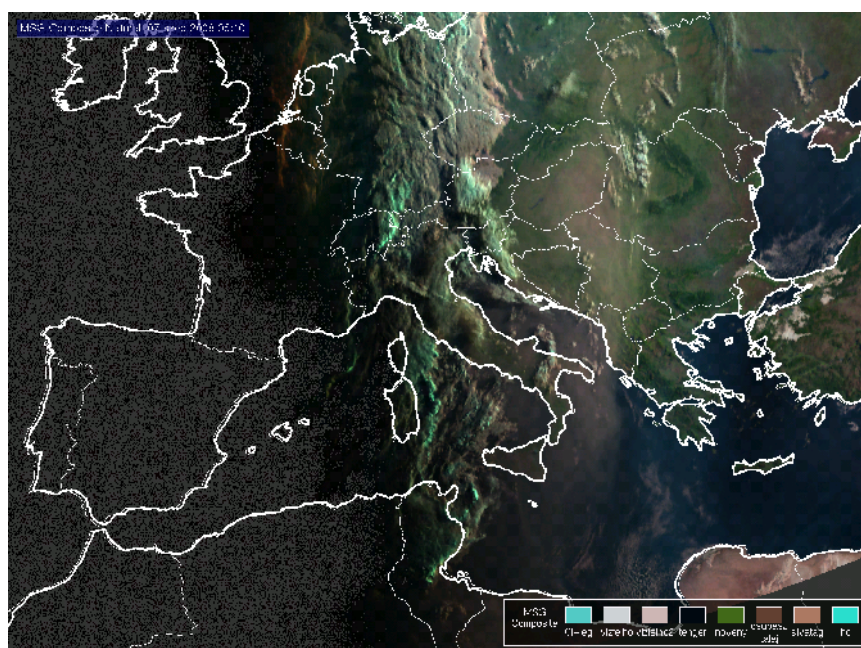


5.6.1. ábra. PM10 napi menete és jelent se megugrása a szahari por következtében





5.6.2. ábra. BSC/DREAM porterhelés el rejelzés 2008.09.07. 00 UTC-re (+12 h)



5.6.3. ábra. MSG Kompozit kép 2008. szeptember 7.



## 6. Összefoglalás

A dolgozatban igyekeztünk átfogó, kvalitatív képet adni a PM10 légszennyezettség alakulásáról, időjárási helyzettel való függőségéről. A valós időjárási tényezők helyett az ECMWF modell ERA Interim első 24 órára vonatkozó utólagos előrejelzéseit (ún. reforecast) vettük alapul a vizsgált időszakokra vonatkozó egységes adatbázis miatt és kerestünk kapcsolatokat a Budapest Gilice téren mért napi átlagos PM10 értékeivel. Feltételezhetjük, hogy az operatív gyakorlatban használt determinisztikus ECMWF modell verzió és az ERA Interim hasonló jellegzetességekkel, hibastatisztikákkal rendelkezik a szél, a határréteg vastagság, a hőmérséklet és a csapadék előrejelzése tekintetében. Az időjárás levegőtisztaságot befolyásoló két legfontosabb paraméterét, a szél és a függőleges légcsere együttes hatását az ezekben egyszerre származtatható ún. Stagnation-index értékein keresztül vizsgáltuk.

*Főbb eredményeinket az alábbiakban foglalhatjuk össze:*

- Több évi téli szezonját megvizsgálva összességében az mondható el, hogy az esetek jelentős részében az előrejelzett Stagnation-index és a PM10 koncentráció időbeli menete hasonló és a tényleges számértékek is hasonló nagyságrendűek.
- Tartósan 0°C alatti napi átlaghőmérséklet esetén, szélcsendesebb, anticiklonális helyzetekben a PM10 koncentrációja emelkedést mutat.
- A 0°C-os napi átlaghőmérséklet és a 100-as SI értékek mellett a szennyezettség nagy valószínűséggel (a vizsgált időszakban 90%-os arányban) meghaladja az egészségügyi határértéket.
- Az 5 mm-t meghaladó napi csapadékösszeg esetén javul a levegőtisztaság.
- A kiemelkedően szennyezett periódusok anticiklon centrumában, száraz, derült időben alakulnak ki. Az időszak elején ködmentes, vagy napközben feloszló köd jellemző. A kritikus légszennyezettség (tájékoztatási, riasztási fokozat) leggyakrabban a tartósan beálló köddel és az ezt követő megemelkedett sztrátusz felhőzettel megszűnik a makroszinoptikus helyzet megváltozása nélkül is.

A hideg légpárnás id járási szituációkat rendszerint, mint a légszennyező anyagok feldúsulása szempontjából kedvező helyzeteket említi több korábbi irodalom. Ez bizonyos szemszögből igaz, hiszen egy ciklon szeles, csapadékos id járásához képest valóban rosszabb a levegő minősége a szélcsendes, hideg légpárnás helyzetekben. A dolgozatban több példát említve és a legszennyezettebb eseteket külön is elemezve megmutattuk, hogy a kritikus légszennyezettségi szintekről való javulás éppenséggel gyakran társul a megemelkedett sztrátusz kialakulásához. Ennek a ténynek éppen a szmogriadó elrendelésének kérdése kapcsán van nagy jelentősége. A hivatali szervek döntéshozatalakor a mért légszennyezettségi értékek, tendenciák mellett az elrejelzett meteorológiai feltételeket, levegő minőség elrejelzést is figyelembe kell venniük. Szmogriadó ugyanakkor csak akkor jön szóba, ha már legalább két napon keresztül küszöbérték feletti volt a légszennyezettség. Több esetben a harmadik, negyedik napon, az előregedő anticiklonban megtörténik a hideg légpárna stabilizálódása és levegő minőség javulása.

A szélcsendes, párás, ködös id hoz a közvélemény szemében is gyakran társul a rossz levegő minőséggel, és mint bemutattuk ez csak részben igaz, így félreértések forrása is ez a sztereotípiá. A leginkább kritikus helyzetekben a délutáni, esti órákban rendszerint derült az ég.

Célunk, hogy az eredményeink, esettanulmányaink bemutatásával, a levegő minőséggel kapcsolatos elrejelzések kommunikációján is javítani lehessen.

#### *Felhasználói produktumok:*

Jelenleg operatív céllal az Országos Meteorológiai Szolgálat Budapest térségére futtat levegő kémiai almodellt a következő 48 órára. Az elrejelzett rácsponti értékek térképesen áttekinthetők és több esetben, - ha a háttérmodell az adott id járási helyzetben megfelelően kezeli a határreteg folyamatait - akár közvetlenül fel is használhatók. Az ország teljes területére, illetve a szmogriadó tervvel rendelkező nagyobb városokra jelenleg nem használnak operatív módon hasonló produktumot.

A modellek elrejelzéseiből a függőleges és vízszintes légcseré együttes hatásának figyelembe vételére a Stagnation-index térképek gyors áttekintést nyújthatnak. A napi átlagokra vonatkozó forma tovább egyszerűsítheti a felhasználást. Az SI index területi eloszlásához, küszöbértékeihez ugyan csak egy hozzávetőleges jelentést tartalmat társíthatunk, a légszennyezettség mértékében bekövetkező tendenciák viszonylagos jó

megbízhatóságú elrejelzéséhez gyakran ez is elegendő lehet. A SI 100 feletti értékeihez általában kedvezőtlen, 50 alatti értékeihez inkább kedvező időjárási feltételeket társíthatunk a levegő minőség szempontjából, a magasabb légszennyezettségi fokozatok elérésének kérdését szem előtt tartva. Adott városra az index értékének grafikonos ábrázolása is javasolt a csapadék és a hőmérséklet menetének feltüntetése mellett.

#### *Felmerült problémák, tervek, kitekintés:*

A leginkább komplex és a napi gyakorlatban is legnehezebben elrejelezhető légszennyezettséget befolyásoló időjárási tényező a vertikális légcseré. A köd és a megemelkedett sztrátusz folyamatai részletes mikrofizikai- és sugárzásparaméterezést igényelnek. A szükséges részletesebb leírást manapság inkább csak a korlátos tartományon futtatott, nagyobb felbontású modellek alkalmazzák. (Az OMSZ-nál jelenleg ilyen az ALADIN, AROME és WRF modellek). A vizsgálatainkban szereplő ECMWF modellverzió csak részben képes jól kezelni a hideg légpárnában kialakuló felhőzetet és hőmérsékleti rétegződést. A vizsgálat periódusokban is találtunk jelentős eltérést az ERA-Interim alacsony szintű felhőzetre vonatkozó elrejelzése és a valóság között, ami természetesen a határreteg vastagságra és szélviszonyokra is kihatással van. Felmerül, hogy külön megvizsgáljuk a tényleges rádiószondás felszállásokból származtatható határreteg vastagságot is, de az elmúlt években hosszabb időszakban nem volt 12 UTC-s budapesti rádiószondás mérés. Azt ezt megelőző években pedig megbízható PM10 adatsorral nem rendelkezünk.

Várható, hogy a különféle elrejelzési modellek fejlődésével egyre inkább elterjed a csatolt kémiai modellek alkalmazása, ami közvetlenül használható lesz a levegő minőség elrejelzésére is. Az eredmények értelmezésében, validálásában szerephez jut a légszennyezettségek befolyásoló különböző meteorológiai tényezők valósággal történő elemző összehasonlítása is. Az esetek kutatási célú gyors áttekintését, kiválasztását akár a Stagnation-index adatsorok, térképek is segíthetik.

A dolgozatban bemutatott kvalitatív elemzések után felmerül, hogy mélyebb statisztikai elemzésnek is alávetjük a helyi forrástényezők valamilyen leírásával kiegészülő határreteg vastagság, szél, hőmérséklet, csapadék és a PM10 értékek adatbázisát, több mérési pontra is. Érdekes olyan esetekre szólni a vizsgálatot, amikor feltételezhetjük, hogy nem játszik domináns szerepet a nagy távolságú szennyezőanyag-transport.

## Irodalomjegyzék

Abraczinskas M., Alter L., Anderson C. B., Ballagas R., Bishop M., Bridgers G., Browner R., Carlson C., Casmassi J., Chan A. C., Chang J., Childs A., Chinkin L., Bobourn G., Comrie A., Cox L., DeGuire L., Dye T. S., Fitzsimmons S., Gilroy M., Gorman B., Hafner H. R., Holman S., Koerber M., Kolczak L., Lambetg B., Linse E., Linton A., Lurmann F., MacDonald C. P., Majewski M., Michaelson C., Pidgeon E., Pruitt K., Roberie C., Roberts P., Ryan B., Shearer K., Stoeckenius T., Stone S., Stuckey T., Swinford B., Taylor R., Timan B., VanArsdale A., Wayland C., White J. E., Weinstock E., Weiss L., Wheeler J. M. N., Wilson R. (2003): Guidelines for Developing an Air Quality (Ozone and PM2.5) Forecasting Program, U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, 126p.

Anda A., Burucs Z., Kocsis T. (2011): Globális környezeti problémák és néhány társadalmi hatásuk. Digitális Tankönyvtár, 154p.

Ansmann A., Bosenberg J., Chaikovsky A., Comeron A., Eckhardt S., Eixmann R., Freudenthaler V., Ginoux P., Komguem L., Linné H., Márquez M. Á. L., Matthias V., Mattis I., Mitev V., Müller D., Music S., Nickovic S., Pelon J., Sauvage L., Sobolewsky P., Srivastava M. K., Stohl A., Torres O., Vaughan G., Wandinger U., Weigner M. (2003): Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: The 11-16 october 2011 outbreak observed with EARLINET. Journal of Geophysical Research: Atmosphere 108, pp 3-11.

Baranka Gy., Bordás Á., Gyuró Gy., Havasi Á., Leel ssy Á., Mészáros R., Szépszó G., Tasnádi P., Weidinger T. (2013): Klasszikus dinamikus meteorológiai feladatgy jtemény II., VIII.5. A stabil és az instabil keveredési réteg vastagságának számítása, Tankönyvkiadó, Budapest, 539p.

Becker P., Beck M., Csóry Gy., Dankó G., Gregor A., Heged sné M llern V., Kéri P., Kovácsy T., Makkai M., Papp S., Radics-Ludvig Gy., Sinka Z., Tóth T., Vitányi I. (2011): Jelentés: A légszennyezés ellen és a klímapolitika terén tett intézkedések hatásának ellen rzésér l, Állami Számvev szék, Budapest, 172p.

- Bergin MS., West JJ., Keating TJ., Russell AG. (2005): Regional atmospheric pollution and transboundary air quality management. *Annual Review of Environmental and Resources*, 30, pp 1-37.
- Cséki G. (2010): Inverziós helyzetek kialakulása a Kárpát-medencében. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. p 99
- Dockery D.W., Pope C.A. III., Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., Ferris B.G., Speizer F.E. (1993): An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, 24, pp. 1-7.
- Ferenczi Z. (2009): Az id járás szerepe a légszennyezettségi epizódok kialakulásában. *Légekör*, 54. évf. 2. szám, pp. 2-5
- Ferenczi Z., (2013): Predictability analysis of the PM2.5 and PM10 concentration in Budapest. *Id járás*, 117. évf. 4. szám, pp. 359-375.
- Ferenczi Z., Kolláth K. (2013): Magas légszennyezettséget okozó id járási helyzetek vizsgálata. 39. Meteorológiai Tudományos Napok, Budapest, 2013. XI. 18.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowq D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. (2007): Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 129-234.
- Gelencsér A. (2004): Aeroszol részecskék a légkörben, *A Természet Világa* 2004//II. különszáma, pp. 25-27
- Guerreiro C., Leeuw de F., Foltescu V. (2013): Air quality in Europe, *European Environmental Agency Report No 9/2013*, Copenhagen, 112p.

- Gyöngyösi A. Z., André K., Horányi A., Mile M., Szépszó G., Tasnádi P., Weidinger T. (2013): Numerikus meteorológiai modellfuttatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. *Légkör*, 57. évfolyam, 4. szám, pp. 177-183
- Holst J., Mayer H., Holst T. (2008): Effect of meteorological exchange conditions on PM10 concentration. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, pp. 273-282
- IPCC (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing 2013: The Physical Science Basis of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Bréon F. M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J. F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Rebeck A., Stephens G., Takemura T., Zhang H., Cambridge University Press, Cambridge, 740p.
- Kolláth K. (2011): A levegő minőség alakulása november harmadik hetében, Tanulmányok. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. [http://met.hu/ismerettar/erdekessegek\\_tanulmanyok/20111120\\_szmoghelyzet\\_november/](http://met.hu/ismerettar/erdekessegek_tanulmanyok/20111120_szmoghelyzet_november/)
- Kolláth K. (2011): Szmoghelyzet 2011 októberében és novemberében, Tanulmányok. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. [http://met.hu/ismerettar/erdekessegek\\_tanulmanyok/20111116\\_szmoghelyzet/](http://met.hu/ismerettar/erdekessegek_tanulmanyok/20111116_szmoghelyzet/)
- Kovács R. (2002): A keveredési réteg vastagság számítása az új magyar transzmissziós szabványban. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 72p.
- Muránszky G. (2011): Városi aeroszol PM10 frakciójának kémiai jellemzése, Doktori Ph.D. értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 117p.
- Németh Z. (2011): Légköri nukleáció városi környezetekben. Tudományos Diákköri Dolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest. 31p.

- Páldy A., Bobvos J., Vaskövi B., Hangyáné Szalkai M. (2009): A levegő szennyezés rövid- és hosszú távú hatásai Budapesten, Országos Környezetegészségügyi Intézet, Budapest, 9p.
- Pomázi I., Szabó E. (2008): OECD Környezetpolitikai Teljesítményértékelések: Magyarország, Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest, 254p.
- Putaud J.P., Van Dingenen R., Baltensperger U., Brüggemann E., Charron A., Facchini M. C., Decesari S., Fuzzi S., Gehrig R., Hansson H. C., Harrison R. M., Jones A. M., Laj P., Lorbeer G., Maenhaut W., Mihalopoulos N., Müller K., Palmgren F., Querol X., Rodriguez S., Schneider J., Spindler G., Bring H. T., Tunved P., Torseth K., Wehner B., Weingartner E., Wiedensohler A., Wahlin P., Raes F. (2003): A European Aerosol Phenomenology physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural, and background sites in Europe, Joint Research Center Institute for Environmental and Sustainability, Ispra, 55p.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. (1997): Atmospheric Chemistry And Physics: From Air Pollution to Climate Change, Wiley-Interscience, New York, 1360p.
- Szuhi A. (2010): A szálló por okozta járulékos halálozás 22 hazai városban. Tájökológiai lapok 8 (3): pp 411-420.
- U.S. Environmental Protection Agency (2012): Our Nation's Air, Status and Trends Through 2010, Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, North Carolina, 49p.
- Vidékfejlesztési Minisztérium (2013): Beszámoló jelentés az 1330/2011. (X.12.) Korm. határozattal elfogadott Kisméret Szálló Por (PM10 részecske) Csökkentés Ágazatközi Intézkedési Programjáról. (<http://pm10.kormany.hu/>)
- Vidékfejlesztési Minisztérium (2014): PM10 csökkentési program (<http://pm10.kormany.hu/>)

Vidékfejlesztési Minisztérium (2014): Vegyi anyagok szabályozása (<http://vegianyag.kormany.hu/lrtap>)

WHO (2000): Air quality guidelines for Europe, Second edition, World Health Organization Regional Office for Europe, 2000, WHO Regional Publications, European Series, 273p.

Wilson R., Spengler J.D. (1996): Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects. Harvard University Physics Department, Cambridge, 259p.



## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megköszönni témavezetőimnek, Ferenczi Zitának és Kolláth Kornélnak a kitartó munkájukat és segítőkészségüket és hogy észrevételeikkel, szakmai tanácsaikkal segítettek dolgozatom elkészülését.

Köszönöm dr. Pongrácz Ritának támogatását és értékes tanácsait.