

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Nukleációs helyzetek meteorológiai háttérének statisztikai vizsgálata budapesti mérések alapján

TDK DOLGOZAT

Készítette:

Kelemen Tibor

Környezettan alapszak
Meteorológus szakirány

Témavezetők:

Dr. Salma Imre, egyetemi tanár, ELTE Analitikai Kémiai Tanszék
Dr. Weidinger Tamás, egyetemi docens, ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2012. 01. 06.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzések	3
2. Irodalmi háttér	5
2.1. A légköri nukleáció	5
2.1.1. A mérőrendszer működési elve	6
2.1.2. A nukleációs napok azonosítása.....	7
2.2. Meteorológiai adatok	8
2.2.1. Péczy-féle napi makrocirkulációs típusok	9
2.2.2. Frontanalízis	9
2.2.3. Keveredési rétegvastagság becslése	10
2.3. Kulcsfontosságú légszennyezők	12
2.4. Statisztikai módszerek	12
2.4.1. Leíró statisztika	12
2.4.2. Korrelációanalízis	13
3. Eredmények és megvitatásuk	14
3.1. A keveredési rétegvastagság	14
3.2. A nukleációs és a nemnukleációs napok időjárási helyzeteinek összehasonlítása	15
3.3. A felépített adatbázis	17
3.4. Néhány tipikus eset.....	19
3.5. Összehasonlítás (nukleációs és nemnukleációs napok).....	24
4. Összefoglalás.....	26
5. Irodalomjegyzék.....	27

1. Bevezetés és célkitűzések

Az aeroszol a levegőben elosztatott szilárd és/vagy cseppfolyós részecskék kolloid rendszere. A részecskék átmérője a néhány nanométertől egészen 100 μm nagyságig terjed; aerodinamikai átmérőjük alapján megkülönböztethetünk: durva ($d > 2,5 \mu\text{m}$) és finom részecskéket ($d < 2,5 \mu\text{m}$). Ezen kívül léteznek még ultrafinom (UF) részecskék is ($d < 100 \text{ nm}$), amelyek tömege az aeroszol részecskék össztömegének kevesebb, mint 1%-át teszi ki (PAKKANEN, T. et al. 2001), viszont számkoncentrációjuk a legnagyobb. E részecskéket már nem aerodinamikai, hanem elektrosztatikai módszerekkel tanulmányozzuk, így méretüket sem az aerodinamikai, hanem az elektromos mozgékonyági átmérővel fejezzük ki (SALMA, I. et al. 2011). A részecskék méreteloszlásában négy jellemző módust (csúcsot) különböztethetünk meg, az egyes módusok medián átmérője (d) alapján: durva ($d \sim 6\text{--}8 \mu\text{m}$), akkumulációs ($d \sim 0,4\text{--}0,5 \mu\text{m}$), Aitken– ($d \sim 0,1 \mu\text{m}$) és nukleációs módus ($d \sim 2\text{--}100 \text{ nm}$). A durva és finom részecskékről viszonylag sok ismerettel rendelkezünk, míg az UF részecskék vizsgálata ezidáig a háttérbe szorult a mérési és kísérleti nehézségek miatt. Az utóbbi évek kutatásai során kiderült, hogy az ultrafinom aeroszol részecskék szerepet játszanak az éghajlat alakulásában és egészségügyi kockázatot is jelenthetnek (IPCC, 2007, RAMANATHAN, V. et al. 2001).

Az aeroszol részecskék éghajlati hatása a felhők keletkezésében nyilvánul meg. A felhőcseppek képződése során a nagyobb, 100–200 nm átmérőjű, főként nukleáció utáni növekedéssel kialakult (MERIKANTO, J. et al. 2009) higroszkopikus részecskék felületén a vízgőz képes kondenzálódni, és felhőcsepp keletkezik. Az ilyen tulajdonságú részecskéket felhőkondenzációs magvaknak (CCN, Cloud Condensation Nuclei) nevezzük. Az aeroszol részecskék számában, illetve higroszkopikus tulajdonságában bekövetkező lényeges változások módosíthatják a felhők mikrofizikai, illetve sugárzási jellemzőit (CHIN, M. et al. 2009). A nagyobb részecske szám mellett kialakuló felhőcseppeknek egyrészt nagyobb összfelületük lesz, és ezért jobban visszaverik a napsugárzást („fehérebbek”), másrészt az átlagos élettartamuk is hosszabb, tehát a sugárzás-visszaverő hatásukat hosszabb ideig fejtik ki. A kisebb cseppeket tartalmazó felhőkből ráadásul ritkábban hullik csapadék, mert a sok csepp a vízpára korlátozott mennyisége miatt nem tud kellően nagyra nőni ahhoz, hogy távozzon a levegőből. Az aeroszol részecskék tehát a felhőcseppek révén egyrészt befolyásolják a víz és a nyomanyagok körforgását, másrészt a sugárzás-visszaverés miatt „hűtik” a Földet.

Ezzel komolyan ellensúlyozzák az üvegházhatású gázok melegítő hatását, és hozzájárulnak az élhető éghajlat fenntartásához és szabályozásához (BORSÓS T.–SALMA I. 2009).

Az utóbbi évek epidemiológiai vizsgálatai kimutatták, hogy kapcsolat van a légköri ultrafinom részecskék koncentrációja és a légzőszervi megbetegedések között. Az ultrafinom részecskék többlet kockázatot jelentenek az emberi egészségre, mert kis méretük miatt keresztülhatolhatnak a légutak sejtmembránján, s bejuthatnak a vérkeringésbe, vagy a szaglóidegen keresztül eljuthatnak a központi idegrendszerbe (PÖSCHL, U. 2005), vagyis a szervezet bármely részébe elkerülhetnek. Az ultrafinom részecskék nagy koncentrációja ilyen módon különböző krónikus légúti megbetegedéseket okozhat, fokozhatja a tüdőgyulladás, illetve az oxidatív stressz kialakulásának az esélyét, de akár szív- és érrendszeri megbetegedéseket is előidézhethet. (POLITIS, M. 2008, ODERDÖRSTER, G. et al. 2005).

A légköri ultrafinom aeroszol részecskék természetes és antropogén úton is keletkeznek. Fő természetes képződési folyamatuk a légköri nukleáció. Legjelentősebb antropogén forrásaik a magas hőmérsékletű folyamatok, amelyek közvetlenül emittálják a részecskéket; így például a közúti közlekedés, a tüzelés és a háztartási fűtés, valamint a hulladékégetés (PÖSCHL, U. 2005). Korábbi vizsgálatokból (Salma, I. et al. 2011) kiderült, hogy a légköri nukleáció nem ritka jelenség Budapesten, gyakorisága éves szinten 27%. Nukleációra viszonylag tiszta napokon, kis aeroszol koncentráció esetén számíthatunk. A folyamat során keletkező új aeroszol nagyságrendekkel megnöveli a részecskék számkoncentrációját a levegőben. A jelenség a nagyvárosokban egészségügyi és városklimatológiai problémákkal, kockázatokkal jár.

A légköri aeroszol részecskék keletkezési folyamata, és a meteorológiai állapothatározók között kapcsolat van. Munkánk fő célja, hogy megvizsgáljuk a nukleációs helyzetek és a meteorológiai, illetve a légszennyezettségi állapothatározók közötti kapcsolatrendszerét. E kutatásban a feladatom egy egységes, napi felbontású adatbázis létrehozása volt az egy éves aeroszol mérési kampány idejére (2008. november 4. – 2009. november 30.) a meglévő nyomanyag koncentrációkból és meteorológiai adatokból.

Az adatbázis kialakításához az ELTE városklíma állomásán mért meteorológiai adatok mellett felhasználtam a budapesti 12 UTC-s rádiószondás mérésekből számított keveredési rétegvastagságot is. Beépítettem az adatbázisba a napi Péczy-féle makrocirkulációs típusokat, és az általam készített napi frontkatalógust is. Felhasználtam a nukleáció szempontjából kulcsfontosságú légszennyezők koncentráció adatait is. Az adatbázis elemei közötti kapcsolatot egyszerű statisztikai módszerekkel vizsgáltam.

2. Irodalmi háttér

Ebben a fejezetben először bemutatom a légköri nukleáció folyamatát, a keletkező új aeroszol részecskék számkoncentrációjának meghatározását szolgáló mérőműszereket, majd a nukleációs napok azonosításának elvét. Ezt követően sorra veszem az adatbázis elemeit, végül pedig bemutatom az adatsorok jellemzésére használt statisztikai módszereket.

2.1. A légköri nukleáció

Légköri nukleációnak nevezzük azt az elsőrendű fázisátmenetet (légnemű-folyadék vagy légnemű–szilárd fázisváltás), amikor homogén, légnemű összetevők (SO_2 , VOC: Volatile Organic Compounds, illékony szerves vegyületek) fotokémiai oxidációjával kisebb egyensúlyi gőznyomású, tehát kondenzációra képes gőzök (pl. H_2SO_4) keletkeznek, és ezek további légköri összetevőkkel (H_2O , NH_3 , NH_2R , NHR_1R_2 , VOC) kölcsönhatva szilárd vagy folyékony fázis megjelenését, vagyis új aeroszol részecskéket eredményeznek. A nukleáció megvalósulásának kedvez, ha nagy az elővegyületek koncentrációja, erős a napsugárzás, illetve kicsi a rendelkezésre álló felület a versengő kondenzációs folyamatok részére (NÉMETH Z. 2012). A nukleáció során, Budapesten másodpercenként 2–12 darab, új aeroszol részecske jön létre egy köbcentiméter levegőben, és a keletkezési folyamat akár egy óránál is tovább tarthat (SALMA, I. et al. 2011).

A szakirodalomban több légköri nukleációs elmélet létezik. A legegyszerűbb a homogén homomolekuláris nukleáció (egy anyagfajta esetén). Több gőz együttes nukleációja energetikailag már sokkal kedvezőbb, ezt homogén heteromolekuláris nukleációnak nevezzük. A már meglévő gócokon a heterogén nukleáció folyamata játszódik le. A nukleációt követően a részecskék kondenzációval, vagy termikus koagulációval növekednek tovább, rendszerint legfeljebb az akkumulációs módusig. Laboratóriumi kutatások alapján kimutatták, hogy a nukleáció legfőbb elővegyülete a H_2SO_4 , de vannak más vegyületek is, például az NH_3 , illetve különböző szerves vegyületek, amelyek szerepe a folyamatban még nem teljesen tisztázott (BENSON, D. R. et al. 2011). A nukleáció tehát bonyolult folyamat, mely több környezeti összetevő együttes hatására jön létre. A közöttük lévő kapcsolatrendszert korábban mért adatok statisztikai kiértékelésével próbáltuk felderíteni.

2.1.1. A mérőrendszer működési elve

A légköri aeroszol részecskék számkoncentrációját elektromos mozgékonyyságon alapuló részecskeszeparátor (DMPS, Differential Mobility Particle Sizer) segítségével határozták meg (1. ábra). A mérőberendezés az ELTE Lágymányosi északi épületének második emeleti teraszán működött. A mérés egy éven keresztül 2008. november 4. és 2009. november 30. között folyamatosan, 10 percenkénti mintavételezéssel zajlott (SALMA, I. et al. 2011).

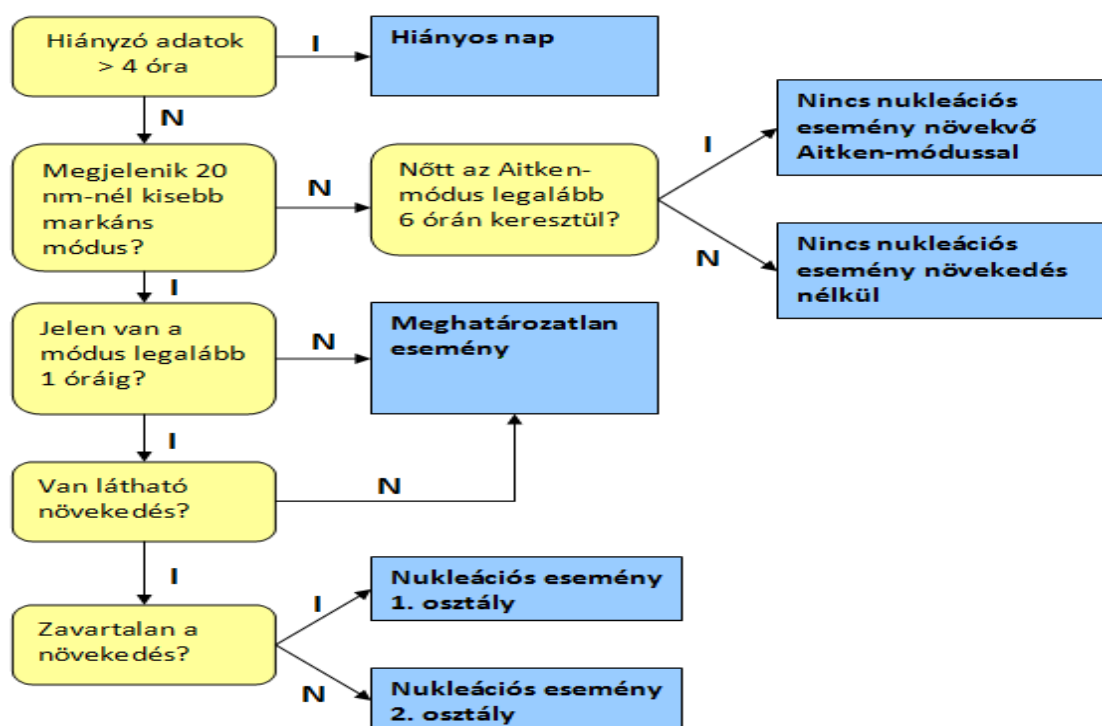
A mérőrendszer három fő egységből áll. A beáramló levegő először egy neutralizálón megy keresztül, melynek feladata, hogy az aeroszol részecskék elektromos töltését egyensúlyi töltéseloszlásra hozza. Egy radioaktív sugárforrás (^{241}Am) ionizálja a levegő molekuláit, mely az aeroszol részecskékkel ütközve egyensúlyi töltéseloszlást eredményez. A részecskék innen a differenciális mozgékonyyság analízátorba (DMA, Differential Mobility Analyser) kerülnek. A DMA elektromos mozgékonyyság alapján szétválogatja a részecskéket. A nagyfeszültséget lépcsőkben változtatva különböző átmérőjű részecskéket szeparálhatunk. A DMA-ból a részecskék a kondenzációs részecskeszámlálóba (CPC, Condensation Particle Counter) jutnak, melynek működése a lézervény szórásán alapul. Annak érdekében, hogy a legkisebb részecskéket is detektálhassuk a szórás alapján, szükség van a részecskék megnövesztésére. Ezért a részecskék először egy butanollal telített, 39 °C-ra fűtött térbe jutnak, majd egy 14 °C-ra hűtött kondenzeren haladnak keresztül. Itt a butanol kondenzálódik a részecskékre, így méretük kondenzáció révén megnő, és mindegyik detektálhatóvá válik. Ezután a mintát egy kollimált lézernyalábra merőlegesen vezetjük tovább, amely szórja a lézervényt. A szórt fény intenzitását egy fotodetektorral mérjük, ami alapján már meghatározhatjuk a részecskék számát, majd a részecskék számának méreteloszlását (NÉMETH Z. 2012).



1. ábra: A mérőrendszer az egyetem egyik laborjában.

2.1.2. A nukleációs napok azonosítása

A részecskeszám méreteloszlás változását az időben kontúrgrafikonokon ábrázolták. A grafikon (pl. 6. ábra) vízszintes tengelyén az időfelbontás szerepel 10 perces osztásközzel, míg a függőleges tengelyén a részecskék átmérője található méterben kifejezve. Az adott időpillanatban jelen levő adott átmérőjű részecskék számkoncentrációját színkód alapján lehet meghatározni, a kék a legkisebb, a piros pedig a legnagyobb koncentrációsintet jelöli. A kontúrgrafikon a részecskék képződésének és növekedésének folyamatát is szemlélteti. A levegőben lévő gőzökből nukleációval kialakuló, új folyékony vagy szilárd részecskék képződésekor a grafikonokon kirajzolódó, elnyúlt piros alakzat, az ún. banángörbe (BORSÓS T.–SALMA I. 2010). A kontúrgrafikonok elemzését követően az egyes napokat a nyilvánvalóan nukleációs, a nyilvánvalóan nem nukleációs, és a nem meghatározható kategóriákba soroltuk. A mérési periódus alatt összesen 83 nukleációs és 229 nemnukleációs napot azonosítottunk. Az osztályozást a 2. ábrán látható folyamatábra alapján végeztük el.



2. ábra: A döntési eljárás folyamatábrája.

2.2. Meteorológiai adatok

A meteorológiai adatokat az ELTE városklíma állomása szolgáltatta, amit az Országos Meteorológiai Szolgálat üzemeltet. Az állomás műszereit a Vaisala–QLC50 típusú automata mérőrendszerhez tartozó talajhőmérséklet, fűszinti hőmérséklet, léghőmérséklet, relatív nedvesség, csapadék, globálsugárzás, szélirány, szélesség, illetve légnyomás mérésére szolgáló szenzorok alkotják (1. táblázat).

1. táblázat: Az egyes meteorológiai elemek mérőműszereinek típusai, működési elve és mérési szintjei.

Meteorológiai elem	Műszer típusa	Működési elve	Mérési szint
talajhőmérséklet	Vaisala DTS12G	platina ellenállás	-20 cm, -10 cm, -5 cm
fűszinti hőmérséklet	Vaisala DTS12G	platina ellenállás	5 cm
léghőmérséklet	Vaisala HMP35D	platina ellenállás	2 m
relatív nedvesség	Vaisala HMP35D	platina ellenállás	2 m
csapadék	Vaisala RG13	billenő edényes	35 m
globálsugárzás	Vaisala CM3	termoelektromos	35 m
szélirány	Vaisala WAV15A	fotoelektromos	45 m
szélesség	Vaisala WAA15A	fotoelektromos	45 m
légnyomás	Vaisala PTB210	szilikon membrános	~35 m

Mind a részecskeszám koncentrációk, mind a meteorológiai paraméterek 10 perces felbontásban, egy éven keresztül lettek rögzítve. A felhasznált meteorológiai adatok a levegőhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], relatív páratartalom [%], szélesség [m/s], szélirány [$^{\circ}$], csapadék [mm], globálsugárzás [W/m^2] és a légnyomás [hPa] voltak.

2.2.1. Péczy-féle napi makrocirkulációs típusok

Az adatbázis építés következő lépéseként összegyűjtöttük a Péczy-féle makrocirkulációs helyzeteket a vizsgált egy évre. Az adatokat Károssy Csaba (Szombathely) bocsátotta rendelkezésünkre. Fontos kérdés a nukleáció kialakulása és a fennálló makroskálájú időjárási helyzet közötti kapcsolat vizsgálata, ami a nukleáló légköri tömeg horizontális kiterjedésére és elhelyezkedésére utalhat. A Péczy-féle makroszinoptikus időjárási helyzetek osztályozási rendszere (2. táblázat) Péczy György (1924–1984) magyar klimatológus nevéhez fűződik, amely a Kárpát-medence egész területére értelmezett, egyidejűleg fennálló, komplex időjárási helyzeteket írja le (KÁROSSY Cs. et al. 2009).

2. táblázat: Péczy-féle makroszinoptikus időjárási helyzetek.

Sorszám	Kód	Típus
1	mCc	Meridionális ciklon hidegfrontja
2	AB	Anticiklon a Brit-szigetek fölött
3	CMc	Mediterrán ciklon hidegfrontja
4	mCw	Meridionális ciklon melegfrontja
5	Ae	Anticiklon a Kárpát-medencétől keletre
6	CMw	Mediterrán ciklon melegfrontja
7	zC	Zonális ciklon
8	Aw	Anticiklon a Kárpát medencétől nyugatra
9	As	Anticiklon a Kárpát-medencétől délre
10	An	Anticiklon a Kárpát-medencétől északra
11	AF	Anticiklon a Skandináv-félsziget fölött
12	A	Anticiklon a Kárpát-medence fölött
13	C	Cikloncentrum a Kárpát medence fölött

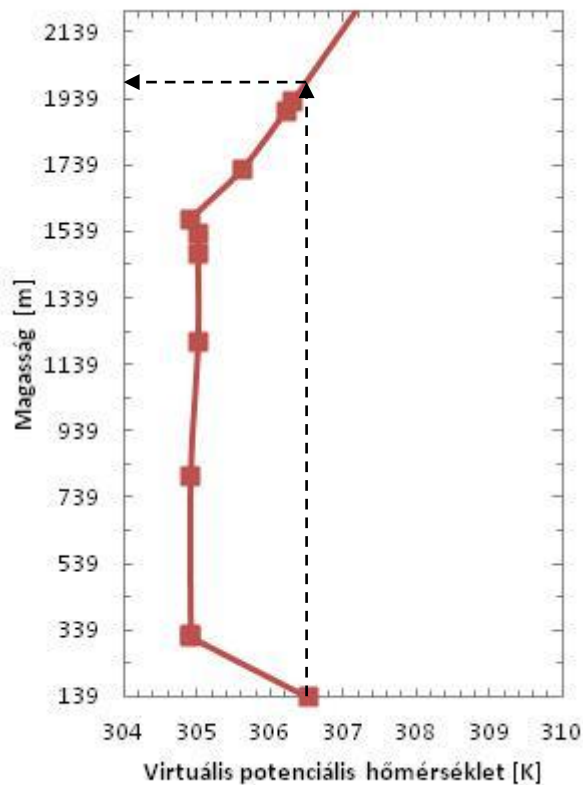
2.2.2. Frontanalízis

A munkám során frontanalízist is végeztem minden egyes napra vonatkozóan. Ennek során először letöltöttem a www.wetterzentrale.de adatbázisából az adott nap 00 UTC-s szinoptikus térképét. A szinoptikus térképek analízise alapján frontmentes, meleg fronti, hideg fronti és okklúziós fronti helyzeteket különítettem el. Ezeket számkód alapján építettem bele az adatbázisba: 0: nincs front, 1: hideg front, 2: meleg front, 3: okklúziós front.

2.2.3. A keveredési rétegvastagság becslése

A keveredési réteg, vagy planetáris határréteg (PBL, Planetary Boundary Layer) a légkör azon része, amelyben a felszín hatása érvényesül a termikus és a mechanikus turbulencia révén. Ebben a rétegben zajlik a légkör és a felszín közötti hő-, nedvesség nyomanyag és momentumcsere turbulens átkeveredés révén. Magasságát mind felszíni, mind légköri tényezők alakítják (BREUER H. et al. 2012). A keveredési réteg szerkezete és áramlási rendszere meghatározza a felszínközeli légszennyezők mozgását, stabilitását és hígulását.

Mivel a határréteg magasságát közvetlenül nem méri, ezért azt a virtuális potenciális hőmérsékleti profil ismeretében, a részecskemódszer alapján határoztam meg (WENHARDT T. 2008). Ehhez letöltöttem a pestszentlőrinci állomás (12843) 12 UTC-s rádiószondás adatait a Wyoming Egyetem honlapjáról. A módszer a virtuális potenciális hőmérséklet magasság szerinti változásán alapul. A virtuális hőmérséklet az a hőmérséklet, amely a száraz levegőt jellemezné, ha nyomása és sűrűsége megegyezne az adott r [kg/kg] vízgőz keverési arányú nedves levegő nyomásával és sűrűségével. A potenciális hőmérséklet pedig megadja egy adott nyomású és hőmérsékletű légréteg azon hőmérsékletét, amit akkor venne fel, ha száraz adiabatikus folyamat során az 1000 hPa-os nyomási szintre vinnénk. Az emelkedő légréteg virtuális potenciális hőmérséklete konzervatív tulajdonság. Tehát a keveredési réteg magasságát úgy kapjuk meg, hogy a virtuális potenciális hőmérsékleti profilon megkeressük azt az első magassági szintet, ahol a profil újra felveszi a kiindulási, azaz a felszínen (vagy annak közelében) mért értéket. A 3. ábrán a virtuális potenciális hőmérséklet vertikális profilját mutatom be példaként 2009. 07. 17-én, 13:00 órákor.



3. ábra: A planetáris határréteg magasságának meghatározása a virtuális potenciális hőmérséklet alapján részecskemódszerrel.

Abban az esetben (pl. csapadéktevékenység, stabil rétegződés), amikor a virtuális potenciális hőmérséklet magasság szerinti profiljának adottságai nem tették lehetővé a keveredési réteg vastagságának meghatározását, akkor a meteorológiai állapothatározók (hőmérséklet, szélsébség, páratartalom) menetében bekövetkező ugrásszerű változás jelezte a PBL valószínűsíthető magasságát. Végül a keveredési réteg vastagságának meghatározása érdekében a kapott magasság értékekből levontam a Gilice téri mérőállomás tengerszint feletti magasságát (139 m).

2.3. Kulcsfontosságú légszennyezők

A nukleáció várhatóan kapcsolatban van a levegőkörnyezet állapotával, a légköri nyomanyag koncentrációkkal. A légszennyező anyagok koncentrációját az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat méri. A kiértékelés során felhasznált levegőszennyező anyagok a SO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], a PM_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], a NO_x [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] és az O_3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] voltak. Ezek órás adatait a legközelebbi, a Kosztolányi Dezső téren elhelyezett mérőállomás szolgáltatta. Az egyes légszennyezők koncentrációját különböző módszerekkel állapítják meg, amelyeket a 3. táblázatban foglaltam össze.

3. táblázat: Az egyes légszennyezők koncentrációjának meghatározási módszerei.

Légszennyező	Módszer neve
SO_2	UV fluoreszcencia
PM_{10}	kemilumineszcencia
NO_x	béta radiometria
O_3	UV abszorpciós fotometria

2.4. Statisztikai módszerek

A nukleáció és a légköri paraméterek közötti kapcsolatrendszer leírásához ismernünk kell az egyes változók eloszlását, illetve a változók közötti összefüggéseket. Ezeket első közelítésben egyszerű leíró statisztikai módszerek segítségével vizsgálhatjuk.

2.4.1. Leíró statisztika

A vizsgált adatokat a Microsoft Office Excel Táblázatkezelő program segítségével rendszereztem. Először külön gyűjtöttem a nukleációs, a nem nukleációs, illetve az összes napra vonatkozó értékeket. Ezután különböző statisztikai függvények segítségével kiszámítottam az adatsorokban szereplő értékek darabszámát, azok extrém értékeit, mediánját, átlagát és szórását. Majd évszakos bontásban értékeltem ki az előbb felsorolt jellemzőket. Végül egy táblázatban foglaltam össze az egyes adatsorokra vonatkozó medián értékeket.

2.4.2. Korrelációanalízis

A korreláció két (vagy több) véletlen változó közötti kapcsolat jellemzésére szolgál. Feltételezzük, hogy mindkét valószínűségi változó (x és y) normális eloszlású, és a közöttük lévő lineáris összefüggés mértékét a korrelációs együttható mutatja, melyet r -rel jelölünk. Értéke -1 és $+1$ közé eshet, a határokat is beleértve. Ha r pozitív, akkor y együtt növekszik, vagy csökken x -szel. Negatív r esetében ellentétes irányú a változás. Amennyiben az r abszolút értéke 1, x és y között függvényyszerű kapcsolat van, amelynél minden pont egy egyenesen helyezkedik el. A két változót korrelálatlannak nevezzük, ha $r = 0$. Az analízis során a Pearson-féle korrelációs együtthatót használtam, amely két változó közötti lineáris kapcsolat erősségét méri. A korreláció képlete:

$$r(x, y) = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

ahol

$$Cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (2)$$

ahol $Cov(x, y)$: kovariancia, σ_x , σ_y : x , ill. y szórása, $\bar{x}$: x átlaga, $\bar{y}$: y átlaga (HUZSAI L. 2011)

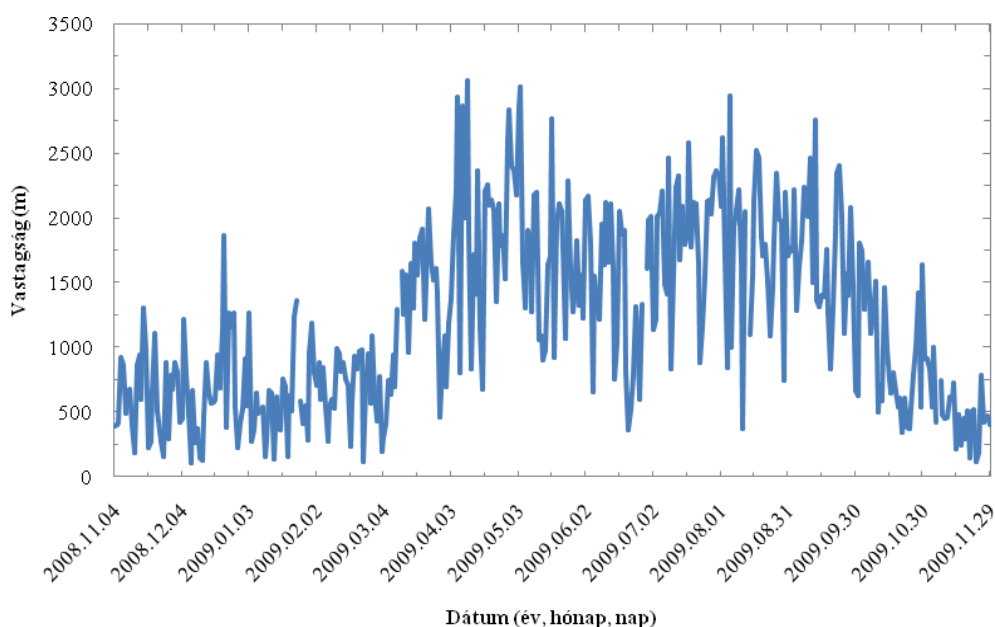
A vizsgált adatok korrelációanalíziséhez az SPSS (Statistical Package for the Social Scientists) statisztikai programcsomag 17.0-ás verzióját használtam.

3. Eredmények és megvitatásuk

E fejezetben a keveredési rétegvastagság évi menetének, illetve a nukleációs és a nemnukleációs napok általános jellemzése (pl. frontális és nem frontális helyzetek előfordulási gyakorisága, makroszinoptikus helyzetek) után az általam felépített napi meteorológiai és levegőkémiai adatbázis elemzésével foglalkozom. Bemutatom a nukleációs és a nemnukleációs napokra jellemző részecskeszám és méreteloszlás időbeli változását, majd a statisztikai vizsgálatok eredményeit ismertetem.

3.1. A keveredési rétegvastagság

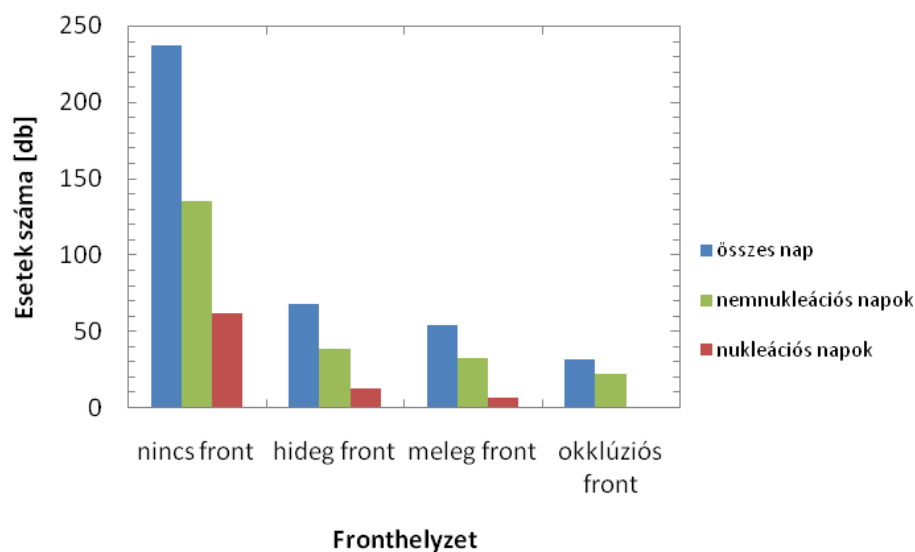
A 12 UTC-s keveredési rétegvastagság részecskemódszerrel meghatározott értékeinek évi menetét a 4. ábra mutatja. Télen néhány száz, nyáron egy-két ezer méteres keveredési rétegvastagság a jellemző. A keveredési réteg vastagsága érzékenyen befolyásolja a légszennyező gázok, a nukleálódó és kondenzálódó gőzök légköri koncentrációját, ezért várhatóan a kiértékelés egyik fontos paramétere lesz.



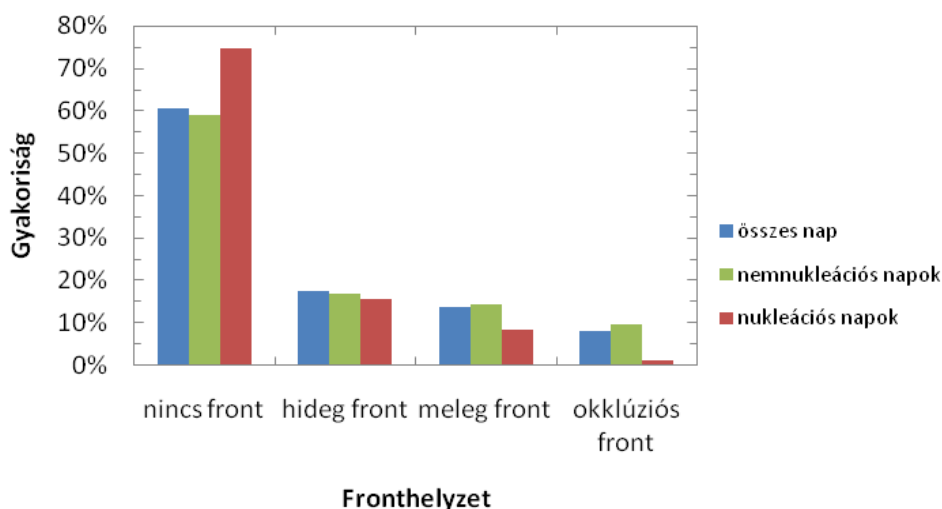
4. ábra: A határréteg vastagságának alakulása Budapesten a mérési periódus idején (2008. 11. 04. – 2009. 11. 30.).

3.2. A nukleációs és a nemnukleációs napok időjárási helyzeteinek összehasonlítása

A nukleációs és a nemnukleációs napok frontanalízisét (5. és 6. ábra) összehasonlítva megállapítható, hogy az egyes frontok eloszlása mindkét esetben hasonlóan alakult, azaz a frontmentes helyzetek gyakorisága a legnagyobb, míg a hideg front, a meleg front és az okklúziós front jóval kevesebbszer fordult elő.



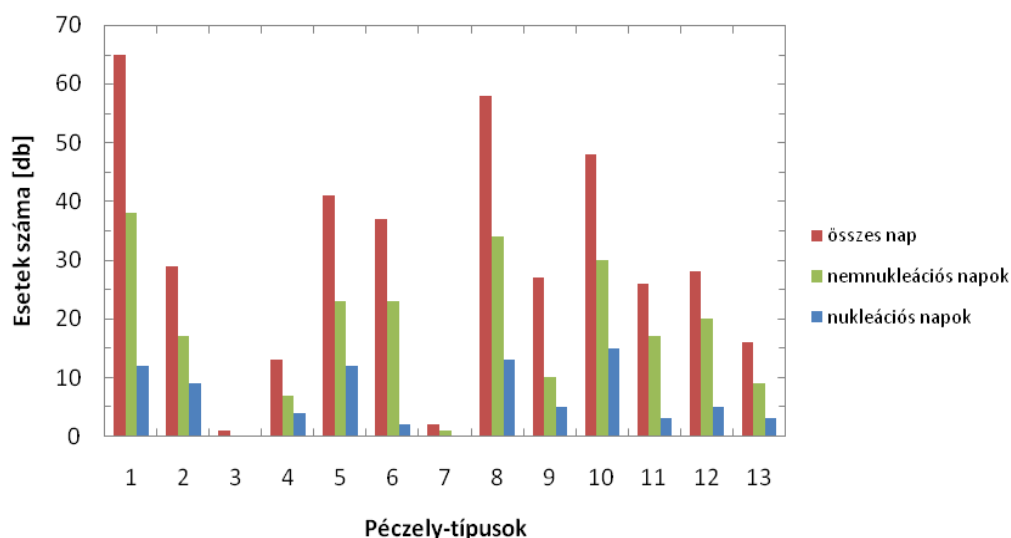
5. ábra: Az egyes fronttípusok eloszlása a nukleációs, a nemnukleációs és az összes napon.



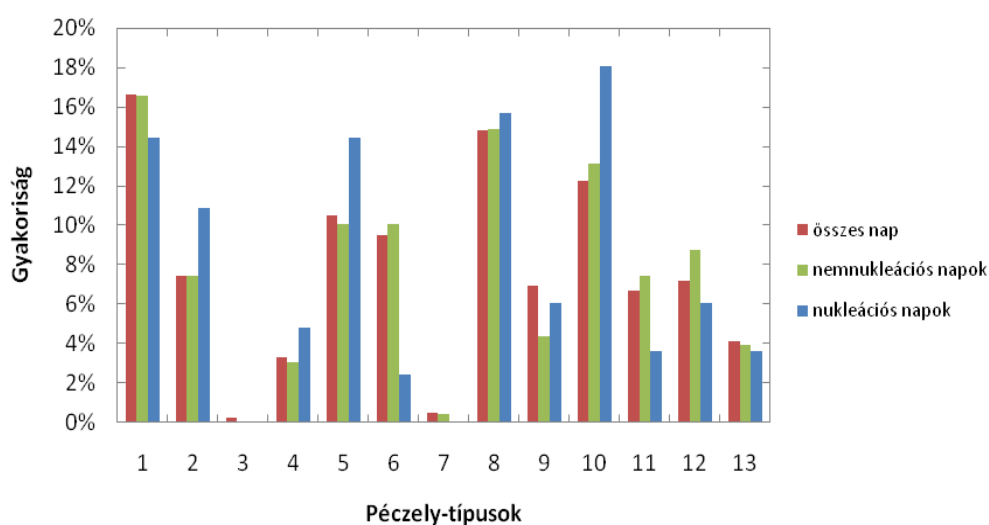
6. ábra: Az egyes fronttípusok gyakorisága a nukleációs, a nemnukleációs és az összes napra vonatkozóan.

Látható, hogy nukleációs napokon gyakrabban jellemző frontmentes helyzet, viszont a többi fronttípus közel azonos gyakorisággal fordul elő a nukleációs, illetve a nemnukleációs napokon. Tehát megállapítható, hogy a fronthelyzet alapján nehéz elkülöníteni a nukleációs, illetve a nem nukleációs napokat.

A Péczely-féle makrocirkulációs helyzetek eloszlása (7. ábra) mindkét esetben közel azonos. Az egyes típusok gyakoriságát (8. ábra) megvizsgálva azonban látható, hogy nukleációs napokon gyakrabban fordult elő a 2-es, 5-ös és 10-es típus, mint a nemnukleációs napokon.



7. ábra: A Péczely-féle makrocirkulációs időjárási típusok eloszlása a nukleációs, a nemnukleációs és az összes nap esetén.

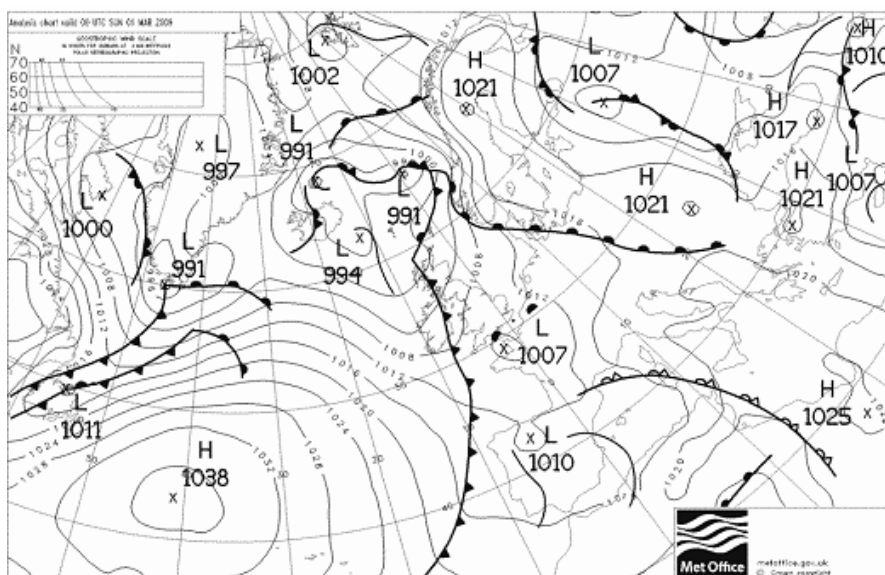


8. ábra: A Péczely-féle makrocirkulációs időjárási típusok gyakorisága a nukleációs, a nemnukleációs és az összes napra vonatkoztatva.

Ezek a típusok a következő makrocirkulációs helyzeteket jelentik: 2: anticiklon a Brit-szigetek fölött, 5: anticiklon a Kárpát-medencétől keletre, 10: anticiklon a Kárpát-medencétől északra. Tehát a nukleációs napokon jellemzőbb az anticiklonális helyzet, de az egyes Péczely-típusok alapján sem lehet egyértelműen elkülöníteni a nukleációs napokat.

3.3. A felépített adatbázis

Az általam összeállított adatbázis kialakításának első lépéseként a nyers, 10 perces felbontásban mért részecskeszám-koncentrációk és a meteorológiai elemek napi átlagértékeit számítottam ki, kivéve a szélirányt, amelynél a 12 UTC-s értéket vettem figyelembe. Ezt követően meghatároztam, hogy az egyes napokat melyik időjárási helyzet jellemzi a Péczely-féle makrocirkulációs helyzetek alapján. Vizsgáltam még az egyes napokra vonatkoztatott fronthelyzetet, amit a www.wetterzentrale.de adatbázisából letöltött 00 UTC-s szinoptikus térképek alapján (példa a 9. ábrán) állapítottam meg. A frontanalízis során elkülönítettem frontmentes, illetve hidegfronti, melegfronti és okklúziós fronti helyzeteket.



9. ábra: A 2009. március 1.-i 00 UTC-s fronthelyzetet ábrázoló szinoptikus térkép, amely a Kárpát-medencére vonatkozóan egy melegfronti helyzetet mutat. (Forrás: Wetterzentrale)

Ezután letöltöttem az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat adatbázisából a Kosztolányi Dezső téren mért SO₂, PM₁₀, NO_x és O₃ koncentrációkat. Továbbá

kiszámítottam a határreteg vastagságot, illetve a nukleáció szempontjából két meghatározó tényező a kondenzációs nyelő (CS, condensation sink) és a Proxy értékét is. A nukleáció elővegyületének, azaz a H_2SO_4 gőz koncentrációjának a mérése rendkívül nehéz. Helyette a keletkezési sebességével arányos, számolt mennyiséget, az ún. Proxy-t használjuk (PETÄJÄ, T. et al. 2009). A H_2SO_4 a SO_2 -ból a napsugárzás hatására végbemenő fotokémiai oxidáció során keletkezik. Azonban ezt egy versengő folyamat, a H_2SO_4 meglévő részecskékre történő kondenzációja (CS) is befolyásolja. A kondenzációs nyelő a levegőben jelenlevő nagyobb méretű aeroszol részecskéket jelenti, amelyek felületére a képződő H_2SO_4 gőz kondenzálódni képes, ezáltal csökkentik a nukleáció kialakulásának az esélyét. A H_2SO_4 gőz koncentrációjával arányos Proxy az alábbi összefüggés segítségével számolható:

$$Proxy \approx \frac{Rad * [SO_2]}{CS}, \quad (3)$$

ahol *Rad*: napsugárzás értéke, $[SO_2]$: kén-dioxid koncentráció, CS: kondenzációs nyelő.

Az általam összeállított adatbázis összesen 392 sorból és 59 oszlopból áll. Az adathalmaz három nagy egységre van lebontva, ezekben az összes napra, a nukleációs napokra és a nemnukleációs napokra vonatkozó adatok szerepelnek.

4. táblázat: Néhány vizsgált meteorológiai és légszennyező paraméter, illetve az összes (N) és az ultrafinom (UF) részecskék számkoncentrációjának tartománya és átlagértékei a mérési periódus egészére vonatkoztatva. A meteorológiai mennyiségek rendre: léghőmérséklet (T), relatív páratartalom (RH), szélsősebesség (WS), napsugárzás (Rad), csapadék (Pr), légnyomás (P), és keveredési rétegvastagság (PBL).

	T	RH	WS	Rad	Pr	P	PBL	SO ₂	PM ₁₀	NO _x	O ₃	N	UF
	[°C]	[%]	[m/s]	[W/m ²]	[mm]	[hPa]	[m]	[µg/m ³]	[µg/m ³]	[µg/m ³]	[µg/m ³]	[1/cm ³]	[1/cm ³]
minimum (1.)	-7	29	1	5	0	975	111	3,4	7,9	26,1	2,9	4 094	2 912
minimum (2.)	-6	32	1	5	0	976	121	3,4	8,0	28,2	3,4	4 153	3 148
medián	13	63	3	114	0	1002	1106	6,7	25,5	80,4	32,3	12 795	10 173
maximum (2.)	28	95	9	343	24	1023	3011	23,5	101,7	322,9	84,4	29 446	19 456
maximum (1.)	29	96	10	347	30	1026	3061	29,5	147,6	325,7	88,8	30 472	21 797
átlag	12	64	3	134	1	1001	1211	7,4	30,3	92,5	34,1	12 901	10 217
szórás	9	15	1	97	4	8	701	3,2	17,1	49,4	21,0	4 447	3 444

minimum (1.): Az adatsor 1. legkisebb értéke.

minimum (2.): Az adatsor 2. legkisebb értéke.

maximum (1.): Az adatsor 1. legnagyobb értéke.

maximum (2.): Az adatsor 2. legnagyobb értéke.

Az adatsorok eloszlása alapján (4. táblázat) elmondható, hogy a meteorológiai mennyiségek az éves menetnek megfelelően alakultak, a nyomanyagok maximális koncentrációja pedig minden szennyező esetén meghaladta az egészségügyi határértéket. Az aeroszol részecskék számkoncentrációja is igen magas volt a mérési periódus alatt.

5. táblázat: A nukleációs napokhoz tartozó adatsorok tartománya és átlagértékei, a nukleáció szempontjából meghatározó mennyiségekre vonatkozóan.

	T	RH	Rad	PBL	SO ₂	N	UF	CS	Proxy
	[°C]	[%]	[W/m ²]	[m]	[µg/m ³]	[1/cm ³]	[1/cm ³]	[1/s]	
minimum (1.)	0	29	28	350	3,6	4 094	2 912	0,00	0
minimum (2.)	0	32	32	381	3,9	4 805	4 133	0,00	0
medián	18	50	215	1661	6,7	13 537	11 391	0,01	89 241
maximum (1.)	25	77	343	2861	12,0	22 955	18 509	0,03	321 638
maximum (2.)	25	78	347	3061	13,1	22 962	19 002	0,03	341 690
átlag	16	52	198	1620	6,9	13 285	11 103	0,01	93 318
szórás	7	11	77	597	1,7	4 483	3 632	0,01	79 485

6. táblázat: A nemnukleációs napokhoz tartozó adatsorok tartománya és átlagértékei, a nukleáció szempontjából meghatározó mennyiségekre vonatkozóan.

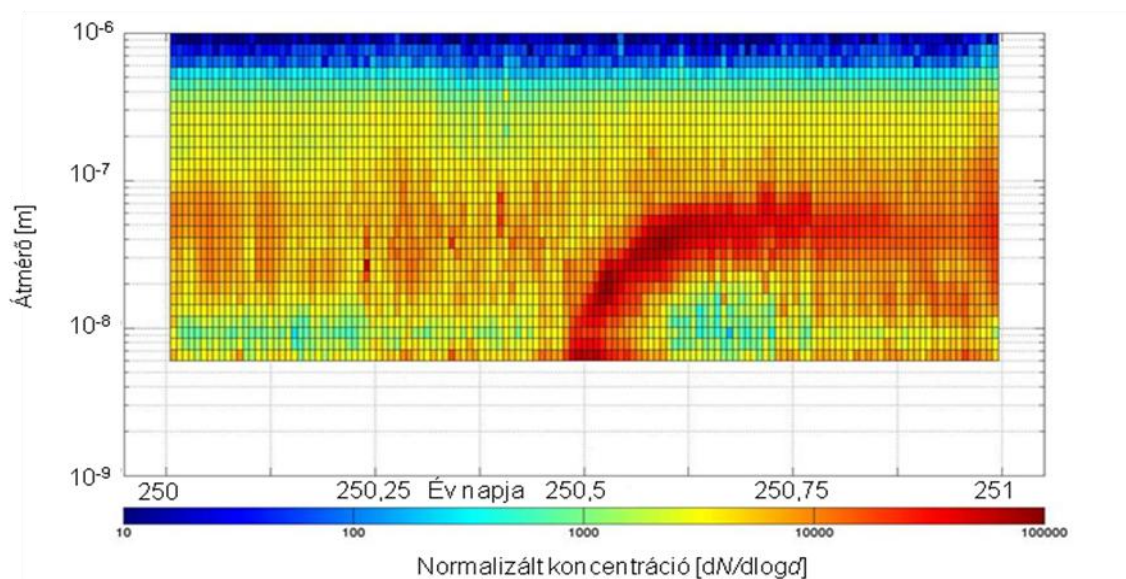
	T	RH	Rad	PBL	SO ₂	N	UF	CS	Proxy
	[°C]	[%]	[W/m ²]	[m]	[µg/m ³]	[1/cm ³]	[1/cm ³]	[1/s]	
minimum (1.)	-7	34	5	111	3,4	4 153	3 453	0,00	0
minimum (2.)	-6	38	9	121	3,5	4 233	3 519	0,00	0
medián	9	69	97	936	6,9	13 027	10 188	0,02	34 867
maximum (1.)	28	91	322	2941	23,5	29 446	19 456	0,05	271 706
maximum (2.)	29	92	330	3011	29,5	30 472	21 797	0,07	291 903
átlag	11	67	120	1127	8,0	13 230	10 324	0,02	50 766
szórás	10	14	94	708	3,8	4 404	3 311	0,01	53 273

A nukleációs és a nemnukleációs napok adatsorait összehasonlítva (5. és 6. táblázat) elmondható, hogy a nukleációs napokon a napsugárzás, a keveredési rétegvastagság, a részecskeszám koncentráció, és a proxy értéke nagyobb, míg a páratartalom és a kondenzációs nyelő értéke viszont kisebb volt.

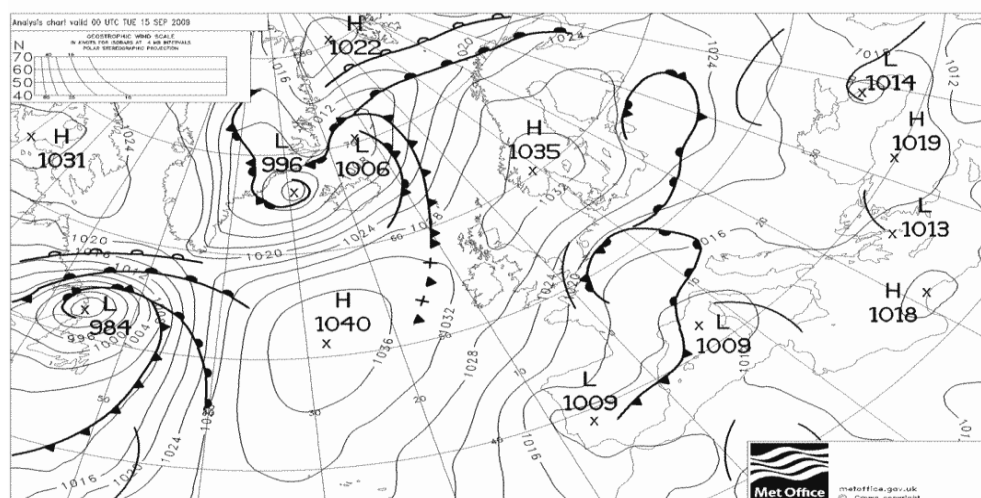
3.4. Néhány tipikus eset

A nukleációs napok három vizsgált esetét (van, nincs, nem eldönthető) egy-egy jellemző példa segítségével szemléltetem. Az egyes eseteknél bemutatom az adott napra

vonatkozó kontúrgörbét, a meghatározott meteorológiai és légszennyezettségi paraméterek értékeit, illetve a vizsgált nap meteorológiai helyzetét ábrázoló szinoptikus térképet. Az ábrák után részletesen elemzem az egyes eseteket.



10. ábra: A részecskeszám méreteloszlás időváltozása egy nukleációs napon, 2009. 09. 15-én, kedden.

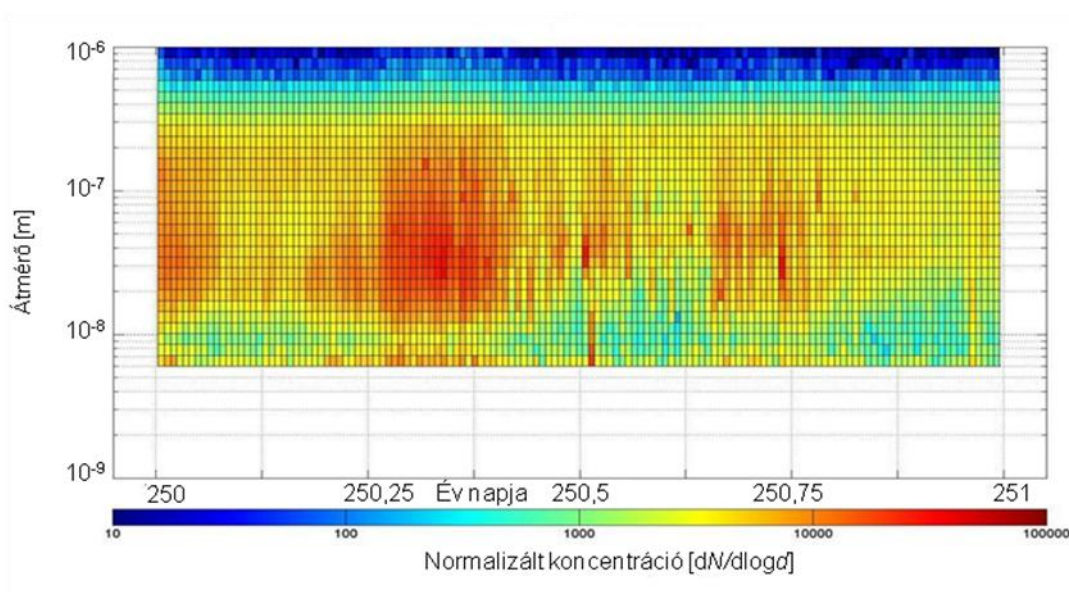


11. ábra: 2009. 09. 15. 00 UTC-s időjárási helyzet. Nincs légköri front a Kárpát-medence felett.
(Forrás: Wetterzentrale).

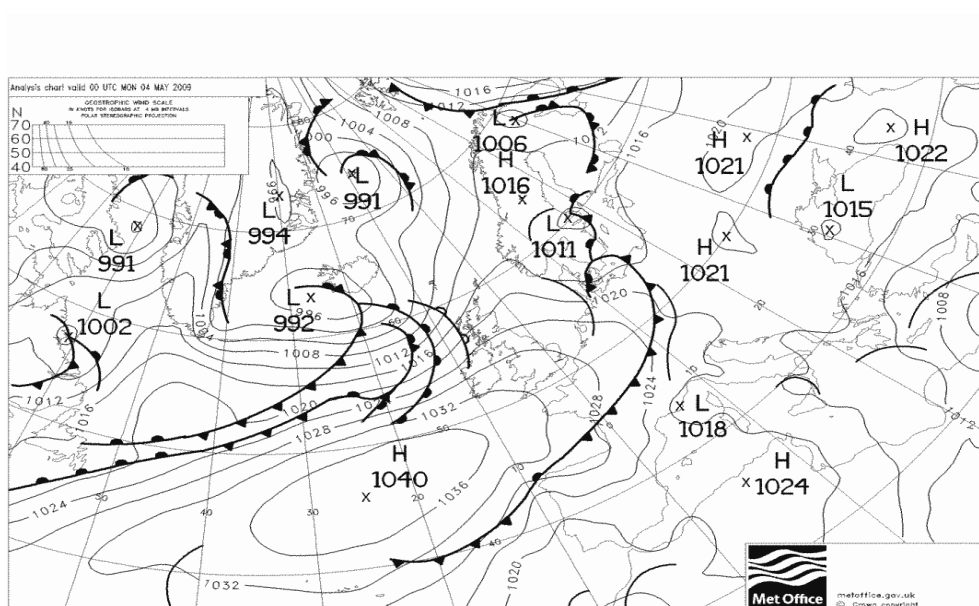
7. táblázat: Meteorológiai mennyiségek és légköri koncentrációk napi átlagértékei 2009. 09. 15-én, kedden.

T [°C]	RH [%]	WS [m/s]	WD (12UTC)	Pr [mm]	Rad [W/m ²]	PBL [m]	N (1/cm ³)	UF (1/cm ³)	P [hPa]	SO ₂ (µg/m ³)	PM ₁₀ (µg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
22	54	3	110	0,0	179	1398	17488	15272	1003	8,14	26,70	91,71	36,36

A 10. ábrán egy erőteljes új aeroszol részecske növekedés látható, és jól kirajzolódik a banángörbe is, ezért ez egy nyilvánvalóan nukleációs nap. A vizsgált napon fronthatás nem volt (ld. 11. ábra), Péczely-féle besorolása alapján, pedig a Brit-szigetek felett elterülő anticiklon határozta meg a Kárpát-medence időjárását. Az adott napra vonatkozó egyéb paraméterek átlagértékei a 7. táblázatban láthatók. A meteorológiai paraméterek alapján elmondható, hogy ez egy tipikus kora őszi nap volt. A légköri aeroszol részecskék száma viszont igen jelentős volt. A határréteg az ilyenkor szokásos vastagságot vett fel (~1400 m).



12. ábra: A részecskeszám méreteloszlás időváltozása egy nemnukleációs napon, 2009. 05. 04-én, hétfőn

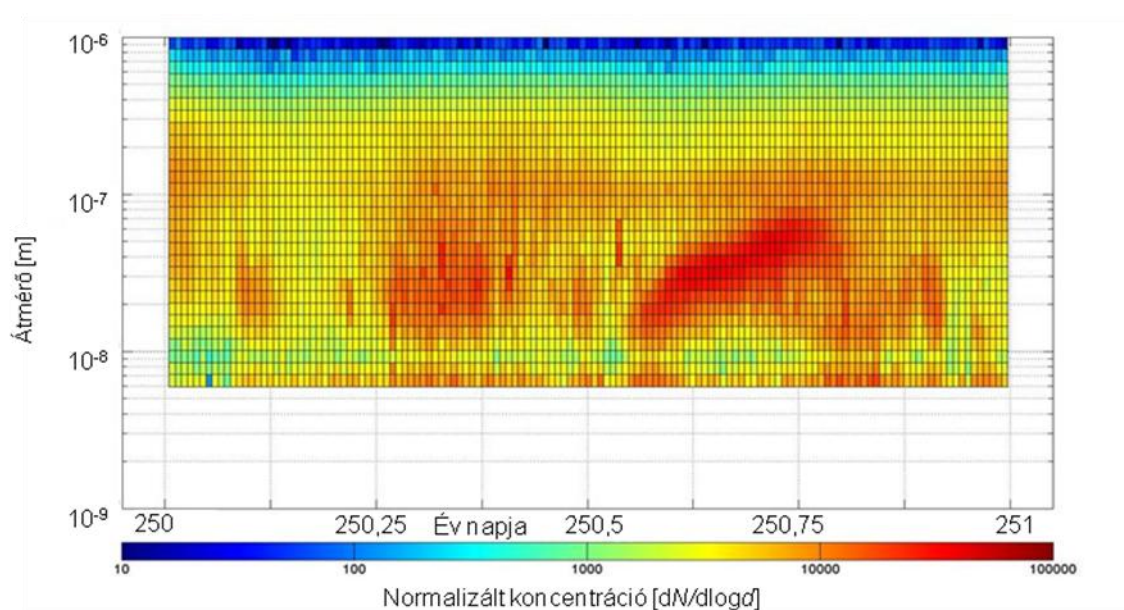


13. ábra: 2009. 05. 04-ei 00 UTC-s szinoptikus térkép, amelyen egy frontmentes helyzet látható a Kárpát-medencére vonatkozóan. (Forrás: Wetterzentrale)

8. táblázat: Meteorológiai mennyiségek és légköri koncentrációk átlagértékei 2009. 05. 04-én, hétfőn

T [°C]	RH [%]	WS [m/s]	WD (12UTC)	Pr [mm]	Rad [W/m ²]	PBL [m]	N (1/cm ³)	UF (1/cm ³)	P [hPa]	SO ₂ (μg/m ³)	PM ₁₀ (μg/m ³)	NO _x (μg/m ³)	O ₃ (μg/m ³)
17	45	3	324	0,0	204	3011	10723	8176	1001	n.a.	27,53	89,20	55,69

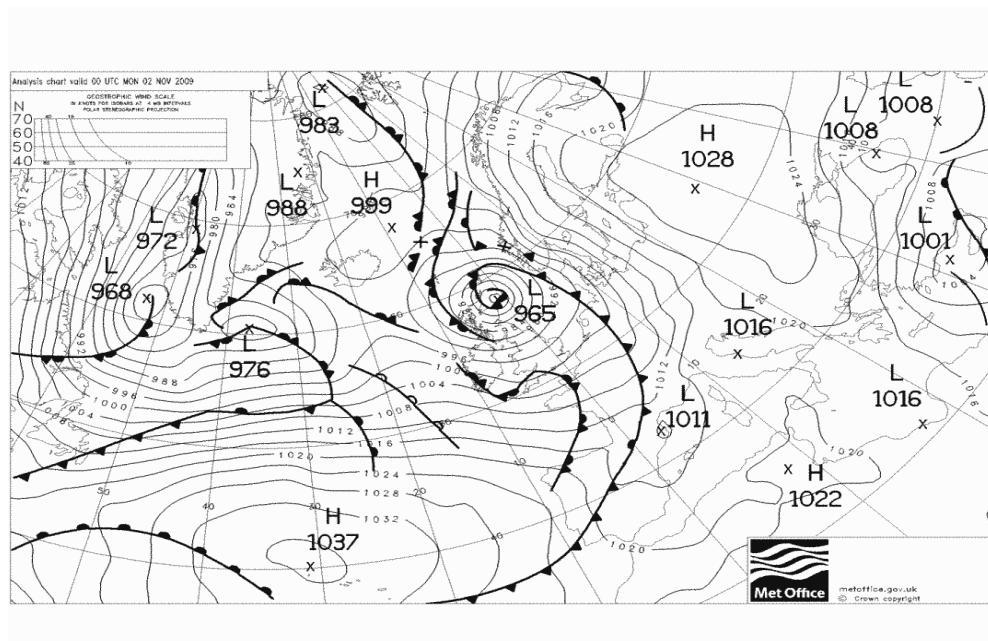
A 12. ábrán bemutatott helyzet egy nemnukleációs napot jelez, ugyanis kizárható az új aeroszol részecskék növekedése, csak a reggeli, illetve a délutáni csúcsforgalom okozta részecskeszám növekedés (két piros sziget) látszik. Ezen a napon fronthatás nem volt (ld. 13. ábra), Péczely-féle besorolás alapján pedig a Kárpát-medencétől nyugatra egy anticiklon helyezkedett el. Az egyéb jellemző paraméterek átlagértékei a 8. táblázatban láthatók. A meteorológiai paraméterek egy tipikus tavaszi napnak megfelelően alakultak. A levegőben közepes mennyiségben voltak jelen aeroszol részecskék. A keveredési rétegről elmondható, hogy meglehetősen vastag (3 km feletti) volt.



14. ábra: A részecskeszám méreteloszlás időváltozása egy nukleáció szempontjából nem kategorizálható napon, 2009. 11. 02-án, hétfőn.

9. táblázat: Meteorológiai mennyiségek és légköri koncentrációk átlagértékei 2009. 11. 02-án, hétfőn.

T [°C]	RH [%]	WS [m/s]	WD (12UTC)	Pr [mm]	Rad [W/m ²]	PBL [m]	N (1/cm ³)	UF (1/cm ³)	P [hPa]	SO ₂ (μg/m ³)	PM ₁₀ (μg/m ³)	NO _x (μg/m ³)	O ₃ (μg/m ³)
4	66	3	115	0,0	96	836	14925	11964	999	8,93	33,61	90,96	18,78



15. ábra: 2009. 11. 02-ai 00 UTC-s szinoptikus térkép, amelyen ismét egy frontmentes helyzet látható a Kárpát-medencére. (Forrás: Wetterzentrale)

A 14. ábrán bemutatott helyzetet a nem eldönthető kategóriába soroltuk a nukleáció szempontjából, mivel ezzel kisebb hibát vétünk, mint ha kategorizálnánk, ugyanis viszonylag későn kezd el kialakulni a banángörbe, és nem állapítható meg egyértelműen, hogy az első két csatornában mért értékek valódiak, vagy csak valamilyen zajforrás következményei. A Péczely-féle besorolás alapján a Kárpát-medencétől keletre egy anticiklon helyezkedett el, fronthatás ismét nem volt (ld. 15. ábra). Az egyéb meghatározott napi paraméterek átlagértékei a 7. táblázatban láthatók. A meteorológiai értékek egy tipikus novemberi őszi napnak megfelelően alakultak. A levegőben közepes mennyiségben voltak jelen aeroszol részecskék. A keveredési rétegvastagság (836 m) az átlagosnál kisebb volt.

A három nap paramétereit vizsgálva elmondható, hogy a hőmérséklet mindhárom esetben megfelelt az adott időszakban szokásos átlagos hőmérsékletnek. A páratartalom minden esetben közepes értéket vett fel. A napsugárzás mennyisége a nem kategorizálható napon volt a legkisebb, míg a másik két esetben közel azonos volt. A részecskeszám koncentráció természetesen a nemnukleációs napon volt a legkisebb, míg a nukleációs napon a legnagyobb. A kulcsfontosságú légszennyezők közül egyedül az O_3 esetében voltak jelentős koncentrációbeli különbségek, mégpedig a nemnukleációs napon volt tapasztalható a legnagyobb koncentráció. A határreteg vastagságában az évszakos változékonyság látható.

3.5. Összehasonlítás (nukleációs és nemnukleációs napok)

A nukleációs és a nemnukleációs napok különbségeit a meteorológiai és a levegőkémiai mennyiségeket tartalmazó korrelációs mátrixok összehasonlításával elemezzük. Ez az első lépése a statisztikai vizsgálatoknak.

10. táblázat: A nukleáció során meghatározó paraméterek párkorrelációs mátrixa.

	N	Proxy	SO ₂	CS	Rad	RH	T	PBL
N	1,00	-0,35**	0,47	0,83**	-0,09*	0,09*	-0,04	-0,09*
	Proxy	1,00	-0,31**	-0,46**	0,67**	-0,50**	0,47**	0,46**
		SO ₂	1,00	0,58**	-0,32**	0,16**	-0,44**	-0,27**
			CS	1,00	-0,29**	0,30**	-0,24**	-0,28**
				Rad	1,00	-0,83**	0,78**	0,79**
					RH	1,00	-0,59**	-0,77**
						T	1,00	0,66**
							PBL	1,00

Esetszám: 296–386

** : A korreláció szignifikáns a 0,01-os szignifikancia szinten.

* : A korreláció szignifikáns a 0,05-os szignifikancia szinten.

A korrelációs együtthatók értékeiből (10. táblázat) leolvasható, hogy minél nagyobb a részecskeszám-koncentráció, annál jelentősebb a kondenzációs nyelő szerepe. Az is jól látszik, hogy minél több a kondenzációs nyelő, annál kisebb a Proxy értéke. Továbbá észrevehető, hogy nagyobb besugárzás esetén, a Proxy, és a hőmérséklet értéke nagyobb (ami természetes, hiszen a Proxy értéke a sugárzással arányos), viszont a páratartalom kisebb. Nagyobb páratartalom mellett pedig kisebb a Proxy értéke. Természetesen a hőmérséklet, a besugárzás, a páratartalom és a keveredési réteg vastagságának értékei korrelálnak egymással, mivel ezek összefüggő mennyiségek. Azonban az előzetes várakozások ellenére a SO₂ koncentráció és a Proxy értéke között nem mutatható ki kapcsolat, ami feltételezhetően annak köszönhető, hogy Budapesten a SO₂ koncentrációja az év során viszonylag szűk határok között változik. Összefoglalva tehát elmondható, hogy a nukleáció egyik fontos elővegyületét, a H₂SO₄ gőz koncentrációját leíró Proxy képződésének kedvező feltételei: a magas besugárzás, ebből következően pedig a nagyobb hőmérséklet és a kisebb páratartalom, illetve a vastagabb határréteg. Viszont, ha a levegőben nagy az aeroszol részecskeszám-koncentráció, akkor több kondenzációs nyelő van jelen, amelyek elvonják a jelen lévő H₂SO₄ gőzt, ezért nem játszódik le a nukleáció folyamata. A részecskeszám koncentrációra a lokális meteorológiai változók nincsenek jelentős hatással.

A kondenzációs nyelő hatása pedig akkor nagyobb, ha nagyobb a részecskeszám-koncentráció, ugyanis ilyenkor nagyobb valószínűséggel vannak jelen, olyan elegendően nagy méretű részecskék, amelyek kondenzációs nyelőként szolgálhatnak a nukleáció elővegyületei számára.

11. táblázat: A nukleációs napokra vonatkozó adatsorok párkorrelációs mátrixa

	N	Proxy	SO ₂	CS	Rad	RH	T	PBL
N	1,00	-0,38**	0,46**	0,79**	0,03	0,03	0,29**	0,10
	Proxy	1,00	-0,16	-0,33**	0,40**	-0,11	0,25*	0,23*
		SO ₂	1,00	0,46**	-0,17	-0,03	-0,02	0,19
			CS	1,00	0,00	0,06	0,24*	0,14
				Rad	1,00	-0,72**	0,70**	0,64**
					RH	1,00	-0,36**	-0,65**
						T	1,00	0,46**
							PBL	1,00

Esetszám: 65–83

***: A korreláció szignifikáns a 0,01-os szignifikancia szinten.

*: A korreláció szignifikáns a 0,05-os szignifikancia szinten.

12. táblázat: A nemnukleációs napokra vonatkozó adatsorok párkorrelációs mátrixa

	N	Proxy	SO ₂	CS	Rad	RH	T	PBL
N	1,00	-0,36**	0,52**	0,79**	-0,18**	0,16*	-0,19**	-0,20**
	Proxy	1,00	-0,34**	-0,42**	0,76**	-0,59**	0,57**	0,52**
		SO ₂	1,00	0,55**	-0,43**	0,27**	-0,53**	-0,41**
			CS	1,00	-0,29**	0,27**	-0,32**	-0,32**
				Rad	1,00	-0,79**	0,81**	0,77**
					RH	1,00	-0,63**	-0,72**
						T	1,00	0,69**
							PBL	1,00

Esetszám: 192–229

***: A korreláció szignifikáns a 0,01-os szignifikancia szinten.

*: A korreláció szignifikáns a 0,05-os szignifikancia szinten.

A korrelációanalízist külön-külön csak a nukleációs, illetve csak a nem nukleációs napokra is elvégeztem (11. és 12. táblázat). Mind a nukleációs, mind a nemnukleációs napokra vonatkozó eredmények alapján elmondható, hogy a nukleáció folyamata szempontjából meghatározó Proxy értéke mindkét esetben a napsugárzás mennyiségétől függ a leginkább. Érdekes módon a Proxy és a napsugárzás értéke közötti lineáris kapcsolat a nemnukleációs napok esetében erősebbnek bizonyult. A nukleációs napok esetén a proxy értéke a napsugárzáson kívül két adatsorral mutat erősebb kapcsolatot (N, CS), míg a nemnukleációs napok esetén mindegyik adatsor hatása egyformán szignifikáns, tehát egyik sem meghatározó jelentőségű.

4. Összefoglalás

A légköri nukleáció jelentősen megnöveli az aeroszol részecskék szám-koncentrációját. A folyamat során keletkező új aeroszol részecskék klimatológiai jelentőségük mellett egészségügyi kockázatot is jelenthetnek. Szükséges tehát a nukleáció előfordulása és a levegőkörnyezet közötti kapcsolatok vizsgálata.

A dolgozatom tárgya a nukleációs helyzetek, illetve a meteorológiai és légszennyezettségi paraméterek közötti kapcsolatrendszer vizsgálata volt. Munkám első lépéseként kialakítottam egy egységes adatbázist a 2008. 11. 04. és 2009. 11. 30. közötti időszakra vonatkozóan. Az adatbázis tartalmazza

- az ELTE Meteorológiai Tanszék lágymányosi városklíma állomásának az adatait,
- a DMPS által mért részecskekoncentrációkat (N, UF),
- a kulcsfontosságú légszennyezők (SO₂, PM₁₀, NO_x, O₃) koncentrációját, valamint
- általam meghatározott paramétereket (PBL, fronthelyzet, kondenzációs nyelő, Proxy), továbbá megadja
- a napi időjárási helyzet Péczy-féle kódját.

Az adatbázist először különböző leíró statisztikai módszerekkel (extrém értékek, medián, átlag, szórás) jellemeztem. Végül az SPSS program által végrehajtott korrelációanalízis segítségével vizsgáltam a változók közötti összefüggéseket. A korrelációanalízis eredményei alapján összességében megállapítható, hogy a nukleáció folyamatának fő meghatározója a napsugárzás mennyisége, ebből következően pedig a magasabb hőmérséklet, az alacsonyabb páratartalom, illetve a nagyobb keveredési rétegvastagság. A SO₂ koncentráció korlátozott mértékben befolyásolja a jelenséget, ami azzal magyarázható, hogy Budapesten a SO₂ koncentrációja többé-kevésbé állandó. A vizsgálatokat napi átlagos értékekkel végeztem, de ez annyira elsimította az egyes adatsorok értékeit, hogy nem mutattak jelentős kapcsolatot a nukleációval, ezért célszerűnek látszik az időfelbontás növelése a jövőbeni vizsgálatok során. (Az adatbázisban 10 perces, illetve órás meteorológiai adatok állnak rendelkezésre.)

További tervek között szerepel a paraméterek közötti részletesebb kapcsolatrendszer megállapítása, azaz az adatoknak egy többváltozós statisztikai módszer, a logisztikus regresszió analízis általi vizsgálata. Ezáltal jobban leírható lenne a nukleáció kialakulását befolyásoló változók köre. Az első számításokat már elvégeztük.

A későbbiekben arra a kérdésre is választ keresünk, hogy milyen módszerrel és milyen pontossággal jelezhető előre a nukleáció folyamata.

5. Irodalomjegyzék

- BENSON D. R.–YU J. H.–MARKOVICH A.–LEE S.-H. 2011: Ternary homogeneous nucleation of H_2SO_4 , NH_3 , and H_2O under conditions relevant to the lower troposphere. – *Atmospheric Chemistry and Physics*. 11. pp. 4755–4766.
- BORSÓS T.–SALMA I. 2009: Nanorészecskék a levegőben. Áldás vagy átok? – *Élet és Tudomány*. 51–52. pp. 1654–1656.
- BORSÓS T.–SALMA I. 2010: Budapesti banángörbe. – *Élet és Tudomány*. 21. pp. 643.
- BREUER H.–ÁCS F.–LAZA B.–MATYASOVSKY I.–HORVÁTH Á.–WEIDINGER T.–RAJKAI K. 2012: A talaj hidraulikus tulajdonságainak és a planetáris határreteg magasságának kapcsolata. – *Agrokémia és talajtan*. 9.(1). pp. 9–28.
- CHIN M.–KAHN A. R.–REMER A. L.–YU H.–RIND D.–FEINGOLD G.–QUINN K. P.–SCHWARTZ E. S.–STREETS G. D.–DECOLA P.–HALTHORE R. 2009: Atmospheric aerosol properties and climate impact. – *U.S. Climate Change Science Program*, Washington, DC, USA. 115 p.
- HUZSVAI L. 2011: Biometriai módszerek az SPSS-ben. SPSS alkalmazások. – Debreceni Egyetem, Mezőgazdaságtudományi kar (kézirat) 277 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report. *Cambridge University Press*, New York, 2007.
- KÁROSSY CS.–PUSKÁS J.–NOWINSZKY L.–BARCZIKAI G. 2009: Feromon csapdákkal gyűjtött gyümölcsmolyok száma a Péczely-féle makroszinoptikus időjárási helyzetek függvényében. – *Léggör*. 2. pp. 20–22.
- MERIKANTO J.–SPRACKLEN D. V.–MANN G. W.–PICKERING S. J.–CARSLAW K. S. 2009: Impact of nucleation on global CCN. – *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9. pp. 8601–8616.
- NÉMETH Z. 2012: Léggöri nukleáció városi környezetekben. – MSc szakdolgozat, ELTE TTK, Budapest. 40 p.
- OBERDÖRSTER G.–OBERDÖRSTER E.–OBERDÖRSTER J. 2005: Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. – *Environ. Health Perspect.* 113. pp. 823–839.
- Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM):
URL: <http://www.kvvm.hu/olm/index.php>

Utolsó letöltés: 2012. 06. 04.

- PAKKANEN T.–KERMINEN V.–KORHONEN C.–HILLAMO R.–AARINO P.–KOSKENTALO T.–MAENHAUT W. 2001: Urban and Rural Ultrafine (PM_{0.1}) Particles in the Helsinki Area. – *Atmospheric Environment*. 35. pp. 4593–4607.
- PETÄJÄ T.–MAULDIN III. R. L.–KOSCIUCH E.–MCGRATH J.–NIEMINEN T.–PAASONEN P.–BOY M.–ADAMOV A.–KOTIAHO T.–KULMALA M. 2009: Sulfuric acid and OH concentrations in a boreal forest site. – *Atmospheric Chemistry and Physics*. 9. pp. 7435–7448.
- POLITIS M.–PILINIS C.–LEKKAS T. D. 2008: Ultrafine particles (UFP) and health effects. Dangerous. Like no other PM? Review and analysis. – *Global NEST Journal*. 3. pp. 439–452.
- PÖSCHL U. 2005: Atmospheric Aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. – *Angewandte Chemie*. 46. pp. 7485–7647.
- RAMANATHAN V.–CRUTZEN P. J.–KIEHL J. T.–ROSENFELD D. 2001: Aerosols, climate, the hydrological cycle. – *Science*. 294. pp. 2119–2124.
- SALMA I.–BORSÓS T.–WEIDINGER T.–AALTO P.–HUSSEIN T.–DAL MASO M.–KULMALA M. 2011: Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment. – *Atmospheric Chemistry and Physics*. 11. pp. 1339–1353.
- SALMA I.–BARKÁCS K.–BARTHOLY J.–KISS KEVE T.–PONGRÁCZ R.–RESKÓNE NAGY M.–SOHÁR PÁLNÉ–TÓTH B. 2012: Környezetkémia. – Környezettudományi alapok tankönyvsorozat, *ELTE TTK – Typotex Elektronikus Kiadó*, Budapest. 341 p.

University of Wyoming:

URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Utolsó letöltés: 2012. 08. 04.

- WENHARDT T. 2008: A planetáris határréteg tulajdonságainak vizsgálata magyarországi repülőgépes mérések alapján. – *Tudományos Diákköri Dolgozat*, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest.

Wetterzentrale:

URL: <http://www.wetterzentrale.de>

Utolsó letöltés: 2012. 08. 12.