

— Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat —

Várszegi Katalin

Környezettan alapszakos hallgató

A légköri nukleáció szélsőséges levegőkörnyezeti körülmények között

Témavezető: Dr. Salma Imre, egyetemi tanár

ELTE Kémiai Intézet



Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar,
Kémiai Intézet, Analitikai Kémiai Tanszék

Budapest, 2014.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzések	3
2. Az ultrafinom aeroszol és keletkezése	6
2.1 Emissziós források	6
2.2 Léggöri nukleáció.....	6
2.3 Részecskeszám méreteloszlás	8
3. Az adatok forrása és feldolgozása.....	10
3.1 A DMPS működési elve.....	10
3.2 Légszennyező gázok	13
3.3 Meteorológiai változók	13
3.4 Adatfeldolgozás.....	16
4. Eredmények és megvitatásuk.....	18
4.1 Meteorológiai környezet	18
4.2 Kontúrgörbék	21
4.3 Átlagos és extrém értékek	24
4.4 Napi időváltozások.....	26
4.5 Visszaszámolt trajektóriák	36
5. Összefoglalás.....	38
6. Irodalomjegyzék.....	40
7. Köszönetnyilvánítás	44

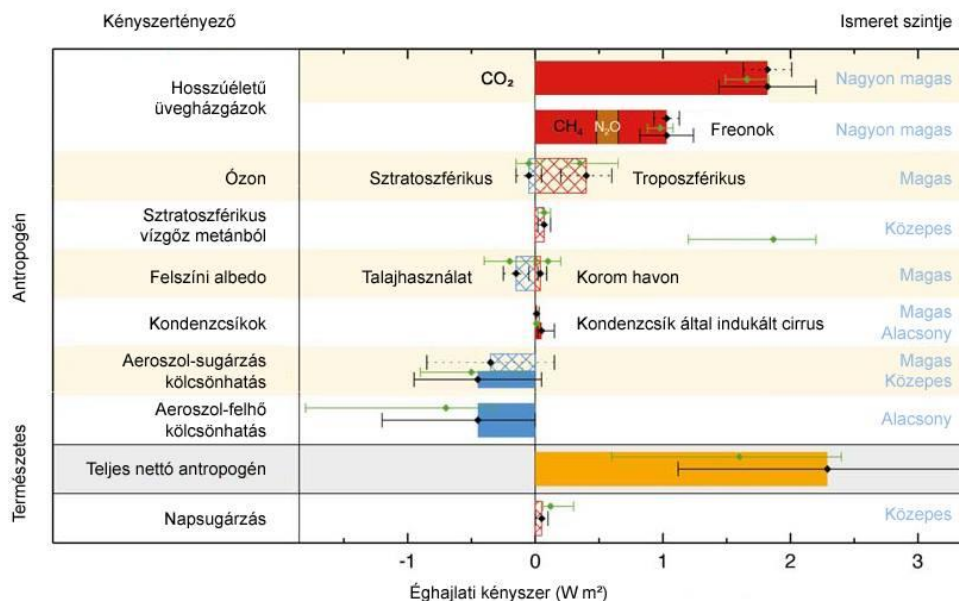
1. Bevezetés és célkitűzések

Az aeroszol levegőből és a benne elosztatott szilárd és folyékony részecskékből áll. A részecskék átmérője néhány nanométertől 100 μm -ig terjed. A részecskék csoportokra oszthatók: durva, finom és ultrafinom részecskékre, melyek medián átmérője rendre $d > 2,5 \mu\text{m}$; $d < 2,5 \mu\text{m}$; $d < 100 \text{ nm}$ (Raes et al., 2000). Az ultrafinom (UF) aeroszról kevesebb ismerettel rendelkezünk, mint a durva és a finom részecskékről. Az ultrafinom aeroszol részecskék emittálódhatnak magashőmérsékletű forrásokból, vagy képződhetnek a levegőben is (Holmes, 2007). Az emberi tevékenység során keletkezett ultrafinom aeroszol részecskék fő forrásai a közúti közlekedés, a lakossági fűtés, tüzelés és hulladékégetés. Természetes képződési folyamatuk a légköri nukleáció (Kulmala et al., 2004). Az ultrafinom aeroszornak káros egészségügyi hatásai vannak (Oberdörster et al., 2005), valamint megnövekedve felhőkondenzációs magvakká (CCN; cloud condensation nuclei) befolyásolják az éghajlatot és a víz körforgását is (Ramanathan et al., 2001; IPCC, 2013).

A levegőben lévő aeroszol részecskék a bőrön vagy az emésztőrendszeren keresztül, illetve légzéssel kerülhetnek a szervezetünkbe. Közülük az utóbbi a legjelentősebb. Depozíciónak nevezzük a tüdőbe kerülő részecskék kiülepedését, mely függ a tüdő geometriájától, a légzési paraméterektől (fizikai igénybevétel, egészségügyi állapot, életkor, nem), illetve az aeroszol részecskék méreteloszlásától és más tulajdonságaitól (Salma et al., 2002a,b; Farkas és Balásházy, 2007). A részecskedepozíciónak több módja van. A nagyobb részecskék esetében a gravitációs ülepedés és a tehetetlenségi impakció, a kisméretű részecskéknél a turbulens diffúzió a meghatározó (Balásházy, 2010). A durva részecskék leginkább a felső légutakban és a tüdő első néhány elágazási egységében ülepednek ki, míg a kisebbek sorsa a tüdőben összetettebb (Oberdörster et al., 2005). A nanométer méretű, vízdoldhatatlan részecskék átjutnak az epithel sejtek falán, így bekerülnek a vérkeringésbe és a nyirokrendszerbe is. Ezáltal megváltoztathatják a vér tulajdonságait és funkcióit, illetve a légzőrendszerből eljuthatnak más, fontos szervekbe, például a májba, a csontvelőbe, a szívbe, a lépbe, és a központi idegrendszerbe is (Oberdörster et al., 2005). A fehérjékkel komplexeket képezhetnek, és ezúton befolyásolhatják azok tulajdonságait, vagy a vér alvadékonysága is megváltozhat (JRC_EASAC 64792). A kémiai összetételben megegyező, de kisebb méretű részecskék bizonyítottan többlet egészségügyi kockázatot jelentenek a nagyobb méretű részecskékhez

képest megnövekedett fajlagos felületük miatt, mert ez nagyobb biológiai aktivitást jelent (Oberdörster et al., 2005). Az aeroszol részecskék felületén kémiai reakciók játszódhatnak le és gyökök keletkezhetnek, valamint létrejöhetnek olyan reaktív oxigéntartalmú részecskék, melyek képesek megváltoztatni a szervezet redoxi folyamatait. Ezen folyamatok által az aeroszol részecskék oxidatív stresszhatást fejtenek ki (Schulz et al., 2005; Brown et al., 2000, 2001). Nem utolsó sorban a részecskék nagyobb koncentrációja esetén a falósejtek már nem tudják hatásosan eltávolítani a tüdőbe került testidegen anyagokat (Oberdörster et al., 2005).

A légköri aeroszol közvetve és közvetlenül is befolyásolja az éghajlatot. A közvetlen hatás a Napból érkező elektromágneses sugárzás szórását vagy elnyelését foglalja magába. Az aeroszol éghajlatot befolyásoló legfőbb tényezőjének azonban a felhőkondenzációs magvak által kifejtett közvetett hatását tekinthetjük (IPCC, 2007). A felfelé áramló levegő lehűl, és vízgőzzel túltelítetté válhat. Azonban a levegő szinte soha nem túltelített a vízgőz szempontjából (szabad, sík vízfelszínre vonatkoztatva), mert a kondenzáció, a kondenzációs magvak tulajdonságai miatt már 100%-os relatív páratartalom alatt megindul. A felhőcseppek kialakulásához tehát, energetikai okok miatt szükség van felhőkondenzációs magvakra, amikre a vízgőz kondenzálódik (Mészáros, 1997; Seinfeld és Pandis, 1998). A kondenzációs magvak főként 100–200 nm átmérőjű, vízdoldható aeroszol részecskék. Ezek nagy része a nukleációt követő növekedés során éri el ezt a méretet (Merikanto et al., 2009). Az éghajlatot befolyásoló tényezők közül a felhők jelentős hűtő hatással rendelkeznek azáltal, hogy a napfény kb. 22%-át visszaverik az űrbe (IPCC, 2007). Több ultrafinom aeroszol részecske átlagosan és globálisan is nagyobb mennyiségű felhőkondenzációs mag kialakulásához vezet, ami a lényegében állandó mennyiségű vízgőzzel kisebb méretű, de nagyobb számú felhőcseppet eredményez. Az így kialakuló felhőknek nagyobb lesz az összfelületük, ami által jobban visszaverik a napsugárzást (a felhők „fehérebbek”), valamint megnő a légköri tartózkodási idejük is. Ahhoz ugyanis, hogy a cseppek csapadék formájában távozzanak a levegőből, elegendően nagyra kell nőniük (Ramanathan et al., 2001). A nagy CCN koncentráció azonban ellene hat a méretnek, ami kevesebb csapadékot és/vagy egyenetlenebb eloszlást eredményezhet. Az aeroszol részecskék összességében hűtő hatással rendelkeznek, amivel hozzájárulhatnak az élhető éghajlat kialakításához (Borsós és Salma, 2011). Az *1. ábra* az energiamérleg fő összetevőinek éghajlati kényszerét szemlélteti (IPCC, 2013.) Az ábra azt is mutatja, hogy a légköri aeroszol közvetett hatása a globális éghajlati modellek legnagyobb egyedi bizonytalanságát jelenti. A hatás ismeretszintje alacsony, bizonytalansága $-0,7$ – $-1,8 \text{ W m}^{-2}$ közötti (IPCC, 2013).



1. ábra. Az energiamérleg fő összetevőinek éghajlati kényszere 1750 és 2011 között (IPCC, 2013).

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi Campusában folyamatos mérés folyik a légköri nukleáció kutatása céljából. 2013. március 15-e körüli napokban extrém meteorológiai helyzet (hóvihár) alakult ki Magyarország nagy részén. Ebben a szélsőséges helyzetben a légköri viszonyok általában sem voltak kedvezőek az új részecske képződéshez, mégis légköri nukleációs eseményre utaló jeleket tapasztaltunk. Utólag választottam ki a vizsgálni kívánt időintervallumot, mely 2013. március 14-től 17-ig tart. A téma kiválasztásában közrejátszott ebben az időszakban történt utazásom alatt szerzett saját tapasztalatom is. Személyes feladatom a különös, szélsőséges levegőkörnyezeti viszonyok vizsgálata, az ezen feltételek mellett lejátszódó nukleáció tényének bizonyítása, és a lejátszódott folyamatok tisztázása. A dolgozat részét képezi az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kémiai Intézetében, Salma Imre vezetésével végzett aeroszol kutatásnak.

2. Az ultrafinom aeroszol és keletkezése

Az ultrafinom aeroszol a 100 nm-nél kisebb mobilitási átmérővel rendelkező részecskéket tartalmazza. Többféle módon keletkezhet. Közvetlen emisszióval magashőmérsékletű folyamatokból vagy légköri nukleációval. Városi környezetben mindkét keletkezési forma egyszerre vagy váltakozva előfordulhat.

2.1 Emissziós források

Az ultrafinom aeroszol egyik fő képződési módja a magashőmérsékletű emisszió. Tipikus forrás városokban a közúti közlekedés, valamint a fűtési, háztartási és ipari égetés. Az emissziós forrásból viszonylag nagyobb méretű részecskék keletkeznek, mert már a forrásban növekedésnek indulnak a füstgáz hűlése következtében (Salma et al., 2011). Az emissziós forrás minőségétől függően különböző mérettartományokba sorolhatók a részecskék. A közúti közlekedésből származó részecskék jellemzően 20–100 nm közötti méretűek. Ez benzinüzemű gépjárművek esetén 20–60 nm-nek, dízelolaj használata esetén 20–130 nm-nek adódik (Morawska et al., 1998,2008; Ristovski et al., 1998). Szén és fűtőolaj égetésével 35–100 nm, földgáz használatával 15–30 nm a fűtési égetési folyamatokból származó részecskék medián átmérője (Shi és Harrison, 1999; Park et al., 2008).

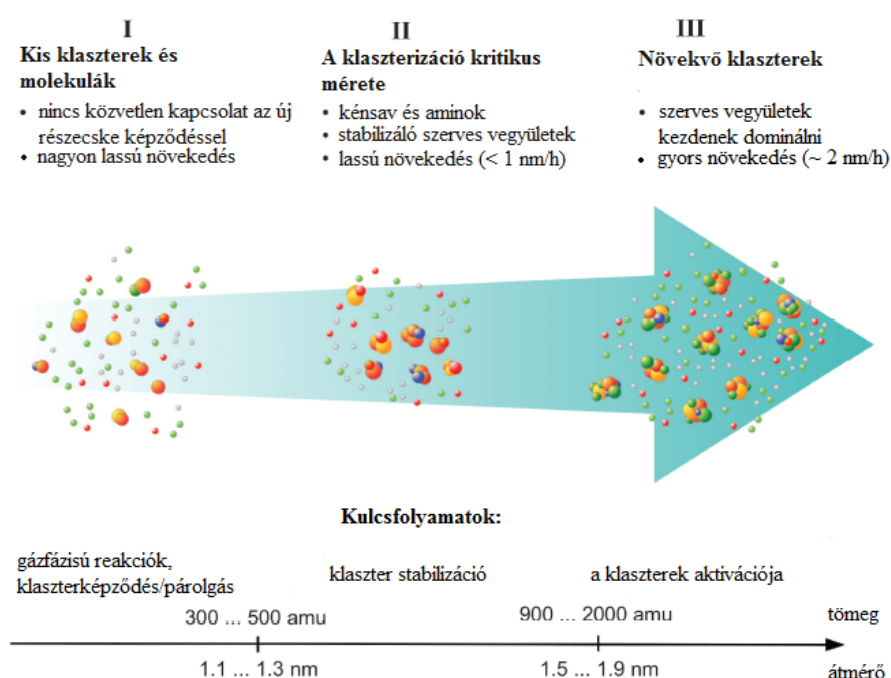
A közúti közlekedés napi váltakozása városokban tipikus időeloszlást mutat 7:30–9:30 közötti időszakban maximummal, valamint munkanapokon a délutáni órákban egy másodlagos növekedéssel (Salma et al., 2011). Ez a változás közvetlen összefüggésbe hozható a kibocsátott részecskék számával, az ultrafinom részecskék viszonylag kicsi ($\tau \leq 1-2$ óra) tartózkodási ideje miatt.

2.2 Légköri nukleáció

A légköri nukleáció egy olyan elsőrendű fázisátalakulás (gáz halmazállapotú részecskékből szilárd vagy folyékony halmazállapotú részecske keletkezik), amelyben a fotokémiai oxidálódott kén-dioxidból és az illékony szerves vegyületekből keletkező kondenzációra képes gőzök (pl. H_2SO_4) más légköri összetevőkkel, mint H_2O , NH_3 , NH_2R , NHR_1R_2 , esetleg további VOC-kkel (Volatile Organic Compounds: illékony szerves vegyületek) kölcsönhatásba lépve kialakítják az új aeroszol részecskéket. A folyamat létrejöttének kedvez az elővegyület nagy koncentrációja, az erős napsugárzás és a kis kondenzációs nyelő. A konden-

zációs nyelő azt az aeroszol populációt jelzi, amely eltávolítja a levegőből a kondenzációra képes gőzöket általában adszorpció útján.

A nukleáció mechanizmusának leírására többféle modell is létezik. Az újabb ismeretek alapján az új részecske képződés és növekedés egy kétlépéses folyamat (Kulmala et al., 2013). Az első lépésben az állandóan jelenlévő, kisméretű klaszterekből kritikus méretű, általában semleges elektromos töltésű klaszter keletkezik. A következő, második lépésben a kritikus méret viszonylag gyors növekedése történik meg aeroszol részecskévé. A mechanizmus egyszerűsített folyamatát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. A semleges klaszterek fő mérettartományai és folyamatai (Kulmala et al., 2013).

Az első tartományban (1,1–1,3 nm-nél kisebb átmérők) a klaszternövekedés sebessége nagyon kicsi, mivel a klaszterek és a molekulák folyamatosan keletkeznek, de meg is szűnnek kémiai reakciók és párolgás eredményeképpen. Ez a tartomány nincs közvetlen kapcsolatban a nukleációval. A második mérettartományban (1,1–1,3 nm-től 1,5–1,9 nm-ig) a semleges klaszterek a kénsav kondenzációja miatt növekedésnek indulnak és egyidejűleg stabilizálódnak ammónia, aminosav vagy szerves gőzök által. Ez a mérettartomány tehát kritikus a klaszterfejlődés szempontjából. Itt is jelentős szerepet játszanak a gázfázisú kémiai reakciók, és megkezdődik a klaszteraktiváció. A harmadik mérettartományban (1,5–1,9 nm-nél nagyobb) a

klaszternövekedés gyorsabb, mint a II. fázisban, ez esetben azonban a folyamatot nem a kénsav kondenzációja okozza. A gyors klaszternövekedés különösen az aktív aeroszol képződés alatti időszakra jellemző, amikor a 3 nm átmérőjű részecskék nagy számban keletkeznek. E folyamat oka az erősödő adszorpció, melyet főként az oxigéntartalmú szerves gőzöknek tulajdonítanak. A kulcsfolyamat tehát a kondenzációs lépés és a gőzök addíciója (Kulmala et al., 2013). A nukleáció a késő délelőtti, déli időszakban fordul elő tipikusan, és akár több mint egy napig is tarthat (Salma et al., 2010), de az új részecske képződés évszakonkénti változást is mutat. Jellemzően tavasszal a leggyakoribb, és télen a legritkább. Budapesten éves szinten átlagosan kb. minden negyedik nap keletkeznek új részecskék nukleáció során (Borsós és Salma, 2010).

2.3 *Részecskeszám méreteloszlás*

Az ultrafinom aeroszol részecskék méretének meghatározását nem célszerű aerodinamikai módszerekkel végezni; helyette a részecskék elektromos tulajdonságait használjuk erre a célra. Az elektromos mobilitás és a részecskék átmérője közötti összefüggést a következő egyenlet fejezi ki (Hinds, 1982):

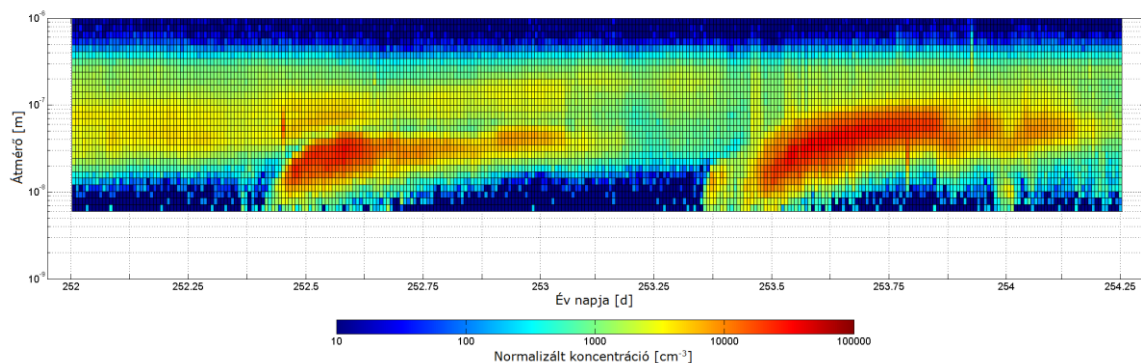
$$Z = \frac{ezC_c}{3\pi\eta d}, \quad (1)$$

ahol Z az elektromos mozgékonyosság, e az elemi elektromos töltés, z az elemi töltések száma, C_c a Cunningham-faktor, η a közeg (levegő) dinamikus viszkozitása, d pedig a részecske elektromos mobilitási átmérője.

Az aeroszol részecskék tulajdonságainak jelentős része összefügg a részecskék méretével. Mivel az ultrafinom aeroszol részecskék tömege elhanyagolható a többi részecske tömegéhez képest, de ezek a részecskék fordulnak elő legnagyobb számban a levegőben, ezért a részecskeszám méreteloszlást használunk ezen részecskék jellemzésére. A részecskeszám méreteloszlás az 1–1000 nm közötti intervallumot foglalja magában, melyben három módus jelenik meg. Általában az Aitken-módus (20–90 nm maximumú csúcs) és az akkumulációs módus (90–300 nm maximumú csúcs) alkotja a méreteloszlást. Az utóbbi módus a forrástól távolabbi aeroszol részecskékből áll. Az Aitken-módusú részecskék emissziós forrásokból származnak, így a közúti közlekedésből, a lakossági fűtésből és ipari égetésből. Bizonyos esetekben azonban megjelenik a legkisebb átmérőjű részecskéket tartalmazó, nukleációs módus (1–20 nm maximumú csúcs) is. Ez egy időszakosan lejátszódó, legtöbbször

folyamatosan növekvő medián átmérőjű módus, amelyik az alsó mérési tartománynál, esetünkben 6 nm-nél jelenik meg, és növekszik az Aitken-módus felé, majd végül egyesül vele. A módusok leírására lognormális függvényeket használunk (Seinfeld és Pandis, 1998), így a görbe alatti terület megadja a teljes részecskeszámot.

A légköri nukleáció azonosítása és elkülönítése az emissziós forrásoktól a részecskeszám méreteloszlás időváltozásának tanulmányozásával megvalósítható. Ennek szemléltetésére szolgál a kontúrgörbe, mely valójában egy háromdimenziós ábra. A vízszintes tengelyen az idő, a függőleges tengelyen az átmérő helyezkedik el. A részecskék normalizált koncentrációját színek jelöli, melyben a kék a legkisebb, a piros a legnagyobb koncentrációt jelenti. A 3. ábrán két egymást követő napon lejátszódó légköri nukleáció kontúrgörbáját mutatom be.



3. ábra. Két légköri nukleáció és részecske növekedés kontúrgörbéje Budapesten 2012. 09. 08. 00:00–09.10. 6:00 közötti időintervallumban.

A 3. ábrán kirajzolódó elnyúló piros alakzatok az ún. banángörbék. Ezek a görbék jelzik az új részecskék képződését. Nukleáció során Budapesten a részecskék átlagos keletkezési sebessége $(4,2 \pm 2,5) \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, és ez a folyamat akár 1–2 óráig is tarthat. Ennek során az éves medián értékekkel ($11,8 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) összemérhető koncentráció kelezkezhethet. A nukleációs módusú részecskék átlagos növekedési sebessége Budapesten $(7,7 \pm 2,4) \text{ nm h}^{-1}$ (Salma et al., 2011).

3. Az adatok forrása és feldolgozása

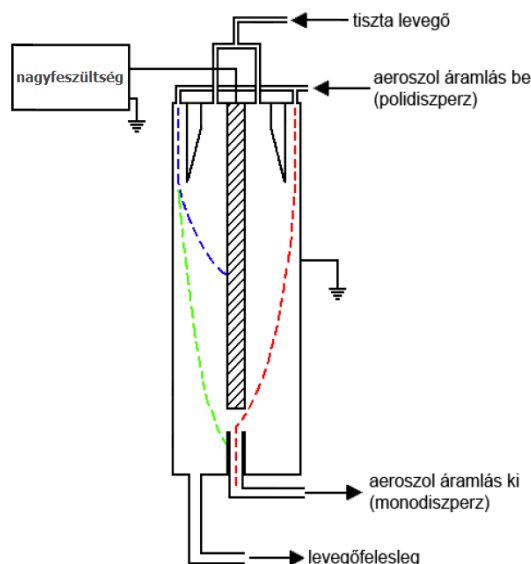
Az ultrafinom aeroszol részecskék szélsőséges levegőkörnyezeti viszonyok közötti vizsgálására az extrém meteorológiai helyzetet, illetve előtte és utána 1–1 napot választottam. A továbbiakban tehát a 2013. március 14–17. közötti időszakra vonatkozó adatokat értékelem ki. A kutatómunkámhoz négy különböző forrásból gyűjtöttem adatokat. Az aeroszol részecskék számának méreteloszlását az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi Campusában folyamatosan működő DMPS mérőrendszerrel határoztuk meg. A légköri nukleáció regionális jelentőségű, előfordulása a város nagy részén hasonló. A mérés helyszíne: Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Lágymányosi Campus, Északi Tömb. A műszer GPS koordinátái: észak-nyugati sarok; N 47°28'29,944", E 19°03'44,659", 158.75 m tengerszint feletti magasság, észak-keleti sarok; N 47°28'29,958", E 19°03'44,732", 158.75 m tengerszint feletti magasság, dél-keleti sarok; N 47°28'29,863", E 19°03'44,760", 158.75 m tengerszint feletti magasság, dél-nyugati sarok; N 47°28'29,849", E 19°03'44,657", 158.75 m tengerszint feletti magasság. A légszennyező gázok adatait a mérőhelyhez legközelebbi, Budapest XI. kerületben a Kosztolányi Dezső téren lévő Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat mérőállomása rögzítette, amely adatai nyilvánosak és szabadon letölthetőek. A meteorológiai adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest XVIII. kerületi, Gilice téren található reguláris mérőállomástól kaptam. A potenciál gradiens adatokat az MTA soproni Geodéziai és Geofizikai Intézet igazgatója bocsátotta rendelkezésemre. Az aeroszol részecskék számának méreteloszlásának adatai 10 perces, a légszennyező gázok és a meteorológiai adatok órás, a potenciál gradiens adatok pedig másodperces felbontásban voltak megadva.

3.1 A DMPS működési elve

A differenciális mobilitás részecskeszeparátor, vagyis DMPS (Differential Mobility Particle Sizer), három fő részből tevődik össze: neutralizálóból, differenciális mobilitási analizátorból, valamint egy butanollal működő kondenzációs részecskeszámlálóból (CPC: Condensation Particle Counter). A mérendő levegő 4 mm belső átmérőjű rézcsövön keresztül áramlik be a neutralizálóba, melynek feladata a részecskék egyensúlyi töltéseloszlásának biztosítása. Ezt ²⁴¹Am radioaktív sugárforrás biztosítja, mely ionizálja a levegő molekuláit, amelyek az aeroszol részecskékkal ütközve egyensúlyi töltéseloszlást eredményeznek. Az egyensúlyi töltéseloszlásnak megfelelően a részecskék kis hányada (amely 10 nm-nél pl. 0,3%

polaritásonként) hordoz elektromos töltést. Ez az arány állandó érték, így lehetővé teszi, hogy az eredményeket a teljes aeroszol populációra átszámíthassuk (Wiedensohler, 1988).

A részecskék továbbhaladnak a differenciális mozgékonyaság analízátorba (DMA: Differential Mobility Analyser). A DMA feladata a részecskék méret szerinti szeparációja elektrosztatikus térben, az elektromos mozgékonyaság alapján.

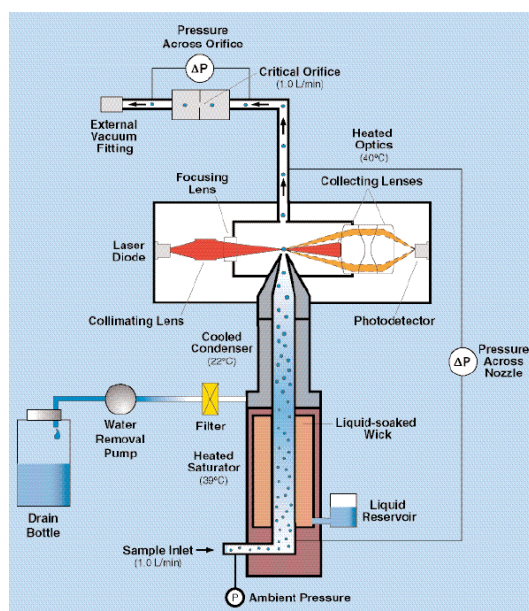


4. ábra. Különböző mobilitási átmérőjű részecskék trajektóriái (kék, piros, zöld) a differenciális mozgékonyaság analízátorban (DMA).

A mérés során egy 28 cm hosszúságú Hauke-típusú DMA-t használunk (4. ábra) (Vakkari, 2008). A külső elektródként szolgáló fém házban egy henger alakú belső elektród helyezkedik el. A belső elektród körül nagy tisztaságú, részecskét nem tartalmazó, ún. pajzs levegő áramlik, melynek állandó áramlási sebességeit egy szivattyú biztosítja. Az aeroszol minta a pajzs levegő és a külső elektród közé érkezik. A belső elektródra kapcsolt nagyfeszültség változtatásával különböző átmérőjű részecskéket választhatunk szét. A DMA-ban, 10 perc alatt 30 lépésben változik a feszültség 10 V és 10 kV között, ennek eredményeként csak az adott feszültségnek megfelelő elektromos mozgékonyaságú részecskék jutnak a mérési áramba. A nagyobb elektromos mozgékonyaságú részecskék nem érik el a kilépő rést, és a belső elektródnak csapódnak, míg a kisebb elektromos mozgékonyaságú részecskék távoznak a levegőfelesleggel. Az átáramlott aeroszol részecskék monodisziperznek tekinthetők.

A részecskék a DMA-ból a detektor felé haladnak. A detektor esetünkben egy kondenzációs részecskeszámláló, melynek felépítése az 5. ábrán látható. A mérés során egy TSI 3775

(USA) típusú, butanollal működő CPC-t használunk. A CPC a lézervény szórása alapján működik. Nem minden részecske átmérője esik azonban a fény hullámhosszáinak tartományába (380 nm–750 nm), ezért, hogy a legkisebb részecskéket is detektálni tudjuk, meg kell növelni azokat egy segédgőzt kondenzáltatásával. A részecskéket egy butanollal telített, 39 °C-ra felfűtött térbe vezetjük, ahol a minta keveredik a segédgőzzel. Ezután 14 °C-os kondenzzerben a mintát hirtelen lehűtjük, így a túltelített butanol gőz kondenzálódik az aeroszol részecskékre. A részecskék egységesen megnövekednek, aminek következtében a legkisebb részecskék is megszámlálhatóvá válnak a fényszórással. A detektáláshoz a mintát továbbvezetjük egy kollimált lézernyalábra merőlegesen. A részecskékről szórt fényt most már mérhető fotodetektorral, így meghatározható a részecskék száma.



5. ábra. Kondenzációs részecskeszámláló (CPC) sematikus ábrája.

A műszerhez kapcsolódik egy vezérlő számítógép. Egy teljes méreteloszlás mérése a 6–1000 nm közötti mérettartományban 10 percig tart. A részecskementes pajzs levegő és az aeroszol áramlási sebessége rendre 20 és 2 L min⁻¹, vagy 3 és 0,3 L min⁻¹. Kisebb részecskék (6–200 nm) esetén az előbbi, nagyobb áramlási sebességet használjuk, mert így kisebb a diffúziós veszteség. Az utóbbi, kisebb áramlási sebességet a nagyobb részecskék (200–1000 nm) esetén alkalmazzuk a részecskék tehetetlenségéből fellépő veszteség kiküszöbölése miatt. A műszert összeszereléskor kalibrálták polisztirol-latex (PSL) szuszpenzióval, valamint hitelesítették egy azonos típusú CPC-vel. A feszültség és az áramlások rendszeres felülvizsgálatát és beállítását a mérések során legalább kéthetente elvégezzük.

A DMPS műszer az általam kiválasztott időszakban folyamatosan, napi 24 órában működött, és 10 percenként rögzítette a mért adatokat, melyek alapján az aeroszol részecskék számának méreteloszlása meghatározható.

3.2 Légszennyező gázok

A légszennyező gázok kiválasztott időszakra vonatkozó adatait a mérési helyszínhez legközelebb lévő, Budapest, XI. kerületi, Kosztolányi Dezső téri, a BP6 számú mérőállomásról vettem, melyet az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat oldaláról töltöttem le (<http://www.kvvm.hu/olm/station.php?id=44>). A mérőállomás GPS koordináták: N 47°28'29.64" E 19°2'26.02". A kiválasztott 4 napra letöltött adatsor tartalmazza a SO₂, NO₂, NO, NO_x, CO, O₃ és PM₁₀ koncentrációkat egyórás időfelbontásban. A különböző légszennyezők koncentrációját a következőképpen mérik: SO₂ esetében ultraibolya fluoreszcenciás, a NO_x koncentrációjának mérésére kemilumineszcenciás, a PM₁₀ koncentrációjának meghatározására béta radiometriás módszert használnak, míg a CO esetében infravörös korrelációs abszorpciós spektrometriát, és az O₃ koncentrációjának mérésére ultraibolya abszorpciós fotometriát alkalmaznak. A légszennyező gázok koncentrációjának ismerete hozzájárul a levegőkörnyezeti viszonyok értelmezéséhez. Információt kaphatunk a forgalom nagyságáról, valamint ennek következtében arról, hogy mennyi légszennyező gáz emittálódott az adott időszakban. A nukleációs folyamatok elővegyülete a SO₂, míg a CO, NO és NO₂ értékeiből a közvetlen emisszióra következtethetünk (közlekedés, fűtés, égetés). A PM₁₀ a 10 µm alatti átmérőjű részecskéket jelenti. A koncentrációjából a meglévő aeroszol tömegére és a szennyezettségre, míg az O₃ koncentrációjából a fotokémiai aktivitásra következtethetünk.

3.3 Meteorológiai változók

Magyarországon 2013 márciusában, nemzeti ünnepünk idején szokatlan téli időjárás volt tapasztalható, amikor sokak ragadtak a hó fogságában. Erős havazás indult meg először a Dunántúlon, majd az egyre erősödő északi és északnyugati szél a délutáni órákra már viharossá fokozódott, és többfelé alakult ki hóvihár. A márciusban szokatlan időjárás katasztrófális helyzetekhez vezetett. Ezt a szélsőséges időjárást egy gyorsan kimélyülő ciklon hozta létre, mely a mediterrán területekről érkezett (OMSz, 2013). Az Országos Meteorológiai Szolgálat legmagasabb szintű, piros riasztást adott ki összesen 8 megyére (Fejér, Veszprém, Komárom-Esztergom, Somogy, Zala, Szabolcs-Szatmár-Bereg, Hajdú-Bihar és Borsod-Abaúj-Zemplén megye) a kialakuló helyzet miatt (BM OKF, 2013). Ez a rendkívüli időjárás országszerte

fennakadásokat okozott. A katasztrófavédelem, a rendőrség, a készenléti szolgálatok, az együttműködő szervezetek és a karitatív szervezetek bevonására is szükség volt, valamint rengeteg önkéntes segédkezett a munkákban. Az utak tisztítását nyugaton a helyenként 100 km/h erősségű szél nehezítette, míg az északkeleti részen az ónos eső és a szél együttesen okozott problémát, melynek következtében súlyos károk keletkeztek az elektromos hálózatban. A meteorológiai és katasztrófavédelmi előzetes figyelmeztetések ellenére ezrek ragadtak az utakon. A rendkívüli hófúvás 57 települést zárt el a külvilágtól (kb. harmincezer ember), száz közül vált járhatatlanná, néhány helyen pedig az ivóvízhálózat hibásodott meg. A hófúvás összesen kétszázhetven-ezer embert érintett (BM OKF, 2013).

Az általam választott 4 napra a meteorológiai adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat Gilice téri mérőállomásától kaptam meg. GPS koordinátái: N 47°25'48.88" E 19°10'56.29", 139 m tengerszint feletti magasság. Az adatok közül kiválasztottam azokat, amelyek szükségesek a légköri nukleáció körülményeinek tisztázásához. Ezek a globálsugárzás (GR), relatív páratartalom (RH), hőmérséklet (T), szélesség (WS), szélirány (WD) és a légnyomás (P).

A további meteorológiai vizsgálatokhoz potenciál gradiens adatokat is felhasználtam. A légköri gázok, részecskék, atomok és molekulák mindig gyengén ionizált állapotban vannak a különböző sugárzásoknak (UV-sugárzás, kozmikus sugárzás, stb.) köszönhetően. Ennek következtében elveszíthetik egy-két elektronjukat, így elektromos töltéssel rendelkező részecskék, molekulák, atomok jönnek létre. Különböző folyamatok (pl. zivatarok kialakulásának) eredményeképpen az elektromosan töltött részecskék töltései előjelük szerint szétválnak, majd az egyes légköri tartományokban összegyűlnek, amivel elektromos teret alakítanak ki (Czelnai, 1996). A kialakuló elektromos feszültség egységnyi távolságra eső változását nevezzük potenciál gradiensnek (mértékegység: volt/méter).

Az időjárási helyzetet a Péczely-féle makrocirkulációs típusok segítségével is vizsgáltuk. A számos tipizálási módszer közül azért ezt választottuk, mert Kárpát-medencei központú, s alkalmazhatóságát számos kutatás bizonyította (Pongrácz, 2003; Philipp et al., 2010). A módszer a nagyterjedésű, 1000 km-es karakterisztikus méretű ciklonok, anticiklonok elhelyezkedésén, fejlődésén és áthelyeződésén alapul (Péczely, 1959). A Kárpát-medence időjárását, az ezekben az objektumokban kialakuló, és hozzánk sodródó légtömegek alakítják. Minden nap időjárását egy-egy makrocirkulációs típussal jellemezhetünk (Péczely, 1983). Péczely 13 típust különböztetett meg. Ezeket mutatja az 1. táblázat.

1. táblázat. A Péczy-féle makrocirkulációs típusok elnevezése és csoportosítása.

Északi irányítású helyzetek	
mCc	Ciklon hátoldali áramrendszere
AB	Anticiklon a Brit-szigetek térségében
CMc	Mediterrán ciklon hátoldali áramrendszere
Déli irányítású helyzetek	
mCw	Ciklon előoldali áramrendszere
Ae	Anticiklon Magyarországtól keletre
CMw	Mediterrán ciklon előoldali áramrendszere
Nyugati irányítású helyzetek	
zC	Zonális ciklonális helyzet
Aw	Anticiklon Magyarországtól nyugatra
As	Anticiklon Magyarországtól délre
Keleti irányítású helyzetek	
An	Anticiklon Magyarországtól északra
AF	Anticiklon Fennoskandinávia térségében
Centrum helyzetek	
A	Anticiklon a Kárpát-medence felett
C	Cikloncentrum a Kárpát-medence felett

A Péczy-féle kódokat a 00:00 UTC idejű európai időjárási térkép alapján minden napra meghatározzák. A nyomási rendszerek elkülönítése 1015 hPa-os értéknél történik. Ezzel a módszerrel a ciklonok és anticiklonok centrumait is megismerhetjük. A 13 makrocirkulációs helyzet közül 6 ciklonális, a többi anticiklonális jellegű (James, 2007).

3.4 Adatfeldolgozás

A DMPS mérőműszerhez tartozó vezérlő számítógép fájlokba rendezi a mért adatokat. Egy naphoz három fájl tartozik, mely tartalmazza a részecskék átmérőjét, a koncentrációját és a lejátszódó folyamat alatt fennálló paramétereket, így a hőmérsékletet, áramlási értékeket és a relatív páratartalmat. A kapott koncentrációt MatLab szkripttel invertáljuk, így kapjuk meg a valós méreteloszlást. Ezekből a méreteloszlásokból megszerkesztettem az általam választott napokra vonatkozó kontúrgörbéket. Különböző csatornáknál különböző mobilitási átmérőjű részecskék detektálhatóak. Az adatokat 10 perces időfelbontásban Excel táblázatban rögzítettem, majd a normalizált koncentrációk ismeretében kiszámoltam az összes részecskeszámot (N), a 6–100 nm (N_{6-100}), a 100–1000 nm ($N_{100-1000}$), és a 6–25 nm (N_{6-25}) mobilitási átmérőjű részecskék koncentrációját a négy napra külön-külön és együttvéve is. $N_{100-1000}$ az ún. öregedett aeroszolt adják, ami a regionális populációra utal. N_{6-25} részecskék a nukleációs folyamatokból, míg az N_{6-100} mind a nukleációból, mind a közvetlen emisszióból származó részecskék számát adják. A nukleációs esemény várhatóan a főváros egészét érinti (regionális nukleáció), így a vizsgálat céljához megfelelnek a Gilice téren mért meteorológiai, és a Kosztolányi Dezső téri légszennyező gázok adatai. Kiszámoltam a minimum, minimumhoz legközelebb eső (MinNext), medián, maximumhoz legközelebb eső (MaxNext) és maximum értékeit, átlagukat és szórását naponként, és a 4 napot együtt nézve is. Ezután megszerkesztettem a napi átlagérték táblázatokat, és ábrázoltam a napi időváltozásokat. A potenciál gradiens másodpercenkénti időfelbontású adataiból órás átlagot véve megszerkesztettem a napi időváltozását.

A körülmények tisztázásának érdekében HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modellel visszaszámolt trajektóriákat készítettem. A HYSPLIT egy az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet Légköri Kutatólaboratóriuma (NOAA ARL) által kifejlesztett modell, mely képes nem csak egyszerű trajektóriákat, de akár több forrásból származó szennyezőanyag terjedést és ülepedést is szimulálni (Draxler és Taylor, 1982; Draxler, 1992; Draxler és Hess, 1997). A modellezéshez használt adatbázis publikus és elérhető (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). A dolgozatomhoz archív GDAS meteorológiai adatbázist használtam fel. A HYSPLIT a számításokhoz a Lagrange-i módszert és az euleri szemléletet együttesen alkalmazza. A Lagrange-i módszer alapján az advekciós és diffúziós számítások a légtömeg mozgását szemléltetik, míg az euleri szemlélet segítségével a szennyezőanyagok koncentrációját tudja meghatározni egy rögzített háromdimenziós rácson

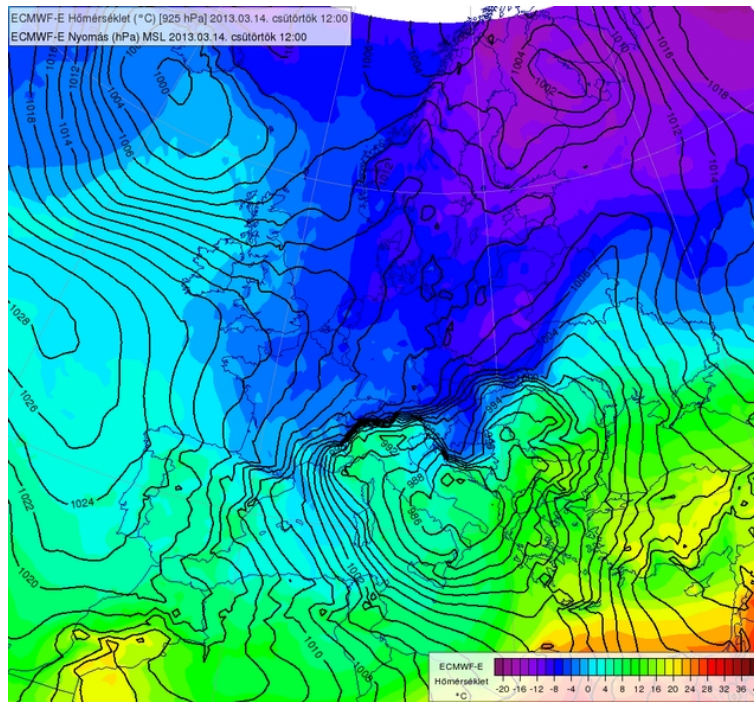
(Draxler és Hess, 1997). Ezzel a módszerrel nyomon követhető, hogy bizonyos anyagok merre és hogyan terjednek a levegőben.

4. Eredmények és megvitatásuk

Az időjárási háttér (napi makrocirkulációs típusok) ismeretében, az adatok feldolgozása során nyert kontúrgörbék, az átlagértékekből összeállított táblázatok ismeretével közelebb jutunk a szélsőséges levegőkörnyezeti körülmények között feltételezett nukleáció megértéséhez. Az aeroszol részecskék számának, a légszennyező gázok koncentrációjának és a meteorológiai paraméterek napi időváltozása, valamint a visszaszámolt trajektóriák meghatározása ugyancsak hozzájárul a vizsgálathoz.

4.1 Meteorológiai környezet

A szélsőséges időjárási helyzet okozója egy Magyarország fölé érkező, és itt gyorsan kimélyülő mediterrán ciklon volt (OMSz, 2013). A ciklon energiáját az északi hideg és az afrikai eredetű meleg légtömegek közötti nagy hőmérsékletkülönbségből nyerte. A Földközi-tenger medencéjébe érkező hideg levegőnek köszönhetően kialakult egy nagy kiterjedésű mediterrán ciklon. A ciklon gyors kimélyülésében két tényező játszott szerepet. Egyrészt a Földközi-tenger feletti meleg levegő és a bezúduló hideg levegő keveredéséből származó feláramlások, másrészt a nagy magasságban kanyargó szélcsatorna a jet-stream (futóáramlás), mely éppen a kialakuló ciklon közelében volt a legerősebb. Az így északkelet felé elmozduló gyorsan mélyülő mediterrán ciklon még nem okozott volna ilyen rendkívüli időjárási helyzetet. Északnyugatról azonban az alacsonyabb légrétegben hidegbeáramlás indult meg, mely pont térségünkben vágta ketté a ciklont, és egy önálló mag fűződött le. Az új mag gyorsan mélyülni kezdett, március 15-én hajnalra a ciklon középpontjában a légnyomás már rendkívül alacsonyra (985 hPa) csökkent. E rendszer kialakulásában nagy szerepe volt a már említett nagy észak-déli hőmérséklet-különbségnek. Az új mag kialakulását mutatja be a *6. ábra*, melyen látható a déli határterületeink mentén lejátszódó lefűződés.



6. ábra. A tengerszinti légnyomás (folyamatos vonalak) és a 850 hPa szint hőmérsékleti mezeje (színskála) 2013. 03. 14-én 12 órakor OMSz, 2013).

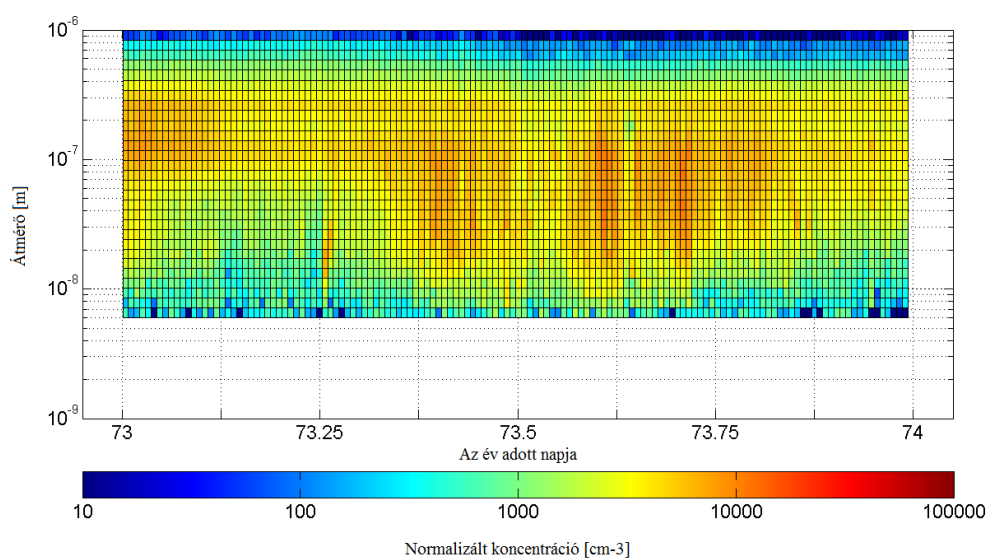
A hideg és a meleg levegő találkozásából kialakuló erőteljes felhő és csapadékképződés eredményeként március 13-án este délnyugati irányból zápor jellegű csapadéksávok alakultak ki. A mediterrán eredetű nedves légtömeg az északnyugatról érkező hideg légtömeggel keveredve 14-én a hajnali órákra a Dunántúlon egyre több felé intenzív havazást eredményezett, a gyors hűlés miatt nedves hóval. Később a talajközeli szél északira fordult, a felhőmozgás azonban tartósan délnyugati maradt. A magasabb légtömegekre tehát csak később hatott a lefűződés, így a délnyugatról érkező nedves légtömegek biztosíthatták a további csapadékot. A legtöbb csapadék ott alakult ki, ahol a legtávolabbi fennmaradt ez az áramlás.

2013. március 14–17-ig tartó időszak Péczy-féle kódjai rendre „CMw”, „C”, „mCc”, „A”. Ennek megfelelően március 14-én egy mediterrán ciklon előoldali áramlásrendszere határozta meg az időjárási helyzetet. A Földközi-tenger térségében kialakuló ciklon melegfronti hatása érzékelhető volt országunkban, mely tavasszal kiadós esőzéseket okoz. Ez az időjárási helyzet az évszakas átlagnál hidegebb időt és jelentős mennyiségű havazást eredményezett. Erős felhőzöttség, nagy légszennyezettség és rossz látási viszonyok a jellem-

zók ilyenkor. Általában aperiodikus napi hőmérséklet-ingás a meghatározó. Március 15-ére, a „C” kódnak megfelelően, a ciklon centruma már a Kárpát-medence fölé helyeződött át. A térséget ekkor nagy hőmérsékleti kontraszt jellemezte, ami télen kisebb borultsággal jelentkezik. A szélsébség nagy volt, azonban a mi esetünkben nem alakult ki egységes szélirány. A változó irányú erős szél és a borultság eredményeképpen kicsi volt a napi hőmérsékleti ingás. A légszennyezettség nem volt számottevő (a nagy szélsébség miatt), de a látási viszonyok rosszak voltak. Ebben az időjárási helyzetben a csapadék mennyisége minden évszakban jelentős, mely ebben az esetben is érzékelhető volt. Az évszakai átlaghőmérséklet télen melegebb, nyáron hidegebb. Március 16-án, a katalógusbeli „mCc” kód szerint a ciklon hátoldali áramlásrendszere volt meghatározó a térségünkben. A ciklon meridionális helyzetű, melyet északias áramlás kísért, erős északi, északnyugati széllel. A levegő hőmérsékleti rétegzettségére a stabilitás jellemző, melegebb alsó légréteggel. Az időjárás jellemzően szeles, csapadékos volt gyorsan változó borultsággal. A ciklon intenzív csapadékot hozott hózáporok formájában. A légszennyezettség és a ködhajlam kicsi, a látási viszonyok jók voltak. A hőmérsékleti ingás gyakran aperiodikus ilyenkor. A március 17-ére meghatározott „A” kód a Kárpát-medence fölött elhelyezkedő centrum helyzetű anticiklont jelez. A jellemzés szerint lehet kisebb kiterjedésű, vagy gyors mozgású, ciklonrendszereket elválasztó köztes anticiklon is. Általában hosszabb ideig marad térségünk fölött, mely időt a medencében megrekedő hideg levegő gyakran meghosszabbítja. A légmozgás változó volt, nem alakult ki jellegzetes szélirány, a felhőzettség kicsi volt. Az alacsony csapadékhozam száraz levegőt eredményezett. Nagy légszennyezettség és rossz látási viszonyok jellemezték ezt a napot. Nagy volt a napi hőmérsékleti ingás.

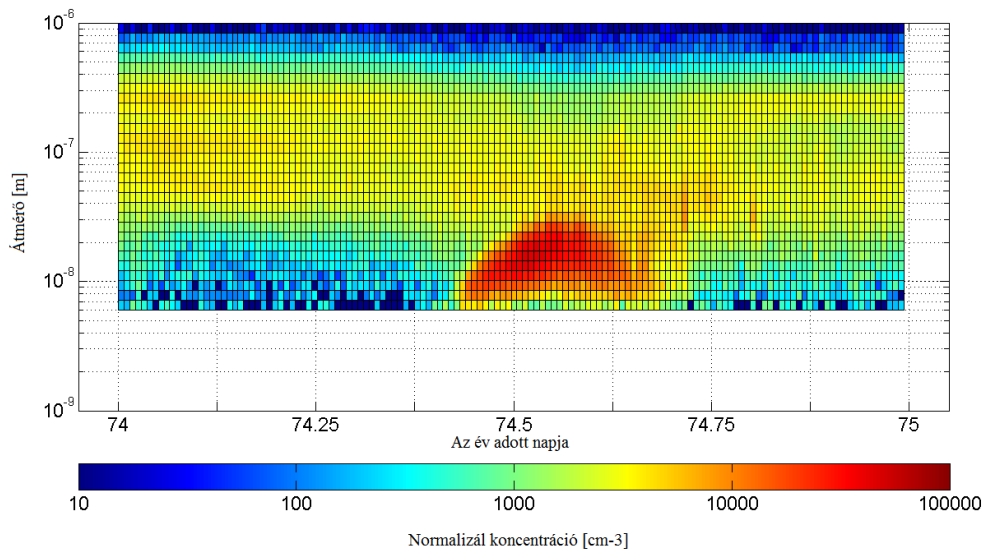
4.2 Kontúrgörbék

A kontúrgörbén a nukleáció azonosítása elsősorban a 20 nm-nél kisebb medián átmérővel jellemezhető módus hirtelen és tartós (kb. 1 óra) megjelenése alapján történik. Ezután a nukleációs módus medián átmérője nő addig, amíg el nem éri az Aitken-módust (20–90 nm). Abban az esetben, ha ez megtörténik, akkor a tapasztalataink alapján a nukleáció gyakran a következő napon is megismétlődik. A következőkben az általam választott napokon mért kontúrgörbéket mutatom be.



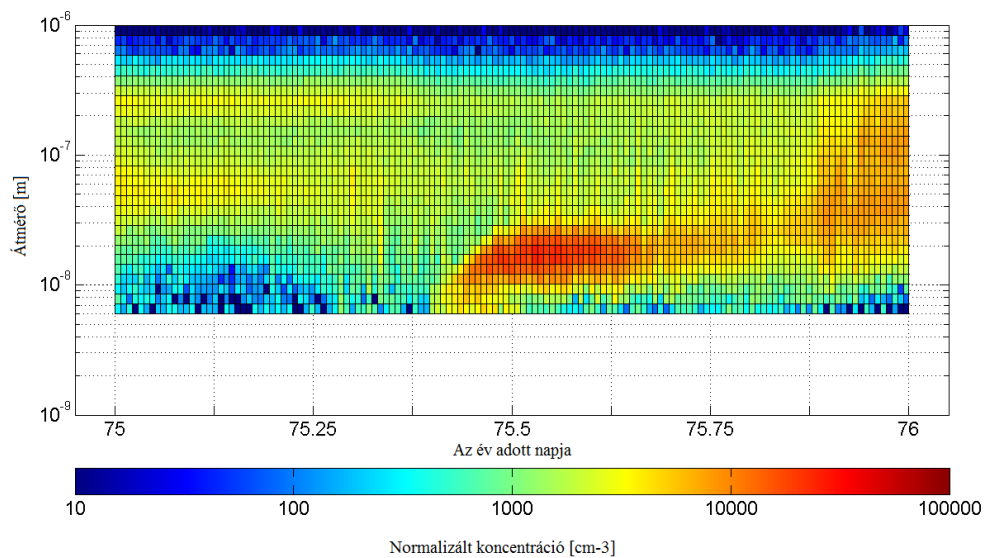
7. ábra. 2013. március 14-én, csütörtökön mért kontúrgörbe.

A 7. ábrán látható kontúrgörbén nem rajzolódik ki banángörbe, amiből arra következtethetünk, hogy március 14-én nem történt légköri nukleáció. A részecskék közvetlen emisszióval kerülhettek a levegőbe.



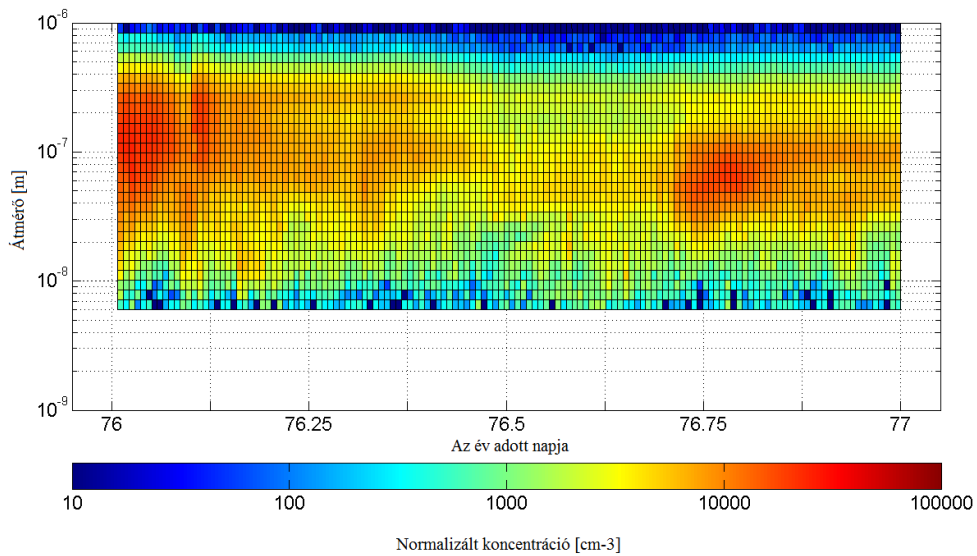
8. ábra. 2013. március 15-én, pénteken mért kontúrgörbe.

A 8. ábrán a kezdetben banángörbének induló alak visszahajlott, és fordított V alak jött létre. A részecskék átmérője nem nőtt tovább, hanem egy idő után lecsökkent. Ez a jelenség ritka, ámbar nem lehetetlen, és a frissen nukleálódott és növekedésnek indult részecskék párolgásával magyarázható.



9. ábra. 2013. március 16-án, szombaton mért kontúrgörbe.

A 9. ábrán már egy szokásos banángörbe látható, amely megerősíti az előző napon, március 15-én lejátszódó eseményt is.



10. ábra. 2013. március 17-én, vasárnap mért kontúrgörbe.

A 10. ábrán már nem látunk nukleációra utaló jelet. A reggeli és délutáni órákban megfigyelhető nagyobb koncentráció a közúti közlekedés forgalmával hozható összefüggésbe.

A kontúrgörbék vizsgálatából megállapítható, hogy 15-én és 16-án megjelent a nukleációs módus, 15-én a szokásos banángörbe helyett, egy fordított V alak jött létre. A fordított V alak kialakulásának oka, hogy a részecskék növekedése elmaradt, helyette a frissen keletkező részecskék elpárologtak.

4.3 Átlagos és extrém értékek

A vizsgált koncentrációk és meteorológiai változók napi mediánját, illetve a napi maximális értékeit az 2., illetve a 3. táblázatban foglaltam össze.

2. táblázat. A részecskeszám, a légszennyező gázok koncentrációjának és a meteorológiai adatok napi medián értékei 2013. 03. 14-től 17-ig.

	03. 14.	03. 15.	03. 16.	03. 17.
N [cm^{-3}]	7365	4860	5710	9489
N_{6-25} [cm^{-3}]	1327	766	2131	1382
$N_{100-1000}$ [cm^{-3}]	2787	1601	1313	2751
PM_{10} [$\mu\text{g m}^{-3}$]	36	37	23	43
SO_2 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	6,4	7,7	5,8	6,1
CO [$\mu\text{g m}^{-3}$]	603	490	513	625
NO [$\mu\text{g m}^{-3}$]	20	6	10	10
NO_2 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	40	16	22	46
O_3 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	27	78	68	66
Hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	3,0	-2,2	-2,0	-1,3
Relatív páratartalom [%]	99	99	64	65
Légnyomás [hPa]	977	985	1002	1004
Szélirány [fok]	320	320	320	120
Szélesség [m s^{-1}]	4	6	3	4

Az 2. táblázatban szereplő medián értékeket az éves átlaghoz hasonlítottam. Március 15-én és 16-án az összes részecskeszám (N) értékei az éves átlagos részecskeszámhoz képest ($11,8 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) nem voltak nagyok, ami alapján tisztának tekinthető a levegő. A levegő regionális háttér aeroszol tartalma ($N_{100-1000}$) szintén nem vett fel nagy értékeket a két feltételezett nukleációs napon, március 15-én és 16-án. A légszennyező gázok közül a PM_{10} medián értékei alapján március 16-án tisztának tekinthető a levegő, míg az SO_2 átlagos koncentrációja a négy nap alatt keveset változott, ezért valószínűleg nem volt limitáló tényező a nukleációs folyamatok kialakulásában. Az NO és az NO_2 átlagos koncentrációjából megállapítható, hogy március 15-én az éves átlagkoncentrációtól kisebb értékeket vett fel, ezek alapján tehát a levegő ezen a napon tisztának tekinthető. Az O_3 koncentrációja március 15-én, 16-án és 17-én

volt nagyobb, csak március 14-én vett fel kisebb értékeket. A meteorológiai változókat vizsgálva megállapítható, hogy jelentős változások mentek végbe az általam választott négy nap alatt. Az átlaghőmérséklet március 14-ről 15-re lényegesen lecsökkent, 16-án is alacsony maradt, és csak 17-én emelkedett, az időjárás enyhült. Az átlagos relatív páratartalom március 14-én és 15-én nagy volt, majd 16-ára nagymértékben lecsökkent. A szélirány 16-áról 17-ére változott jelentősen, északiból dél-délkeletire fordult, az átlagos szélesség pedig március 15-én vett fel nagyobb értéket, amely már erős szélnek számít.

3. táblázat. A részecskeszám, a légszennyező gázok koncentrációjának és a meteorológiai adatok maximum értékei 2013. 03. 14-től 17-ig.

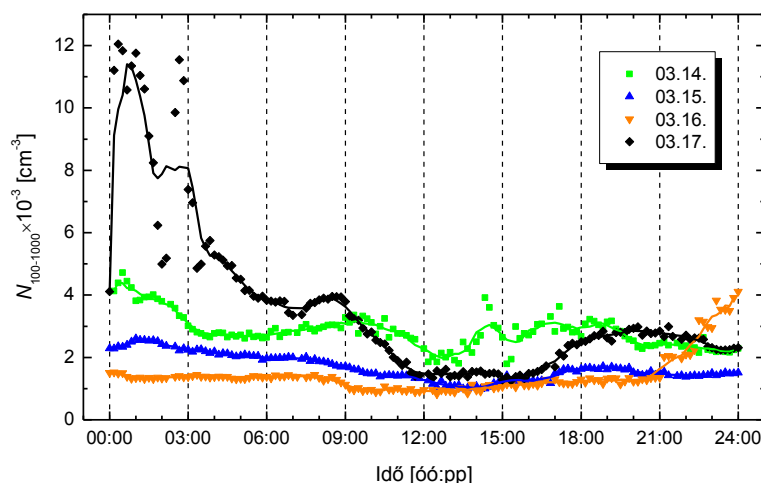
	03. 14	03. 15.	03. 16.	03. 17.
N [cm ⁻³]	15545	24116	14482	28891
N_{6-25} [cm ⁻³]	4192	20020	10366	3887
$N_{100-1000}$ [cm ⁻³]	4718	2601	4109	12042
PM ₁₀ [μg m ⁻³]	68	93	53	71
SO ₂ [μg m ⁻³]	7,9	9,4	6,7	8,2
CO [μg m ⁻³]	791	562	1030	1291
NO [μg m ⁻³]	62	17	79	94
NO ₂ [μg m ⁻³]	54	34	91	94
O ₃ [μg m ⁻³]	67	83	77	93
Napsugárzás [W m ²]	161	162	635	555
Hőmérséklet [°C]	7,4	-1,3	1,5	1,9
Relatív páratartalom [%]	99	99	92	97
Légnyomás [hPa]	981	996	1005	1005
Szélesség [m s ⁻¹]	5	7	5	6

A maximális értékeket tanulmányozva az N_{6-25} esetében március 15-én és 16-án a másik két naphoz viszonyítva jelentősen megnőtt a nukleációs módusba eső részecskék koncentrációjának értéke, amely azt mutatja, hogy valóban nukleáció ment végbe ezen a két napon. Az $N_{100-1000}$ (regionális populáció) március 15-én mért alacsony értékei arra utalnak, hogy a nukleáció kialakulása előtt kicsi volt a kondenzációs nyelő, amely a nukleáció versengő folyamata. A nukleáció legfontosabb elővegyületének számító SO₂ nagy értéke március 15-én

szintén a nukleáció kialakulásának kedvez. A CO maximális koncentrációja március 15-én kicsinek mondható, mely arra utalhat, hogy a közvetlen emissziós folyamatok nem voltak számottevők ezen a napon, vagy a nagyobb szélesebbesség miatt erős volt a hígulás. A napsugárzás értékeiből arra következtethetünk, hogy március 14-én és 15-én felhős volt az időjárás, míg 16-án és 17-én napos idő volt jellemző. A hőmérséklet maximális értékei március 14-ről 15-re erősen lecsökkentek, mely jelentős meteorológiai változásokra utal.

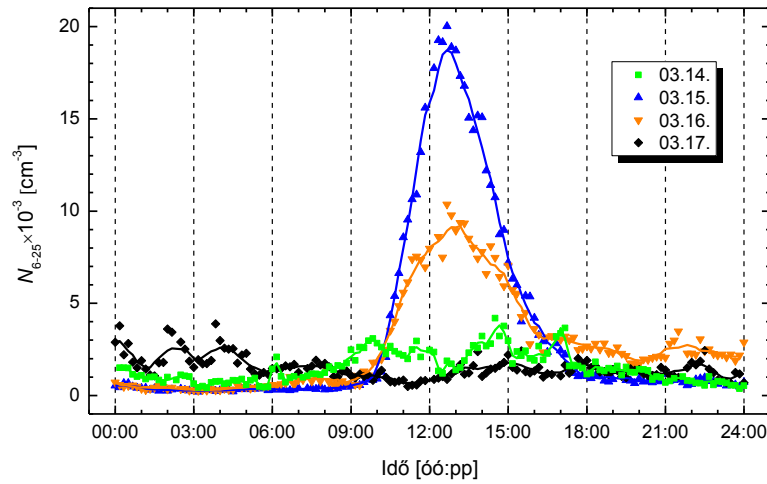
4.4 Napi időváltozások

Tekintettel arra, hogy a nukleáció tipikusan a késő délelőtti, déli időszakban fordul elő (Salma et al., 2010), célszerű a vizsgált koncentrációk és meteorológiai változók napi menetét is megvizsgálni a négy napon külön-külön. A következőkben ezeket a görbéket mutatom be.



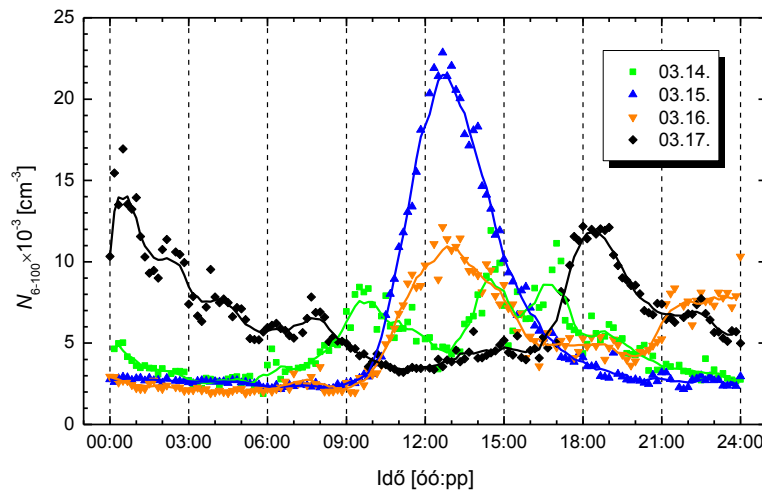
11. ábra. A 100–1000 nm átmérőjű részecskék koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

Az 100–1000 nm átmérőjű részecskék ($N_{100-1000}$) száma a regionális aeroszol tartalomra utal. A 11. ábrán látható, hogy március 14-én, 15-én és 16-án nem volt jelentős a változékonyság a régióban. 17-én azonban a hajnali órákban jelentős növekedés történt.



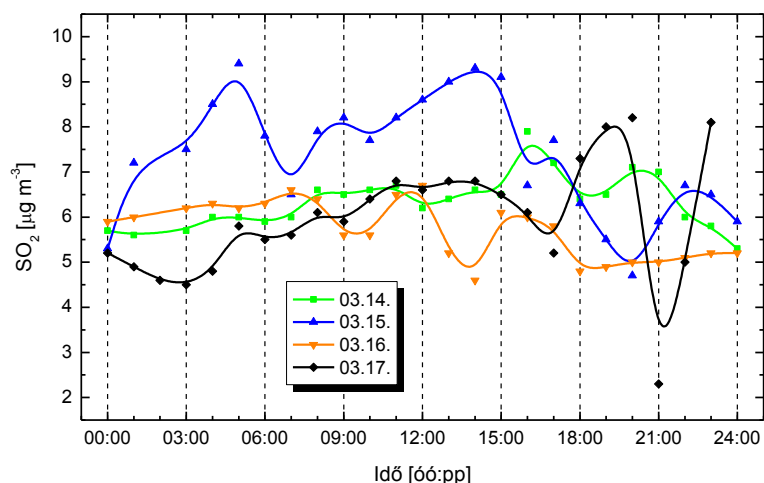
12. ábra. A 6–25 nm közötti átmérőjű részecskék koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 12. ábrán a 6–25 nm (N_{6-25}) átmérőjű részecskék koncentrációjának időváltozása látható. Az ebbe a mérettartományba eső részecskék nagy része légköri nukleációs folyamatok során keletkezik, tehát a részecskék mennyisége a nukleációra utal. Március 14-én kicsi volt a koncentráció. 15-én és 16-án kezdetben nem volt jelentős változás, azonban a déli órákban markáns növekedés volt tapasztalható, két csúcs rajzolódik ki, mely a nukleáció lejátszódására utal. 17-én az N_{6-25} koncentrációja végig alacsony maradt.



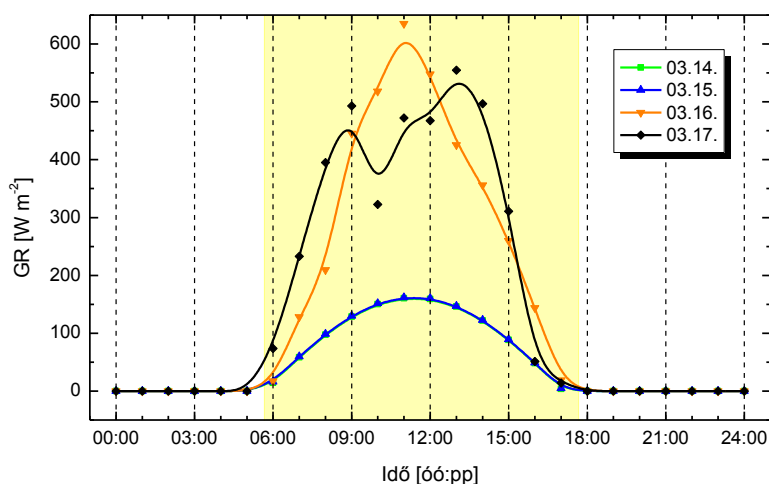
13. ábra. A 6–100 nm közötti átmérőjű részecskék koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 6–100 nm közötti átmérőjű részecskék (N_{6-100}) származhatnak nukleációból, de közvetlen emissziós folyamatokból, tehát a közúti közlekedésből és a fűtési folyamatokból is. Ebben a mérettartományban mindkét forrásból találunk részecskéket, a nagyobbak a közvetlen emisszióval, a kisebbek pedig a nukleáció során keletkeztek. A 13. ábrán szemléltetett időváltozásból megállapítható, hogy március 14-én nem volt nagy a koncentráció. Március 15-én és 16-án mért koncentráció a 12. ábrához hasonlóan a déli órákban jelentősen megnő, ám ez esetben a részecskék száma nagyobb, mint a 6–25 nm közötti mérettartományba eső részecskéké. Ez szintén azt mutatja, hogy N_{6-100} -ba már az emissziós forrásokból származó részecskék is beletartoznak. Március 17-én már jól láthatóan nagyobb volt a részecskék koncentrációja, amely hangsúlyozza az emissziós források jelentőségét.



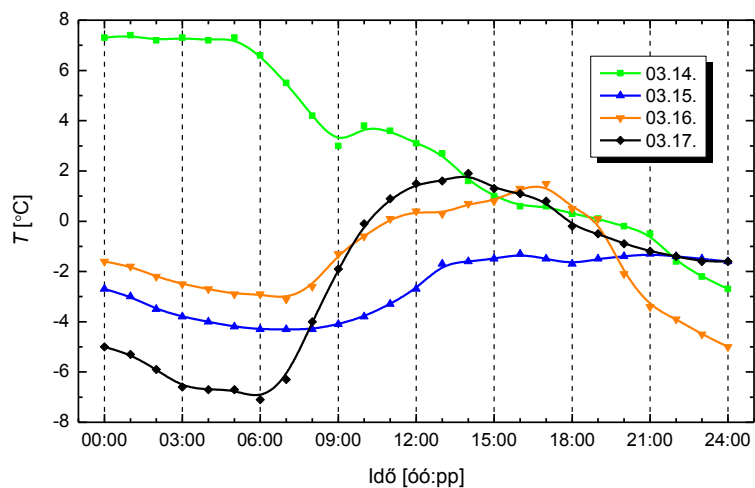
14. ábra. A kén-dioxid koncentráció napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 14. ábrán a kén-dioxid napi időváltozását mutatom be. Az SO_2 a nukleációs folyamatok egyik legfontosabb elővegyülete. Látható, hogy mind a négy napon hasonló érték körül ingadozott, ami azt sejteti, hogy a nukleáció nélküli időszakban is lett volna elegendő SO_2 az új részecskék keletkezéséhez, tehát a nukleáció nem az SO_2 hiánya miatt maradt el március 14-én és 17-én. E komponens valószínűleg nem volt limitáló tényező a nukleáció kialakulásában.



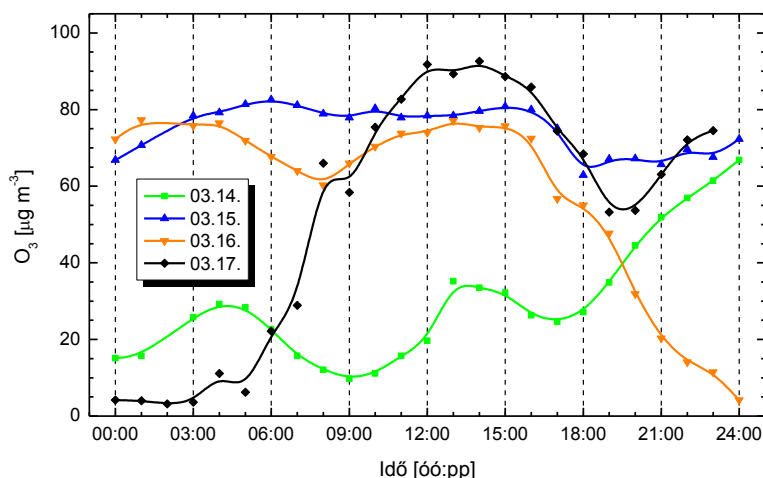
15. *ábra.* A napsugárzás napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között. A sárga mező a napfelkeltétől napnyugtáig tartó időszakot jelzi.

A napsugárzás 2013. március 14. és 17. közötti változását a 15. *ábra* mutatja be. Március 14-én és 15-én felhős, csapadékos idő volt jellemző. 16-án és 17-én azonban már jelentősen változott az időjárás, és naposabb 2 nap következett. A nukleációs folyamatoknak kedvez az erős napsugárzás, de más feltételek is szükségesek a kialakulásához. Esetünkben azonban nem mindig állt fent ez a tényező, ez is mutatja a kialakult helyzet különlegességét.



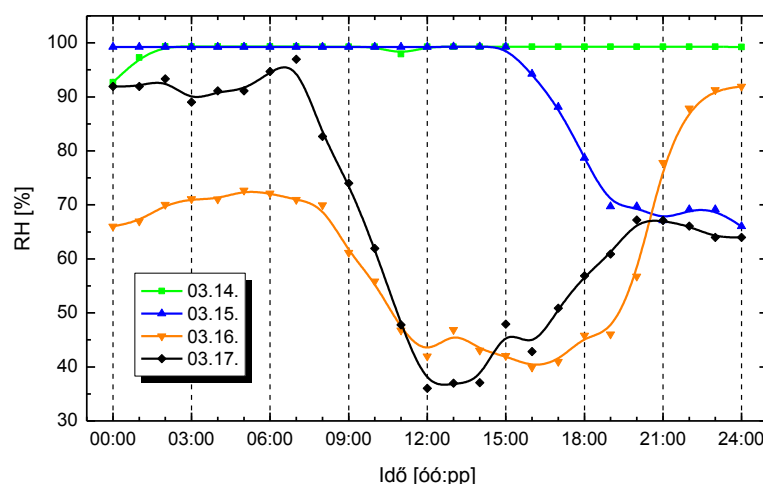
16. *ábra.* A levegő hőmérsékletének napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A hőmérsékleti értékeket ábrázolva (16. ábra) látható, hogy március 14-én a kezdeti +7–8 °C-os levegő az éjszakai órákra jelentősen, -2 °C-nál kisebb hőmérsékleti értékre csökkent. Március 15-én napközben végig alacsonyan maradt ez az érték, még a déli órákban is csak kicsivel haladta meg a -2°C-os hőmérsékletet. Március 16-án az előző naphoz képest jobban felmelegedett a levegő, de így is az átlagosnál alacsonyabban maradt, éjszakára -5°C körüli hőmérsékletre hűlt le. Az utolsó napon a -7°C-os hideg után a déli órákra enyhült az idő, de a hőmérséklet továbbra is alacsony értéken maradt. A tapasztalt gyors hűlés is hozzájárult a nedves hó kialakulásához.



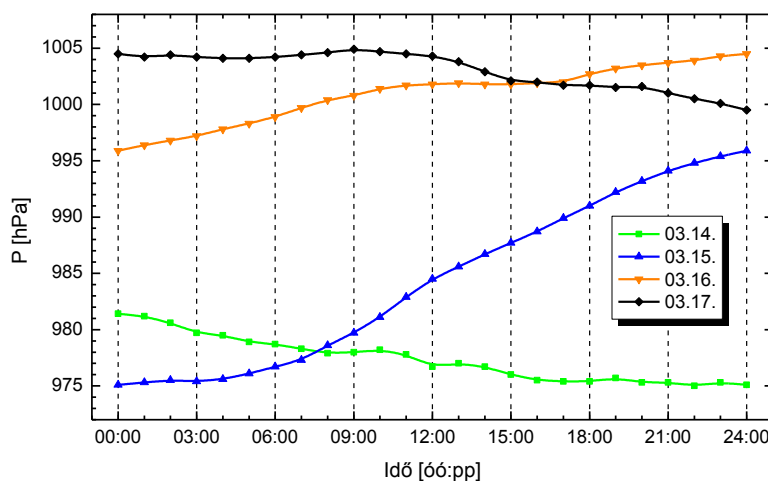
17. ábra. Az ózon koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

Az ózon mennyiségének ismeretéből következtethetünk a fotokémiai aktivitásra, amely az új részecske képződést segíti elő. A 17. ábrán látható az O₃ napi időváltozás. Március 14-én alacsony volt az O₃ koncentrációja (10–35 µg m⁻³ között változott). Az esti órákban azonban növekedésnek indult. A következő két napon, március 15-én és 16-án megnőtt az O₃ koncentrációja, 65 µg m⁻³ és 80 µg m⁻³ között ingadozott, csak 16-án este csökkent le. Az általam vizsgált időszakban az utolsó napon kezdetben alacsony volt az O₃ koncentráció, a déli órákban megnőtt, majd kisebb értékre csökkent. Az ózon koncentrációjából napos idő esetén, így március 16-án és 17-én nagyobb fotokémiai aktivitásra következtethetünk, illetve borús idő esetén, március 15-én a mért nagy ózon koncentráció utalhat egy hozzánk sodródó ózon-felhőre is.



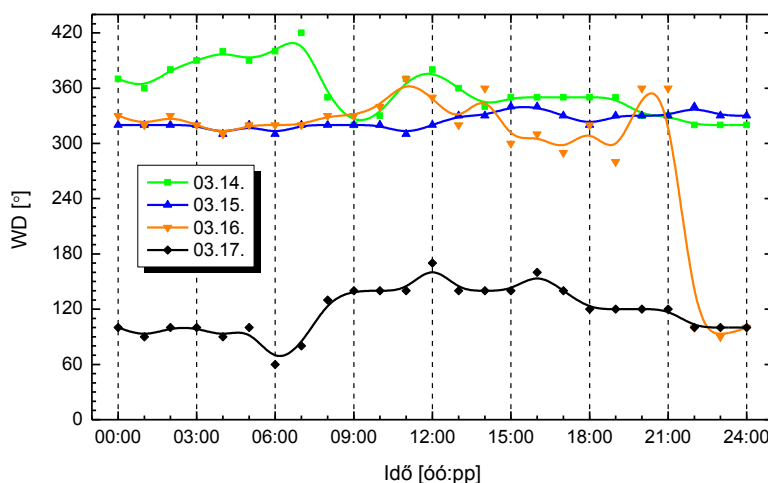
18. ábra. A relatív páratartalom napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 18. ábrán az általam kiválasztott négy napra vonatkozó relatív páratartalom napi időváltozása van ábrázolva. Leolvasható, hogy az első két napon majdnem egész nap 100% körül mozgott a relatív páratartalom, csak 15-én este csökkent le 70% alatti értékre. Március 16-án a kezdeti alacsony értékek még jobban lecsökkentek egészen 40% körüli értékre, majd az esti órákban már elérték a 90%-os relatív páratartalmat is. Március 17-én a déli órákban ismét egy drasztikus csökkenés volt jellemző. A magas relatív páratartalom a nukleációs folyamatok ellen hat, ennek figyelembe vételével csak március 15-étől délután 3 órától alakulhatott volna ki nukleáció.



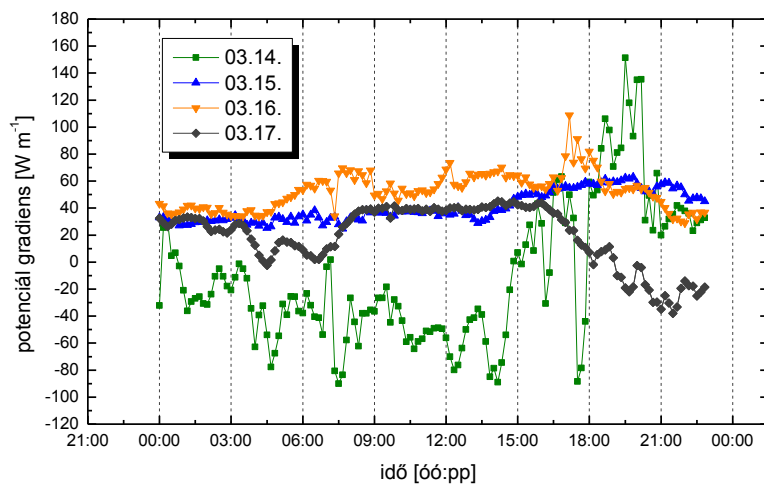
19. ábra. A légnyomás napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 19. ábra mutatja a légnyomás napi időváltozását a kiválasztott négy napra. Március 14-én a nyomás 981 hPa-ról a nap végére 975 hPa-ra csökkent. Nem volt jelentős változás ezen a napon. Március 15-én nagy növekedés volt tapasztalható, az esti órákra 996 hPa-ra növekedett a légnyomás értéke. Március 16-án kis mértékben újra nőtt a légnyomás, 1004 hPa körüli értéket vett fel. Március 17-én a nap végére kis mértékben csökkent, 999 hPa körüli értékre. A március 15-én történő drasztikus légnyomás növekedés is az időjárás jelentős változását mutatja.



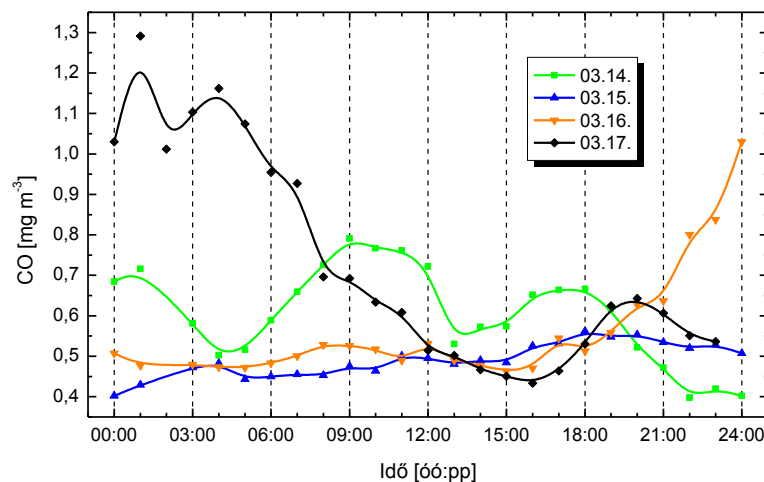
20. ábra. A szélirány napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 20. ábra azt mutatja, hogy március 14-én, 15-én és 16-án lényegében az északi szektorból érkezett a levegő. Markáns változás 16-án az éjszakai órákban történt, amikor a szélirány dél-délkeletire változott, és a következő napon végig megmaradt. A szélesség négy napra vonatkozó adataiból elmondható, hogy az első napon nőtt a szélesség 1 m s^{-1} -ről 4 m s^{-1} -ra, majd március 15-én végig magas értéken maradt: $6\text{--}7 \text{ m s}^{-1}$ között ingadozott. Következtetni lehet tehát arra, hogy a kezdeti szélesség növekedés az időjárás változását mutatja, a március 15-én végig fennálló magas érték pedig már a hófűvés alatti időszakra utal. Március 16-án már kisebb volt a szélesség (4 m s^{-1}), és az esti órákra szinte teljesen megszűnt. Március 17-én ismét megnövekedett a szél erőssége, a déli órákra elérte az 5 m s^{-1} értéket.



21. ábra. A potenciál gradiens napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

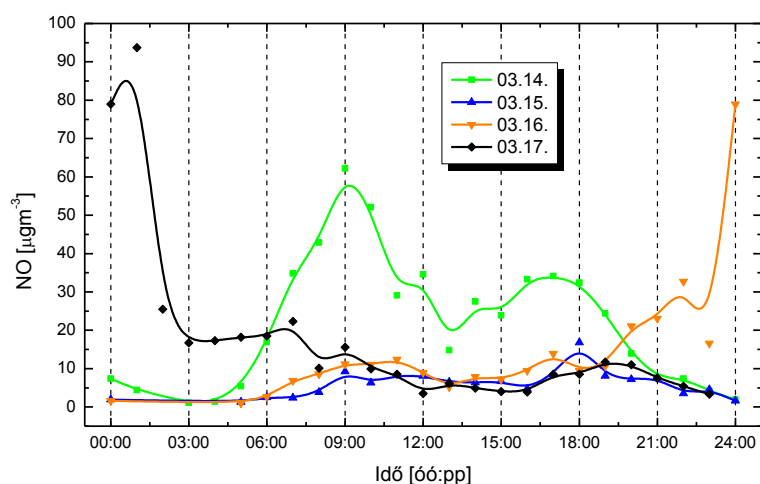
A 21. ábrán látható, hogy a potenciál gradiens napi menetében és a napok között nincs markáns, rendszerszerű változás.



22. ábra. A szén-monoxid koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

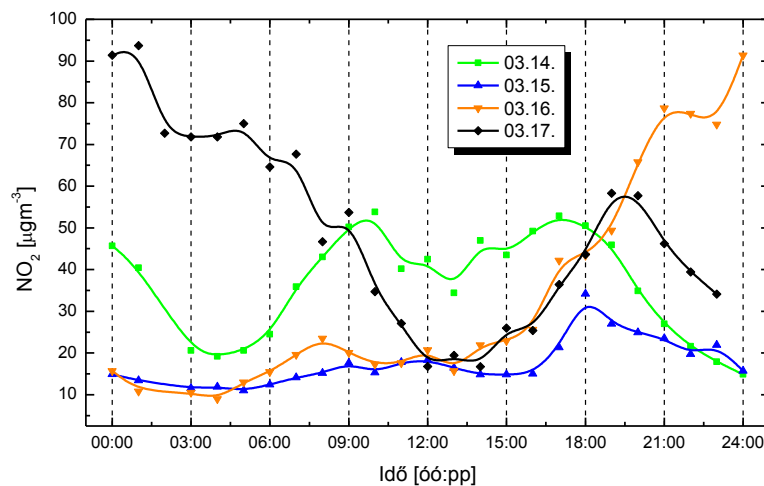
A szén-monoxid egy olyan légszennyező gáz, mely közvetlen emisszió útján kerülhet a levegőbe a közlekedés vagy a háztartási fűtés útján. A 22. ábra mutatja a CO koncentrációjának napi időváltozását, melyen látszik, hogy március 14-e után, március 15-én és 16-án lecsökkent a koncentráció. A koncentráció változását az emissziós források intenzitása és a

helyi meteorológia (főleg a keveredési réteg vastagsága, szélsébség) egyaránt befolyásolja, ezért közvetlen következtetések levonása akadályba ütközik.



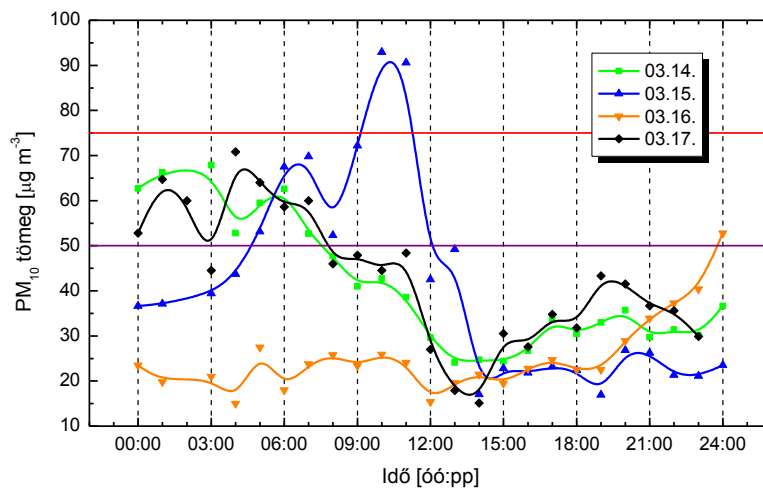
23. ábra. A nitrogén-monoxid koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

Szintén közvetlen emissziós forrásból származik a nitrogén-monoxid, melynek forrásai ugyancsak a közúti közlekedés és a háztartási fűtés. Ezen légszennyező gáz vizsgált időintervallumra vonatkozó koncentrációjának időbeli változását mutatja be a 23. ábra. Mint a CO koncentrációjánál (22. ábra), úgy a NO-nál is elmondható ugyanaz, tehát, hogy március 14-én a kezdeti magasabb koncentráció (nagyobb közúti forgalom) után március 15-én és 16-án kisebb lett ez az érték, és csak az általam vizsgált napok közül március 17-én 0 óra körül növekedett meg jelentősen.



24. ábra. A nitrogén-dioxid koncentrációjának napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között.

A 24. ábra szemlélteti a nitrogén-dioxid koncentráció napi időváltozását 2013. március 14. és 17. között. A NO_2 egy olyan légszennyező gáz, mely a közvetlen emissziós folyamatokból származó termékek átalakulásával jön létre, tehát másodlagos termék. A NO_2 gáz a közlekedésből és a háztartási fűtésből származik, nem közvetlen úton. A CO és NO analógiáját követi az NO_2 is, tehát a március 14-ei viszonylag nagyobb koncentráció március 15-én és 16-án alacsony értéken maradt. Március 17-én a kezdeti nagy koncentráció a déli órákban lecsökkent, majd délután ismét növekedésnek indult.



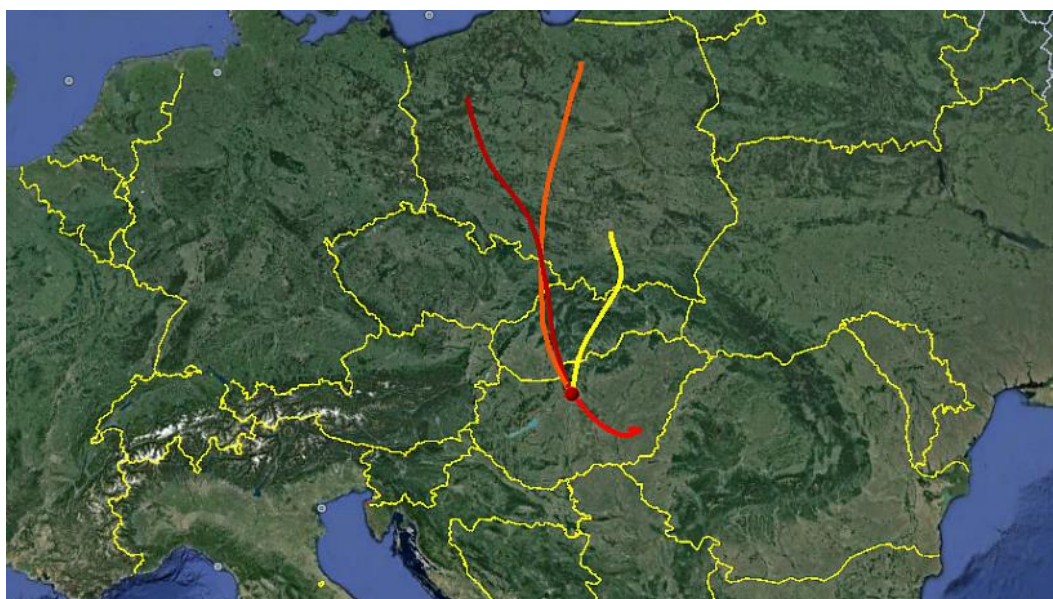
25. *ábra.* A PM_{10} koncentráció napi időváltozása 2013. március 14. és 17. között. A lila vonal a napi egészségügyi határértéket ($50 \mu g m^{-3}$), a piros vonal pedig a szmogriadó tájékoztatási szintjét jelzi ($75 \mu g m^{-3}$).

A PM_{10} részecskék közvetlen emisszióval közlekedési és fűtési forrásokból származhatnak. Rövid légköri tartózkodási idővel rendelkeznek, de reszuszpenzió révén újra a levegőbe juthatnak. 2013. március 14. és 17. közötti időszak PM_{10} koncentráció változását írja le a 25. *ábra.* A PM_{10} tömegkoncentráció menete egyáltalán nem hasonlít a részecskeszám koncentrációkra (8–10. *ábra*), ami arra utal, hogy a részecskék tömege és száma közötti nem áll fenn közvetlen kapcsolat. Március 14. és 16. között a hajnali–délelőtti órákban (a szmogriadó tájékoztatási szintjéhez hasonlítható) nagy értékek alakultak ki, míg 17-én végig kis koncentráció volt jellemző.

4.5 Visszaszámolt trajektóriák

A nukleáció kialakulásához több feltétel együttes teljesülése szükséges. Ezek levegőkémiai és meteorológiai körülményeket, illetve vezérlő mennyiségeket is magukba foglalnak. A körülmények ráadásul gyakran nem függetlenek egymástól, és hatásaiknak vizsgálata további kiértékelést igényel. Ezért a kutatás célját adó szélsőséges körülmények között feltételezett nukleáció jobb megértése céljából 24 órás visszaszámolt trajektóriát készítettem. A trajektóriák helyi idő szerint 12:00-kor érkeztek. Azért választottam ezt az időpontot, mert tapasztalataink szerint a nukleáció 9:30 és 13:30 között játszódik le, és az általam mért fordított V-alakú görbét délben tapasztaltuk. A nukleáció nélküli napokon pedig az összeha-

sonlíthatóság miatt szintén a 12:00-kor érkező légtömegeket vizsgáltam. A 200 méteres magasságban Budapestre érkező légtömegek útját a 26. ábrán mutatom be.



26. ábra. 2013. március 14. és 17. között 200 méteres magasságban, helyi idő szerint 12:00 órakor Budapestre érkező légtömegek útja. A citromsárga szín március 14-én, a narancssárga március 15-én, a sötétpiros március 16-án, míg az élénkpiros szín március 17-én a térségbe érkező légtömeget jelöli.

A 26. ábrán látható, hogy március 14. és 16. között az északi régióból, míg 17-én déli irányból érkeztek a légtömegek Budapestre. Március 15-én és 16-án a másik két naphoz viszonyítva nagyobb utat tettek meg Budapestig, ami a nagyobb szélsébséggel magyarázható. A légtömeg irányának és az általuk megtett út hosszának a változása is a meteorológiai viszonyok jelentős változására utal.

5. Összefoglalás

Az ultrafinom aeroszol részecskék 100 nm-nél kisebb mobilitási átmérővel rendelkeznek. Mind az egészségügyi, mind az éghajlatot befolyásoló hatásai jelentősek. Legfontosabb keletkezési módjuk a közvetlen magas-hőmérsékletű emisszió és a légköri nukleáció. Ezen részecskék fordulnak elő legnagyobb számban a levegőben. Jellemzésük egyik fontos lehetősége a részecskeszám méreteloszlás. A méreteloszlásban három fő módus azonosítható. Az Aitken-módus és az akkumulációs módus általában jelen van. A nukleációs módusú részecskék az alsó mérettartománynál jelennek meg, és átmérőjük folyamatosan nő az Aitken-módus felé, majd egyesülnek azzal. A nukleációval keletkezett részecskék elkülönítése az emissziós forrásokból származó részecskéktől, tehát a részecskeszám méreteloszlás időváltozásának, azaz a kontúrgörbéknek a vizsgálatával megvalósítható.

A légköri nukleáció gyakorisága Budapesten éves átlagban, a releváns napokat számításba véve 27% körüli. Kialakulásához többféle feltételnek kell teljesülnie. Ezek közé tartozik az erős napsugárzás, az elővegyületek jelentős koncentrációja és kondenzációs nyelő kis értéke. A folyamatot további levegőkémiai és meteorológiai mennyiségek triggerelhetik (beindíthatják) vagy hátráltathatják. 2013. március közepén szokatlan és szélsőséges időjárás (hóvihar) alakult ki Magyarország nagy részén. Ebben az időszakban a nukleáció feltételei látszólag nem voltak meg, de ennek ellenére mégis azonosítottunk, mégpedig két alkalommal ilyen eseményt. Munkám fő célja ennek a látszólagos ellentmondásnak a feloldása volt.

A vizsgálatokhoz a 2013. március 14. és 17. közötti időszakot választottam ki. Ezen időintervallum alatt lejátszódó folyamatok megértéséhez szükségem volt különböző méretfrakciójú részecskék számának koncentrációjára, a légszennyező gázok koncentrációjára és a meteorológiai változók adataira. A részecskék méreteloszlásának mérése az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi Campusában történt. A mérésre differenciális mobilitás részecske-szeparátor (DMPS) mérőműszert használtunk. Ezekből megkaptam a különböző méretfrakciójú részecskék (az összes részecske, a 6–100 nm, a 100–1000 nm, és a 6–25 nm mobilitási átmérőjű részecskék) számának koncentrációját, amelyek különböző típusú forrásból származó aeroszolt képviselnek. A légszennyező (SO_2 , NO_2 , NO , NO_x , CO , O_3 és PM_{10}) adatok az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat mérőállomásáról, a meteorológiai paraméterek (globálsugárzás, relatív páratartalom, hőmérséklet, szélsébség, szélirány és

légnymás) az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőállomásáról, a potenciál gradiens adatai pedig az MTA soproni Geodéziai és Geofizikai Intézet igazgatójától származnak.

A négy forrásból származó adatokat összesítve dolgoztam fel. Az adatsorokat leíró statisztikai módszerrel jellemeztem, majd napi időváltozékonyságokat határoztam meg.

A szélsőséges meteorológiai helyzet kialakulását, a Földközi-tenger térségéből érkező mediterrán ciklon okozta. A délnyugatról haladó ciklont, az északnyugatról, alacsonyabb légrétegekben érkező hidegbeáramlás kettévágta, így egy új lefűződés alakult ki, mely gyorsan mélyülni kezdett. Ebben a kimélyülésben két tényező játszott szerepet, a hideg és meleg levegő nagy hőmérsékletkülönbsége és a futóáram (jet-stream) is.

Az általam kiválasztott négy nap kontúrgörbéit tanulmányozva megerősítettem, hogy az extrém meteorológiai viszonyok ellenére március 15-én és 16-án nukleáció történt. Március 15-én azonban a szokásos banángörbe helyett, egy fordított V alak jött létre, melynek oka, hogy az újonnan keletkező részecskék nem nőttek kondenzációval, hanem a szokatlan és változó időjárási viszonyok miatt elpárologtak. A napi átlagos és extrém értékek vizsgálata azt mutatja, hogy bizonyos koncentrációk és légköri viszonyok jelentősen változtak 2013. március 14. és 17. közötti időintervallumban. A közvetlen emissziós forrásokból származó részecskék koncentrációja nem volt jelentős, ami viszonylag kis kondenzációs nyelőt jelentett a túltelített gőzök számára. A különböző méretfrakciójú részecskék koncentrációjának napi időváltozásai alátámasztják a március 15-én és 16-án lejátszódó nukleáció tényét. A meteorológiai paraméterek március 14. és 17. között jelentős változást mutatnak, mely a szélsőséges levegőkörnyezeti viszonyokat jelzi, míg a közvetlen emisszióra utaló gázok kis koncentrációja a közúti gépjárműforgalom kis mértékével lehet kapcsolatban.

A feldolgozott adatsorok alapján felmerült az a gondolat, hogy a szokásos (semleges klaszterekhez kapcsolódó) nukleációs mechanizmus helyett egy másik, elektromosan töltött részecskék által indukált jelenség válhat meghatározóvá. Ezt az elképzelést nem támasztja alá azonban az, hogy a rendelkezésre álló, a légköri elektromosságot jellemző adatok (potenciál gradiens) nem jeleztek markáns változást a vizsgált napok alatt. A nukleáció előfordulása inkább azzal kapcsolatos, hogy a kialakuláshoz két, versengő folyamat vezet: a túltelített gőzök kialakulása és a kondenzációs nyelő. Extrém időjárási körülmények között is kialakulhat olyan helyzet, amikor mindkét folyamat intenzitása, abszolút értéke kicsi vagy nagyon kicsi, de arányuk mégis kedvező, és eléri a szükséges mértéket. Ilyen eseteket ez idáig nem vizsgáltak.

6. Irodalomjegyzék

- Balásházy, I., 2010. Aeroszolkok légúti kiülepedésének és a kis dózisok hatásainak vizsgálata. *MTA doktori értekezés*. MTA, Budapest.
- BM OKF (Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság) 2013. Nehéz napokon van túl a katasztrófavédelem. URL: http://www.katasztrofavedelem.hu/index2.php?pageid=szervezet_hirek&hirid=1644. Letöltés: 2013. október 26.
- BM OKF (Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság) 2013. Nincs járhatatlan út és elzárt település. URL: http://www.katasztrofavedelem.hu/index2.php?pageid=szervezet_hirek&hirid=1644. Letöltés: 2013. október 26.
- BM OKF (Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság) 2013: A katasztrófavédelem közleménye A Katasztrófavédelem Közelménye, A rendkívüli időjárás elmúlt 24 órájáról. URL: http://www.katasztrofavedelem.hu/index2.php?pageid=szervezet_hirek&hirid=1634. Letöltés: 2013. október 26.
- Borsós, T., Salma, I., 2009. Nanorészecskék a levegőben: áldás vagy átok? *Élet és Tudomány* 64/11–12, 1654–1656.
- Borsós, T., Salma, I., 2010. Banángörbe Budapesten. *Élet és Tudomány* 65/21, 643.
- Borsós, T., Salma, I., 2011. A Várhegy-alagút közepén. *Természet Világa* 142/6, 257–260.
- Brown, D. M., Stone, V., Findlay, P., MacNee, W., Donaldson, K., 2000. Increased inflammation and intracellular calcium caused by ultrafine carbon black is independent of transition metals or other soluble components. *Occup. Environ. Med.* 57, 685–691.
- Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V., Donaldson, K., 2001. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 175, 191–199.
- Czelnai, R., 1996. Bevezetés a meteorológiába I. Légekörtani alapismeretek. *Nemzeti Tankönyvkiadó*, Budapest,

- Draxler, R. R., 1992. Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectories (HYSPLIT) Version 3.0 – User’s guide and model description. *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-195*, 26 pp.
- Draxler, R. R., Hess, G. D., 1997. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. *NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224*, December, 24 pp.
- Draxler, R. R., Taylor, A. D., 1982. Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 27, 617–625.
- Farkas, Á., Balásházy, I., 2007. Simulation of the effect of local obstructions and blockage on airflow and aerosol deposition in central human airways. *J Aerosol Sci.* 38, 865–884.
- Hinds, W. C., 1982. *Aerosol Technology*. Wiley, New York.
- Holmes, N.S., 2007. A review of particle formation events and growth in the atmosphere in the various environments and discussion of mechanistic implications. *Atmos. Environ.* 41, 2183–2201.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. The Physical Science Basis. *Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press, New York.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report*. Stockholm, Sweden.
- James, P. M. 2007. An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, 88, 17–42.
- JRC-EASAC 24847 (European Commission, Joint Research Centre – European Academies Science Advisory Council). 2011. Impact of engineered nanoparticles on health: Considerations for benefit - risk assessment. *Reference Report 24847*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V.-M., Birmli W., McMurry, P. H., 2004. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *J. Aerosol Sci.* 35, 143–176.
- Kulmala, M., Kontkanen, J., Junninen, H., Lehtipalo, K., Minninen, H. E., Nieminen, T., Petäjä T., Sipilä, M., Schobesberger, S., Rantala, P., Franchin, A., Jokinen, T., Järvinen E.,

- Äijälä, M., Kangasluoma, J., Hakala, J., Aalto, P. P., Paasonen, P., Mikkilä, J., Vanhanen, J., Aalto, J., Hakola, H., Makkonen, U., Ruuskanen, T., III. Mauldin, R. L., Duplissy, J., Vehkamäki, H., Bäck, J., Kortelainen, A., Riipinen, I., Kurtén, T., Johnston, M. V., Smith, J. N., Ehn, M., Mentel, T. F., Lehtinen, K. E. J., Laaksonen, A., Kerminen, V.-M., Worsnop, D. R., 2013. Direct Observations of Atmospheric Aerosol Nucleation. *Science* 339, 943–946.
- Limbach, L. K., Wick, P., Manser, P., Grass, R. N., Bruinink, A., Stark, W. J., 2007. Exposure of Engineered Nanoparticles to Human Lung Epithelial Cells: Influence of Chemical Composition and Catalytic Activity on Oxidative Stress. *Environ. Sci. Technol.* 41, 4158–4163.
- Merikanto, J., Spracklen, D. V., Mann G. W., Pickering, S. J., Carslaw, K. S., 2009. Impact of nucleation on global CCN. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 8601–8616.
- Mészáros, E., 1997. Levegőkémia. *Veszprémi Egyetemi Kiadó*, Veszprém.
- Morawska, L., Thomas, S., Bofinger, N., Wainwright, D., Neale, D., 1998. Comprehensive characterization of aerosols in a subtropical urban atmosphere: particle size distribution and correlation with gaseous pollutants. *Atmos. Environ.* 32, 2467–2478.
- Morawska, L., Ristowski, Z., Jayaratne, E. R., Keogh, D. U., Ling, X., 2008. Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicles emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure. *Atmos. Environ.* 42, 8113–8138.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster J., 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particle. *Environ. Health Perspect.*, 113, 823–839.
- OMSz (Országos Meteorológiai Szolgálat) 2013. A március 14–15-i hóvihár meteorológiai elemzése. URL: http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=597. Letöltés dátuma: 2013. november 6.
- Park, K., Park, J. Y., Kwak, J.-H., Cho, G. N., Kim, J.-S., 2008. Seasonal and diurnal variations of ultrafine particle concentration in urban Gwangju, Korea: Observation of ultrafine particle events. *Atmos. Environ.* 42, 788–799.
- Péczely, Gy., 1959. Budapest légszennyeződése különböző makroszinoptikus helyzetekben. *Időjárás*, 63, 19–27.

- Péczely, Gy., 1983. Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek katalógusa, 1881-1983. *OMSz Kisebb Kiadványai* No. 53.
- Pongrácz R., 2003. A nagytérségű cirkuláció és a légköri oszcillációk (ENSO, NAO) együttes hatása regionális éghajlati paraméterekre. *PhD dolgozat*, ELTE Meteorológiai Tanszék.
- Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Sylvie, J., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S. C., Pianko-Kluczynska, K., Post, P., Alvarez, D. R., Schiemann, R., Spekat, A., and Tymvios, F. S., 2010. Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. *J. Phys. Chem. Earth*, 35, 360–373, doi:10.1016/j.pce.2009.12.010.
- Raes, F., Van Dingenen, R., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J. P., Seinfeld, J. H., Adams, P., 2000. Formation and cycling of aerosol in the global troposphere. *Atmos. Environ.* 34, 4215–4240.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., Rosenfeld, D., 2001. Aerosols, climate, the hydrological cycle. *Science*. 294, 2119–2124.
- Salma, I., Borsós, T., Aalto, P., Hussein, T., Dal Maso, M., Kulmala, M., 2011a. Production, growth and properties of ultrafine atmospheric aerosol particles in an urban environment. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 1339–1353.
- Salma, I., Borsós, T., Aalto, P., Kulmala, M., 2011b. Time-resolved number concentration and size distribution of aerosol particles in an urban road tunnel. *Boreal. Environ. Res.* 16, 262–272.
- Schulz, H., Harder, V., Ibad-Mulli, A., Khandoga, A., Koenig, W., Krombach, F., Radykewicz, R., Stampfl, A., Thorand, B., Peters, A., 2005. Cardiovascular effects of fine and ultrafine particles. *J. Aerosol Med.* 18, 1–22.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998. Atmospheric chemistry and physics. Wiley.
- Shi, J. P., Harrison, R. M., 1999. Investigation of ultrafine particle formation during diesel exhaust dilution. *Environ. Sci. Technol.* 33, 3730–3736.
- Vakkari, V., 2008. Flow-switching differential mobility particle sizer. – *Flow-switching DMPS manual* 1–42, University at Helsinki, Helsinki.
- Wiedensohler, A., 1988. An approximation of the bipolar charge distribution for particles in the submicron size range (technical note). *J. Aerosol Sci.* 17, 413–416.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a témavezetőmnek, Dr. Salma Imre egyetemi tanárnak a fáradhatatlan szakmai segítségét és a támogatását, mellyel elkészülhetett a dolgozatom.

Köszönöm Dr. Weidinger Tamás egyetemi docensnek, hogy a budapesti meteorológiai adatokat hozzáférhetővé tette részünkre, és segítette a meteorológiai értelmezést.

Köszönöm Németh Zoltán Ph.D. hallgatónak, hogy a DMPS működésének és az adatok feldolgozásának elvét megismertette velem.

Köszönöm Dr. Károssy Csabának, hogy a rendelkezésünkre bocsátotta a Péczely-féle kódokat személyes közlés (regisztrációssz. 45/2013) alapján, és Dr. Wesztergom Viktornak, az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet igazgatójának a potenciál gradiens adatokat.