

——— Tudományos Diákköri Dolgozat ———

LOVÁK VIVIEN
kémia alapszakos hallgató

**A korom aeroszol és jelentősége
Budapesten**

Témavezető:

Dr. Salma Imre, egyetemi tanár
ELTE Kémia Intézet



——— Eötvös Loránd Tudományegyetem ———
——— Természettudományi Kar ———
—— Budapest, 2014 ——

Tartalomjegyzék

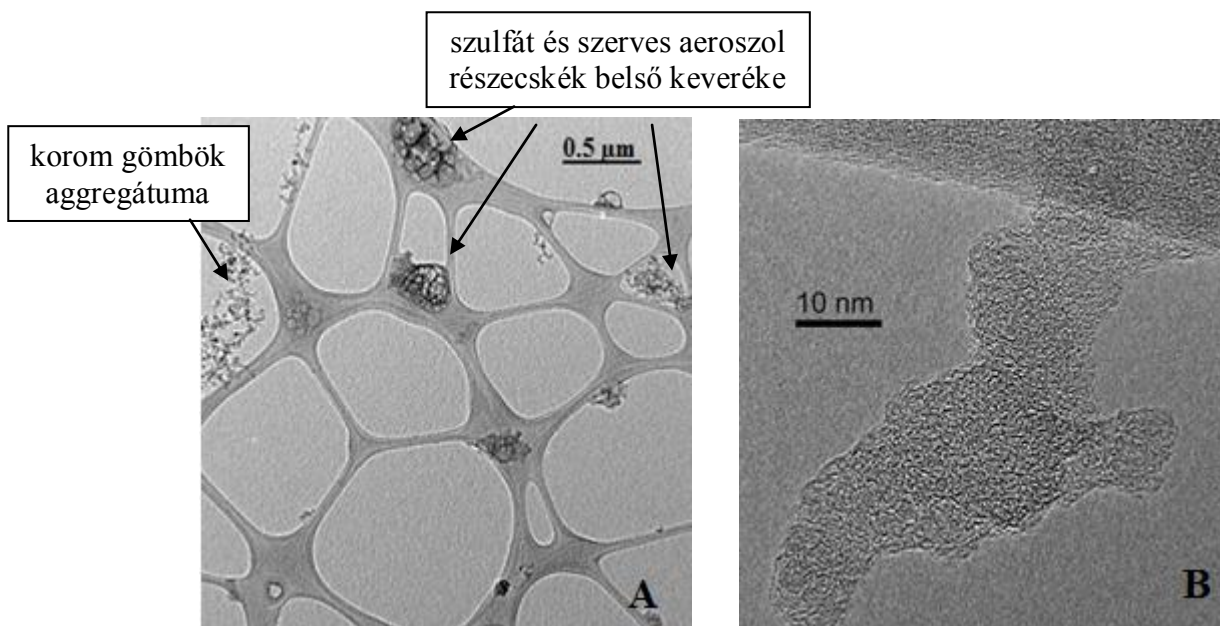
1. Bevezetés és célkitűzések	3
2. Irodalmi áttekintés: a korom részecske	5
2.1. Méreteloszlás.....	5
2.2. Széntartalmú aeroszol részecskék és mérési módszerei.....	7
2.3. Termikus-optikai transzmissziós módszer	8
2.4. Környezeti és egészségügyi hatások.....	9
3. Kísérleti rész.....	13
3.1. Mérési időszak és helyszín.....	13
3.2. A valós idejű szerves szén és elemi szén analízátor	14
3.3. Hőmérsékleti protokoll, kalibrálás és kiértékelés	15
3.4. Kúpos elemű oszcilláló mikromérleg	18
4. Eredmények és megvitatásuk	21
4.1. Átlagértékek	21
4.2. Időbeli változékonyság	22
4.3. Koncentrációarányok.....	24
5. Összefoglalás	27
6. Irodalomjegyzék	29
7. Köszönetnyilvánítás	34

1. Bevezetés és célkitűzések

Az elmúlt évtizedben az aeroszol iránti tudományos érdeklődés megélénkült egészségi hatásuk és az éghajlatváltozásban játszott szerepük miatt. Az aeroszolt úgy definiáljuk mint folyékony vagy szilárd részecskék szuszpenzióját gáznemű közegben (Seinfeld és Pandis, 1998; Hinds, 1999). A gáznemű közeg a levegő, részecskék mérete pedig néhány nanométertől mintegy 100 μm -ig terjed. A rendszer egyik legfontosabb tulajdonsága a részecskék méretének eloszlása (Gieré és Querol, 2010), mert számos fontos fizikai és kémia tulajdonságot is befolyásol. A részecskéket elvi és kísérleti okok miatt gyakran három csoportra osztjuk: durva ($d > 2,5 \mu\text{m}$), finom ($d < 2,5 \mu\text{m}$) és ultrafinom ($d < 100 \text{ nm}$) részecskékre (Raes et al., 2000).

Az aeroszol részecskék emissziós forrásokból kerülnek a levegőbe, vagy a levegőben keletkeznek. Az előbbi részecskéket elsődleges részecskének nevezzük, és tipikus forrásai a szélerozió, tengeri permet, az égetésből keletkező részecskék és vulkánkitörések. Ezzel szemben a másodlagos részecskék a légkörben képződnek gázokból és gőzökből nukleáció és kondenzáció útján. Ezen részecskék nagy része a tömeget tekintve szulfát-aeroszol $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ vagy NH_4HSO_4), nitrát aeroszol (NH_4NO_3), és szerves vegyületeket tartalmazó aeroszol (ezekben a különböző molekulák száma meghaladhatja az ezret). A városi aeroszol részecskéinek fő típusait az 1. ábrán mutatom be.

A felsorolt összetevők közül a korom kiemelkedő szerepet játszik mint légszennyező és a globális felmelegedést befolyásoló anyag (Andreae, 1995; Hansen et al., 1998; Hansen és Nazarenko, 2004; Hansen et al., 2005 ; Ramanathan et al., 2005). A korom fekete színű, melynek részecskéi biotömeg és fosszilis tüzelőanyagok tökéletlen égése során keletkeznek, és kezdetektől előforduló légszennyező anyagként is tekinthetjük (Brimblecombe, 1987). A korom részecske töredezett grafén-lapokból hagymahéjszerűen épül fel gömbökké, melyek átmérője 10–50 nm (lásd 1B ábra). A gömbök láncszerű, majd fűrszerű fraktálszerkezetté alakulnak (Cachier, 1998) és nagyobb aggregátumokat is létrehozhatnak.



1. ábra: A Budapest Kutató és Oktató Platformon csipkés Formvar szubsztráton gyűjtött korom aeroszol részecskék transzmissziós elektronmikroszkópos képe (A). A korom gömbök belső szerkezete (B). A felvételeket Pósfai Mihály készítette.

A koromrészecskék a levegőben oxidálódhatnak, illetve szerves anyagokat köthetnek meg a felületükön, ezáltal hidrofilebbé válnak (Andreae és Gelencsér, 2006). Az északi félgömbön meghatározó forrásuk a közlekedés és háztartási tüzelés, míg a déli félgömbön a bozót- és erdőtüzek (Pakkanen et al., 2000). A városokban a közúti gépjárműforgalom, különösen a dízel járművek képviselnek jelentős forrást.

Tudományos diákköri munkám célja a Budapest belvárosában jelenlévő korom aeroszol részecskék légköri koncentrációjának meghatározása néhány órás időfelbontással a téli (fűtési) időszakban a finom mérettartományban, a mérésre szolgáló on-line módszer elvének és működésének ismertetése, illetve a mért koncentrációkból levonható következtetések meghatározása és megvitatása. Munkám részét képezi az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi Campusában a Budapest Kutató és Oktató Platformon (BpART) Salma Imre vezetésével végzett légköri aeroszol kutatásoknak.

2. Irodalmi áttekintés: a korom részecske

A korom aeroszol a szénttartalmú részecskék családjába tartozik. A családot alapvetően három csoportra oszthatjuk: a korom, szerves szén (OC) és karbonát szén (CC). A finom mérettartományban a karbonát tartalom elhanyagolható, ezért a teljes széntartalmat a korom és a szerves szén összege adja, amelyet TC-nek rövidítünk.

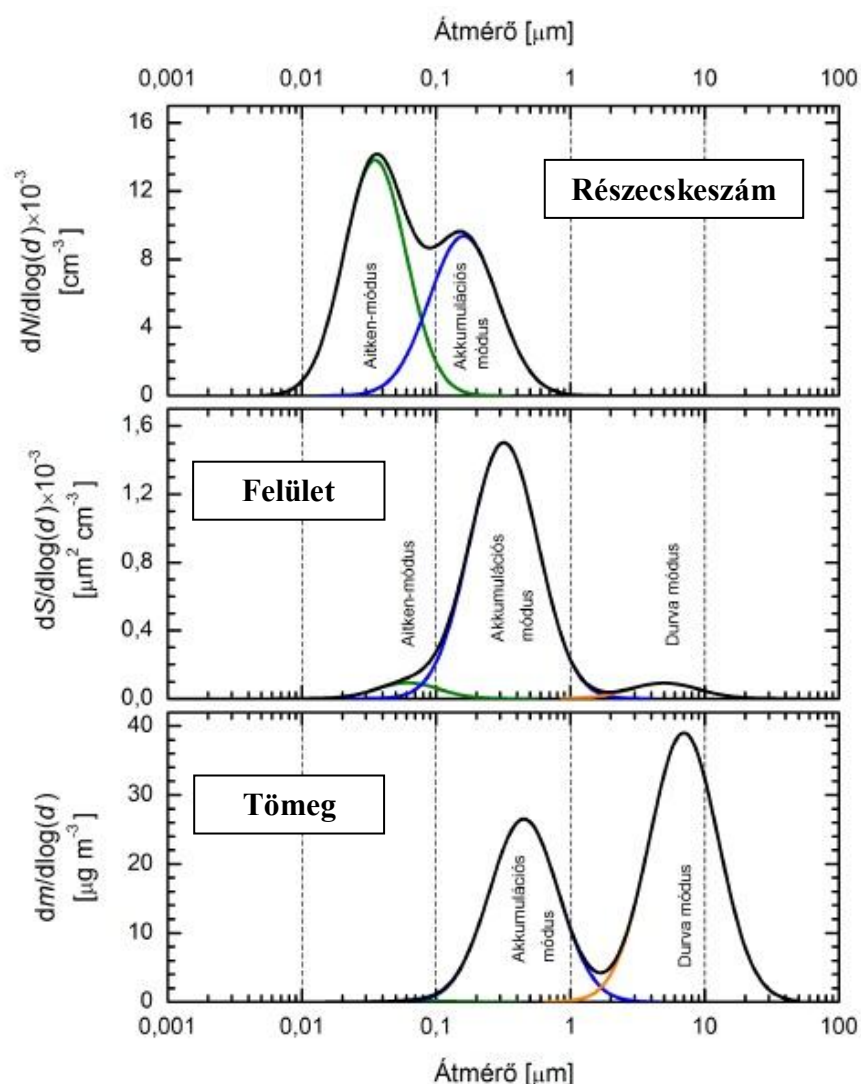
2.1. Méreteloszlás

Az aeroszol részecskék méreteloszlása kiemelkedő fontosságú, mert tulajdonságaik és hatásaik jelentős része összefügg a részecskék méretével. A légköri aeroszol részecskék klasszikus méreteloszlását három módus alkotja: az Aitken-módus, az akkumulációs módus és a durva módus. A 2. ábrán a légköri aeroszol részecskék klasszikus méreteloszlását szemléltetem. Az Aitken-módus maximuma általában 20–90 nm közé esik, az akkumulációs módus maximuma 0,4–0,5 µm tartományban, míg a durva módus maximuma néhány µm körül található. A részecskeszámot tekintve az Aitken-módus részecskéi a legelterjedtebbek a troposzférában, míg a durva részecskék adják a legnagyobb tömegkoncentrációt (Hinds, 1999). A legnagyobb összfelülettel az akkumulációs módushoz tartozó részecskék rendelkeznek, ami a felszínen lejátszódó szorpciós és kémiai folyamatok miatt jelentős.

A meteorológiai paraméterek jellegzetes eloszlásai miatt, illetve az aprítási elmélet következtében a módusokat egyenként lognormális sűrűségfüggvénnyel írhatjuk le (Seinfeld és Pandis, 1998):

$$\frac{dN}{d \ln D} = \frac{N_T}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln \sigma_g} \cdot \exp \left(-\frac{(\ln D - \ln D_{gN})^2}{2 (\ln \sigma_g)^2} \right), \quad (1)$$

ahol N a részecskék száma, N_T összes részecskék száma, σ_g mértani szórás, D_{gN} a részecskék átmérőjének a mértani középértéke (mediánja). A lognormális eloszlás jellemzője, hogy a változó tetszőleges hatványa szintén lognormális eloszlású, ezért az aeroszol részecskék felülete ($\sim d^2$), tömege ($\sim d^3$) vagy térfogata ($\sim d^3$) szintén ilyen eloszlásúnak tekinthető.



2.ábra: A légköri aeroszol részecskék klasszikus részecskeszám, felület és tömeg méreteloszlásai (Salma, 2012)

A korom részecskék magashőmérsékletű, égési folyamatokban keletkeznek. Az ilyen emissziós források tipikusan Aitken-módusú részecskéket emittálnak, amelyek a légköri folyamatok során akkumulációs részecskékké alakulnak át. További növekedésüket kinetikai okok gátolják. Ezen megfontolások alapján megállapíthatjuk, hogy a korom részecskék mintavételezését a $PM_{2,5}$ -méretfrakcióban célszerű elvégezni. A $PM_{2,5}$ -méretfrakció a $2,5\ \mu m$ -nél kisebb aerodinamikai átmérővel rendelkező részecskéket tartalmazza. Ezt erősíti meg a korom koncentráció $PM_{10}/PM_{2,5}$ aránya, amelyik a mérési hibahatáron belül 1-et eredményez (Salma et al., 2004).

2.2. Széntartalmú aeroszol részecskék és mérési módszerei

A szerves aeroszol részecskék molekuláris szintű azonosítása összmennyiségek vagy összegtulajdonságok segítségével történik. Egyik legáltalánosabban használt ilyen mennyiség a szerves molekulákban lévő szén, más néven szerves szén (OC, organic carbon). Az OC tehát valójában műveletileg definiált mennyiség. Az OC kisebb mértékben áll ellen a hőnek és kisebb mértékben abszorbeálódó vegyületekből épül fel, mint a korom. A kormot erősen hőálló, fényelnyelő anyagok alkotják (Pöschl, 2005). Mivel a korom elsősorban az égési folyamatok elsődleges termékeként keletkezik, forrásai általában antropogén jellegű, tökéletlen égési folyamatok. Ez magában foglalja a dízelmotorok, kazánok, háztartási fűtés pl: fafűtés kibocsátását. Az OC részecskék emissziója származhat tökéletlen égésből, biológiai részecskék szuszpenziójából pl: spórák, baktériumok, gombák, növényi hulladék vagy gumi és műanyag kopásából, de eredményezheti illékony szerves vegyületek fotooxidációja is (Hallquist et al., 2009). A fent említett osztályozás széles körben használt, de határ az szerves szén és az elemi szén között mesterséges és módszerfüggő (Schmid et al., 2001; ten Brink et al., 2004).

A termikus módszerrel a minta széntartalmára következtethetünk. Ezzel a technikával az OC-t inert atmoszférában eltávolítjuk kihasználva a szerves vegyületek nagyobb illékonyosságát, majd a kormot oxigén jelenlétében elégetjük. Az O₂ mentes fázisban azonban bizonyos szerves vegyületek pirolízise történik, ami művi effektusként kormot hoz létre a mintában. Az OC és EC közötti helyes vágási értéket kétféle optikai módszerrel állapíthatjuk meg. Az egyik figyelemmel kíséri a szűrő transzmittanciáját (Birch és Cary, 1996), a másik a szűrő reflektanciáját (Chow et al., 1993). Az OC és az EC vágási értéket annak a pillanatnak tekintjük, amikor a pirolizációval módosított transzmittancia vagy reflektancia visszatér a termikus analízis kezdetén mért értékhez. Ennek megfelelően a módszernek két fő változata ismert: az egyik (TOR) a minta reflexiójának a megváltozását, a másik (TOT) a minta transzmittanciájának a megváltozását vizsgálja (Birch, 1998). Az eljárást megnehezíti, hogy nincs éles határvonal a szerves szén és elemi szén között, de a termikus tulajdonságokban, illetve az optikai tulajdonságokban folytonos csökkenés látható, a grafitszerű struktúráktól a szerves vegyületek felé haladva (Pöschl, 2005).

Az EC meghatározásának másik, fő lehetősége az optikai elnyelésen alapuló módszer. Ebben az esetben ismert térfogatú levegőt szívatunk át az eredetileg fehér szűrőn, aminek a feketedését vizsgáljuk. A feketedés mértékéből következtetünk az BC koncentrációjára, mert a 880 nm-es hullámhosszon a finom aeroszol tartományban a korom extrém nagy fényelnyelési tényezővel rendelkezik. Ebben az esetben a kormot „fekete” szén (BC, black carbon) formában minősítjük.

Összehasonlítva az on-line módszerekkel az off-line technikákat, az on-line gyorsabb és kevésbé munkaigényes. Folyamatos időbeli felbontása sokkal jobb. Ezért az on-line technika rögzíthet olyan ingadozásokat vagy eseményeket, melyek az off-line módszerrel nem követhetők. Az off-line módszer előnye azonban a nagyobb megbízhatóság, kisebb a kimutatási és a meghatározási szint. Mindkét módszer alkalmas légköri aeroszol részecskék vizsgálatára.

2.3. Termikus-optikai transzmissziós módszer

A munkám során a termikus-optikai transzmissziós (TOT) szénanalízis módszert használtam, amelyet széles körben alkalmaznak OC és EC meghatározására légköri aeroszolban (Phuah et al., 2009). Az elemzési folyamat lényegében két szakaszban történik. Az eljárás során a szerves aeroszol deszorbeálódik He-atmoszférában, majd a maradékot koromnak tekintjük, és elégetjük oxidáló atmoszférában ($\text{He} + \text{O}_2$). A kemence felfűtését egy kiválasztott hőmérsékleti profil segítségével végeztük maximum 850 °C-ig. A deszorbeálódott széntartalmú fragmensek átáramolnak egy MnO_2 katalizátort tartalmazó kemencén, és teljes mértékben átalakulnak szén-dioxid gázzá. A képződött CO_2 áthalad a nemdiszperzív infravörös detektoron (NDIR), amelyik az analitikai jelet szolgáltatja. Az elemzés második szakaszában a kemence hőmérséklete 500 °C alá csökken. Ezután az EC mérésére kerül sor, mely 2% O_2 és 98% He gáz keverékében történik. Ebben a szakaszban az összes maradék szén oxidálódik és az oxidációs termékek haladnak végig az MnO_2 -n, majd ezt a szén-dioxidot érzékeli az NDIR detektor. A mérés során egy hélium-neon lézer megvilágítja a szűrőt 633 nm-es hullámhosszú fénnel, amely a szűrő transzmittanciájának folyamatos megfigyelését teszi lehetővé. A szűrő fényáteresztő képessége a pirolízis következtében csökken, majd az oxigén szakaszban ismét növekszik. Azt az értéket, amikor a szűrő transzmittanciája visszatér a kezdeti értékhez az OC és

az EC közötti vágási pontnak nevezzük (Birch és Cary, 1996). Az egyes mérések után ismert mennyiségű He-CH₄ gázkeverék szolgál belső vonatkoztatásként.

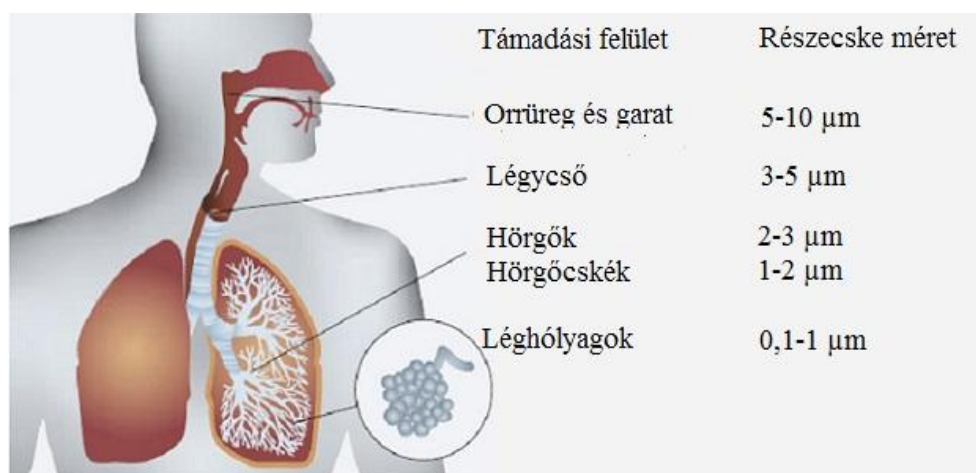
2.4. Környezeti és egészségügyi hatások

A korom részecskére nagy fajlagos felületének és aktív felületi tulajdonságainak köszönhetően égési termékeket és más gázokat (pl. szerves poláris vegyületek), vírusokat, vagy radon-bomlástermékeket is képes megkötni. A korom részecskékhez nagy mennyiségű rákkeltő szén-hidrogének kapcsolódhatnak, melyek ezáltal követik a korom útját, pl. a tüdőbe. A tüdő védekező mechanizmusa hatékonyan tartja vissza a durva részecskéket, de az ultrafinomak átjutnak rajtuk. A káros egészségügyi hatások forgalmas nagyvárosok, iparvidékek szennyezett levegőjében meghatározóak, amely nagyszámú lakost érintenek (Curtis et al., 2006).

A nagy fajlagos felületű aeroszol részecskék katalizátorként is viselkednek a szervezetben, és előidézhetik az oxidatív stressz kialakulását. Az aeroszol részecskék felszínén kémiai reakciók játszódhatnak le és gyökök alakulhatnak ki, melyek a fehérjéket oxidálhatják. Tehát az így létrejött reaktív oxigéntartalmú részecskék képesek a szervezet redoxi folyamatait szabályozni, különösen a mitokondrium működését (Brown et al., 2000, 2001). A kipufogókból származó gáznemű légszennyezők hozzájárulnak az aktív fotokémiai időszak kialakulásához. A nagyvárosokban az erősen szennyezett levegő és a kedvezőtlen meteorológiai jelenségek hatására fotokémiai füstköd (szmog) is kialakulhat.

Az aeroszol részecskéktől eredő egészségügyi terhelés főleg a légzőrendszeren keresztül éri a szervezetet, melyektől csökken a tüdő ellenálló képessége a betegségekkel és más potenciálisan toxikus anyagokkal szemben. Az egészségre gyakorolt hatásuk függ a részecskék fizikai tulajdonságaitól (méret, sűrűség, elektromos töltés, higroszkopicitás), a belégzés módjától. A 10 µm-nél nagyobb részecskék szinte teljesen, 5–10 µm közötti részecskék 60%–80%-ban kiülednek a légutakban (Kertész, 2000). Az egyik legveszélyesebbek a 2,5 µm-nél kisebb részecskék, melyek bejutnak a légzőszerveink legmélyére, a léghólyagokba is (Magyar, 1998). Mivel ez a mérettartomány tartalmazza az antropogén eredetű részecskék döntő részét, köztük számottevő toxikus, karcinogén vegyületet is (átmeneti fémek, PAH vegyületek, korom), egészségre gyakorolt hatásuk különösen nagy. Az aeroszol krónikus légzőszervi

megbetegedéseket (légcsőgyulladás, tüdőhegesedés) és daganatos betegségeket is okozhat, a meglévő légzőszervi megbetegedések súlyosbodása fokozza az asztma kialakulását és súlyosságát. Korreláció figyelhető meg a részecskék koncentrációja és a szív- és érrendszeri megbetegedések között is.

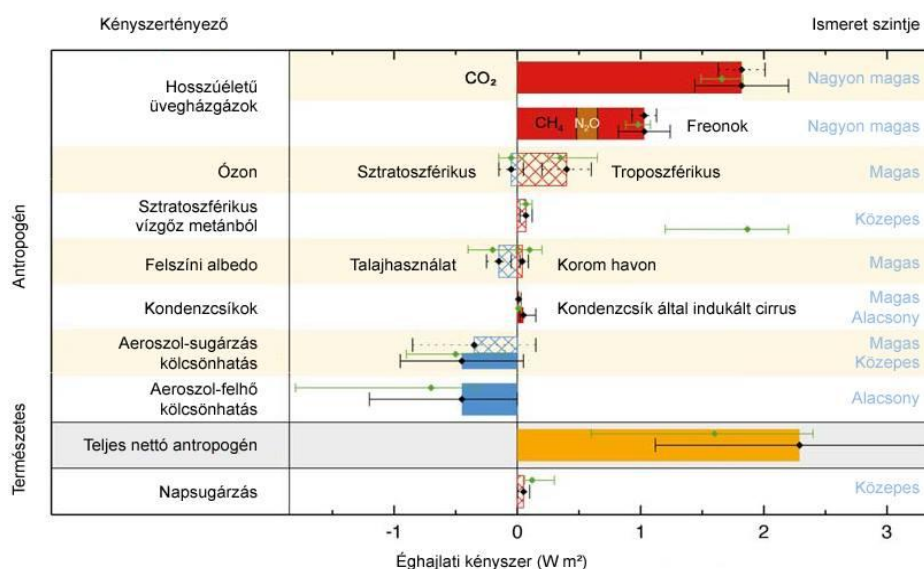


3. ábra: A légzőrendszer sematikus váza

(<http://www.naneos.ch/products.htm>)

Epidemiológiai vizsgálatok alapján kimutatható, hogy az aeroszol szennyezéssel kapcsolatos halálesetek elsősorban szív- és érrendszeri okokra vezethetők vissza (Nenmar et al., 2002). A tüdőbe jutott káros anyagok megnövekedett koncentrációja miatt gyulladásos tünetek is felléphetnek. Ezek a nanoméretű, vízdoldhatatlan részecskék ráadásul átjutnak az epithel sejtek falán, bekerülnek a véráramba, megváltoztathatják a vér tulajdonságait (fibrinogén, vérlemezék száma) és funkcióit, illetve eljuttatják őket más szervekhez is (Oberdörster et al., 2005). A vér fibrinogén szintjének megemelkedésével növekedhet a vér viszkozitása, és ezáltal alvadékonysága, mely növeli a trombózis kialakulásának esélyét.

A légköri aeroszol közvetlen és közvetett módon is hatással van az éghajlatra. A közvetlen hatást a napsugárzás elnyelése és szóródása okozza. Az üvegházhatású gázok (H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , ózon, CFC-k) elnyelik a földfelszínről távozó IR sugárzás nagyobb részét, így melegebb globális átlag hőmérsékletet alakítanak ki a Földön ($-18\text{ }^\circ\text{C}$ helyett $15\text{ }^\circ\text{C}$). Ezzel szemben az aeroszol részecskék a bejövő- és kimenő oldalt is képesek befolyásolni. Vannak olyan aeroszol részecskék, melyek negatív sugárzási kényszeret okozva csökkentik a felszínre érkező rövidhullámú energia mennyiségét (Pilinis et al., 1995). Ezek a részecskék főként nem elnyelő összetevőket tartalmaznak (szulfát és szerves szén). Másik csoportjuk elnyeli a napsugárzást mint például a korom és ezzel pozitív éghajlati kényszeret eredményeznek. Az aeroszol összesített közvetlen hatása hűtő (lásd 4.ábra).



4. ábra: Az éghajlati kényszer antropogén és természetes összetevői és mértéke az 1750 és 2005 közötti időszakban (IPCC, 2013)

Az emberi tevékenység is jelentősen befolyásolta az üvegházhatású gázok és az aeroszolok globális légköri koncentrációjának növekedését. Motorok és tüzelőberendezések tökéletlen égése során korom, szén-dioxid, nitrogén-oxid, kén-dioxid is szennyezi a levegőt. Ezek következtében savas eső is kialakulhat.

Az aeroszol közvetett hatása a felhőképződéshez vagy az albedóhoz köthető (Lohmann és Feither, 2005). A hatás befolyásolja a felhők mikrofizikai tulajdonságait. Az éghajlatot meghatározó legfontosabb egyedi tényezőként a

felhőkondenzációs magvak (CCN) kialakulása tekinthető (IPCC, 2007). A kondenzációs magvak főként 100–500 nm átmérőjű, vízdoldható aeroszol részecskék, amelyek többsége nukleációt követő növekedés során éri el a kívánt méretet (Merikanto et al., 2009). A feláramlás során levegő hőmérséklete csökken és a benne található vízgőz túltelítetté válhat. A vízgőz CCN részecskék felületére kondenzálódik, és cseppek jönnek létre. Energetikai okok miatt szükségesek a felhőkondenzációs magvak a felhő cseppek kialakulásához, amikre a vízgőz kondenzálódik (Mészáros, 1997; Seinfeld és Pandis, 1998).

Ha a koromrészecskék a hóra vagy jégkristályokra ülepednek, akkor a légköri hőmérsékletgradiens csökkenését idézik elő. A felszíni hűtő hatás és a légköri fűtő hatás megváltoztathatják a légkörben a függőleges hőmérséklet-eloszlást, ezáltal a víz globális körforgását (Ramanathan, 2001). Az aeroszol részecskék összességében hűtő hatással jellemezhetők, így fontos szerepet játszanak az éghajlat keletkezésében (Borsós és Salma, 2011). Ugyanakkor érdemes megemlíteni, hogy a közvetett hűtő hatás bizonytalansága a legnagyobb az összes éghajlati tényező között.

3. Kísérleti rész

3.1. Mérési időszak és helyszín

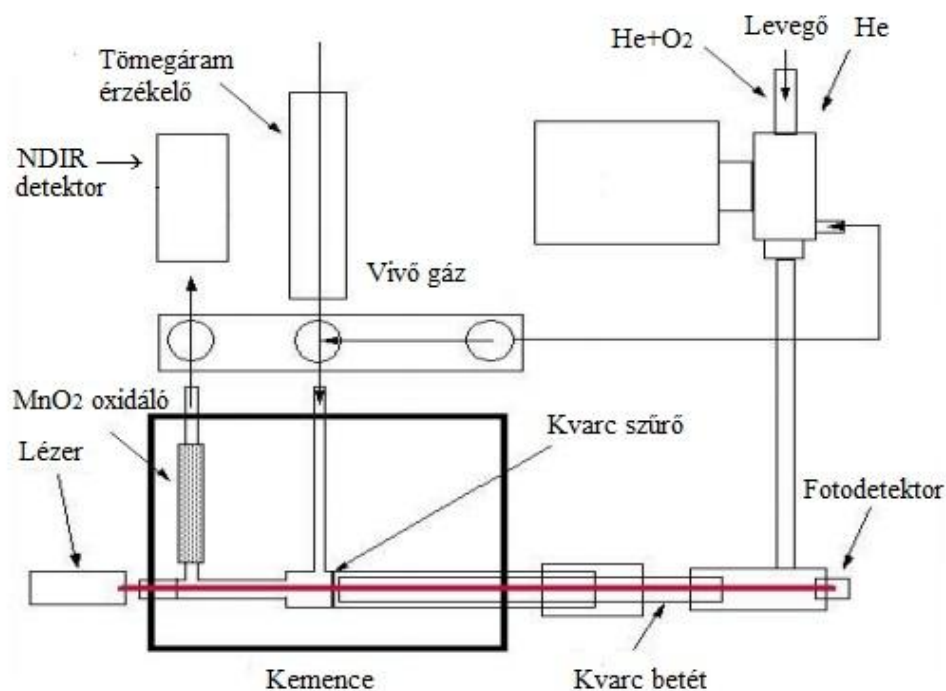
Munkám a Carbon2014W elnevezésű nemzetközi kampányhoz kapcsolódik, melyet 2014. február 25. 10:36-tól március 11. 7:22-ig végeztünk. A helyszín az Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Kémia Intézetének második emeleti északi erkélye. Itt található BpART mérőállomás (<http://salma.web.elte.hu/BpArt/index.html>), amelynek GPS koordinátái: északi szélesség $47^{\circ} 28' 25.22''$; keleti hosszúság $19^{\circ} 03' 48.65''$; tengerszint feletti magasság: 117 m (5.ábra). A helyszín kiválóan alkalmas az átlagos, jól átkevert, belvárosi levegő vizsgálatára. A korom koncentrációjának meghatározása valós idejű szerves szén és elemi szén analizátorral történt. Az aeroszoltömeg mérését a kúpos elemű oszcilláló mikromérleggel (TEOM) végeztem. A helyszíni meteorológiai állomás műszereivel hőmérsékletet és relatív páratartalmat mértünk termisztor és vízgőzmérés elvek segítségével.



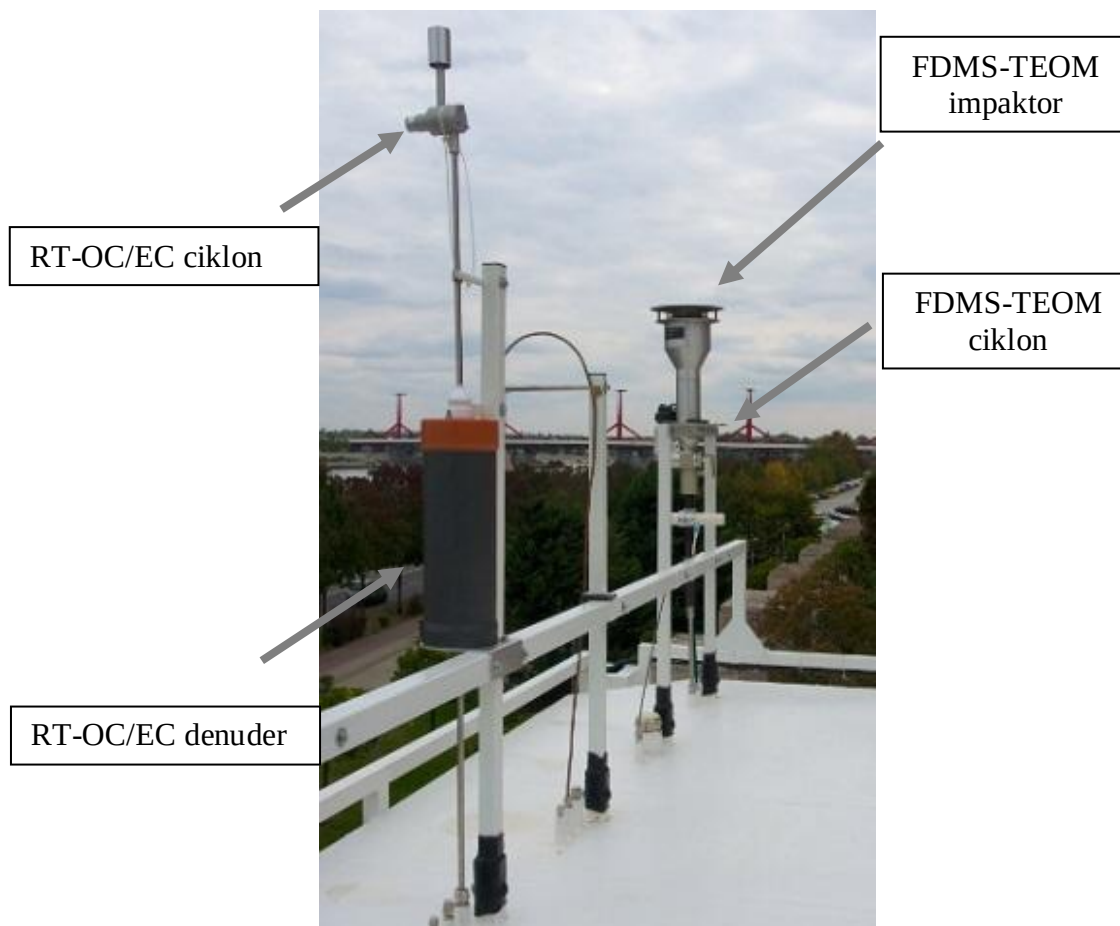
5. ábra: A mérés helyszíne a Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (BpART)

3.2. A valós idejű szerves szén és elemi szén analízátor

A valós idejű szerves szén és elemi szén (RT-OC/EC) analízátor egy olyan műszer, amelyik az OC és EC mérést végzi kvázifolytonos, mintavétel és azonnali elemzés formájában. Az analízátor előtt található egy ciklon, ami a kívánt $PM_{2,5}$ -frakció leválasztását szolgálja. Ezt követi az aktív szénen tartalmazó, párhuzamos lemezekből álló diffúziós denuder, ami eltávolítja az illékony és közepesen illékony szerves gázokat a szűrőre áramló levegőből. Ezek adszorpciója jelentős abszorpciós művi effektust okozna (7.ábra). A gázok járuléka és ennek szórása a szerves anyaghoz a $PM_{2,5}$ -mérettartományban a nappali és az éjszakai időszakban $(37 \pm 18)\%$ és $(46 \pm 16)\%$ volt egy korábbi tavaszi mérés eredményei szerint (Salma et al., 2004), ami a téli időszakban még jelentősebb lehet. Ha ezek eltávolítása nem történik meg, akkor abszorbeálódhatnak a kvarcszűrőn és ezáltal látszólag nagyobb lesz az aktuális OC érték. A méréshez Pallflex Tissnequartz kvarcszálal szűrőket használtam. A levegő 8 l/min sebességgel $1,5 \text{ cm}^2$ felületű szűrőn halad át. A mintavétel befejezése után az analízátort héliummal öblítettük át. Ezután megkezdődik az analízis a kiválasztott hőmérsékleti protokoll szerint és a kemence hőmérséklete növekedni kezd (6.ábra).



6. ábra: Az RT-OC/EC sematikus rajza



7. ábra: Az alkalmazott mintavevő berendezések látképe
a BpART mérőállomáson

3.3. Hőmérsékleti protokoll, kalibrálás és kiértékelés

A leggyakrabban alkalmazott termikus protokoll: a NIOSH (Birch és Cary, 1996), és az EUSAAR2 (Cavalli et al., 2010). Bár ezek a protokollok jó egyezést mutatnak teljes szén meghatározására, de az elemi szén és szerves szén mérésénél különböző koncentrációkat kaphatunk (Chow et al., 2001; Schmid et al., 2001). A NIOSH protokoll az asztali, míg az EUSAAR2 protokoll a valós idejű készülékeknél ajánlott. Mindkét protokoll széles körben használható városi aeroszol minták vizsgálatára.

A két módszert összehasonlítva a tartózkodási időben és hőmérsékleti lépésekben tapasztalható különbség. A NIOSH esetén a maximális hőmérséklet 940°C, míg az EUSAAR2-nél 850°C. Az általunk alkalmazott EUSAAR2 hőmérsékleti protokollnál különösen fontos a tartózkodási idő a legmagasabb hőmérsékletű lépésben hélium atmoszférában, hogy csökkentse pirolízist, és OC

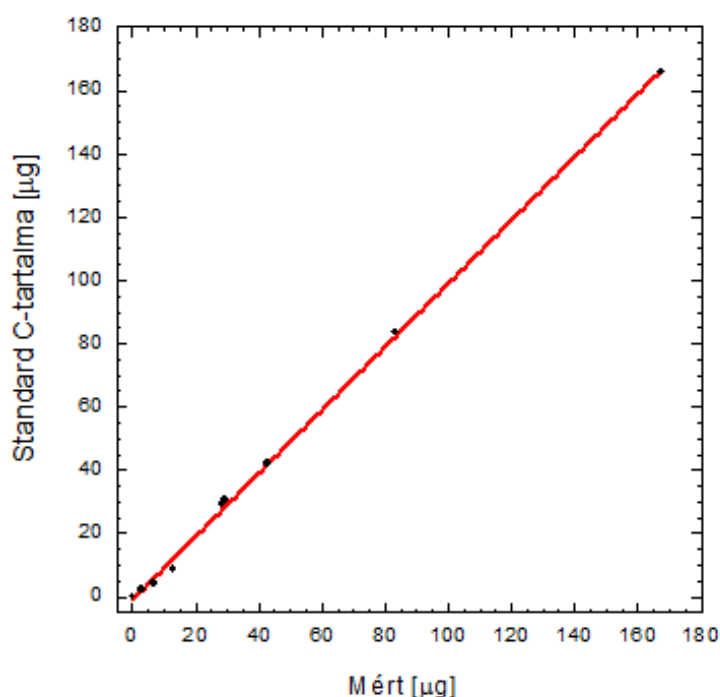
elérje deszorpcióját ezen a hőmérsékleten. Az 1. táblázatban tüntettem fel a pontos hőmérsékleti lépcsőket és tartózkodási időket. Hasonlóképpen lényeges az időtartam a He/O₂ módban 850 °C körül, mely lehetővé teszi a fényelnyelő szén teljes átalakulását a kalibrálás előtt, ezáltal megakadályozza ezen specieszek metán csúcsot zavaró hatását. Tehát az EUSAAR2 az alacsonyabb hőmérsékletű lépések használatát és a hosszabb tartózkodási időt preferálja. Ezek a tulajdonságok előnyt jelentenek a NIOSH módszerrel szemben, ahol megfigyelték a fényelnyelő szén veszteségét inert atmoszférában, mely az EC korai átalakulásának volt köszönhető.

1. táblázat: Az EUSAAR2 analízis protokoll hőmérsékleti lépcsői és tartózkodási idői (Cavalli et al., 2010)

Szakasz	Hőmérséklet [°C]	Időtartam [s]
He 1	200	120
He 2	300	150
He 3	450	180
He 4	650	180
He/O ₂ 1	500	120
He/O ₂ 2	550	120
He/O ₂ 3	700	70
He/O ₂ 4	850	80

A kalibrálás célja az adott mérőeszköz válaszele és a mérendő anyag mennyisége közötti közvetlen összefüggés meghatározása. Első lépésben a kvarcszálas szűrőket készítettem elő, amelyeket 8 órán keresztül 550°C-on kemencében izzítottam, és exsikkátorban hagytam szobahőmérsékletre hűlni. Ezután a szacharóz törzsoldat elkészítése következett, melynek koncentrációja 4.2065 µg/µL volt, majd elkezdtem a meghatározott mennyiségű törzsoldatot felcseppenteni a szűrőkre, melyeket végül az előmelegített (50°C)

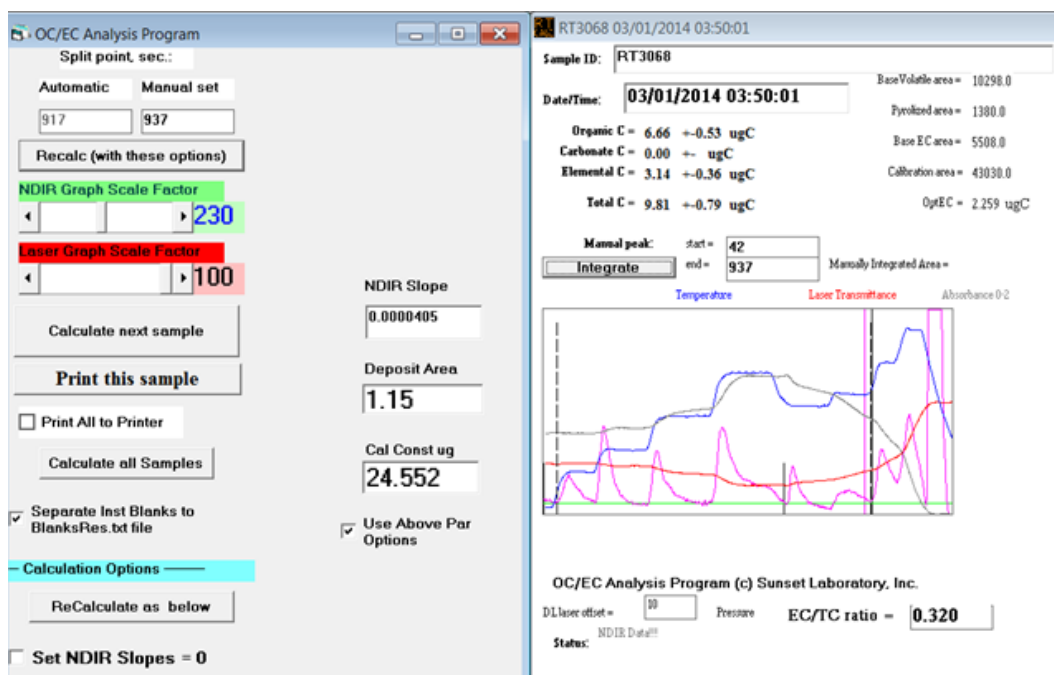
szárítószekrényben szárítottam. Figyelembe kellett venni, hogy a hőmérséklet ne haladja meg a 70°C-ot, mert ekkor elszénesezés következne be. Második lépésben a szűrőket egyenként behelyeztem az RT-OC/EC analizátorba, és megmértem a rajtuk lévő összes széntartalmat. A kapott értékre egyenest illesztettem, aminek meredeksége határozta meg a kalibrációs állandót.



8. ábra: A kalibráció során kapott kalibrációs egyenes

A valós aeroszol minták eredményeit a vezérlő számítógép fájlokba rendezte termikus spektrum formájában. Ezen adatok kiértékelése az RTCalc631 számítógépes programmal történt meg. A kiértékelés során a mért görbékől lineáris alapvonal levonása történt. Ezután a csúcsterületeket digitális összeadással meghatároztam, majd a belső vonatkoztató és kalibrációs tényező segítségével anyagmennyiséggé számítottam át. Az OC és EC közötti vágási értéket minden esetben ellenőriztem, és szükség szerint pontosítottam. Végül az ismert, átszívott térfogat felhasználásával légköri koncentrációt határoztam meg. A 9. ábra szemlélteti RTCalc631 kiértékelő programot, a kijelző felületének tipikus képét, OC, pirolitikus szén, EC és metán csúcsokkal, valamint a hőmérsékleti protokoll beállított és megvalósított időmentével. Az első négy csúcs a szerves szén mennyiségét ábrázolja. A He+O₂ gázelegy beengedése után a pirolizált szén csúcsa következik, majd ezután az EC megjelenése látható. Az

ábrán zöld színnel az alapvonalat, piros színnel a transzmittanciát, szürkével pedig az abszorbanciát ábrázoltam.

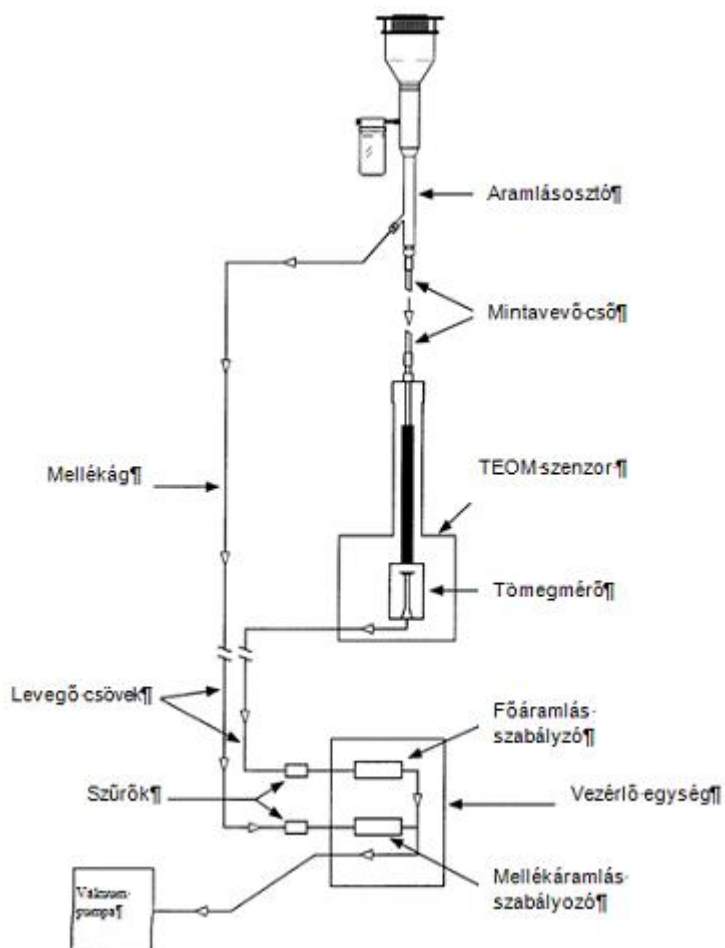


9. ábra: RTCalc631 kiértékelő program számítógépes felülete és egy aeroszol minta hőmérsékleti spektruma

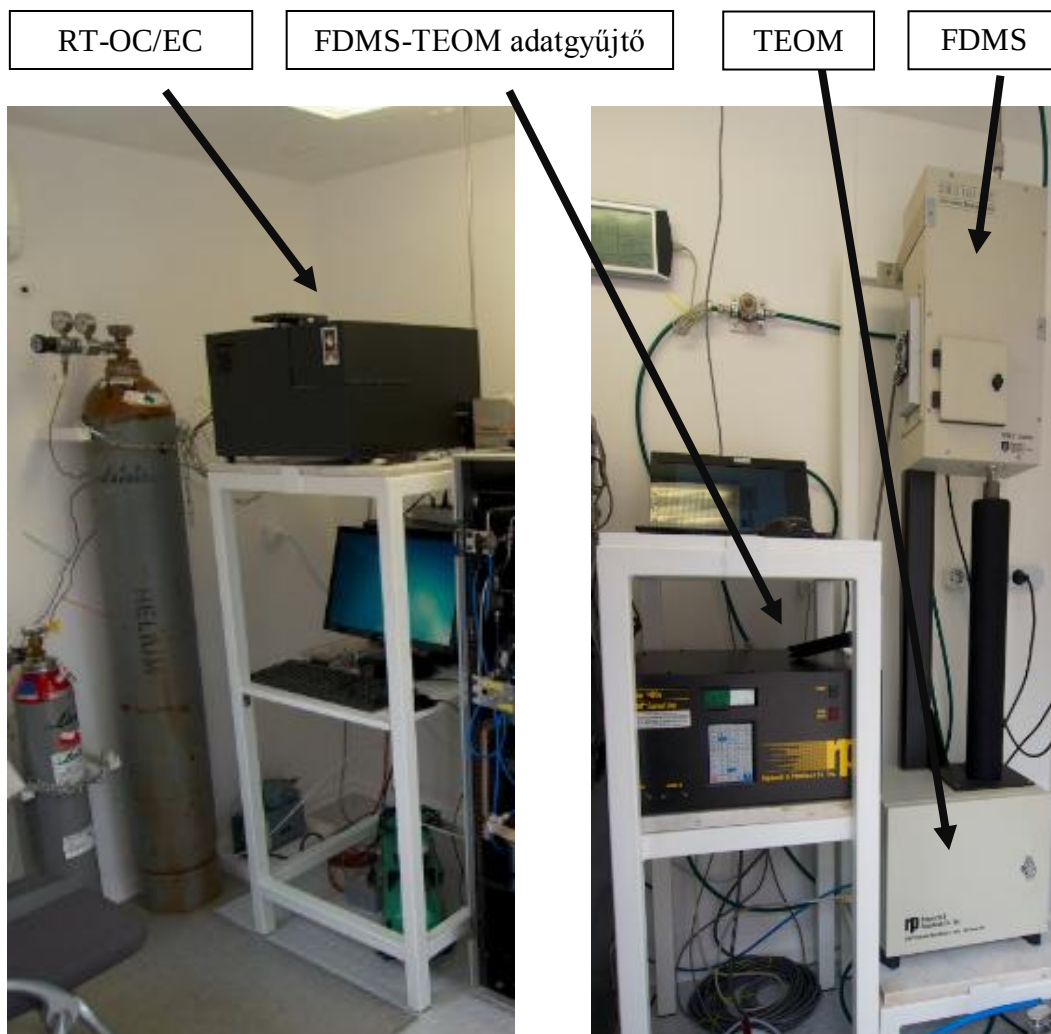
3.4. Kúpos elemű oszcilláló mikromérleg

A légköri korom koncentrációkat előnyös az aeroszol részecskék össztömegére vonatkoztatni, mert ezzel járulékokat tudunk meghatározni és így a forrás intenzitásáról kapunk adatokat. A kiértékeléshez $PM_{2,5}$ -méretfrakciójú tömegkoncentráció nagy időfelbontású adatsorára volt szükség segédmenyiségként, amelyet egy on-line módszerrel mértem. A műszer a kúpos elemű oszcilláló mikromérleg (TEOM), melynek működési elvét a 10. ábrán mutatom be. A szűrőfelületre rakódó részecskék frekvencia-módosító hatását felhasználva, mint mikromérleg működik a készülék. Ahogy változik az aeroszol tömege a kúpos elemen, úgy változik meg a rezgő kvarckúp frekvenciája. A vízgőz esetleges kondenzációja és a közepesen illékony komponensek távozása kétkörös kifagyasztó rendszerrel (FDMS, Filter Dynamic Measurement System) akadályozható meg. A műszer első része előleválasztó légbeszívóból (impaktorból és ciklonból) áll. A levegő 3 l/perc áramlási sebességgel tovább halad az érzékelő egységbe. A tömegmérő fontos része a kúpos elem, mely kvarc egykristályból

készült. A csonka kúp falán egy állandó mágnes található, így a váltakozó elektromágneses térben rezgéseket hoz létre. A kvarckúp felső része egy szűrőhöz kapcsolódik, amelyre a levegőből érkező részecskék kiülednek, így a kvarckúp rezgési frekvenciája is megváltozik, amelyből tömegnövekedésre lehet következtetni. A mérőrendszer időfelontása 6 perc.



10. ábra: A kúpos elemű oszcilláló mikromérleg vázlatos rajza



11. ábra: Az RT-OC/EC és az FDMS-TEOM látképe
a BpART mérőállomáson

4. Eredmények és megvitatásuk

A mérési kampány során összesen 82 termikus spektrumot vettem fel, amelyek kiértékelésével állítottam elő az OC és EC koncentrációból álló adatsorokat. Az FDMS-TEOM hat perces adatsorát a mintagyűjtési időszakoknak megfelelően integráltam, amivel a $PM_{2,5}$ -méretfrakciójú tömegkoncentrációkat kaptam.

4.1. Átlagértékek

Az 1. táblázatban összefoglaltam a kampány során kapott adatsorok tartományát, mediánját, középértékét és szórását. A $PM_{2,5}$ -frakció tömegkoncentrációját összehasonlítottam a 2002. április-május között mért adatokkal. A $PM_{2,5}$ tömegkoncentráció akkor 8 és $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ között változott, mediánja $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Salma et al., 2004) volt, amelyek lényegében azonosak a jelenlegi adatokkal ($8,4\text{--}55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mediánja $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Az európai értékeket vizsgálva ebben a mérettartományban 2010-ben, az éves átlag $3\text{--}35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -ig (Putaud et al., 2010) terjedt, a háttér környezettől a városok felé haladva Északnyugat- és Dél-Európába. Budapest belvárosának aeroszol szennyezettsége a szokásos európai tartományba esik, és a felső harmadba tartozik. Meg kell említeni ugyanakkor, hogy a jelenlegi értékek viszonylag rövid időszakra vonatkoznak, és nem tekinthetők érvényesnek az egész évre.

Az EC koncentrációjának mediánját ($2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) és az OC koncentrációjának medián értékét ($4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) szintén összevettem a 2002 tavaszán mért adatokkal. A 2002-ben tavaszi időszakban végzett kampány színhelye, Budapest belvárosának egyik utcakanyonja, a Rákóczi út volt. Tehát egy fűtésen kívüli időszakot viszonyítok egy enyhe, téli időszakhoz. A téli hónapokban nagyobb koncentrációt vártam az OC-ra és az EC-re nézve. A fosszilis üzemanyagok és a biomassa tüzelés hozzájárul az OC érték növekedéséhez. A fafűtés és a szénégetés a régióban, illetve a dízelmotorok emissziója viszont az EC mennyiségét növelik, mely a téli időszakban várhatóan nagyobb. Az utcakanyon nappali EC és OC koncentrációjának mediánjai $3,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, illetve $6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ volt (Salma et al., 2004). Az általam mért értékeket összevetve a belvárosi eredményekkel 1,6-szoros csökkenés tapasztalható. A különbség leginkább az eltérő mintavételezési hellyel magyarázható. A

Lágymányosi Campuson kapott adatok a Duna környezetére vonatkoznak, ahol a folyó felett a szabad légtérben gyakran szélcsatorna képződik, ami ez felhígítja a szennyezett levegőt. Ezzel szemben a belvárosban 25–30 méter magas épületek között, nyílt légtér hiányában, az utcakanyont lassabb légcserre jellemzi és a felhígulás korlátozott. Így a légszennyezettség mértéke is nagyobb, amit a tömegközlekedés és a gépjárműforgalom fokozottan befolyásol.

A meteorológiai paraméterek vizsgálata kulcsfontosságú, hiszen ezek (különösen a keveredési réteg vastagsága és a szélesebbesség) lényegesen módosíthatják az aeroszol részecskék koncentrációját. A hőmérséklet a vizsgált időszakban 3,3 és 14 °C között változott, 8,8 °C-os átlaghőmérséklettel. A szélesebbesség 0,5 és 3,6 m/s között mozgott, mely kevésbé szeles időnek mondható. A relatív páratartalmat 35%–99% között mértük, mediánja 78% volt. Az OC és EC koncentráció növekedésének szempontjából ezek kedvezőek.

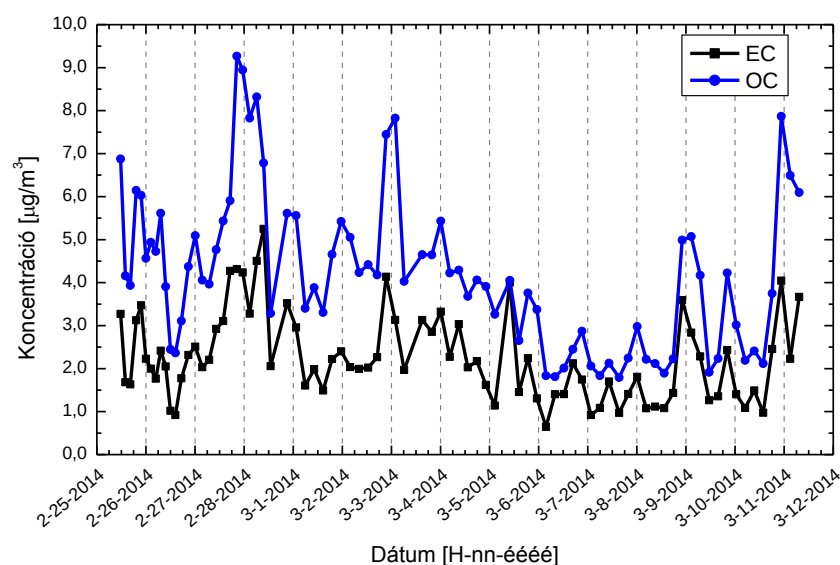
2. táblázat: A szerves szén (OC), elemi szén (EC) és a teljes szén (TC) koncentrációjának, a PM_{2,5}-méretfrakciójú aeroszol részecskék tömegkoncentrációjának, illetve a meteorológiai változóknak a tartománya, mediánja, középértéke és szórása a mérési kampány során

	Tartomány	Medián	Középérték	Szórás
OC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1,8–9,3	4,1	4,2	1,8
EC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0,6–5,2	2,1	2,3	1,0
TC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	2,5–13,6	6,2	6,5	2,7
PM _{2,5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8,4–55	26	26	11
Hőmérséklet [°C]	3,3–14	8,6	8,8	2,5
Relatív páratartalom [%]	35–99	78	77	14
Szélesebbesség [m/s]	0,5–3,6	1,6	1,6	0,7

4.2. Időbeli változékonyság

A 12. ábrán az OC és az EC időbeli változását tüntettem fel a mérési kampány során. Az OC és EC koncentrációjának változása hasonlóan alakult a

vizsgált időszakban (korrelációs tényező: 0,996), ami egyrészt a közös forrásukra utal, de fontosabb lehet a helyi meteorológiai viszonyok változása. A keveredési réteg dinamikája például együtt változtatja a légköri koncentrációkat. Az időmenet jellege rendszertelen. Megfigyelhetők olyan periódusok, mikor mindkét anyag koncentrációja kisebb volt. Ezek a periódusok a hétvégék voltak, amihez részben hozzájárulhat a hétvégi kisebb forgalom. A közúti forgalom hatásának korlátozott jellegét mutatja, hogy a munkanapokon a forgalmi adatok időmenete és átlagértéke nagyon hasonlóan alakultak, ami nem tükröződik a légköri koncentrációk rendszertelen változásában. A nappali és éjszaki mérések adatait összevetve, szignifikáns különbséget nem tapasztaltam. Megvizsgáltam a délelőtti órákat, ekkor mind az szerves szénre, mind az elemi szénre nagyobb értékeket mértem az átlagos értéknél ($4,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, illetve $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ami a markáns reggeli csúcsforgalomnak köszönhető. A maximális OC értéket ($9,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) február 27-én csütörtök este, 28-án péntek hajnalban figyeltem meg. A maximális EC eredményt ($5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) február 28-án péntek reggel kaptam. A korom és a szerves aeroszol koncentrációjához a közlekedés mellett a fűtés és a háztartási tevékenység (főzés) hasonló arányban járult hozzá. Az aktuális koncentráció alakulásáért leginkább a helyi meteorológiai viszonyok a felelősek. A fent említett napokon alacsonyabb volt hőmérséklet (6°C) az átlagos hőmérsékletnél (9°C), és a szélsebesség (1 m/s) is kevesebb volt az $1,6 \text{ m/s}$ -os átlagértéknél. A legkisebb értékeket is figyelembe véve, a szerves szénnél $1,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t mértem, míg az elemi szénre $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -t. A meteorológiai paramétereket vizsgálva a hőmérséklet (9°C) és a szélsebesség ($3,2 \text{ m/s}$) is viszonylag nagyobb volt ebben az esetben, az átlagosnál. Mindez szintén a koncentráció csökkenését okozhatja.



12. ábra: A szerves szén és az elemi szén koncentrációjának változása a mérési időszakban

4.3. Koncentrációarányok

A koncentrációarányok értékes információkat tartalmaznak a széntartalmú vegyületek jelentőségéről és az elsődleges/másodlagos szerves aeroszol arányokról. Az egyedi arányok tartományát és átlagértékeit a 3. táblázatban foglaltam össze. Megvizsgáltam az elemi szén járulékát a $PM_{2,5}$ -tartományú aeroszol részecskék tömegéhez. A 2002-es adatokhoz nyúltam vissza, ahol $(14 \pm 6)\%$ volt az EC tömegjáruléka a $PM_{2,5}$ -höz (Salma et al., 2004). A mi eredményünk alacsonyabbnak bizonyult $(8,9 \pm 2,5)\%$, ami ismét a mérési helyek közötti különbségre vezethető vissza. Érdekes megjegyezni, hogy a városközeli háttérben a korom koncentrációja és járuléka kb. 1 nagyságrenddel kisebb. Az európai EC adatokat is megvizsgáltam. Északnyugat-Európában az EC értéke a $PM_{2,5}$ -tartományban 7% körüli. Hasonló eredményt mértek Dél-Európában is (8%), míg Közép-Európában nagyobb EC járulék volt tapasztalható (14%) (Puteaud et al., 2010). A budapesti érték hasonló tehát más európai városokkal összehasonlítva.

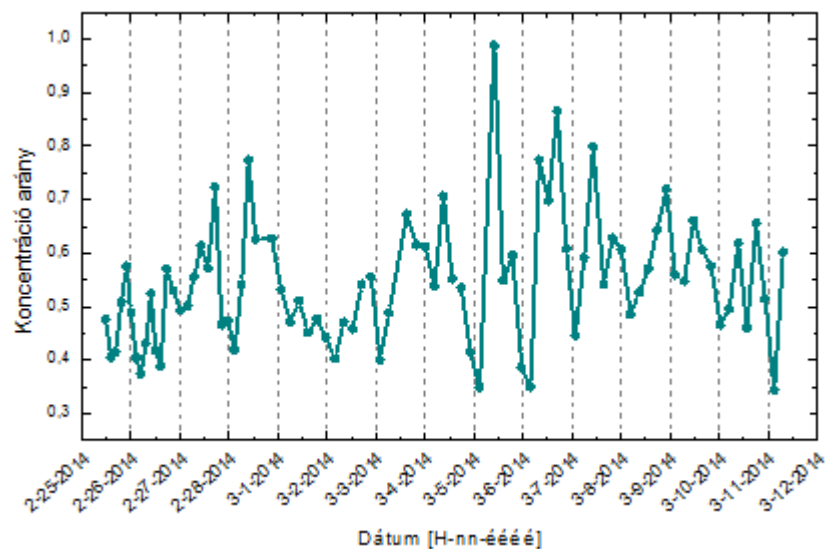
A szervesanyag-tartalmat a szerves széntartalomból tudtam kiszámítani, melyhez 1,6-os konverziós faktort használtam. A konverziós tényező az O, H, S, elemek átlagos tartalmát fejezi ki, ami a szerves molekulákban környezetfüggő és a városi oxidatív környezetben az 1,6-os érték jól közelíti a valóságot (Russel 2003; Turpin és Lim, 2001). A 2002-ben mért OM/PM arány a PM_{2,5}-ös tartományban (43±9) % (Salma et al., 2004). Az általam kapott adat (26±5) % kisebbnek bizonyult a különböző mérési helyszínek miatt. A szervesanyag-tartalom és a PM_{2,5}-frakció hányadosából a szerves járulékokra tudtam következtetni. A biomassza tüzeléséből származó részecskék tartalmazhatnak szerves járulékokat mint például a humuszszerű anyagok (HULIS) és a policiklikus aromás szénhidrogének (PAH). Ezek mennyisége szintén a városi forgalommal és a mérési helyszíneken lévő koncentráció hígulásával hozhatók összefüggésbe.

3. táblázat: A koncentrációarányok tartománya, mediánja, átlaga és szórása a PM_{2,5} méretfrakcióban

Arány	Tartomány	Medián	Középérték	Szórás
EC/PM [%]	4,5–15,8	8,6	8,9	2,5
OM/PM [%]	16–41	25	26	5,4
EC/OC [%]	34–99	34	35	7,2
(EC+OM)/PM [%]	22–56	54	54	12

Az OC/EC arány fontos információval szolgálhat az elsődleges és a másodlagos szerves aeroszol relatív koncentrációjáról. Az előzőekhez hasonlóan elsőként a maximum (99%), a minimum (34%), az átlag értéket és a szórást (54±12)% vizsgáltam. Nagyobb arányban a reggeli és a délutáni órákban volt jelen a másodlagos szerves aeroszol. A korai időpontok a kipufogógázból emittálódó légszennyező anyagokkal hozhatók összefüggésbe. A délutáni szakaszok viszont fotokémiaiilag aktív időszakot jelentenek. A városi környezetben általában az elsődleges szerves aeroszol mennyisége nagyobb, de

néhány fotokémiai aktív időszakban a másodlagos szerves járulékok meghaladják a közvetlenül kibocsátott szerves vegyületek koncentrációját.



13. ábra: A szerves szén és elemi szén koncentrációjának aránya a mérési időszakban

A táblázat utolsó sorában az elemi szén és szerves anyag összegének aránya szerepel a $PM_{2,5}$ -tartományban (mediánja (34%) és középértéke $(35 \pm 7,2)\%$), mely a széntartalmú aeroszol járulékokot adja meg. Ezekből az adatokból arra lehet következtetni, hogy a széntartalmú összetevők mellett más, szervesetlen összetevők, főleg a szulfát aeroszol és felszíni eredetű komponensek szintén jelentős járulékokat képviselnek. Ilyen összetevők például a városi por reszuszpenziójával kerülhetnek a levegőbe.

5. Összefoglalás

Budapest levegőminőségét mintegy 100 éve vizsgálják. A korom koncentrációjára mindig különös figyelmet fordítottak, mert az éghajlati és egészségügyi hatások miatt rendkívül fontos. Nagy fajlagos felületének köszönhetően különböző gázokat és vírusokat is képes megkötni, melyek a részecskékkel együtt mozognak és a tüdőbe juthatnak. Fő emissziós forrása a tökéletlen égési folyamatok: a dízelmotorok, a fosszilis és biomassza tüzelőanyagok. A korom aeroszolt korábban optikai módszerekkel mérték. Az elmúlt években váltak csak lehetővé a termikus és termikus-optikai elveken alapuló módszerek, és különösen ezek on-line alkalmazása.

A tudományos diákköri munkám fő célja a korom aeroszol részecskék koncentrációjának és tulajdonságainak meghatározása a budapesti PM_{2,5} méretfrakcióban. Méréseket végeztem az ELTE TTK Lágymányosi Campusába telepített BpART mérőállomáson 2014. február 25. és március 11. között, két hétig. A szerves szén és elemi szén mennyiségét valós idejű szerves szén és elemi szén analizátorral (RT-OC/EC) mértem, a termikus-optikai módszert felhasználva, az EUSAAR2 hőmérsékleti protokollt alkalmaztam a szerves szén és elemi szén szétválasztására. Mérési eredményeimet a részecskék tömegkoncentrációjának mérésével és alapvető meteorológiai paraméterek meghatározásával egészítettem ki.

A PM_{2,5}-méretfrakció tömegkoncentrációját (8,4–55 µg/m³) összehasonlítottam az 2002. április-május között, Budapest belvárosának egyik utcakanyonjában kapott adatokkal, amelyek nagyon hasonlóak voltak. Következő lépésben vizsgáltam a szerves szén és elemi szén tömegkoncentrációját. Az OC és EC koncentrációjának mediánja rendre 4,1 µg/m³ és 2,1 µg/m³ volt. Ezeket az adatokat a 2002 tavaszán a belvárosi utcakanyonban vizsgált értékekkel (6,8 µg/m³, illetve 3,4 µg/m³) hasonlítottam össze. A belvárosi értékek nagyobbak bizonyultak főleg a nyílt légtér hiánya miatt. A Duna mellett elhelyezkedő BpART mérőállomás környezetében gyakran szélcsatorna képződik, ami felhígítja a szennyezett levegőt. A hőmérséklet a kampány időszakában 3,3 és 14 °C között ingadozott, a szélsébség 0,5 és 3,6 m/s között mozgott, míg a relatív páratartalom 35%–99% volt. Tehát az EC és OC koncentrációjának változásához a helyi meteorológiai körülmények nagyban hozzájárultak.

Az EC és OC időbeli változékonysága periódusokra bontható. Kisebb koncentrációkat a hétvégén mértem, a kisebb tömegközlekedésnek és a gépjárműforgalom csökkenésének köszönhetően. Az időbeli változás fő befolyásoló tényezői azonban a meteorológiai viszonyok voltak. Az átlagosnál alacsonyabb hőmérséklet és szélsébség értékek elősegítették az EC és az OC koncentrációjának együttes növekedését. A következőkben a koncentrációk arányait is megvizsgáltam. Elsőként a szerves szén és elemi szén hányadosát, aminek átlagos szórása $(54 \pm 12)\%$. Ez az arány a másodlagos szerves járulékra enged következtetni. A másodlagos szerves járulék koncentrációját fotokémiai folyamatok, a mérés helyszíne és a meteorológiai helyzet is befolyásolják. Az elemi szén járuléka a $PM_{2,5}$ -tömegkoncentrációhoz $(8,9 \pm 2,5)\%$ volt. Az adatokat összevetettem a 2002-ben kapott eredményekkel $(14 \pm 6)\%$. A mi eredményünk kisebbnek bizonyult, de más európai városokhoz viszonyítva így is jelentős.

Ezt követően a szerves anyag járulékát $(26 \pm 5,4)\%$ hasonlítottam össze a 2002-es eredményekkel $(43 \pm 9)\%$. A különbségek a gépjárműforgalommal és a mérési helyszínekben lévő koncentráció dúsultságával magyarázható. A különbséghez alkalmazott hőmérsékleti protokoll is hozzájárult. Végül a széntartalmú járulék meghatározására került sor (mediánja: 34%). Ez azt jelenti, hogy a széntartalmú összetevők mellett más, szervetlen (szulfát aeroszol és felszíni közet eredetű aeroszol) szintén jelentős járulékot képvisel, és a városi reszuszpenzió jelentőségére hívja fel a figyelmet.

6. Irodalomjegyzék

- Andreae, M. O.: Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels, in: World Survey of Climatology, Future Climates of the World, edited by: Henderson-Sellers, A., Elsevier, Amsterdam, Vol. 16, 341–392, 1995.
- Andreae, M. O., Gelencsér, A.: Black carbon or brown carbon? The nature of lightabsorbing carbonaceous aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 3131– 3148, 2006.
- Birch, M. E., Cary, R. A.: Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust, *Aerosol Sci. Tech.*, 25, 221–241, 1996.
- Birch, M. E.: Analysis of carbonaceous aerosols: interlaboratory comparison. *Analyst* 123: 851–857, 1998.
- Borsós, T., Salma, I.: A Várhegy-alagút közepén. *Természet Világa*, 142/6, 257–260, 2011.
- Brimblecombe, P.: The big smoke: a history of air pollution in London since medieval times, London, 185, 1987.
- Brown, D. M., Stone, V., Findlay, P., MacNee, W., Donaldson, K.: 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, 2000.
- Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V., Donaldson, K.: 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, 2001.
- Cachier, H.: Carbonaceous combustion aerosol: Harrison, R. M., Van Grieken, R. (szk.), *Atmos. Particles*. Wiley, New York, 1998.
- Cavalli, F., Viana, M., Yttri, K. E., Genberg, J., and Putaud, J.-P.: Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 79–89, doi:10.5194/amt-3-79-2010, 2010.
- Chow, J. C., Watson, J. G., Pritchett, L. C., Pierson, W. R., Frazier, C. A., Purcell, R. G.: The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system:

- description, evaluation and applications in U.S. air quality studies. *Atmos. Environ.*, 27, 1185–201, 1993.
- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E., Pan, Y.: Adverse health effects of other air pollutants. *Int. Environ.*, 32, 815–830, 2006.
- Gieré, R., Querol, X.: Solid Particulate Matter in the Atmosphere. *Elements* 6, 215–222, 2010.
- Hallquist, M., Wenger, J. C., Baltensperger, U., Rudich, Y., Simpson, D., Claeys, M., Dommen, J., Donahue, N. M., George, C., Goldstein, A. H., Hamilton, J. F., Hertmann, H., Hoffmann, T., Iinuma, Y., Jang, M., Jenkin, M. E., Jimenez, J. L., Kiendler-Scharr, A., Maenhaut, W., McFiggans, G., Mentel, T. F., Monod, A., Prévôt, A. S. H., Seinfeld, J. H., Surratt, J. D., Szmigielski, R., Wildt, J.: The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5155–236, 2009.
- Hansen, J. E., Sato, M., Lacis, A., Ruedy, R., Tegen, I., Matthews, E.: Climate forcings in the industrial era, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 12 753–12 758, 1998.
- Hansen, J., Nazarenko, L.: Soot climate forcing via snow and ice albedos, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 101, 423–428, 2004.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R.: Efficacy of Climate Forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776, 2005.
- Hinds, W. C.: *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, Wiley, New York, 1999.
- <http://www.naneos.ch/products.htm> (Az utolsó megtekintés időpontja: 2014. november 4.)
- <http://salma.web.elte.hu/BpArt/index.html> (Az utolsó megtekintés időpontja: 2014. november 4.)
- 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.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report*. Stockholm, Sweden, 2013.

- Kertész, Zs.: Városi és barlangi aeroszolok vizsgálata PIXE és mikro-PIXE módszerrel. Doktori értekezés, Debreceni Egyetem, 2000.
- Lohmann, U., Feichter, J.: Global indirect aerosol effects: a review, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715–737, 2005.
- Magyar, P.: A tüdő és légzőrendszer anatómiája. Magyar, P., Hutas, I., Vastag, E. (szk.), *Pulmonológia*, 3–13, Medicina, Győr, 1998.
- Merikanto, J., Spracklen, D. V., Mann G. W., Pickering, S. J., Carslaw, K. S.: Impact of nucleation on global CCN. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 8601–8616, 2009.
- Mészáros, E.: Levegőkémia. Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 1997.
- Nenmar, A., Hoet, P. H. M., Vanquickenborne, B., Dinsdale, D., Thomeer, M., Hoylaerts, M. F., Vanbilloen, H., Mortelmans, L., Nemery, B.: Passage of inhaled particles into the blood circulation in humans. *Circ.*, 105, 411–414, 2002.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster J.: Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particle. *Environ. Health Perspect.*, 113, 823–839, 2005.
- Pakkanen, T. A., Kerminen, V. A., Ojanen, C. H., Hillamo, R. E., Aarnio, P., Koskentalo, T.: Atmospheric black carbon in Helsinki. *Atmos. Environ.*, 34, 1497–1506, 2000.
- Phuah, C. H., Peterson, M. R., Richards, M. H., Turner, J. H., Dillner, A. M.: A Temperature Calibration Procedure for the Sunset Laboratory Carbon Aerosol Analysis Lab Instrument, *Aerosol Sci. Tech.*, 43, 1013–1021, 2009.
- Pilinis, C., Pandis, S. N., Seinfeld, J. H.: Sensity of direct climate forcing by atmospheric aerosol to aerosol- size composition. *J. Geophys. Res.* 100, 18739–19754, 1995.
- Pöschl, U.: Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44, 7520– 7540, 2005.
- Putaud, J.-P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Flentje, H., Cyrys, J., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H. C., Harrison, R. M., Herrmann, H., Hitzenberger, R., Hüglin, C., Jones, A. M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Kousa, A., Kuhlbusch, T. A. J., Löschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen, J., Perrino, C., Pitz, M., Puxbaum, H., Querol, X.,

- Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Viana, M., Tursic, J., Wiedensohler, A., Raes, F.: A European aerosol phenomenology 3: Physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe, *Atmos. Environ.*, 44 1308-1320, 2010.
- Raes, F., Van Dingenen, R., Vignati, E., Wilson, J., Putaud, J. P., Seinfeld, J. H., Adams, P.: Formation and cycling of aerosol in the global troposphere. *Atmos. Environ.* 34, 4215– 4240, 2000.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., Rosenfeld, D.: Aerosols, climate and the hydrological cycle. *Sci.*, 294, 2119– 2124, 2001.
- Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J. T., Washington, W. M., Fu, Q., Sikka, D. R., Wild, M.: Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 102, 5326–5333, 2005.
- Russell, L.M.: Aerosol organic-mass-to-organic-carbon ratio measurements. *Environ. Sci. Tech.*, 37, 2982–2987, 2003.
- Salma, I., Chi, X., Maenhaut, W.: Elemental and organic carbon in urban canyon and background environments in Budapest, Hungary, *Atmos. Environ.*, 38 27–36, 2004a.
- Salma, I., Maenhaut, W., Weidinger, T., Pinto, J.: Temporal variation of secondary organic aerosol in downtown Budapest, *J. Aerosol. Sci.* 35S1 153–154, 2004b.
- Salma I.: *Környezetkémia*, Typotex Kiadó, Budapest, 2012.
- Schmid, H., Laskus, L., Abraham, H. J., Baltensperger, U., Lavanchy, V., Bizjak, M., Burba, P., Cachier, H., Crow, D., Chow, J., Gnauk, T., Even, A., Ten Brink, H. M., Giesen, K.-P., Hitzenberger, R., Hueglin, C., Maenhaut, W., Pio, C., Carvalho, A., Putaud, J.-P., Toom-Sauntry, D., Puxbaum, H.: Results of the “carbon conference” international aerosol carbon round robin test stage I, *Atmos. Environ.*, 35, 2111–2121, 2001.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics*, Wiley, New York, 1998.
- Ten Brink, H., Maenhaut, W., Hitzenberger, R., Gnauk, T., Spindler, G., Even, A., Chi, X. G., Bauer, H., Puxbaum, H., Putaud, J.-P., Tursic, J., Berner, A.:

INTERCOMP-2000: the comparability of methods in use in Europe for measuring the carbon content of aerosol. *Atmos. Environ.*, 38,6507–19, 2004.

Turpin, B.J., Lim, H.-J.: Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass. *Aerosol Sci. Tech.*, 35, 602–610, 2001.

7. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Salma Imrének, a munkám során nyújtott odaadó segítségéért és szakmai tanácsaiért.

Köszönöm Kardos Attila Ph.D. hallgatónak, az RT-OC/EC kalibrációját.

Köszönöm végül, de nem utolsó sorban Családomnak és Kedvesemnek a szerető támogatásukat.