

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

A légköri aeroszol koromtartalmának mérése optikai módszerrel



Készítette:

Bejer Barbara

Témavezető:

Dr. Osán János

MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet

Dr. Baranka Györgyi

Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki Konzulens:

Dr. Mészáros Róbert

ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2011.

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	3
2. A LÉGKÖRI AEROSZOL	4
2.1 A léggöri aeroszol-részecskék fogalma és méret szerinti eloszlása	4
2.2 Koromrészecskék a léggöri aeroszolban.....	5
2.3 Az aeroszol-részecskék egészségre gyakorolt hatása	8
2.4 Az aeroszol-részecskék klímára gyakorolt hatása	10
3. A LÉGKÖRI AEROSZOL- ÉS KOROMTARTALOM MÉRÉSE	13
3.1. A felhasznált adatok.....	13
3.2 Mérési helyszínek	13
3.3 Alkalmazott műszerek	16
3.3.1 TEOM 1400a (Tapered Element Oscillating Microbalance).....	16
3.3.2 GRIMM aeroszol spektrométer	17
3.3.3 Aethalometer.....	18
4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK	25
4.1 A BC koncentrációk napi menetei	25
4.2 A napi átlagos BC koncentrációk a szinoptikus helyzet tükrében.....	29
4.2.1 Paks, 2010. február 3–15.	30
4.2.2 Paks, 2010. április 16–30.....	33
4.2.3 Paks, 2010. június 17–30.	35
4.2.4 Paks, 2010. szeptember 17–30.....	36
4.2.5 Budapest; Gilice tér; 2010. március 3–18.....	39
4.3 Az optikai abszorpció hullámhosszfüggése.....	41
4.3.1 A biomassza tüzelés és közlekedés hatása az optikai abszorpcióra.....	41
4.3.2 Az aethalometer modell	46
5. ÖSSZEFOGLALÁS	49
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	51
IRODALOMJEGYZÉK	52

1. BEVEZETÉS

Diplomamunkával a Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet (KFKI AEKI) koordinálásával a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) által kiadott, 2010-ben kezdődött RER/2/005 technikai együttműködési projekt mintavételezési eljárásába és adatfeldolgozásába kapcsolódtam be. A projektben résztvevő országok: Albánia, Bosznia-Hercegovina, Görögország, Horvátország, Lengyelország, Magyarország, Montenegró, Portugália és Szerbia. A projekt célja a légköri aeroszol PM_{10} frakciójának ($10\ \mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű részecskék) monitorozása, az adatok értelmezése, a részecskék elemi összetételének meghatározása, valamint az évszakos változás jellemzése volt. A projekt mindegyik országban két mintavételezési hely (városi és vidéki környezet) kiválasztását tartotta szükségesnek. A helyszínválasztásnál fontos volt, hogy az adott város fűtési időszakára jellemző legyen a szilárd tüzelés. Az AEKI Paksot választotta városi, Faddot pedig vidéki helyszínnek. A projekt hároméves időtartama alatt két téli és két nyári expedíció szükséges mindkét helyszínen. Diplomamunkám keretében a 2010. februártól Paksra kezdődő légköri aeroszol mérésekbe kapcsolódtam be. Így lehetőségem adódott több mérési technika megismerésére is. Munkám során főként a koromkoncentráció többszörös optikai elven működő aethalométerrel történő meghatározását végeztem.

Diplomamunkám felépítése követi az AEKI projektjében végzett munkát. A dolgozat második fejezetében átfogó képet adok a légköri aeroszol-részecskékről, ezen belül részletezve a koromrészecskéket. A harmadik fejezet tartalmazza a felhasznált adatokat, a mérés során alkalmazott műszerek rövidebb ismertetését. Az aethalometer esetén kitérek az adatok korrigálására alkalmazott korrekciós algoritmus ismertetésére. Az eredményeimet a negyedik fejezetben mutatom be, mely két fő részre tagolódik. Először bemutatom, hogyan változik a koromkoncentrációk napi menete, majd a napi átlagos koromkoncentrációkat vizsgálom a szinoptikus helyzet szerint Paksra, mind a négy évszakra (2010. február 3–15., április 16–30., június 17–30., szeptember 17–30.), illetve a budapesti adatokra 2010. március 3. és 18. között. A második részben a koncentrációkból a két városi környezetben legjelentősebb tüzelési eredetű forrás (dízelüzemű belső égésű motorok és biomassza-tüzelés) hatását vizsgálom az optikai abszorpcióra, ezt követően az optikai abszorpció segítségével meghatározom a már fent említett források megoszlását a $PM_{2.5}$ aeroszolban ($2,5\ \mu\text{m}$ -nél kisebb átmérőjű részecskék). A dolgozatot összefoglalással és irodalomjegyzékkel zárom.

2. A LÉGKÖRI AEROSZOL

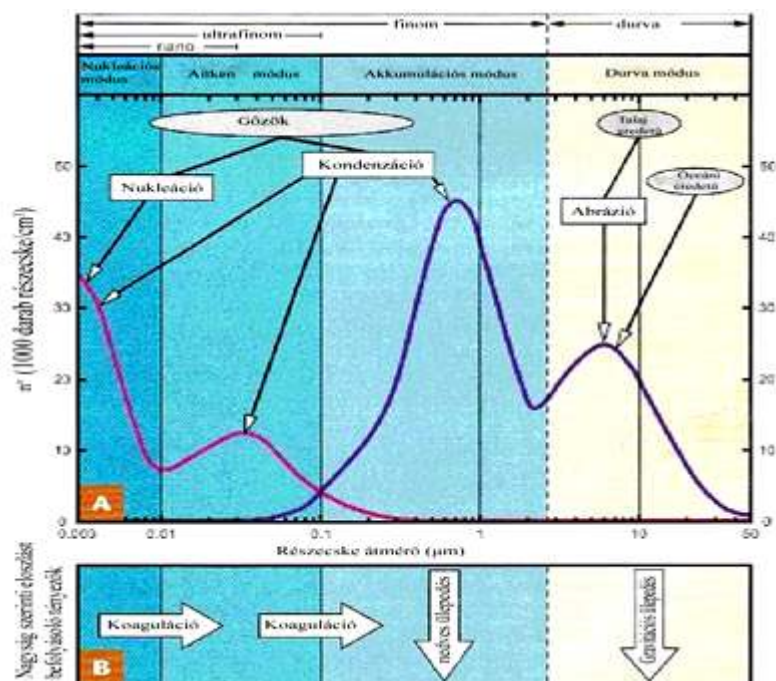
2.1 A légköri aeroszol-részecskék fogalma és méret szerinti eloszlása

Aeroszoknak nevezzük valamely gáznemű közegben finoman elosztatott szilárd vagy cseppfolyós részecskék együttes rendszerét (Mészáros, 1997). A légköri folyamatok során a gáznemű közeg a levegő, a szilárd és cseppfolyós részecskék együttesen pedig az aeroszol-részecskéket, "particulate matter"-t (PM) alkotják (Gieré and Querol, 2010). A részecskék egyik jellemzője, hogy gravitációs ülepedésük lassú, mivel a turbulencia hosszú időn keresztül a levegőben tartja őket. Mozgásukat a tehetetlenségi erő helyett a viszkozitásból származó erő irányítja. Jellegzetes mozgásformájuk a Brown-mozgás, melyet a gázmolekulákkal való ütközés vált ki. Felületi rétegük tömege nagy a teljes tömegben belül, mely kedvez a felületen végbemenő kémiai reakcióknak (Mészáros, 1977).

Az aeroszol-részecskéket méretük szerint két jól elkülönülő csoportra oszthatjuk: finom, illetve durva tartományra. A finom részecskék átmérője nem haladja meg az 1 μm -t, míg a durva részecskék ennél nagyobb méretűek (Mészáros, 1997). A szakirodalomban másfajta felosztással is találkozhatunk, ahol a finom és durva részecskék közötti határt a 2,5 μm -nek tekintik ($\text{PM}_{2.5}$; PM_x : az x μm -nél kisebb átmérőjű részecskéket jelenti). A két frakció részecskéi különböznek képződésük, tartózkodási idejük, kémiai és fizikai tulajdonságaik tekintetében, ezért fontos a megkülönböztetésük (Seinfeld and Pandis, 2006).

Az 1. ábrán látható, hogy a finom részecskéket további három tartományra oszthatjuk fel. A 10 nm-nél kisebb átmérőjű részecskék alkotják a nukleációs módust. Ebben a tartományban a részecskék a gázfázisú kémiai reakciók termékeinek vagy égéstermékeinek (gőzöknek) a nukleációjával és kondenzációjával képződnek. A 10–100 nm közötti részecskék alkotják az Aitken-módust, melyek a nukleációs tartományban lévő részecskék koagulációjával, vagy az ezeken történő kondenzációval jönnek létre. A nukleációs és Aitken tartományban lévő részecskéket együttesen ultrafinom részecskéknek ($\text{PM}_{0.1}$) nevezzük. A nukleációval keletkezett részecskék gyorsan koagulálnak. Ha a levegőben a cseppfolyósodó gőznek nincs utánpótlása, a finom aeroszol tömege koagulációval a 0,1–1 μm -es nagyságtartományba kerül, és ott összegyűlik, vagyis akkumulálódik. Így a harmadik tartományt akkumulációs módusnak nevezzük (Mészáros, 1997; Seinfeld and Pandis, 2006). A 0,1–1 μm nagyságú részecskék tartózkodási ideje a

leghosszabb: 8–10 nap. Ezek a részecskék a csapadékelemekkel együtt, nedves ülepedéssel hagyják el a légkört (Mészáros, 2001).



1. ábra: (A) A légköri aeroszol részecskék méreteloszása és a (B) részecskék keletkezési és ülepedési folyamatai (forrás: Gieré and Querol, 2006)

A finom részecskék városi környezetben főleg emberi tevékenységhez kapcsolódó folyamatokból származnak (pl: kipufogógázból, széntüzelésből, erőművi kibocsátásokból). A részecskék kémiai összetétele nagyon változatos; nagy arányban tartalmaznak ammónium-szulfátot, ammónium-nitrátot, szerves vegyületeket és kormot.

A durva részecskék elsősorban mechanikai folyamatokból, természetes forrásokból származnak; például szárazfölkék felett a felszín aprózódásával keletkeznek erózió által, és ezért főleg kőzetalkotó elemeket (szilíciumot, kalciumot, vasat, alumíniumot, magnéziumot, káliumot és oxigént) tartalmaznak (Zichler et al., 2007). A részecskék tömege és térfogata is arányos az átmérő harmadik hatványával, így a PM durva frakciója jelentős mértékben hozzájárul a teljes PM térfogathoz, illetve tömegéhez. A nagyobb szemcseméret azonban viszonylag rövid tartózkodási idővel jár a nagy ülepedési sebesség miatt (Gieré and Querol, 2010).

2.2 Koromrészecskék a légköri aeroszolban

A korom egy olyan szennyező részecske, mely különböző szerves anyagok tökéletlen égése során keletkezik. Globálisan évente 8 Tg emittálódik a légkörbe (Bond et al., 2004).

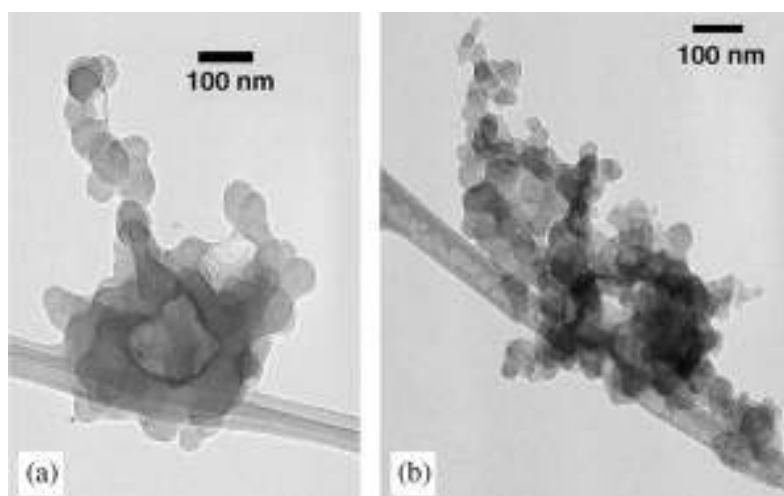
Korábbi tanulmányok szerint 13,94 Tg (Cook and Wilson, 1996), illetve 12,24 Tg (Penner et al., 1993) az éves koromkibocsátás. Fő forrásai a fosszilis tüzelőanyagok égése és a biomassa-tüzelés. Előbbi az északi félgömbön meghatározó a közlekedés miatt, míg utóbbi elsősorban a déli félgömbön játszik meghatározó szerepet az erdő- és bozóttüzek következtében (Pakkanen et al., 2000). A biomassa-tüzelésből származó részecskék tartalmazhatnak organikus anyagokat, mint például policiklikus aromás szénhidrogéneket (PAH), valamint aromás és humusz-szerű összetevőket (HULIS), melyek növelik a fény abszorpcióját az UV tartományban a közeli infravörös tartományhoz képest, ahol a korom a fő elnyelő részecsketípus. A közlekedés, vagyis a dízelüzemű gépjárművek ezzel szemben több koromrészecskét bocsátanak ki, mint organikus anyagot (Sandradewi et al., 2008).

A koromrészecskék erősen abszorbeálják a fényt, ezáltal módosítják a Föld sugárzási egyenlegét, így jelentős az éghajlati kényszerben betöltött szerepük. Továbbá csökkentik a látástávolságot, megváltoztatják a légkör stabilitását, befolyásolják a nagyszálájú cirkulációt, és hatással vannak a felhők albedójára, valamint káros hatással vannak az emberi egészségre (Cao et al., 2009). E tulajdonságok miatt fontos a koromrészecskék szerkezetének és mennyiségének mérése.

A légköri aeroszol-részecskék össztömegének 10–30%-át széntartalmú részecskék alkotják. Ide tartoznak a szerves és szervetlen szénvegyületek, illetve a korom – EC (elemental carbon) vagy BC (black carbon) formájában – mely az aeroszol részecskék össztömegének megközelítően 5–10%-át teszi ki Európában (Ramanathan and Crutzen, 2003). A BC a széntartalmú anyagok azon komponense, mely elnyeli a fényt a látható tartományban. Koncentrációjának mérése optikai elven történik (3.3.3 fejezet). A BC-től megkülönböztetjük a már fent említett EC-t. Az EC a széntartalmú anyagok azon komponense, mely nagyon magas termikus stabilitással rendelkezik. Mérése termikus vagy termo-optikai módszerrel történik. A két fogalmat a szakirodalomban gyakran felcserélik (Andreae and Gelencsér, 2006; Husain et al., 2007).

A légkörbe került korom 20–50 nm átmérőjű elsődleges részecskékből áll, amelyek fűrtökbe rendeződnek. Az így képződött agglomerátumok mérete akár az 1 μm -t is elérheti. Kovács Kis et al. (2006) nagy felbontású transzmissziós elektronmikroszkóppal vizsgálták szavannatűzből származó és közép-európai háttérállomásról (K-pusztá) származó koromrészecskék szerkezetét. A szavannatűzből származó elsődleges részecskék átmérője tipikusan 50 nm, a kontinentális eredetűeké pedig 20–30 nm volt. A 2. ábrán az

elsődleges részecskék és a fűrtserű agglomerátumok jól megfigyelhetők, magyarázatot adva a koromszemcsék nagy aktív felületére.



2. ábra: (a) Szavannatűzből származó koromrészecskék (Kruger Nemzeti Park, Dél-Afrika), (b) Troposzférából származó koromrészecskék (K-pusztá), (forrás: Kovács Kis et al., 2006).

Világszerte végeznek koromméréseket városi, vidéki és háttérállomásokon. A világ legnagyobb BC kibocsátó országa Kína. Kína észak-nyugati részén található 7 millió lakosú Xi'an városában a napi átlagkoncentráció értékek 2 és 65 $\mu\text{g m}^{-3}$ közé estek 2003 szeptembere és 2005 augusztusa között, a vizsgált időszak átlaga pedig 14,7 $\mu\text{g m}^{-3}$ volt (Cao et al., 2009). Egy japán városban, Ujiban (180 000 lakos) 4,89 $\mu\text{g m}^{-3}$ volt az éves átlagkoncentráció 1998–1999 között; Bécsben (1,8 millió lakos) ugyanezen időszak alatt 5,01 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Hitzenberger and Tonho, 2001). Debrecenben Kertész et al. (2010) 3,1 $\mu\text{g m}^{-3}$ átlagkoncentrációt kapott a téli hónapokra, illetve 2,23 $\mu\text{g m}^{-3}$ -t a nyári időszakra. Az átlagos koromrészecske-koncentráció 1,38 $\mu\text{g m}^{-3}$ volt Helsinkiben (Pakkanen et al., 2000), 1,8 $\mu\text{g m}^{-3}$ és 7,4 $\mu\text{g m}^{-3}$ volt két budapesti állomáson (Salma et al., 1998). Zappoli et al. (2002) 1 $\mu\text{g m}^{-3}$ átlagkoncentrációt mért szennyezett városi állomás esetén Olaszországban, és 0,6 $\mu\text{g m}^{-3}$ átlagkoncentráció adódott a magyar regionális háttérállomáson K-pusztán. Még kisebb átlagkoncentrációt (0,114 $\mu\text{g m}^{-3}$) mért Kleefeld et al. (2002) Írországban Mace Head állomáson. Tiszta tengeri eredetű levegő esetén ez az érték 0,027 $\mu\text{g m}^{-3}$, kontinentális eredetű légtömeg esetén pedig 0,114 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Bécsi mérési eredmények szerint a koromrészecskék 50–70%-ban járultak hozzá a részecskék teljes tömegéhez a 0,02–0,1 μm -es tartományban, és 20% körül a 0,3–2 μm -es tartományban (Bernier et al., 1996). Hitzenberger et al. (2006) eredménye alapján a BC

hozzájárulás 6,1% (Bécs) és 5,2% (Ljubljana) a 0,1–2,15 µm-es tartományban, valamint 1,9% (Bécs) és 2,5%-a (Ljubljana) a 2,15–10 µm-es tartományban. Helsinkiben a mérések szerint a koromrészecskék 11–34%-ban járulnak hozzá a PM_{2,5}-hez, legnagyobb mértékben akkor, ha a finom frakció koncentrációja alacsony (például hat esetben 5 µg m⁻³ alatti koncentrációnál az átlagos BC hozzájárulás 27% volt) (Pakkanen et al., 2000). Kínában a BC/PM_{2,5} arány 1,6–15,6% közé tehető, illetve az átlagos arány 8,3% (Cao et al., 2009).

A koncentráció-értékeket befolyásolják a meteorológiai feltételek. Cao et al. (2009) negatív korrelációt ($r = -0,67$) találtak a koromrészecskék koncentrációja és a szélesebbesség között 2,5–3 m s⁻¹ alatti szélesebbesség esetén, mely a koromrészecskék lokális eredetére utal. Helsinkiben hasonló kapcsolatot figyeltek meg 2–2,5 m s⁻¹ alatti szélesebbesség esetén. A szélesebbesség 0,5 m s⁻¹-ről 1,5 m s⁻¹-ra történő emelkedése a BC koncentráció 50%-os csökkenését eredményezte (Pakkanen et al., 2000). Csapadékmentes napokon a 24 órás átlagos BC koncentráció 2,6-szer volt nagyobb (14,9 µg m⁻³), mint csapadékos napokon (5,8 µg m⁻³). Mivel télen megnövekedett a lakossági széntüzelés, ezért inverz kapcsolat ($r = -0,80$) állt fent a BC koncentráció és a hőmérséklet között is, valamint az alacsony keveredési réteg magasság is elősegíti a magas koncentráció értékeket (Cao et al., 2009).

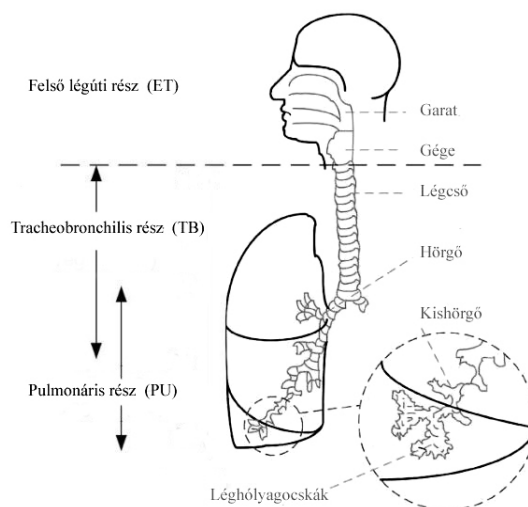
2.3 Az aeroszol-részecskék egészségre gyakorolt hatása

Az aeroszol-részecskék mérése és vizsgálata az elmúlt évtizedben főleg azok egészségre és klímára gyakorolt hatása miatt kapott jelentőséget.

A részecskék belégzése a légzőszervi betegek (asztma, bronchitis) állapotát súlyosbítja, csökkenti a tüdő ellenálló képességét a fertőzésekkel, toxikus anyagokkal szemben (<http://www.kvvm.hu/olm>). Az Egészségügyi Világszervezet egy korábbi tanulmánya szerint Európában a finom aeroszol-részecskék expozíciója évente 100 000 ember halálához vezet, illetve rövidül az élettartam is. A megbetegedések és halálozások száma a tüdővel kapcsolatos betegségekből adódik, mint az asztma vagy a COPD (krónikus obstruktív tüdőbetegség, amely a légutak szűkületével jár), és a tüdőrák, de korrelációt találtak a részecskék koncentrációja, valamint a szív- és érrendszeri megbetegedések között is (Highwood and Kinnersley, 2006).

A 3. ábra légzőrendszerünk sematikus vázát mutatja. Az aeroszol részecskék lerakódása szempontjából három részt különíthetünk el: (1) a felsőlégúti rész (ET), mely az orrot, szájat, gégét és garatot tartalmazza; (2) tracheobronchiális rész (TB), ahol a levegő a

légcsővön keresztül eljut a hörgőkhöz; (3) pulmonáris rész (PU), melyben a gázcsere zajlik és ez a rész tartalmazza a tüdőhólyagocskákat (Alföldy et al., 2009).



3. ábra: A légzőrendszer sematikus váza (forrás: Alföldy et al., 2009)

A részecskék lerakódásának helye függ a részecskék méretétől. A 10 μm -nél nagyobb részecskék szinte teljes egészében, az 5–10 μm aerodinamikai átmérővel rendelkező részecskék körülbelül 60–80%-a befogódik az orr-garat régióban, a kisebb részecskék viszont lerakódnak a tüdőben (Kertész, 2000). Az ultrafinom részecskék, főleg a dízelüzemű gépjárművek kipufogógázából származó koromrészecskék átjuthatnak a tüdőhólyagok membránján és bekerülnek a véráramba, ezáltal számos káros hatást okoznak, például fokozódik a vérrögképződés valószínűsége (Nemmar et al., 2004). A koromrészecskék egészségre gyakorolt hatása nagy aktív felületük miatt jelentősebb lehet, mint az a kis méretükből következne (Giechaskiel et al., 2009).

Az Európai Unió egyik irányelve (1999/30/EC) szabályozza a PM_{10} koncentráció határértékét. Az éves átlaghatárérték $40 \mu\text{g m}^{-3}$ és a 24 órás átlag, vagyis az egészségügyi határérték¹ $50 \mu\text{g m}^{-3}$, mely a naptári év alatt 35-nél többször nem léphető túl (<http://eur-lex.europa.eu>). Az önkormányzatok akkor kötelesek tájékoztatni a lakosságot, ha a szálló por értéke két egymást követő napon meghaladja a $75 \mu\text{g m}^{-3}$ -t. Riasztási kötelezettség pedig akkor áll fenn, ha a szálló por értéke két egymást követő napon meghaladja a $100 \mu\text{g m}^{-3}$ -t, és a meteorológiai előrejelzések szerint a következő napon sem várható javulás

¹ Tartós egészségkárosodást nem okoz, és az emberi egészség védelme érdekében a jogszabályban meghatározott módon és időn belül be kell tartani. Elérése és túllépése veszélyes légszennyezettséget eredményez (<http://www.met.hu>).

Vannak olyan aeroszolok, melyek főként nem elnyelő részecskéket tartalmaznak, mint szulfát, nitrát és szerves szén (Piliński et al., 1995). Ezek a részecskék a napfény szórásával direkt módon csökkentik a felszínre érő rövidhullámú energia mennyiségét, negatív sugárzási kényszert okozva. A szulfátrészecskék, a biomassza-égésből származó aeroszolok, valamint a fosszilis tüzelőanyagok égéséből származó szerves szénrészecskék által előidézett átlagos sugárzási kényszer a modellszámítások szerint $-0,7 \text{ W m}^{-2}$ -re tehető. Továbbá negatív sugárzási kényszert eredményez a troposzférikus aeroszol-részecskék indirekt hatása. A részecskék, mint kondenzációs magok megváltoztatják a felhők mikrofizikáját, ezáltal a sugárzási tulajdonságukat. Elsődleges indirekt hatásnak vagy felhő-albedó hatásnak nevezzük, amikor cseppecskék számszerinti koncentrációjában illetve a cseppecskék méretében (konstans cseppfolyós víztartalom mellett) következik be változás. Nagyobb számú kisebb csepp növeli a felhő sugárzás-visszaverő képességét. Szulfát-aeroszolok esetén a hatás igen bizonytalan mértékű, $-0,3$ és $-1,8 \text{ W m}^{-2}$ közötti sugárzási kényszert eredményez (IPCC, 2001).

Vannak olyan aeroszol-részecskék, mint például a BC (korom), melyek elnyelik a napsugárzást. Highwood és Kinnersly (2006) részletesen leírta a koromrészecskék klímára gyakorolt hatását, melyek a következők:

- Direkt hatás: a koromrészecskék a fényelnyelő tulajdonságuknak köszönhetően lokálisan melegítik a légkört és pozitív sugárzási kényszert okoznak. Az IPCC (2001) szerint a fosszilis tüzelőanyagokból származó BC $+0,2 \text{ W m}^{-2}$ sugárzási kényszert eredményez.
- Indirekt hatás: a modellszámítások a szerves szénrészecskék és koromrészecskék együttes indirekt hatását adják meg. Egy modellbecslés szerint, mely figyelembe veszi a koromrészecskék felhőcseppeken belüli elnyelő hatását is, a sugárzási kényszer $-1,51 \text{ W m}^{-2}$ -re tehető.
- Szemi-direkt hatás: azt fejezi ki, hogy a fényelnyelés által a koromtartalmú részecskék felmelegítik a troposzférát, miáltal változik a relatív nedvesség és a troposzféra stabilitása, ennek következtében pedig a felhőképződés és a felhők élettartama. Johnson et al. (2004) kimutatta a szemi-direkt hatást Indiai-óceán feletti stratocumulus felhőkre. A határrétegen belül pozitív, a felhők felett pedig negatív kényszert kaptak eredményül.

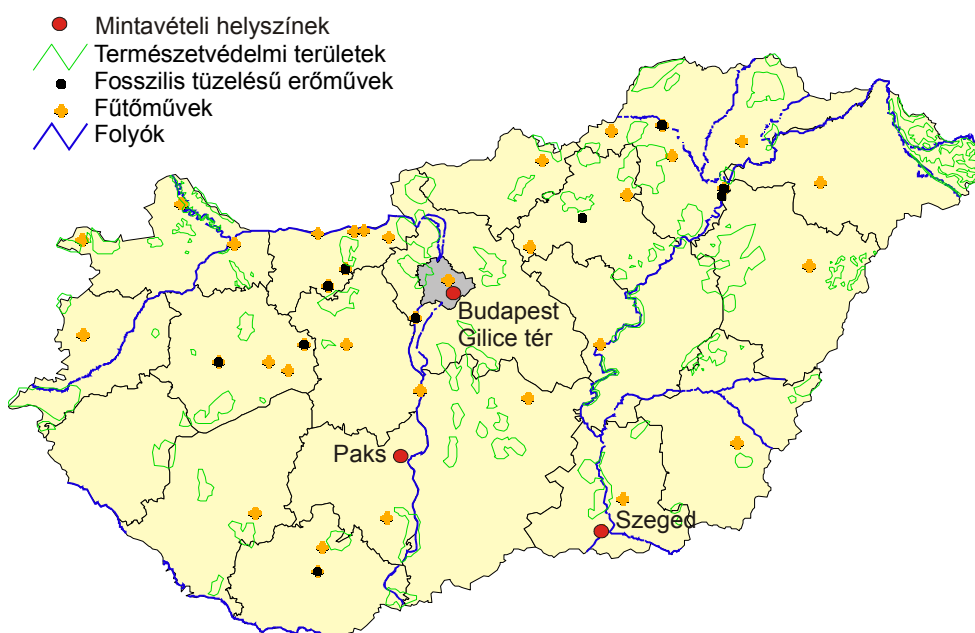
- Indirekt felszín-albedó hatás: azt fejezi ki, ha a koromrészecskék hóra vagy jégkristályokra ülepednek, akkor a felszín albedója lecsökken, ez jégolvadáshoz és melegedéshez vezet. Az IPCC (2007) szerint ez a hatás $+0,1 \text{ W m}^{-2}$ sugárzási kényszert eredményez.

3. A LÉGKÖRI AEROSZOL- ÉS KOROMTARTALOM MÉRÉSE

3.1. A felhasznált adatok

Az aeroszol mintavételezésében és az azt követő laboratóriumi munkában 2010 folyamán négy mérési kampányban aktívan részt vettem. A mérési időszakok mind a négy évszakra kiterjedtek. A téli időszak során 2010. február 3. és 15. között Pakson, két helyszínen (Kurcsatov utcában és a Dózsa György úton) folytak mérések, majd a műszereket február 16. után véglegesen áttelepítettük a Paksi Atomerőmű Zrt. Kurcsatov utcai állomására. Továbbá ugyanezen a helyszínen 2010. április 16–30., június 17–30. és szeptember 17–30. időszakokban folytak mintavételezések. A fentiekén kívül a Szegedi Egyetem munkatársai által Budapesten 2010. március 3. és 18., valamint Szegeden január 22. és 28. között mért koromkoncentráció-adatok álltak rendelkezésemre. A mérőállomások helyzete az 5. ábrán látható. További légszennyezők (PM_{2,5}) szegedi órás adatsorai a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium (KVVM) Országos Légszennyezettségi Mérőhálózatának (OLM) adatbázisából származnak. Az aeroszol-mérési időszakokra a meteorológiai adatokat Paks, Szeged, Budapest állomásokra az Országos Meteorológia Szolgálat biztosította.

3.2 Mérési helyszínek



5. ábra: A mérőállomások helyzete

Paks

Paks ($\varphi = 46^{\circ}34'11''$, $\lambda = 18^{\circ}51'5''$) Budapesttől mintegy 110 kilométerre, délre, a Mezőföldön, a Duna jobb partján fekszik. A város legmagasabb pontja a 103 méter magas löszös domb, a Sánchegy. A várost síkvidéki, meleg, száraz, kontinentális éghajlat jellemzi. A paksi lakótelepek számára a fűtést az atomerőmű biztosítja. A családi házakban a gázfűtésről – a magas gázár miatt – sokan áttértek ismét a vegyes tüzelésre (szén, fa).

Az első mérési állomás (6. ábra) a Paksi Atomerőmű Környezetellenőrző Laboratóriumának műszerkertje (Paks, Kurcsatov u. 1.), 650 m-re észak-nyugati irányban helyezkedik el a 6-os főúttól, amely jelentős közlekedési főút a város dél-keleti részén. Az erőmű laboratóriuma kizárólag a levegő radioaktivitásának mérésével foglalkozik, így a mi méréseink többlet információt jelentenek számukra is. A laboratórium egyik konténerében egy TEOM 1400a típusú műszert helyeztünk el, melyet a légköri aeroszol PM_{10} koncentrációjának monitorozására használtunk.

A második mérési helyszín az Energetikai Szakközépiskola és Kollégium (Dózsa György út 95.). A Dózsa György út a város egyik forgalmas útja, az iskolától alig 200 m-re körforgalom, mögötte pedig autóbusz-pályaudvar található, ami miatt indokolt ezen a helyszínen a közlekedésből származó káros anyagok mérése. A Dózsa György úton a PM_{10} -nél kisebb frakciójú aeroszol-részecskék koncentrációméréséhez Grimm 1.109 típusú aeroszol spektrométert, valamint a koromkoncentráció méréséhez AE42 típusú aethalometert alkalmaztunk.



6. ábra: A paksi környezetellenőrző laboratórium udvarán elhelyezett levegőminőségi mérőkonténer

Budapest (XVIII. ker., Gilice tér 39.)

Az OLM budapesti monitor hálózatának egyik tagja (7. ábra) a város délkeleti részén a XVIII. kerületben a Gilice téren ($\varphi = 47^{\circ}25'18''$, $\lambda = 19^{\circ}11'22''$) külvárosi, családi házas környezetben található. Tengerszintfeletti magassága 140 m. A kerület lakosainak száma 95 257 fő (2001). A kerületben a lakossági fűtésről nincs pontos információ, de általánosságban elmondható Budapestre, hogy a külső kerületekben ismét egyre jellemzőbb a fatüzelés. Az állomást a városi háttérszennyezettség vizsgálatának céljából hozták létre. A városból délkeleti irányba távozó levegő minőségét próbálták megállapítani az állomás telepítésekor. Az 1990-es évek végén gyenge forgalom és közepes beépítettség jellemezte, de későbbi építkezések és forgalmi változások miatt a terület levegőminősége megváltozott és városi háttérszennyezettség mérésre már nem alkalmas (<http://www.kvvm.hu>). A Szegedi Egyetem munkatársai 2010. márciusi kampányuk során AE42 típusú aethalometert helyeztek el a konténerben koromkoncentráció-mérés céljából.



7. ábra: A budapesti Gilice téri meteorológiai állomáson elhelyezett levegőminőségi mérőkonténer
(forrás: <http://www.kvvm.hu/olm>)

Szeged

Szeged Csongrád megye székhelye, Magyarország déli részén, Budapeستől kb. 160 kilométerre (közúton 170 km), a Maros és a Tisza találkozásánál fekszik. Tengerszint feletti magassága 80 m, meleg–száraz éghajlat jellemzi. Magyarország negyedik legnagyobb városa, kb. 160 000 fő él itt. Az ipari területek a város ÉNy-i részén találhatóak, innen az uralkodó nyugatias légáramlatok a szennyezőanyagokat a város központja felé

szállítják. Az energiaárak emelkedése miatt ebben a városban is sokan áttértek a gázfűtésről az egyedi fűtésre, ami tovább rontja a levegő minőségét.

Az OLM mérőállomása Szeged belvárosában a Kossuth Lajos utca 89. ($\varphi = 46^{\circ}15'46''$, $\lambda = 20^{\circ}08'10''$) szám alatt található (8. ábra), a város legnagyobb helyi és tranzitforgalommal terhelt útkereszteződésben. A mérőállomáshoz nagyon közel van az E5 nemzetközi főút szegedi bevezető szakasza, emiatt a közúti közlekedési eredetű légszennyeződést mérik (<http://www.kvvm.hu>). Az állomás konténerében a Szegedi Egyetem munkatársai AE42 típusú aethalometert helyeztek el.



8. ábra: A szegedi levegőminőségi mérőkonténer
(forrás: <http://www.kvvm.hu/olm>)

3.3 Alkalmazott műszerek

Ebben az alfejezetben bemutatom a mérési kampányok során a már korábban is említett aeroszolmérésre alkalmazott műszereket. Részletesebben kitérek a koromrészecskék mérésére és a mérés után alkalmazott korrekciókra.

3.3.1 TEOM 1400a (Tapered Element Oscillating Microbalance)

A TEOM 1400a típusú készülékkel a légköri aeroszol PM_{10} frakciójának tömegkoncentrációját mértük Pakson. A műszer előleválasztó légbeszívójából (“inlet”) a levegő 3 l min^{-1} sebességgel áramlik egy tömegmérőbe, melynek fontos eleme egy vékony rezgő kvarccső. A kvarccső felső részéhez egy szűrő kapcsolódik. Miközben az átszívott levegőből a szűrőre kiülepednek a részecskék, a kvarccső rezgési frekvenciája változik. A frekvencia megváltozásából következtetni lehet a szűrőre rakódott részecskék által okozott tömegnövekedésre, mely a következő egyenlettel írható le:

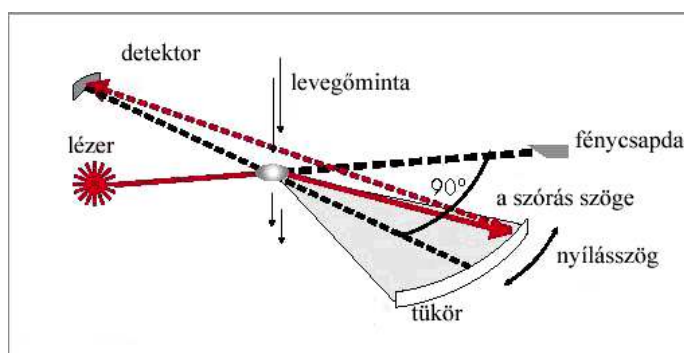
$$\Delta M = K_0 \left(\frac{1}{f^2} - \frac{1}{f_0^2} \right), \quad (1)$$

ahol ΔM a gyűjtött részecskék által okozott tömegváltozás, K_0 a kvarccsőre jellemző állandó, f és f_0 rendre a telített és a telítetlen szűrő esetén a frekvencia.

A műszer a tömegnövekedésből számolja a tömegkoncentrációt. A módszer előnye, hogy folyamatos információt szolgáltat jó időbeli felbontással: 15 perces pillanatnyi, 30 perces, órás és 24 órás átlagértékeket ad. Hátránya, hogy mielőtt a minta a szűrőre kerül, egy termosztát 40 °C fokra felfűti, így a részecskéken megkötődött vízgőzön kívül egyéb illékony komponensek is elpárolognak, ezáltal a műszer alulbecsli a tömeget (Muir, 2002).

3.3.2 GRIMM aeroszol spektrométer

Az aeroszol spektrométerrel a kisebb frakciójú részecskék tömegkoncentrációját határoztuk meg Pakson 1 perces időbeli felbontással. A műszer nagy előnye, hogy több csatornán (31 ill. 32) lehet vele mérni a szám szerinti (db l^{-1}) illetve a tömeg szerinti ($\mu\text{g m}^{-3}$) koncentrációt jó időbeli (1, 5, 10, 30 vagy 60 perces) felbontással és pontossággal. A műszer működési elve (9. ábra) a részecskék Mie-szórásán alapul.



9. ábra: Az aeroszol spektrométer mérési elve (forrás: <http://www.grimm-aerosol.com>)

A mintavevő a levegőmintát egy mérési kamrába vezeti, ahol egy lézer a részecskéket megvilágítja. A részecskéről szóródott fény egy homorú tükör segítségével egy detektorba jut, ami egyszerre csak egy részecskét detektál. A műszer a szórt fény intenzitásának szögfüggése alapján az éppen megvilágított részecskét mérete szerint a megfelelő méretfrakció-csatornába sorolja be egyel megnövelve az odasorolt részecskék számát. Az ismert térfogatáram ($1,2 \text{ l min}^{-1}$) segítségével a db s^{-1} -ből adódik a szám szerinti koncentráció, vagyis db l^{-1} . Minden csatornához meghatározott sűrűség tartozik.

Ebből a sűrűségből, a részecskék térfogatából és a szám szerinti koncentrációból adódik a tömeg szerinti koncentráció ($\mu\text{g m}^{-3}$) (<http://www.grimm-aerosol.com>).

3.3.3 Aethalometer

A koromkoncentráció mérésére többszatornás (370 nm–950 nm) optikai abszorpciós elven működő AE42 típusú aethalometert alkalmaztunk (10. ábra). A műszer a koromkoncentrációt a 6. csatornán (880 nm) mért abszorpció alapján határozza meg, kalibrációját erre a hullámhosszra végezték el. Az időbeli felbontást 2 percre állítottuk.



10. ábra: Az AE42 típusú aethalometer
(forrás: <http://mageesci.com>)

A mérési elvet Hansen (2005) ismerteti az aethalometer műszerkönyvében, mely a következőképpen magyarázható. A műszer ismert térfogatárammal levegőt szív be egy csövön keresztül és folyamatos mintagyűjtést végez egy fehér kvarcszűrő-tekercsre. Egy fényforrás megvilágítja a mintát és két detektor 7 hullámhosszon (370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm) méri az áteresztett fény intenzitását. Az egyik detektor referenciaként a tiszta szűrőn áteresztett, a másik pedig a telítődő szűrőn áteresztett fényintenzitást méri. A műszer ugyanezeket az értékeket a fényforrás bekapcsolása előtt is megméri. A bekapcsolás előtti és utáni értékeket kivonja egymásból, hogy kiszűrje a háttérzajokat. Így a fényintenzitásokra felírható:

$$I = SB - SZ \quad (2)$$

$$I_0 = RB - RZ, \quad (3)$$

ahol I a telítődő szűrőn történő áthaladás utáni fényintenzitás, I_0 a tiszta szűrőn áthaladó fény intenzitása, SB , RB rendre a fényforrás bekapcsolásánál jel és a referenciajel háttéré, SZ , RZ rendre a fényforrás bekapcsolása előtt a jel és a referenciajel háttéré.

A szűrőn áthaladó fény esetén az optikai csillapítás ATN százalékban kifejezve:

$$ATN \equiv 100 \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (4)$$

ahol a 100 számítási konvenciónak megfelelő faktor. $ATN = 1$ azt jelenti, hogy a gyűjtött aeroszollal telítődő folt és a szalag fehér része közötti különbség 1%, ami szabad szemmel alig észrevehető, és ha $ATN = 100$, akkor a telítődő folt sötétszürke lesz.

A műszer az optikai csillapítás számítását mindig t időközönként ismétli. Az optikai csillapítás megváltozásából (ΔATN) számítja a szűrő adott foltfelületére rakódott minta tömegváltozását (ΔB ; g cm^{-2}), azaz:

$$\Delta B = \Delta(ATN) / \sigma_{ATN} = (ATN(t) - ATN(0)) / \sigma_{ATN}, \quad (5)$$

ahol σ_{ATN} az optikai abszorpciós hatáskeresztmetszet ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), melynek értéke különböző hullámhosszokra (λ) eltérő (1. táblázat). A gyártó által a BC koncentráció mérésére szolgáló hullámhosszra javasolt érték $16,6 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$. A σ_{ATN} hullámhosszfüggésére fordított arányosságot feltételezve a többi hullámhosszra az 1. táblázatban megadott értékek adódnak.

	λ	σ_{ATN}
UV	370 nm	39,5
Blue	470 nm	31,1
Green	520 nm	28,1
Yellow	590 nm	24,8
Red	660 nm	22,2
IR-1	880 nm	16,6
IR-2	950 nm	15,4

1. táblázat: σ_{ATN} értéke a különböző hullámhosszakra
(forrás: Hansen, 2005)

A műszer továbbá méri a t idő (min) alatti Q áramlási sebességet (1 min^{-1}) és ebből számolja az átáramlott V térfogatot:

$$V = Qt . \quad (6)$$

Aethalometerrel történő mérés esetén azt feltételezzük, hogy az ATN optikai csillapítás csak a filterre gyűjtött minta (11. ábra) fényelnyelése következtében növekszik, így a BC koncentráció (ng m^{-3}) az ATN megváltozásából a (5) és (6) egyenleteket felhasználva számolható:

$$[BC] = \frac{\Delta B A}{V} = \frac{A \Delta ATN}{V \sigma_{ATN}}, \quad (7)$$

Ahol A a filter azon részének (foltnak) a területe, amelyen a levegőt a műszer átszívja ($1,67 \text{ cm}^2$) (Park et. al., 2010). A fenti egyenlet alapján a b_{ATN} (m^{-1}) gyengítési együttható a következőképpen definiálható:

$$b_{ATN} = \frac{A \Delta ATN}{V}, \quad (8)$$

vagyis

$$[BC] = \frac{b_{ATN}}{\sigma_{ATN}} . \quad (9)$$

Miután a műszer kiszámolta a koncentrációt, a számolást újra kezdi úgy, hogy a t időpontra kapott optikai csillapítás ($ATN(t)$) lesz a következő időpontban a kezdő optikai csillapítás ($ATN(0)$). A tekercsen a műszer akkor léptet tovább, ha az ATN előre beállított maximum-értékét bármely hullámhossznál eléri. Méréseink során a továbbléptetés $ATN = 125$ elérésekor történt.



11. ábra: Kvarcszűrő-tekercsre gyűjtött minta
(forrás: <http://mageesci.com>)

A műszer előnye, hogy azonnali, real-time adatokat szolgáltat. Mivel az adatok mellett a dátum és idő is megjelenik, így információt ad a források időbeli változékonyságáról. Több hullámhosszon mér, így következtethetünk más anyagok jelenlétére is. A 880 nm-től eltérő hullámhosszakon mért abszorpcióból számított $[BC]$ igazából BC-ekvivalens koncentrációnak tekinthető, azaz azt adja meg, hogy mekkora BC koncentrációnak lenne az adott hullámhosszon ugyanannyi az abszorpciója, mint a szűrőre gyűjtött aeroszol-részecskének. Ha tisztán fekete anyagot tartalmazna az aeroszoliminta, mindegyik hullámhosszon ugyanazt a számított BC koncentrációt kapnánk. Amennyiben a BC-től eltérő optikai tulajdonságú részecskéket (is) tartalmaz az aeroszol, az abszorpció hullámhosszfüggése a λ^{-1} -től eltér. A hullámhosszfüggés vizsgálatával különböző optikai tulajdonságú aeroszol-részecskék arányairól szerezhethetünk információt.

A mérések során megfigyelték, hogy a szűrőszalag továbbítása előtt a BC koncentráció csökkenő tendenciát mutat, majd látszólag megugrik a szűrőszalag továbbítása után (Arnott et al., 1999; Weingartner et al., 2003; Kirchstetter and Novakov, 2007; Virkkula et al., 2007). A műszer feltételezi, hogy az ATN változás és a BC koncentráció között egyenes arányosság van, miközben a feketedést a szűrő egy adott foltján folyamatosan mérik, de közismert, hogy a kapcsolat nem lineáris (Weingartner et al., 2003; Park et al., 2010). Ennek oka, hogy a szűrőre az elnyelő részecskéken kívül szóró részecskék is kerülhetnek, melyek befolyásolják az optikai csillapítást. Így a szűrő telítődésével, vagyis ATN növekedésével a mért BC koncentrációt a műszer alulbecsli, valamint a szóró részecskéket is BC-nek érzékeli.

A módszer hátránya tehát, hogy korrekciós algoritmust kell alkalmazni a mért BC koncentrációk javítására, mert b_{ATN} nagyon különbözhet a valós abszorpciós együtthatótól (b_{abs}), amely a levegőben lévő aeroszol-részecskékre a Beer–Lambert törvény alapján definiálható. Egy x vastagságú közegen áthaladva a fényintenzitás a következőképpen írható:

$$I = I_0 e^{-b_{abs} x}, \quad (10)$$

Bevezették a C és az $R(ATN)$ kalibrációs faktorokat. A faktorok két hatást jellemeznek, melyek a szűrő szálai közé ágyazódott részecskék optikai tulajdonságainak megváltozását írják le:

$$b_{abs} = b_{ATN} \frac{1}{C R(ATN)}. \quad (11)$$

A C faktor az első hatás kiküszöböléséért felelős, mely 1-nél nagyobb és a még telítetlen szűrőszálon végbemenő többszörös fényszórás miatt van rá szükség. Ez az optikai úthossz növekedéséhez és így a lerakódott részecskék fényelnyelésének növekedéséhez vezet (Liousse et al., 1993). C értékét empirikus úton határozta meg Petzold et al. (1997), ami becslésük szerint 1,9 és 2,5 között változik. Weingartner et al. (2003) a C faktort 2,14-nek választotta. Az abszorpciós együttható kiszámításánál én is ezzel az értékkel dolgoztam.

A lerakódott részecskék másik hatását az empirikus $R(ATN)$ függvény írja le, mely változik (a) a szűrőre beágyazódott aeroszol részecskék mennyiségétől és (b) a szűrőre ülepedett részecskék optikai tulajdonságaitól. Telítetlen szűrő esetén $R(ATN = 0) = 1$. A filterre akumulálódott részecskék következtében ATN fokozatos növekedésével a filteren elnyelő részecskék a szórt fény nagyobb hányadát abszorbeálják, ami az optikai úthossz csökkenéséhez vezet ($R < 1$). Ezt a hatást árnyékoló hatásnak nevezzük. Ha fényszóró részecskék is vannak a szűrőn, akkor az árnyékoló hatás részben lecsökken és egyfajta kisebb csökkenés mutatható ki az R értéket tekintve a részecskék filterre történő töltődésével. Ez a jelenség a világos aeroszol-részecskék által okozott további fényszórás következménye. Így R függ az aeroszolminta egyszeres szórási albedójától, mely definíció szerint:

$$\omega_0 = \frac{b_s}{b_e} = \frac{b_s}{b_{abs} + b_s}, \quad (12)$$

ahol b_s és b_e a fényszórási és fényextinkciós együttható. Az empirikus korrekciós faktorok ismerete fontos a korrigált BC koncentráció meghatározásához:

$$[BC]_{corr} = \frac{b_{abs}}{\sigma_{abs}} = \frac{b_{ATN}}{\sigma_{ATN} R(ATN)}, \quad (13)$$

ahol $\sigma_{abs} = \frac{\sigma_{ATN}}{C}$ a tömeg szerinti korrigált abszorpciós hatáskeresztmetszet ($m^2 g^{-1}$).

Így (9) és (13) egyenletekből a korrigált BC koncentráció:

$$[BC]_{corr} = \frac{[BC]}{R(ATN)}. \quad (14)$$

Coen et al. (2010) összegyűjtötték a filteres mérési technikákra alkalmazott korrekciókat. Ezek közül a Virkkula-féle filter telítődési korrekciót mutatom be.

3.3.3.1 Virkkula-féle filter telítődési korrekció

A Virkkula-féle korrekció (Virkkula et al., 2007) csak a filter telítődésénél fellépő hiba korrigálására alkalmas, így nem b_{ATN} teljes korrekciója. A kutatások során azok alkalmazzák, akik aethalometerrel végeznek méréseket, és nem mérik mindig egyidejűleg a részecskék szórását. A részecskék szórásáról nekem sem volt információ. A (14) egyenlethez szükséges R faktor a következőképpen írható fel:

$$\frac{1}{R} = (1 + k_i \cdot ATN) b_{ATN}, \quad (15)$$

$$k_i = \frac{[BC]_0(t_{i+1,first}) - [BC]_0(t_{i,last})}{ATN(t_{i,last}) [BC]_0(t_{i,last}) - ATN(t_{i+1,first}) [BC]_0(t_{i+1,first})}, \quad (16)$$

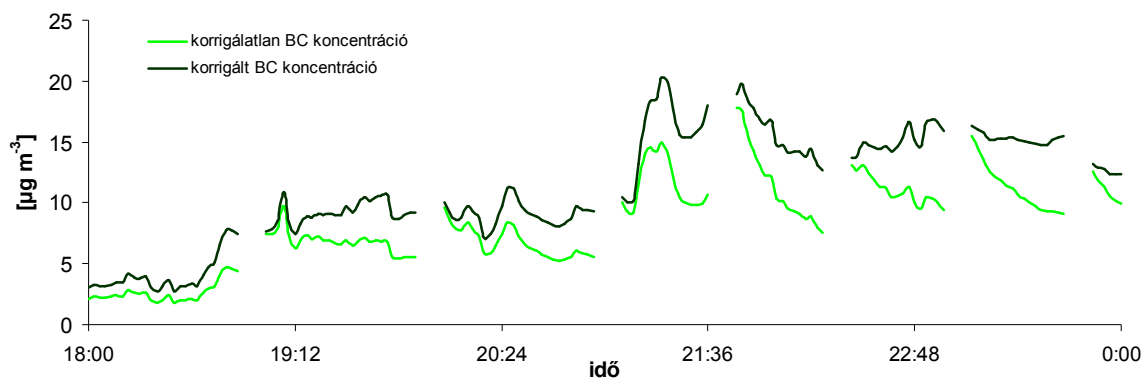
Ahol $t_{i,last}$ az utolsó mérés ideje az i . filterfolton és $t_{i+1,first}$ az első mérés ideje az $i+1$. folton. A k_i értéket minden filterfoltra meg kell határozni és az egyes expedíciókra vett átlagát (k) alkalmazni az összes mért értékre. Így a korrigált BC aeroszol tömegkoncentrációra ($\mu\text{g m}^{-3}$) teljesül, hogy:

$$[BC]_{corr} = (1 + k \cdot ATN) [BC] \quad (17)$$

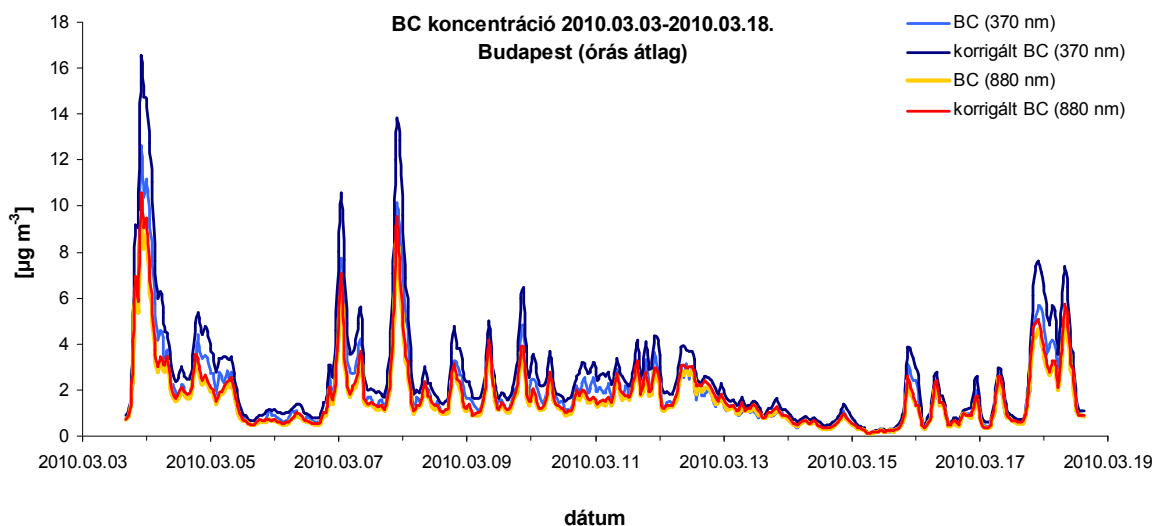
A korrekció gyakorlati alkalmazásakor k_i kiszámításához javasolt a szűrőszalag i . foltn az utolsó három mérési adat és a következő $i+1$. folton az első három mérési adat átlagát venni. A korrekció előnye, hogy minimalizálja a filter telítődése által okozott fényintenzitás-gyengülés hatását.

Egy példán keresztül szemléltem a korrekció alkalmazásának szükségességét. A 12. ábrán a budapesti nyers és korrigált adatok egy része látható 2 perces mintavételezési idővel 2010. március 3-án 18.00 és 24.00 között a 370 nm-es hullámhosszon. Az adatsorban akkor vannak szakadások, amikor a műszer továbbítja a mintavevő szalagot. A

szalagtovábbítás előtt általában erős csökkenő tendencia figyelhető meg, illetve utána egy nagy ugrás látható, az adatok nem tűnnek egymás folytatásának. Például 21.36-kor $10,7 \mu\text{g m}^{-3}$ volt a koncentráció, majd a szalagtovábbítás után $19,8 \mu\text{g m}^{-3}$ -re, szinte kétszeresére változott. A már korábban említett okok miatt alkalmaztam a (17) egyenletet. A korrigált adatokból számolt órás átlagok Budapestre a 13. ábrán láthatók.



12. ábra: Korrigálatlan és korrigált BC koncentrációk (Budapest, 2010. márc. 3. 18.00–24.00)



13. ábra: A 2 perces korrigálatlan és korrigált adatokból számolt BC koncentrációk 370 és 880 nm-en (órás átlag, Budapest 2010.03.03–18.)

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

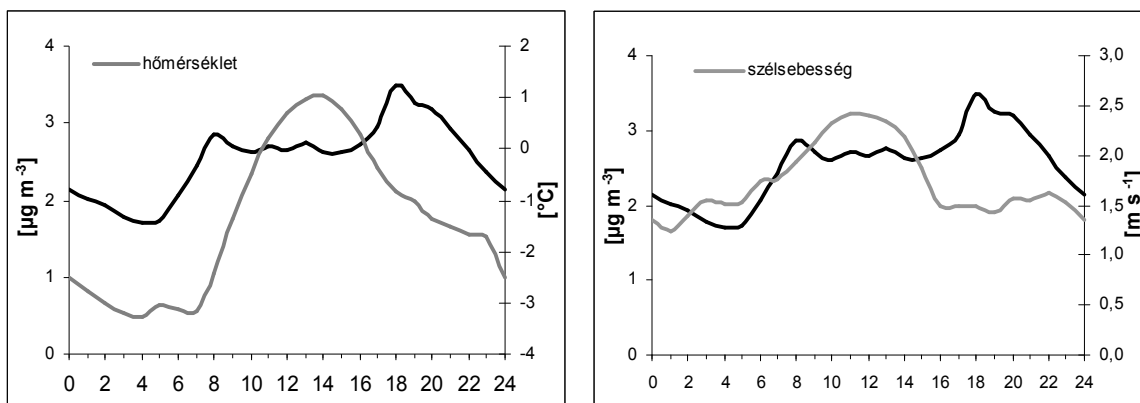
4.1 A BC koncentrációk napi menetei

Ebben az alfejezetben szemléltetem a BC koncentrációk napi meneteit, melyeket a korrekció után nyert óras átlagokból határoztam meg. A napi menteket a 14–20. ábrákon mutatom be Paksra évszakos bontásban a vizsgált kéthetes időszakokra, illetve a budapesti és szegedi mérési időszakokra is. A BC mellett feltüntettem a helyben mért hőmérséklet és a szélesség átlagos napi változását, valamint Budapest és Szeged esetén a keveredési réteg magasságának átlagos napi meneteit is.

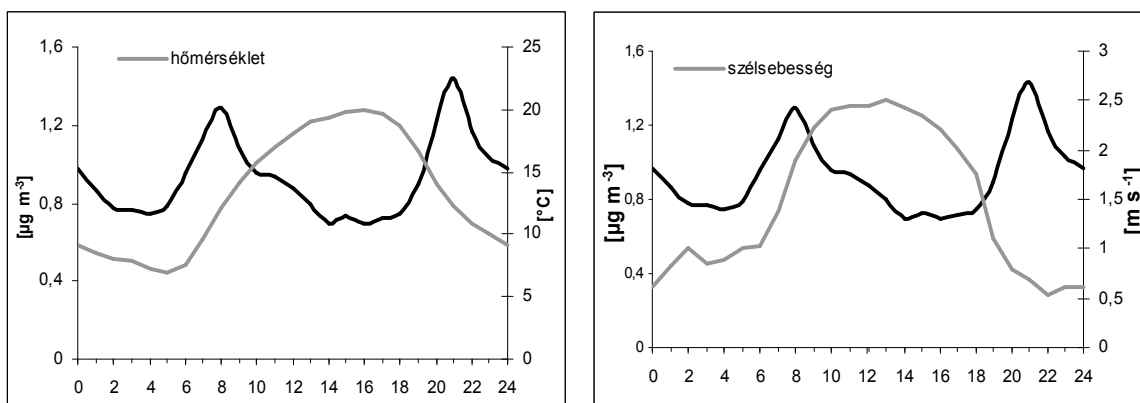
A koncentrációnak határozott napi menete van. A koncentrációk emelkedése hajnali 4–5 óra körül indul meg és mindegyik esetben megfigyelhető egy reggeli maximum; a paksi és budapesti állomáson 8 órakor, a szegedi állomáson pedig 10 órakor. Az emelkedést előidézhetheti az éjszakai maradék rétegből a részecskék lekeveredése, valamint a közlekedés. A maximumok oka főként a reggeli csúcsforgalom, de az értékek erősen függenek az évszaktól is. A legmagasabb reggeli értékek a fűtési időszakokban figyelhetők meg (Paks: $2,8 \mu\text{g m}^{-3}$, Szeged: $3,5 \mu\text{g m}^{-3}$, Budapest: $2,49 \mu\text{g m}^{-3}$). Ezt követi rendre a szeptemberi ($2,03 \mu\text{g m}^{-3}$), az áprilisi ($1,29 \mu\text{g m}^{-3}$) és a júniusi ($0,89 \mu\text{g m}^{-3}$) reggeli maximum. Ezután a napi menetet csökkenő tendencia jellemzi. Az esetek nagy részében a minimum 13.00–14.00 körül figyelhető meg (Paks, ápr.: $0,69 \mu\text{g m}^{-3}$, jún.: $0,61 \mu\text{g m}^{-3}$, szept.: $0,65 \mu\text{g m}^{-3}$, Budapest: $1,1 \mu\text{g m}^{-3}$, Szeged: $2,13 \mu\text{g m}^{-3}$). Februárban a paksi állomás esetén 9.00 -ra lecsökken a koncentráció $2,7 \mu\text{g m}^{-3}$ -re, de további csökkenés nem figyelhető meg, összehasonlítva a szegedi és a budapesti értékkel. Budapesten a csökkenő tendencia oka az autóforgalom csökkenése mellett a szélesség és a keveredési réteg magasságának megemelkedése a vizsgált időszakban a nappali órák folyamán, ami elősegítette a levegő felhígulását, így a részecskék az intenzív turbulencia miatt magasabb légrétegekbe kerülhettek. A szélesség maximumai 12.00–14.00 közötti időszakban következnek be (Pakson, febr.: $2,4 \text{ m s}^{-1}$, ápr.: $2,5 \text{ m s}^{-1}$ jún.: $2,5 \text{ m s}^{-1}$ szept.: $2,2 \text{ m s}^{-1}$). A keveredési réteg magassága délben volt maximális (1875 m). A szegedi adatok napi menete és a szélesség között nem figyelhető meg összefüggés, aminek vélhetően az az oka, hogy itt csak viszonylag kis változásokat tapasztaltunk a szélesség átlagos napi menetében, valamint a mintavételezési idő is csak egy hét volt. Szegeden a koncentrációértékek csökkenésének lehetséges okai az autóforgalom csökkenése és a keveredési réteg magasságának megemelkedése, mely délben érte el a maximumot (1174 m).

A napi menetek csökkenő tendenciáit a koncentráció növekedése követi 17.00-tól, kivéve Szegedet, ahol a koncentráció-értékek emelkedése már 13.00-tól megfigyelhető. A koncentrációk a maximum értéket 21.00–22.00-között veszik fel; Budapesten $3 \mu\text{g m}^{-3}$, Szegeden $5,25 \mu\text{g m}^{-3}$, Pakson áprilisban $1,43 \mu\text{g m}^{-3}$, júniusban $0,8 \mu\text{g m}^{-3}$, szeptemberben $1,64 \mu\text{g m}^{-3}$. Pakson februárban a koncentráció a maximumát ($3,48 \mu\text{g m}^{-3}$) 18.00-kor éri el. A koncentráció emelkedésének az autóforgalom növekedése, a szélesebbesség csökkenése és a határreteg magasságának csökkenése lehetnek az okai. Budapesten a keveredési réteg magassága 17.00-kor 524 m-re, majd 22.00-ra 290 m-re csökkent. Szegeden a keveredési réteg magassága 13.00-ra 473 m-re csökkent, 21.00-kor pedig 212 m volt. és a téli menetek esetén ezen kívül az alacsony hőmérsékletek miatt a lakossági egyéni fűtési megoldások is, például a fatüzelés is szerepet játszanak a koncentráció-értékek emelkedésében. A koncentráció-értékek hajnali 4 óráig csökkenő tendenciát mutatnak. Az autóforgalom is lecsökken, így nincs utánpótlása a részecskéknek, valamint egy részük száraz ülepedéssel távozik a légkörből. A koncentráció-értékek minimumai 4.00-kor Budapesten $1,31 \mu\text{g m}^{-3}$, Szegeden $2,05 \mu\text{g m}^{-3}$, Pakson februárban $1,7 \mu\text{g m}^{-3}$, áprilisban $0,75 \mu\text{g m}^{-3}$, júniusban $0,52 \mu\text{g m}^{-3}$ és szeptemberben $0,73 \mu\text{g m}^{-3}$. A szélirányok és a koncentrációk napi menetei között nem található egyértelmű összefüggés.

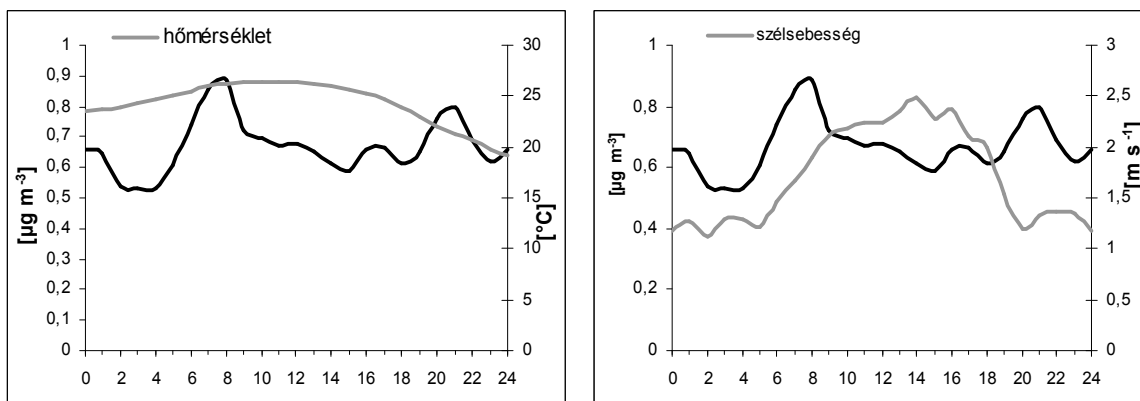
A 21. ábra együtt mutatja be a koncentrációk napi meneteinek évszakos változását, kiegészítve a budapesti és szegedi értékek napi meneteivel. Az évszakok közti különbségek az antropogén forrásokon kívül nagymértékben függenek a légköri folyamatoktól, mint a határreteg dinamikája, illetve a szélesebbesség megváltozása. Paksi határreteg magasság adatok nem álltak rendelkezésemre, de összességében elmondható, hogy nyáron a nagyobb besugárzás miatt a turbulencia jelentősebb napközben és a határreteg is magasabban van, mely elősegíti a részecskék felhígulását, így magas koncentrációk sem alakulnak ki. A paksi téli adatok menete azért is térhet el a többi évszakétól, mert máshol történt a mintavételezés.



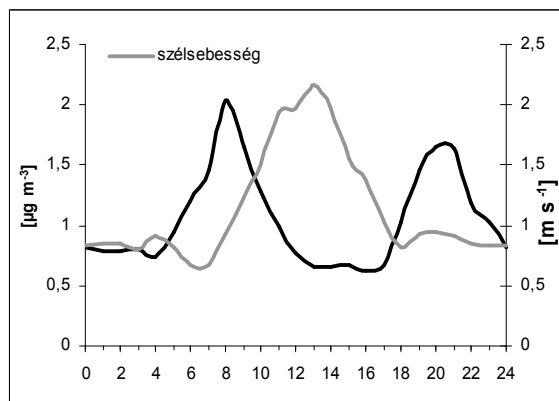
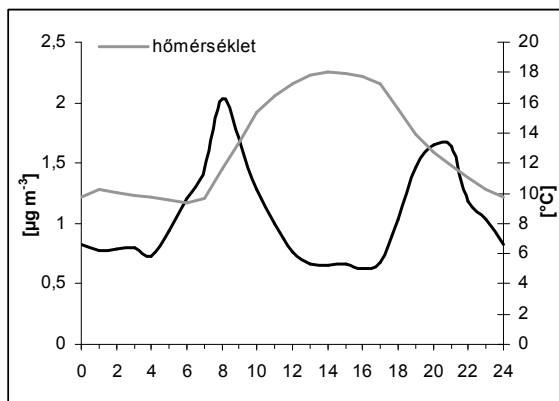
14. ábra: A BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a hőmérséklet és a szélsebesség átlagos napi menetei Paks, 2010.02.03–15



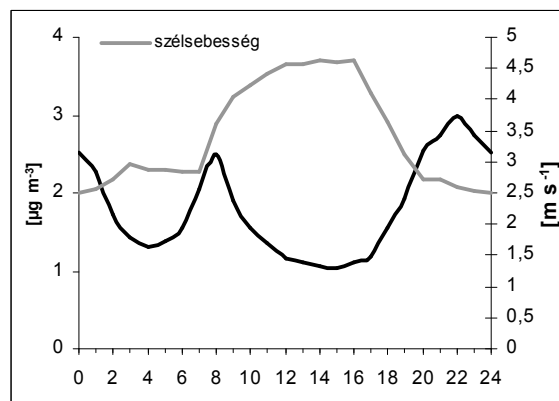
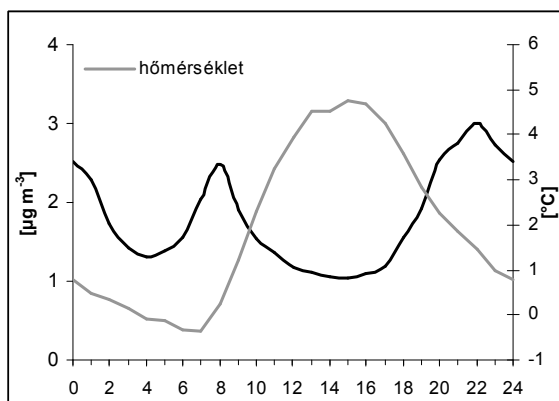
15: A BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a hőmérséklet és a szélsebesség átlagos napi menetei Paks, 2010.04.16–30.



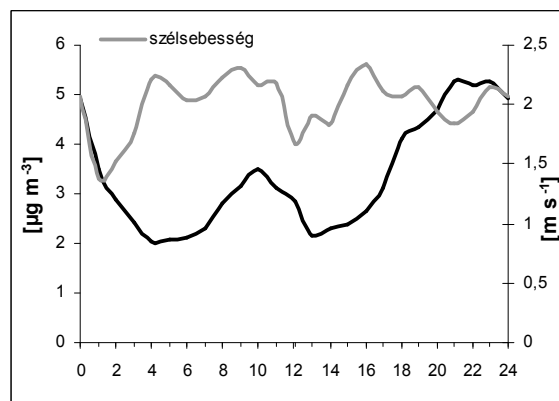
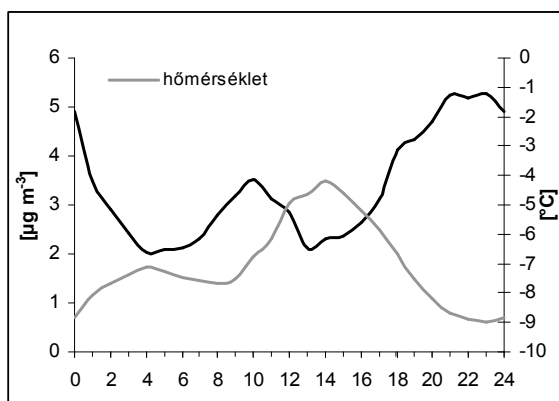
16. ábra: A BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a hőmérséklet és a szélsebesség átlagos napi menetei Paks, 2010.06.17–30.



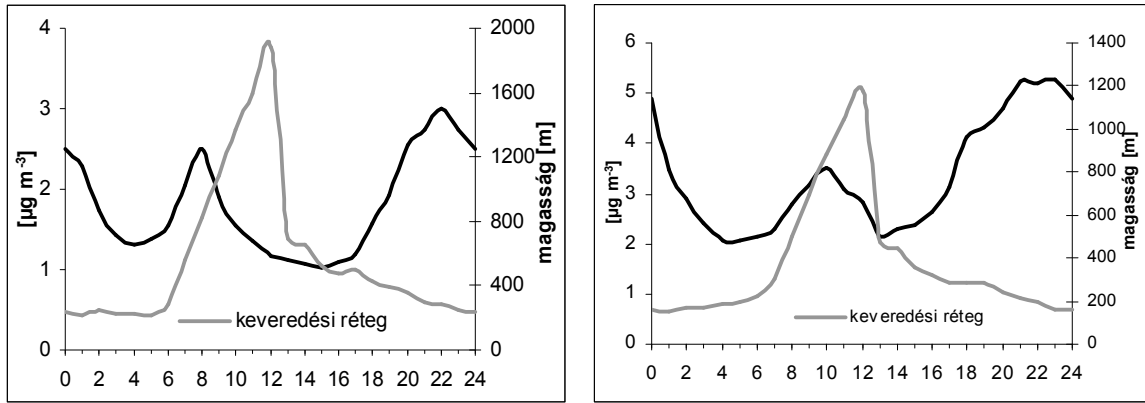
17. ábra: A BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a hőmérséklet és a szélesebesség átlagos napi menetei, Paks, 2010.09.17–30.



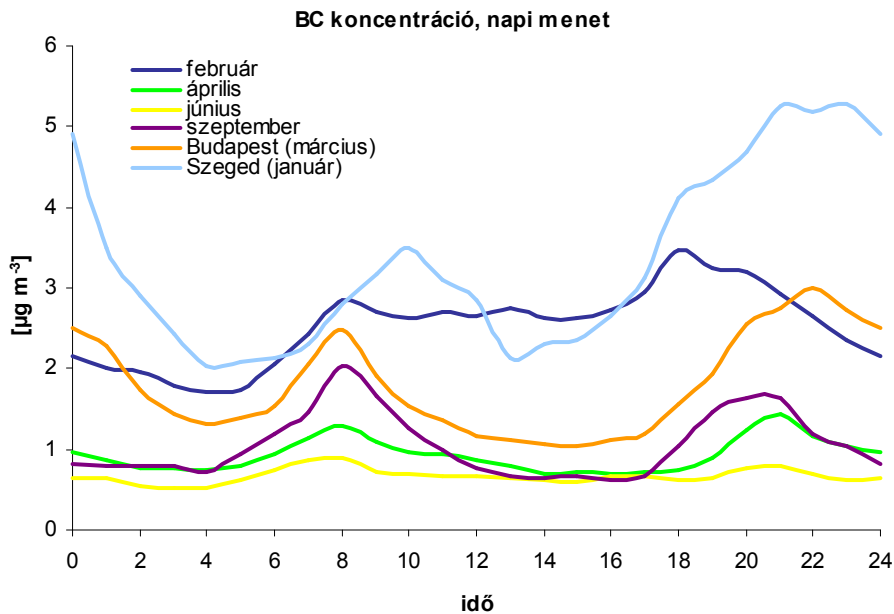
18. ábra: BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a hőmérséklet és a szélesebesség átlagos napi menetei, Budapest, 2010.március 3–18.



19. ábra: BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a hőmérséklet és a szélesebesség átlagos napi menetei, Szeged, 2010.január 22–28.



20. ábra: BC koncentrációk (az ábrákon fekete vonal), valamint a keveredési réteg átlagos napi menetei, Budapest, 2010.március 3–18., Szeged, 2010.január 22–28.



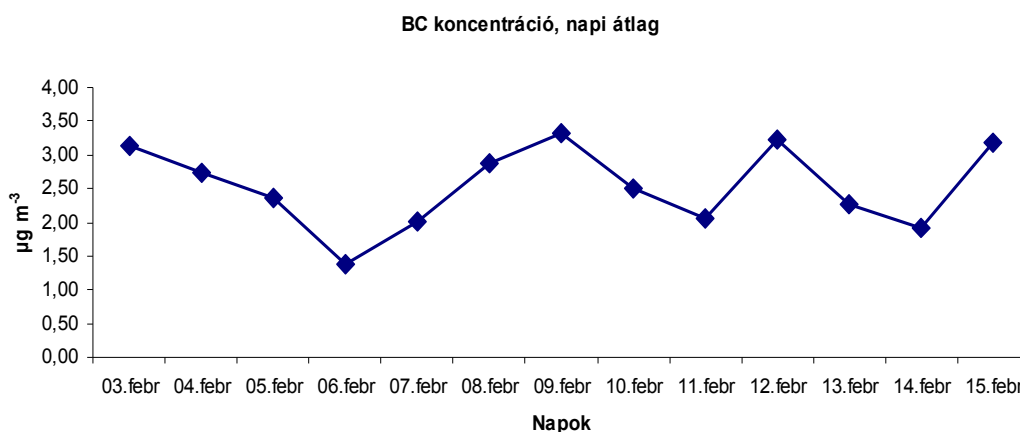
21. ábra: A BC koncentráció órás átlagokból számolt napi menete Paks (február, április, június, szeptember), Budapest és Szeged állomásokra

4.2 A napi átlagos BC koncentrációk a szinoptikus helyzet tükrében

Több kutatás -köztük Holst et al. (2008) és Viana et al. (2005)- kimutatta, hogy a magas PM10 szennyezettség a szinoptikus skálájú időjárási folyamatok befolyásolják, ezért a BC koncentrációk napi átlagainak időbeli változása és szinoptikus helyzetek kapcsolatát vizsgáltam.

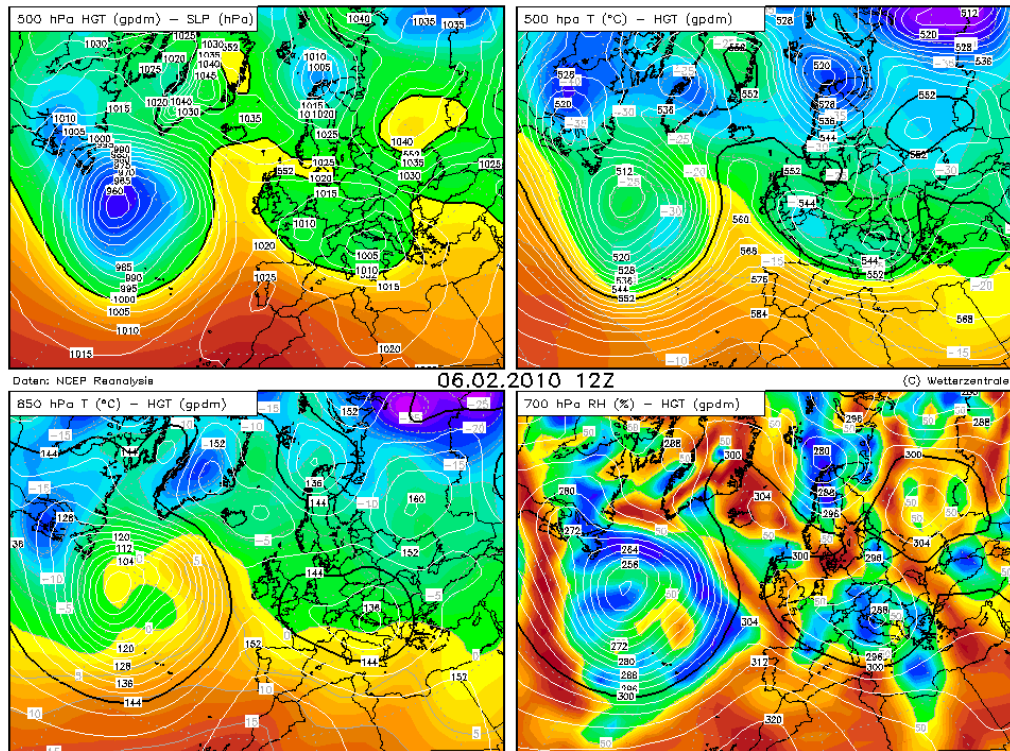
4.2.1 Paks, 2010. február 3–15.

A hónap elején a napi átlagkoncentrációk (22. ábra) folyamatos csökkenése figyelhető meg. A csökkenés oka a váltakozó irányú szél, mely több irányból is kitisztította a város levegőjét.



22. ábra: A BC koncentráció napi átlaga Pakson, 2010. február 3–15.

Február 3-án északnyugat felől egy ciklon melegfrontja érintette az országot, az északi és keleti területeken többfelé volt havazás a front területén, de számottevő friss hóréteg ebből nem alakult ki. A nyugatias szelet többfelé erős lökések kísérték, emiatt az éjszakai hőmérséklet a Dunántúl jelentős részén fagypont közelében alakult; míg keleten, ahol gyengébb volt a szél, később érkezett a frontfelhőzet, és vastag hótakaró alakult ki a korábbi mediterrán ciklonból; jellemzően -10 fok alatti hőmérsékleti értékek fordultak elő. Ekkor $3,13 \mu\text{g m}^{-3}$ volt a napi átlagos BC koncentráció. A melegfront távozása után egy kelet-európai (kontinentális) anticiklon éreztette hatását. A Dunántúlon az anticiklon keleti peremén délies irányból enyhébb levegő áramlott, ennek hatására a Dunától nyugatra a maximumhőmérsékletek általában fagypont felett alakultak, és az éjszakák sem voltak zordak. A BC koncentráció február 5-ére $2,35 \mu\text{g m}^{-3}$ -re csökkent. Február 6-ától kezdve hazánk ismét egy mediterrán ciklon (23. ábra) áramlási rendszerébe került, fokozatosan délkeleti-keleti, majd északkeleti áramlással ismét hideg levegő érkezett az egész Kárpát-medencébe. A magassági térképeken látszik, hogy 500 hPa-on Magyarországtól délnyugatra alacsonyabbak a hőmérsékletek, magas szintű réteges felhőzet alakult ki, illetve a 700 hPa-os térképen a nagy nedvesség középszintű réteges felhőzetre utal. Tehát délnyugat felől kiterjedt havazás kezdődött. Pakson 8 mm csapadék esett hó formájában (24. ábra). Ekkor a BC koncentráció $1,37 \mu\text{g m}^{-3}$ volt.



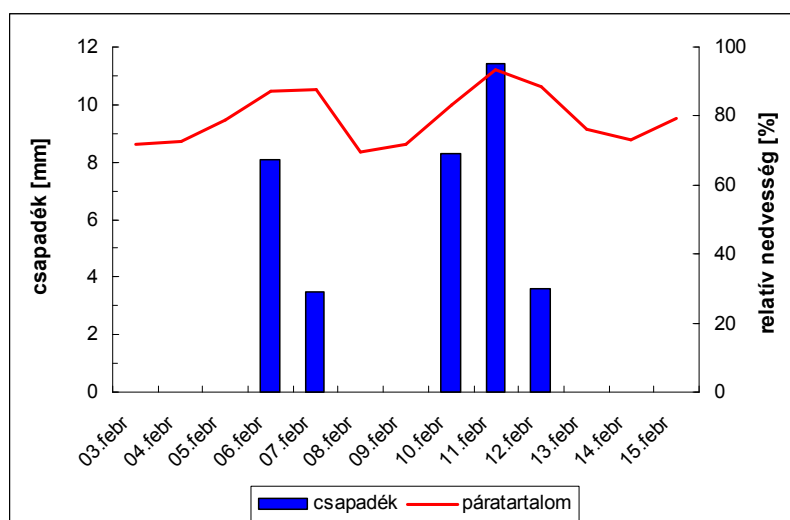
23. ábra: NCEP reanalízis mező; 2010.06.02. 500 hPa-os geopotenciál magasság és légnyomás, 500 hPa-os hőmérséklet és geopotenciál magasság, 850 hPa-os hőmérséklet és geopotenciál magasság, 700 hPa-os relatív nedvesség és geopotenciál magasság térképek (forrás: <http://www.wetterzentrale.de>)

Február 7-én sokfelé fordult elő havazás, nagyobb mennyiség a déli-délnyugati országrészben esett. Február 8-án a havazást okozó légörvény délkelet felé távozott, fokozatosan gyengült a havazás intenzitása és területi kiterjedése is. A ciklon mögött ismét hideg levegő érkezett, többfelé volt zord nap az országban, és a maximumhőmérséklet is fagypont alatt alakult általában. A távozó és gyengülő ciklon felhőzetéből helyenként még előfordult kisebb havazás. A hó átvette az aktív felszín szerepét, így a kialakuló inverzió miatt a napi átlagos koncentráció értékek megemelkedtek, 8-án $2,87 \mu\text{g m}^{-3}$, 9-én $3,32 \mu\text{g m}^{-3}$ volt a napi átlag. PM_{10} koncentráció napi átlagértéke 9-én az egészségügyi határérték felett alakult ($67,7 \mu\text{g m}^{-3}$). Határérték túllépés a paksi mérési kampány alatt csak ezen és a következő napon történt. A PM_{10} koncentráció napi átlagait 2. táblázat mutatja.

Napi átlagos PM ₁₀ koncentrációk Pakson							
téli periódus	PM ₁₀ µg m ⁻³	tavaszi periódus	PM ₁₀ µg m ⁻³	nyári periódus	PM ₁₀ µg m ⁻³	ősz periódus	PM ₁₀ µg m ⁻³
2010.02.03	34,4	2010.04.16	19,3	2010.06.17	17,8	2010.09.17	11,4
2010.02.04	47,7	2010.04.17	25,1	2010.06.18	13,1	2010.09.18	8,7
2010.02.05	45,8	2010.04.18	26,3	2010.06.19	13,5	2010.09.19	10,9
2010.02.06	29,4	2010.04.19	25,4	2010.06.20	15,2	2010.09.20	18,9
2010.02.07	35,6	2010.04.20	28,5	2010.06.21	16,9	2010.09.21	25,2
2010.02.08	43,4	2010.04.21	21,4	2010.06.22	14,9	2010.09.22	25,8
2010.02.09	67,7	2010.04.22	16,3	2010.06.23	16	2010.09.23	28,7
2010.02.10	52,1	2010.04.23	22,4	2010.06.24	14,8	2010.09.24	48,1
2010.02.11	22,7	2010.04.24	28,1	2010.06.25	15,8	2010.09.25	45
2010.02.12	46,5	2010.04.25	29,4	2010.06.26	15,1	2010.09.26	11,6
2010.02.13	35,8	2010.04.26	34,4	2010.06.27	22,7	2010.09.27	15,8
2010.02.14	23,4	2010.04.27	29,4	2010.06.28	16,9	2010.09.28	13,1
2010.02.15	34,6	2010.04.28	16,2	2010.06.29	20,65	2010.09.29	8,6
				2010.06.30	27,9	2010.09.30	9,4

2. táblázat: A légköri aeroszol PM₁₀ koncentrációjának napi átlaga a vizsgált időszakokra

Február 9. után ismét csökkenő tendenciát mutattak a BC koncentráció-értékek 14-éig, de 12-én egy maximum volt megfigyelhető. 10-én egy újabb mediterrán ciklon hatására délkelet felől a keleti országrészbe enyhébb levegő érkezett, a Dunántúlon északkelet felől továbbra is hideg levegő áramlott. Emiatt egyre többfelé fordult elő havazás a Dunántúlon és az Északi-középhegység területén; a keleti országrészben eső is, megerősödő keleties szél mellett. Február 10-én 8, 11-én 11 mm csapadék esett hó formájában (24. ábra). 10-ére a PM₁₀ koncentráció is lecsökkent, de még az egészségügyi határérték fölött volt (52,1 µg m⁻³).

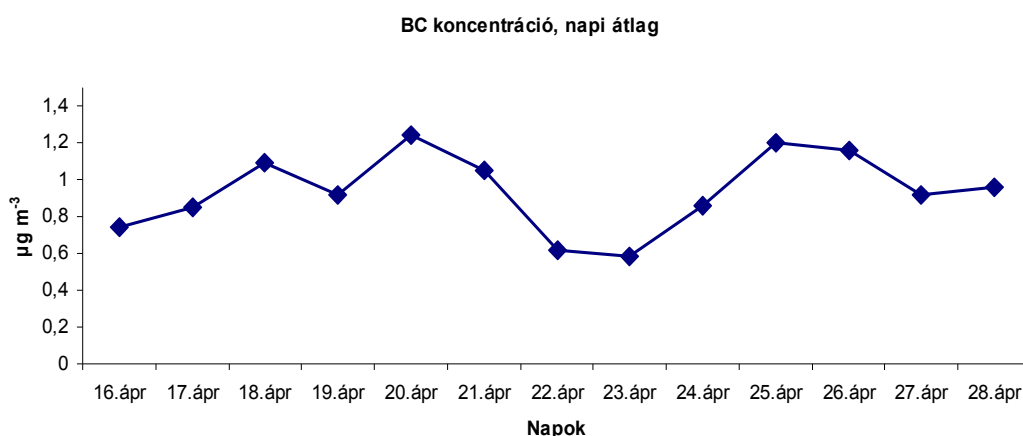


24. ábra: Napi csapadékösszegek és napi átlagos páratartalom, Paks (2010.02.03–15.)

Február 12-én a Dunántúlon az egész napos fagyos idő és erős szél miatt több helyen volt hófúvás, sokfelé alakult ki 20 cm-t meghaladó hóréteg. A 12-én megfigyelt kiugró érték ($3,23 \mu\text{g m}^{-3}$) valószínűleg annak köszönhető, hogy a cikloncentrum áthaladt az ország fölött, ezáltal átmenetileg gyengébb lett a légmozgás, így felhalmozódhattak a szennyezőanyagok a légkörben. Február 13–14-én a ciklon hátoldali áramlási rendszerébe kerülve a keleti területeken is havazásba váltott a csapadék, míg a Dunántúlon megszűnt a havazás, de a szél erős maradt. Február 15-én a ciklon csapadékzónája kelet-északkelet felé elhagyta az országot, itt még előfordult gyenge havazás. A koncentráció ismét megemelkedett ($3,12 \mu\text{g m}^{-3}$).

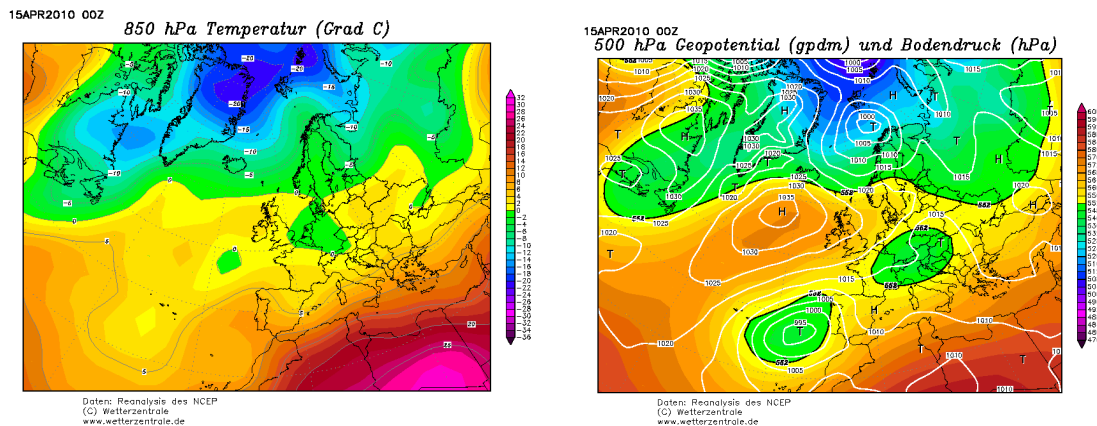
4.2.2 Paks, 2010. április 16–30.

Az időszak elején alacsony napi átlagkoncentráció értéket (25. ábra) figyelhetünk meg ($0,74 \mu\text{g m}^{-3}$). Ennek oka, hogy április 14-én egy mediterrán ciklon vonult át a Kárpát-medence fölött. Az ország keleti részén melegfrontja mentén sztratiform csapadék; nyugaton hidegfrontja mentén záporok, zivatarok alakultak ki. Az ország középső területén, ahol a ciklon melegszekektora húzódtott; sztratiform és beágyazott konvektív csapadék egyaránt jellemző volt. A Dunántúlon jégdara és jégeső is esett.



25. ábra: A BC koncentráció napi átlaga Pakson, 2010.04.16–30.

A következő nap a ciklon elkezdett feltöltődni hideg levegővel, hidegcseppé alakult (26. ábra). Így a nagy vertikális hőmérsékleti gradiensnek köszönhetően konvektív események alakították az időjárást; többféle alakultak ki záporok, zivatarok.

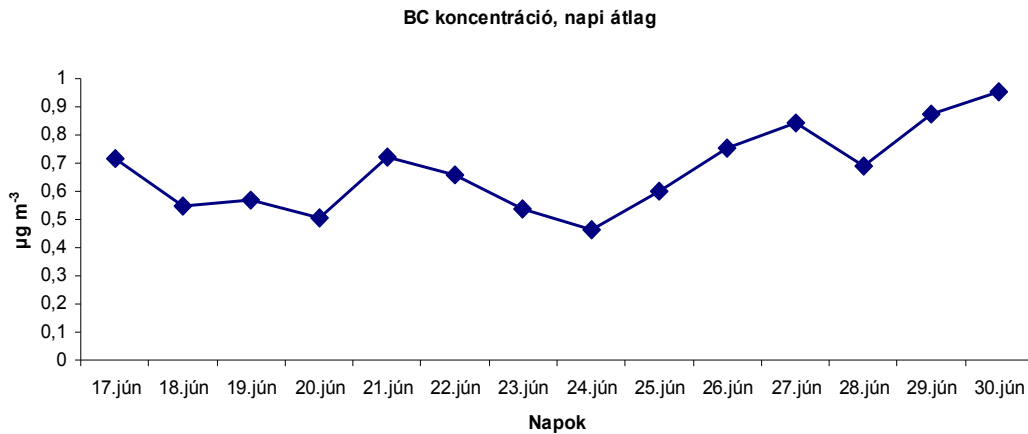


26. ábra: NCEP reanalízis mezők; 2010.04.15. 850 hPa-os hőmérséklet, 500 hPa-os geopotenciál magasság és légnyomás térképek (forrás: <http://www.wetterzentrale.de>)

Április 16-ára a ciklon északkelet felé haladva, fokozatosan disszipálódott. Április 17-én és 18-án anticiklonális hatás következtében kicsivel magasabb átlagkoncentráció-értékek voltak jellemzőek ($0,85$ és $1,09 \mu\text{g m}^{-3}$). Április 19-ére a koncentráció lecsökkent egy sekélyebb sztratiform csapadékot adó mediterrán ciklon következtében. A ciklon hátoldalán 20-án megerősödött az északi szél. A hideg levegő bezúdulását északról egy fokozatosan fölénk helyeződő anticiklon akadályozta meg, melynek hatása a koncentráció kismértékű emelkedésében is érvényesült. Április 21-én és 22-én a BC koncentráció ismét csökkent az északias áramlású hideg levegő következtében. Április 22-ére megerősödött az északi szél, Pakson a napi maximum hőmérséklet 10 – 12 fok körül ingadozott. Az ország déli területén a lelassuló hidegfront mentén záporok fordultak elő viharos szellőkessel. A front elvonultával 23-án mérséklődött a szél, a déli területeken előfordult még gyenge eső, zápor; majd a nap második felétől egyre erősödő anticiklonális hatás érvényesült. Április 24-én és 25-én gyenge volt a légmozgás; a talajon és a magasban is a hőmérséklet jelentős mértékben emelkedett; csapadék nem hullott. A következő nap az anticiklon kelet felé mozdult el. A nappali órákban megélnkült a délies szél; csapadék nem fordult elő; a hőmérséklet a délies irányú melegadvekciónak következtében tovább emelkedett. Mindezen hatások következtében a BC koncentráció emelkedő tendenciát mutatott; 25-én $1,2 \mu\text{g m}^{-3}$ volt a napi átlag. Az időszak végén a koncentráció kismértékben lecsökkent. Észak felől egy magassági teknő súrolta Magyarországot, melynek következtében kismértékben labilizálódott a légkör, emiatt erősebb lett az átkeveredés, mely a koncentráció értékek csökkenésében is megnyilvánult.

4.2.3 Paks, 2010. június 17–30.

A napi átlagos BC koncentráció június 17-én $0,72 \mu\text{g m}^{-3}$ volt, majd 18-án kismértékű csökkenés, 19-én növekedés, majd 20-án újból csökkenés következett be (27. ábra).



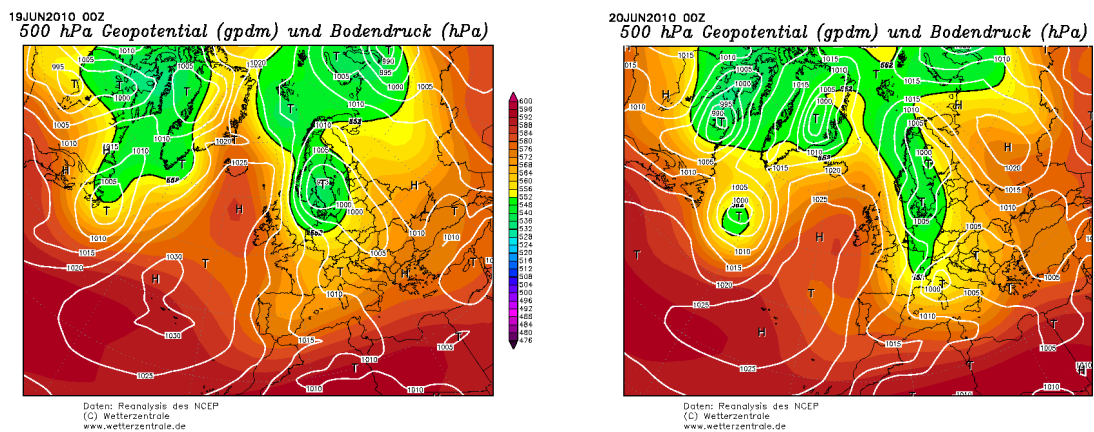
27. ábra: A BC koncentráció napi átlaga Pakson, 2010.06.17–30.4.2.4 Paks, 2010. szeptember 17–30.

Ennek oka, hogy június 17-én és 18-án egy előregező mediterrán ciklon érintette hazánkat délnyugatról. A ciklon áramlási rendszerében a Dunántúlon záporok, zivatarok fordultak elő, az ország keleti területei nem voltak annyira csapadékosak; a délkelet felől érkező száraz levegő következtében. Pakson 14 mm csapadékot regisztráltak (28. ábra).



28. ábra: 2010.06.19-én kiadott OMSZ időjárás napi jelentés részlete

Június 19-én átmenetileg anticiklonális hatások érvényesültek, majd a Skandinávia fölött örvénylő ciklon áramlási rendszerébe került Közép-Európa. Északnyugat felől hideg levegő áramlott be a Kárpát-medencébe. Az Alpokon átbukó hideg levegő és a magassági örvényességi advekciónak következtében gyorsan kialakult egy újabb mediterrán ciklon a felső troposzféra nagy amplitúdójú hullámzása következtében. A hideg levegő advekciónak jól látható a 29. ábrán. Június 20-án már ez a ciklon befolyásolta hazánk időjárását erős, viharos szellőkéssekkel, folytonos esővel. A koncentráció-értékekben további csökkenés figyelhető meg 24-éig ($0,46 \mu\text{g m}^{-3}$).



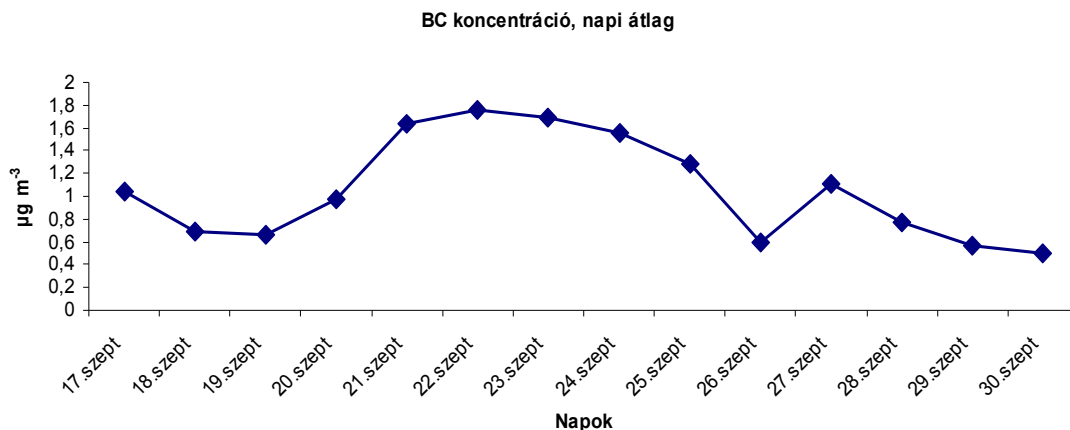
29. ábra: NCEP reanalízis mezők; 2010.06.19–20. 500 hPa-os geopotenciál magasság és légnyomás térképek (forrás: <http://www.wetterzentrale.de>)

Június 23-án a ciklon kelet felé távozott, a hőmérséklet visszaesett és a szél erős maradt. Június 24-én csapadék nem volt és a szél is mérséklődött. A napi átlagkoncentráció értékek ismét emelkedő tendenciát mutattak, 27-én $0,84 \mu\text{g m}^{-3}$ volt a napi átlag. Ennek oka, hogy a távozó ciklon hátoldali áramlásában fokozatosan mérséklődött a légmozgás, és egyre kevesebb helyen volt zápor, zivatar. Az időszak végéig anticiklonális hatások uralkodtak, a koncentrációban kismértékű visszaesés volt tapasztalható. Június 28-án a labilis légrétegződés miatt, záporok, zivatarok fordultak elő.

4.2.4 Paks, 2010. szeptember 17–30.

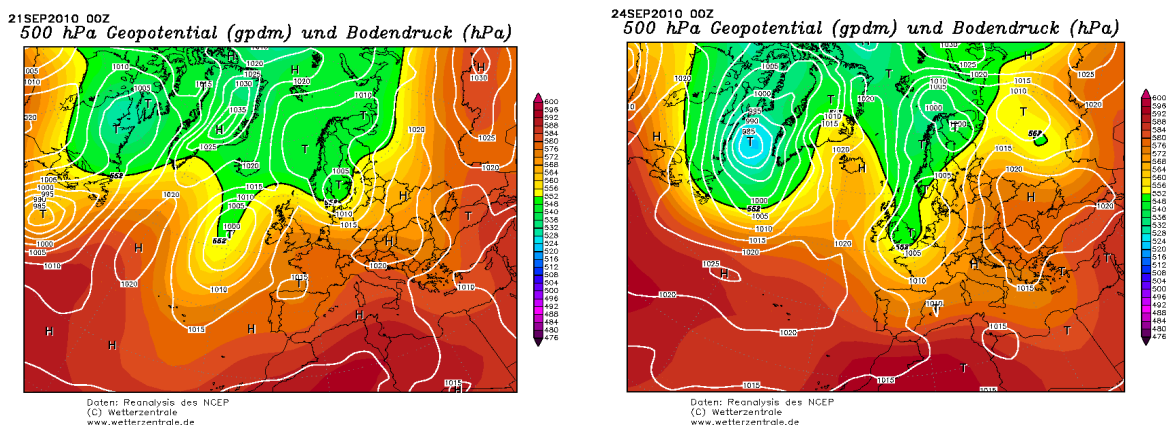
Szeptember 16-án és 17-én egy Skandinávia fölött örvénylő ciklon hullámzó frontrendszerébe érte el a Kárpát-medencét; északon sokféle okozott csapadékot. A Kárpát-medencétől délre anticiklonális helyzet alakította az időjárást, a déli területek kevésbé voltak csapadékosak. Az elkövetkezendő két napban délnyugat felől érkező mediterrán ciklon okozott csapadékot, és áramlási rendszerében erős szellőkéssek is előfordultak. Így

az időszak elején a szeptember 17-i ($1,04-0,84 \mu\text{g m}^{-3}$) napi átlagos koncentráció 19-ére lecsökkent ($0,66 \mu\text{g m}^{-3}$), majd az átlagértékek ismét emelkedni kezdtek és 24-étől ismét csökkenő tendenciát mutattak (30. ábra).



30. ábra: A BC koncentráció napi átlaga Pakson, 2010.09.17–30.

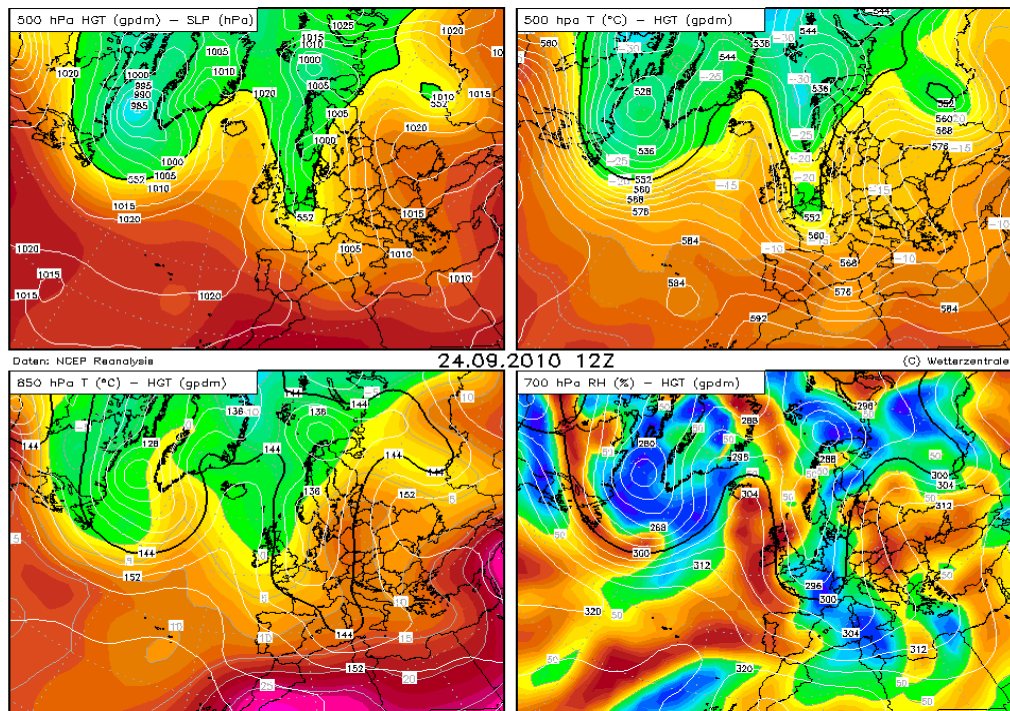
Szeptember 20. és 24. között anticiklonális hatások érvényesültek, ugyanis a Nyugat-Európa felett elhelyezkedő anticiklon keleti irányba helyeződött át, és fokozatosan a Kárpát-medence fölé húzódott. Az anticiklonális hatás következtében a talajközeli és magassági hőmérsékletek is megemelkedtek, gyenge volt a légmozgás. 24-én az anticiklon kelet felé helyeződött át, mögötte megélenkült a délkeleti szél (31. ábra).



31. ábra: NCEP reanalízis mezők; 2010.09.20. és 24. 500 hPa-os geopotenciál magasság és légnyomás térképek ([forrás: www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de))

Szeptember 25-én a Brit-szigetek fölött kiépült egy újabb anticiklon, keleti peremén észak felől hidegebb levegő érkezett, majd az Alpokon átbukva egy újabb mediterrán ciklont generált (32. ábra). A kialakuló mediterrán ciklon melegfrontja elérte a Kárpát-medencét,

erős délkeleti széllel, sok csapadékot okozva a nyugati területeken. A következő nap a ciklon hidegfrontja átvonult a Dunántúlon, mögötte megerősödött az északnyugati szél. A hidegfront vonala mögötti divergencia miatt átmenetileg csökkent a szélesebbég Paks térségében, ezáltal a napi átlagos koncentráció értékében is egy maximum ($1,1 \mu\text{g m}^{-3}$) alakult ki.

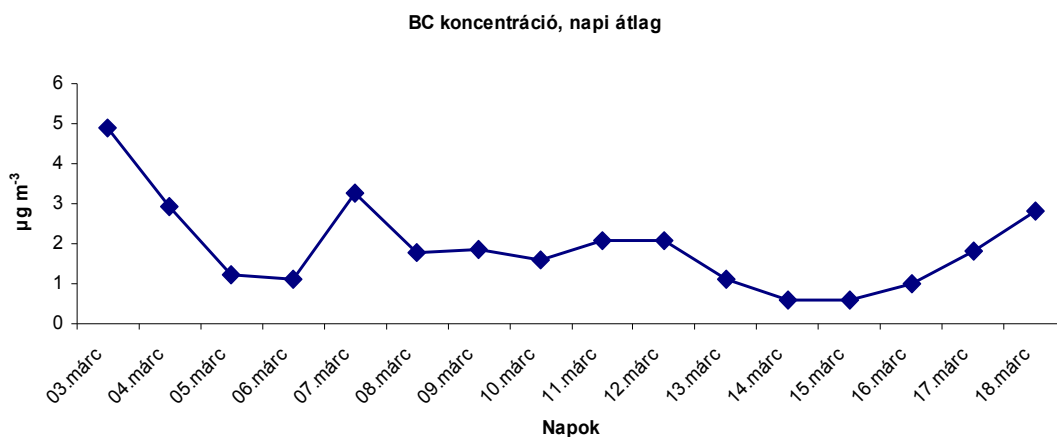


32. ábra: NCEP reanalízis mezők; 2010.09.24. 500 hPa-os geopotenciál magasság és légnyomás, 500 hPa-os hőmérséklet és geopotenciál magasság, 850 hPa-os hőmérséklet és geopotenciál magasság, 700 hPa-os relatív nedvesség és geopotenciál magasság térképek (forrás: <http://www.wetterzentrale.de>)

Szeptember 27-től ismét csökkenő tendencia figyelhető meg. A ciklon ugyanis Magyarországtól keletre helyeződött át, hátoldalán észak felől hideg, váltakozó nedvességtartalmú léghullámok érték el a Kárpát-medencét. Záporok fordultak elő, gyenge intenzitással a kisebb nedvességtartalom miatt (hideg légtömeg), az északias szél erős volt. Az erősen labilis légrétegződés miatt a keveredési réteg magasra felnyúlhatott, ezért csökkenthetett le a napi átlagkoncentráció.

4.2.5 Budapest; Gilice tér; 2010. március 3–18.

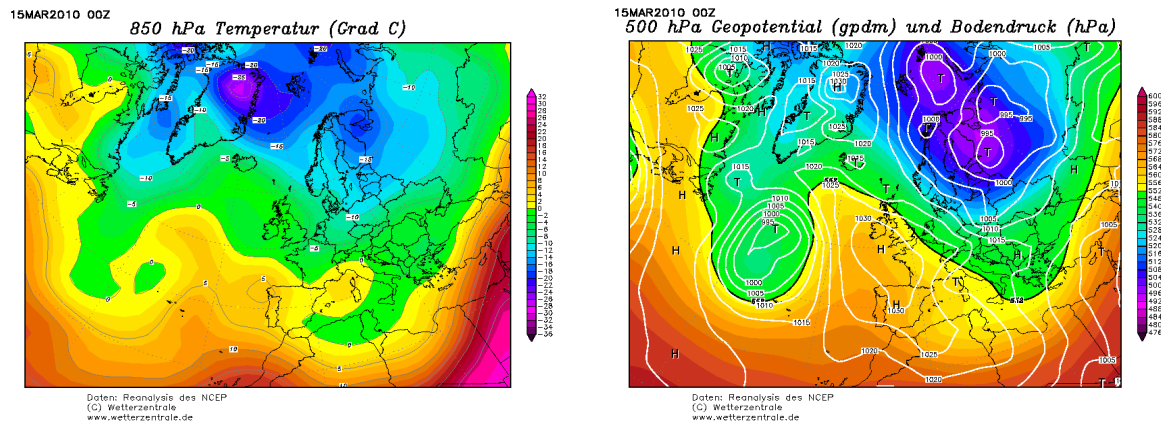
A március 3-ai $4,9 \mu\text{g m}^{-3}$ BC napi átlagkoncentráció folyamatosan csökkent, március 6-án $1,2 \mu\text{g m}^{-3}$ volt az értéke (33. ábra).



33. ábra: A BC koncentráció napi átlaga Budapesten, 2010.03.03–18.

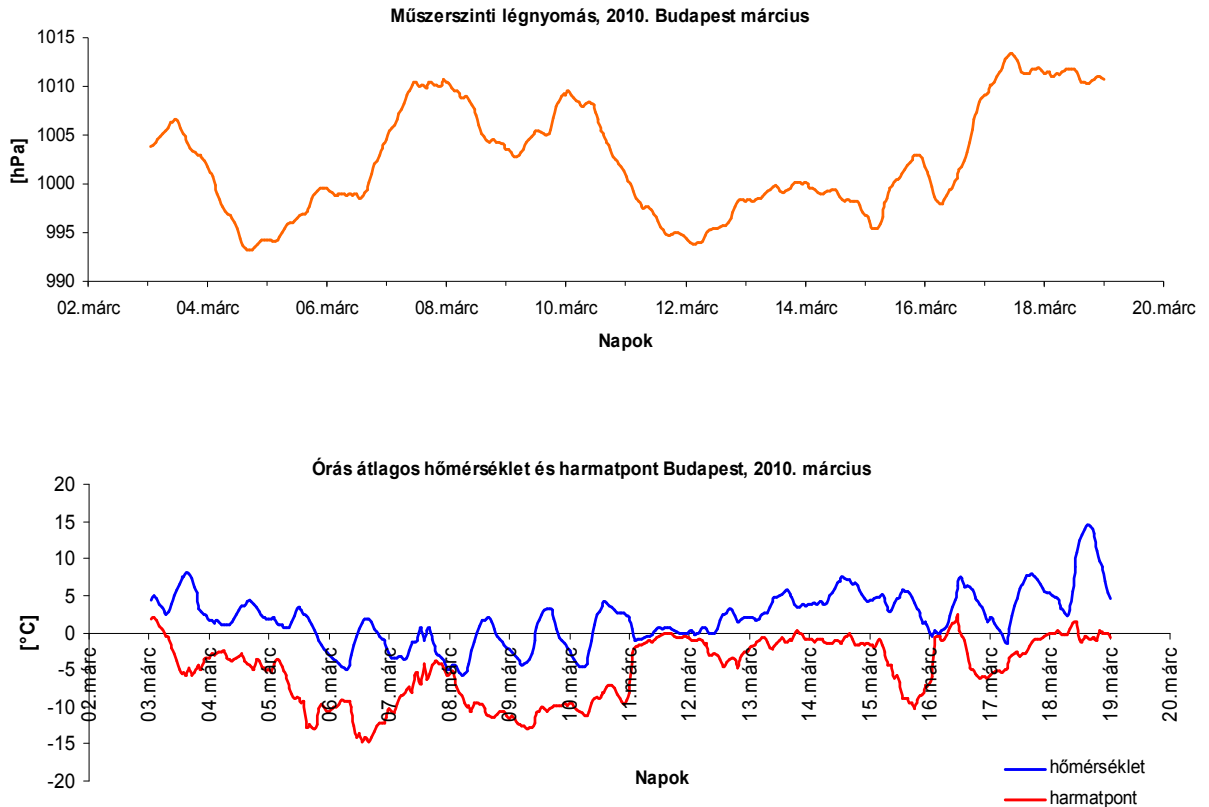
Az időszak elején egy Nyugat-Európa felett elhelyezkedő anticiklon keleti peremén észak felől hideg, eleinte száraz levegő érkezett hazánk fölé. Később az Alpoktól délre egy mediterrán ciklon képződött az oda is érkező hideg levegő hatására. A ciklon az országtól délkeletre vonult el, de csapadékot csak a déli-délnyugati határ mentén adott. Majd március 6–7–8-án a ciklon keletről visszahajló okklúziós frontja következtében havazás, hózaporok fordultak elő, főleg az ország keleti felén. Március 7-én a napi átlag koncentráció maximumot mutat, $3,42 \mu\text{g m}^{-3}$ volt az értéke, majd 8-ára lecsökkent $1,79 \mu\text{g m}^{-3}$ -re. A maximum oka egy okklúziós front északról délre történő áthaladása lehetett, a frontvonalban ugyanis gyenge a szél, konvergencia jellemző. A magassági hidegörvény okklúziós frontjának feloszlása után a hideg levegő nyugalomba került, és kissé felmelegedett az erősebb tavaszi besugárzás hatására. Mivel a Földközi-tenger térségébe több hullámban érkezett északkelet felől a hideg, 9-én egy erősebb mediterrán ciklon is kialakult, melynek csapadékszónája 10-én este érte el Magyarországot délnyugatról havazást okozva ezeken a területeken. Március 11-én és 12-én a szél és a havazás is fokozatosan gyengült, valamint kelet-északkelet felé helyeződött. Március 12-én a fagypont közeli hőmérsékleti maximum miatt a lehulló hó jó része el is olvadt, az északkeleti országrészt kivéve. Ezeken a napokon az átlagkoncentrációk kicsivel magasabbak voltak az előző napi átlagokhoz képest. $1 \mu\text{g m}^{-3}$ alá kerültek az értékek.

Március 13-tól ($1,2 \mu\text{g m}^{-3}$) ismét csökkenés figyelhető meg a koncentrációban $1 \mu\text{g m}^{-3}$ alá kerültek az értékek. A disszipálódó ciklon elhagyta északkelet felé az országot, elvonultával megerősödött a szél. Március 14-én sarkvidéki eredetű levegő érte el a Kárpát-medencét, egy Skandinávia és Kelet-Európa felett örvénylő, több középpontú ciklonrendszer áramlási rendszerében. A hideg levegő advekcója jól látszik a 34. ábrán. Az érkező levegő erősen labilis volt, igen nagy volt a vertikális hőmérsékleti gradiens, amit erősített a besugárzás is, emiatt többfelé alakultak ki heves hózáporok viharos szellőkések kíséretében. Az érkező hidegfront a Kárpát-medence területén hullámot vetett, egy gyors mozgású peremciklon alakult ki rajta, ennek melegfrontjából 15-én éjjel több helyen fordult elő havazás, ezt gyorsan követte a hidegfront nappal, mely ismét többfelé okozott záporokat, hózáporokat, erős szellőkésekkel.



34. ábra: NCEP reanalízis mezők; 2010.03.15. 850 hPa-os hőmérséklet, 500 hPa-os geopotenciál magasság és légnyomás térképek (forrás: <http://www.wetterzentrale.de>)

A fent leírt légköri képződmények hatásai jól látszanak a légnyomás és hőmérséklet–harmatpont görbéken is (35. ábra); például a március 10-től a mediterrán ciklon hatására bekövetkező nyomáscsökkenés; vagy 15-én éjjel a peremciklon melegfrontja miatt ugrásszerűen megnövekedett a harmatpont, majd 16-án a hidegfront elhaladtával lecsökkent, illetve a nyomás emelkedni kezdett.



35. ábra: Műszerszinti légnyomás, hőmérséklet és harmatpont értékek Budapesten 2010.03.03–18.

A peremciklon elvonultával gyökeres változás kezdődött az időjárásban, a ciklonális hatásokat felváltották a leszálló légmozgások, köszönhetően a Dél-Európa felett kiépülő anticiklonnak, melynek peremén délnyugat felől melegebb és szárazabb léghullámok érkeztek. Az anticiklonális hatás következtében a napi átlag koncentráció március 18-ra ismét megemelkedett ($2,8 \mu\text{g m}^{-3}$).

4.3 Az optikai abszorpció hullámhosszfüggése

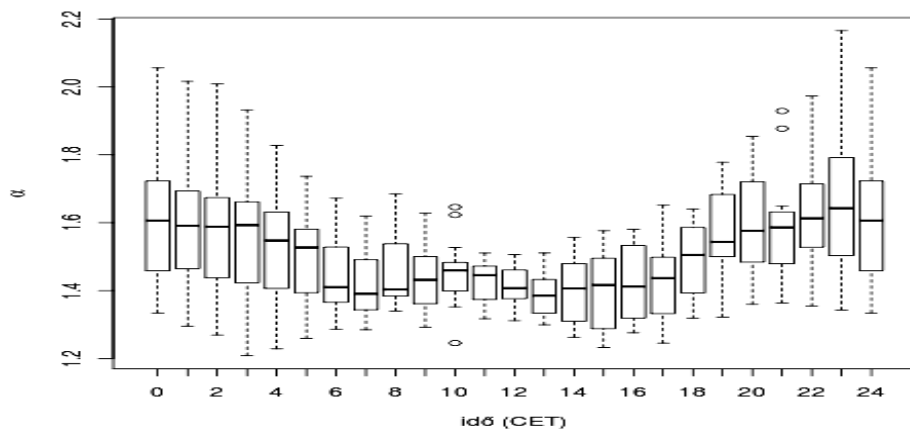
4.3.1 A biomassa tüzelés és közlekedés hatása az optikai abszorpcióra

Az abszorpciós együttható (b_{abs}) hullámhosszfüggése jó közelítéssel exponenciális függvénnyel írható le ($b_{abs} = a \lambda^{-\alpha}$), ahol λ a hullámhossz, α az abszorpciós exponens (Angström exponens) és a egy konstans szám. Az α értékeket függvényillesztéssel kaptam meg. A közlekedésből származó aeroszolok hullámhosszfüggése alacsony; az Angström exponens 1 körüli értéket vesz fel, a meghatározó elnyelő aeroszol komponens a BC aeroszol. Ezzel szemben a biomassa tüzelésből származó részecskék abszorpciójának

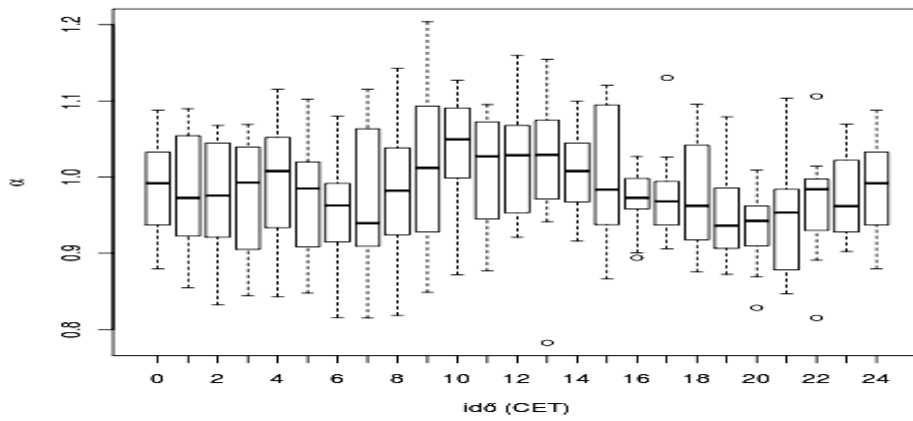
hullámhosszfüggése nagyobb; $\alpha = 2$ (Kirchstetter and Novakov, 2004). Először a teljes hullámhossztartományra, majd kisebb és nagyobb hullámhossztartományokra mutatom be az α értékeket. Az órás átlagokból számolt napi menetek az R statisztikai programmal készültek. A paksi eredmények közül a téli és nyári időszakokat szemléltetem a közlekedés és biomasszatüzelés kimutatása céljából, valamint bemutatom a Budapestre kapott eredményeket is. Áprilisban és szeptemberben a napi menetek a júniusi menethez hasonlóan futnak, így ezeket nem mutatom be.

Az α abszorpciós Angström exponens napi menete a teljes hullámhossztartományra

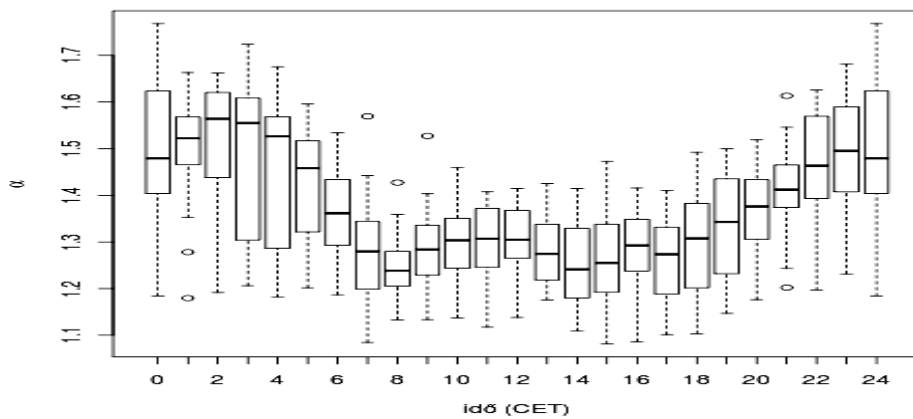
A februári időszakban (36.a ábra) a medián értékek 1,39 és 1,64 között változtak. A medián minimum értékeit a reggeli órákban (6.00–8.00) a csúcsforgalom ideje alatt figyeltünk meg. 7.00-kor a medián 1,39 és hozzá tartozó minimum (0. kvartilis) 1,28 és maximum (4. kvartilis) 1,62 volt. 8.00 és 16.00 között a medián értékek csak kismértékben ingadoztak, 1,4 és 1,46 között. 17.00-tól emelkedő tendencia mutatkozott, mely a szilárd tüzelés következménye. 18.00-kor α értéke már 1,5 volt és 21.00-kor elérte az 1,6-ot. A közúti forgalom csökkenésével meghatározóbbá válik a fatüzelésből származó anyagok abszorpciója. A maximum értékeket 22.00–24.00 között észleltük, valamint a hajnali órákban. 23.00-kor a medián 1,64; a hozzá tartozó minimum 1,34 és a maximum 2,17 volt. Az interkvartilis terjedelem értéke 1,38 és 0,25 között változott. A maximális interkvartilis terjedelem az éjszakai és hajnali órákban jelentkezett, vagyis az értékek szórása ekkor volt a legnagyobb. Nyáron (36.b ábra) a medián értékek szűkebb tartományban; 0,95 és 1,05, a minimum értékek 0,78 és 0,92; a maximum értékek 1 és 1,2 között változtak. Az interkvartilis terjedelem is elég szűk tartományba esett. Így elmondható, hogy a júniusi medián értékek nem rendelkeznek olyan jellegzetes napi menettel, mint a téli értékek. A budapesti márciusi adatokból kapott napi menet (36. c ábra) hasonló lefutású, mint a februári adatok napi menete. A medián értékek alacsonyabbak. A minimum medián értéket (1,23) 8.00-kor észleltük. A hozzá tartozó 0. és 4. kvartilis 1,13 és 1,43 volt. Az interkvartilis terjedelem ekkor volt a legkisebb (0,07). A medián értékek 16.00-tól 17.00-ig kismértékben ingadoztak, majd növekvő tendenciát mutattak. A maximum érték 23.00-kor 1,5 volt, illetve látható, hogy maximumokat kaptunk a hajnali időszakra is. Az interkvartilis terjedelem hajnalban volt a legnagyobb.



(a)



(b)



36. ábra

(c)

36. ábra: Az α abszorpció Angström exponens napi menete a teljes hullámhossztartományra

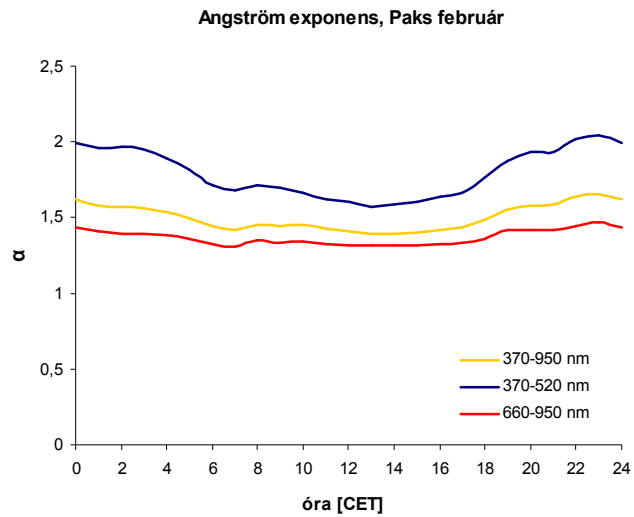
(a) Paks, 2010.02.03–15.

(b) Paks, 2010.06.17–30.

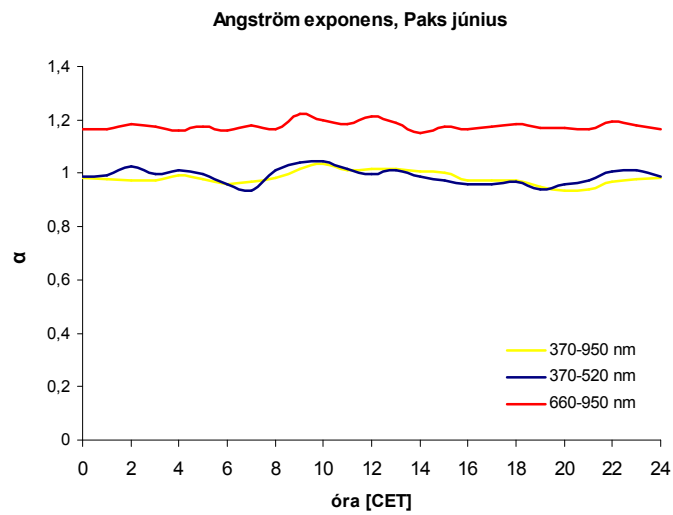
(c) Budapest, 2010.03.03–18.

Az α abszorpciós Angström exponens napi menete különböző hullámhossztartományokra Sandradewi et al. (2008) két hullámhossztartományt; a 370–520 nm és 660–950 nm közötti tartományokat definiált, mert a b_{abs} értékek télen a 370 nm-es hullámhosszon az illesztett görbe felett helyezkedtek el, míg nagyobb hullámhosszak esetén (470, 520, 590, 660 nm) az illesztett görbe alatt voltak. Nem tudjuk egyetlen exponenciálissal leírni a hullámhosszfüggést, mert a mintát alkotó komponensekről, melyek hullámhosszfüggése különböző, nincs információnk, így célszerűbb hullámhossztartományokra vizsgálni. Ezt a közelítést alkalmazva bemutatom az $\alpha_{370-520\text{nm}}$ és $\alpha_{660-950\text{nm}}$ átlagos napi meneteket a paksi februári és júniusi, valamint a budapesti márciusi mérési időszakokra. A teljes 370–950 nm-es tartományt összehasonlításképpen ábrázolom.

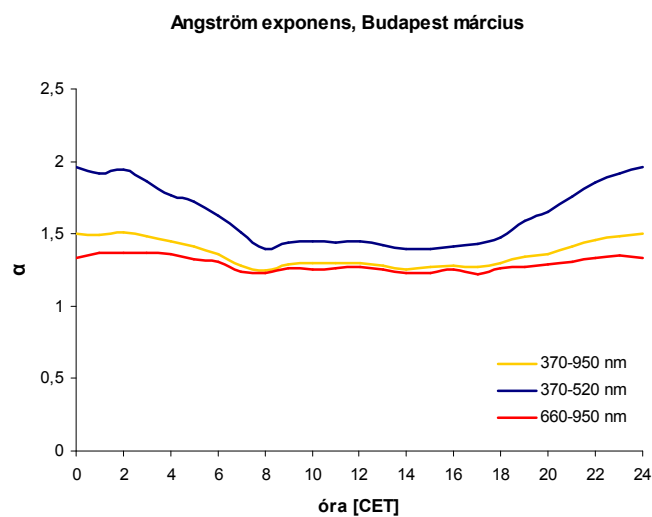
Februárban (37.a ábra) az $\alpha_{370-520\text{nm}}$ értékek sokkal erősebb napi menetet mutatnak, mint az $\alpha_{660-950\text{nm}}$ értékek. Júniusban (37.b ábra) mindhárom hullámhossztartományban az Angström exponensek lényegesen kisebbek, mint télen és nem mutatnak jellegzetes napi menetet sem. Februárban az $\alpha_{370-520\text{nm}}$ értékek napi menete 1,6 és 2 között változik. A maximum értékeket a hajnali és éjszakai órákban veszi fel. Az óras adatsorban előfordultak 2-nél nagyobb értékek is. Az $\alpha_{660-950\text{nm}}$ értékek 1,3 és 1,45 közé esnek. Júniusban az $\alpha_{370-520\text{nm}}$, $\alpha_{660-950\text{nm}}$, $\alpha_{370-950\text{nm}}$ értékek szűk tartományban mozognak; 0,94 és 1,22 közötti értékeket vesznek fel. Budapesten (37.c ábra) az $\alpha_{370-520\text{nm}}$ értékek a februárhoz hasonlóan erősebb napi menetet mutatnak. Az értékek 1,4 és 1,96 között változnak, míg a nagyobb hullámhossztartományra 1,23 és 1,37 közötti értékeket kaptam. Összességében az eredmények alapján elmondható, hogy télen az aeroszokok több UV elnyelő anyagot tartalmaznak a fűtési időszakokban, mint nyáron.



(a)



(b)



(c)

37. ábra: Az α abszorpciós Angström exponens napi menete különböző hullámhossztartományokra
 (a) Paks, 2010.02.03–15.
 (b) Paks, 2010.06.17–30.
 (c) Budapest, 2010.03.03–18.

4.3.2 Az aethalometer modell

Sandradewi et al. (2008) és Favez et al. (2009) munkájára alapozva becsléssel meghatároztam, hogy a széntartalmú PM₁ részecskék milyen arányban tartalmaznak közlekedésből és biomasszatüzelésből származó részecskéket. A Beer–Lambert törvény alkalmazásával szétválasztva a közlekedés (*traffic*) és fatüzelésből (*wb*) eredő részecskék abszorpciós együtthatóját, a következő egyenletekhez jutunk:

$$\frac{b_{abs}(370nm)_{traffic}}{b_{abs}(950nm)_{traffic}} = \left(\frac{370}{950}\right)^{-\alpha_{traffic}} \quad (18)$$

$$\frac{b_{abs}(370nm)_{wb}}{b_{abs}(950nm)_{wb}} = \left(\frac{370}{950}\right)^{-\alpha_{wb}} \quad (19)$$

$$b_{abs}(\lambda) = b_{abs}(\lambda)_{traffic} + b_{abs}(\lambda)_{wb} \quad (20)$$

$b_{abs}(370\text{ nm})_{traffic}$, $b_{abs}(950\text{ nm})_{traffic}$, $b_{abs}(370\text{ nm})_{wb}$, $b_{abs}(950\text{ nm})_{wb}$ kiszámolható a fent megadott egyenletekből. $\alpha_{traffic}$ értékét 1,1-nek választottam, mely megfelel a szakirodalomban leírtaknak, α_{wb} értéke nagyobb és szélesebb tartományban mozoghat, a számolásokhoz az illesztéssel meghatározott maximális $\alpha_{370-950}$ értéket választottam, így $\alpha_{wb} = 2,16$.

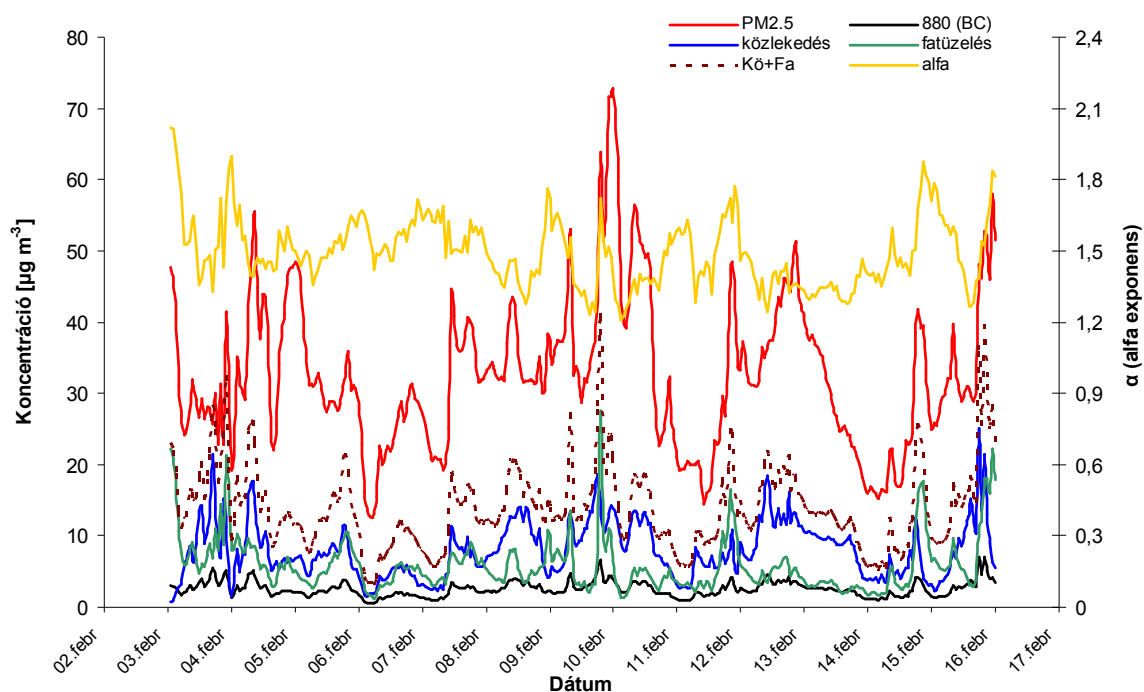
A PM₁ széntartalmú komponenseit a következő módon választhatjuk szét fatüzelésből és közlekedésből eredő összetevőkre:

$$CM(PM_1) = PM_{traffic} + PM_{wb} = c_1 \cdot b_{abs}(950nm)_{traffic} + c_2 \cdot b_{abs}(370nm)_{wb}, \quad (21)$$

ahol $CM(PM_1)$ az organikus részek és a korom részek koncentrációjának összege. Mivel nem állt rendelkezésünkre megfelelő mérési technika az organikus részecskék meghatározására, ezért $CM(PM_1)$ értékét becstültük. Salma et al. (2004) eredménye alapján az organikus részek 47%-a és a korom 7%-a járul hozzá a PM_{2.5} teljes tömegéhez. Így a $CM(PM_1)$ -et a PM_{2.5} 50%-nak vettem. A c_1 és c_2 együtthatókat lineáris regressziós közelítéssel számoltam ki. Eredményeimet a fűtési időszakokra, Paksra a 38. ábrán, Szegedre a 39. ábrán mutatom be. Mindkét ábrán jelöltem a PM_{2.5} részecskék, a koromrészecskék, a közlekedésből és fatüzelésből származó részecskék óras átlag

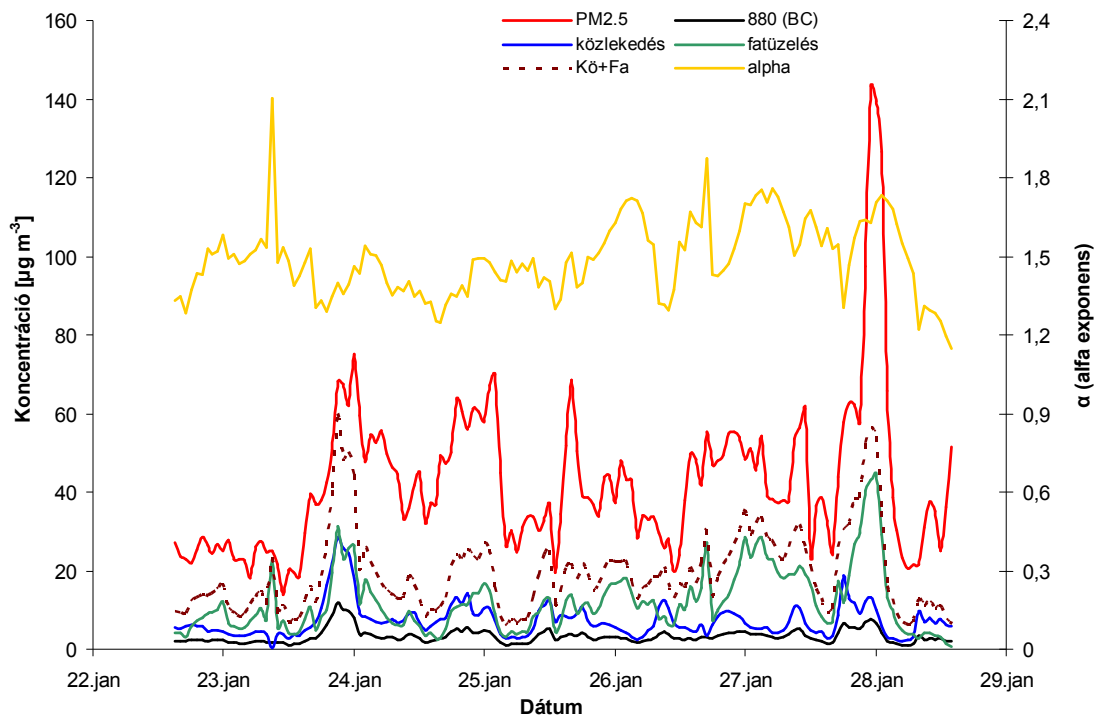
koncentrációját (külön-külön és együtt is). A fatüzelésből származó részecskék Angström exponense 2 körüli értéket vesz fel, a közlekedésből származó részecskék értéke 1 (4.3.1 fejezet).

Pakson a PM_{2.5} részecskék koncentrációja 12,6 és 72,5 µg m⁻³ között változott. Az átlagkoncentráció értéke 32,7 µg m⁻³ volt. A BC koncentráció átlaga 2,54 µg m⁻³ volt és 7,8 %-ban járult hozzá a PM_{2.5}-hez. A közlekedésből és fatüzelésből származó részecskék koncentrációjára 8 µg m⁻³ és 5,93 µg m⁻³ adódott; és 24,63 és 18 %-ban járultak hozzá a PM_{2.5}-hez. Az alfa exponens értékei 1,2 és 2,16 között változtak. A fatüzelésből származó részecskék maximumai jól követik az alfa értékek maximumait. A fatüzelésből származó részecskék koncentrációja inkább az esti, éjszakai órákban kerül a közlekedésből származók fölé. A fatüzelésből származó részecskék maximuma 9-én 19.00-kor 27,47 µg m⁻³, mely 43,1%-ban járult hozzá a 63,76 µg m⁻³ koncentrációjú PM_{2.5}-hez



38. ábra: A fatüzelésből és közlekedésből származó részecskék hozzájárulása a PM_{2.5} aeroszolhoz Pakson, 2010.02.03–15.

Szegeden a PM_{2,5} részecskék koncentrációja 14,1 és 143,32 µg m⁻³ közé esett. Az átlagkoncentráció értéke 42,28 µg m⁻³ volt. A BC koncentráció átlaga 3,3 µg m⁻³ volt és 8 %-ban járult hozzá a PM_{2,5}-hez. A közlekedésből és fatüzelésből származó részecskék átlagkoncentrációjára 7,3 µg m⁻³ és 12,1 µg m⁻³ adódott; és 18,1 és 28,5%-ban járultak hozzá a PM_{2,5}-hez. Az alfa exponens értékei 1,14 és 2,16 között változtak. Az ábrán jól látszik, hogy alfa maximum értékeinél a fatüzelésből származó részecskék dominálnak, a minimum értékeknél pedig a közlekedésből eredők. Például január 26-án 17.00-kor alfa értéke 1,87, a fatüzelésből származó részecskék koncentrációja 27,3 µg m⁻³ volt a közlekedésből származó részecskék koncentrációjához (3,38 µg m⁻³) képest. Január 23. és 25. között a fatüzelésből származó részecskék a hajnali órákban illetve éjszaka domináltak, 26-ától kezdve pedig a koncentráció értékek mindig a közlekedési eredetű részecskék koncentráció értékei fölé kerültek, vagyis megnövekedett a lakossági tüzelés az alacsony hőmérsékletek miatt. 26-án a minimum hőmérséklet –8,6 °C, 27-én –13,9 °C volt. 26-ától anticiklonális hatás volt jellemző, mely elősegítette az inverziós helyzetek kialakulását, ezáltal a szennyező részecskék feldúsultak és a koncentráció értékek megemelkedtek. Január 27-én 23.00-kor a PM_{2,5} koncentráció 143,32 µg m⁻³ volt, ehhez a fatüzelés hozzájárulása 43,28 µg m⁻³ (30%) volt.



39. ábra: A fatüzelésből és közlekedésből származó részecskék hozzájárulása a PM_{2,5} aeroszolhoz Szegeden, 2010.01.22–28.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet (KFKI AEKI) koordinálásával 2010-ben Pakson kezdődött aeroszol mintavételezésében és az azt követő laboratóriumi munkában négy mérési kampányban aktívan részt vettem. Dolgozatomban az optikai elven működő hét csatornás AE42 típusú aethalometerrel mért koromkoncentráció értékek adatfeldolgozását végeztem el.

Ismertettem és alkalmaztam az adatok feldolgozásához szükséges, a szakirodalomban is javasolt korrekciót, melyre a filter telítődésénél fellépő hiba miatt volt szükség.

A korrigált adatok órás átlagaiból bemutattam a koromkoncentrációk napi meneteit Paksra évszakos bontásban, valamint Szegedre és Budapestre. A koncentrációértékek változását meteorológiai és lokális forráskibocsátással kapcsolatos okokra vezettem vissza. Kimutatható volt a koncentráció értékek és szélességek közötti kapcsolat. A vizsgált időszakokban a maximális értékek tipikusan a reggeli és éjszakai órákban voltak megfigyelhetőek. A legnagyobb koncentráció értékeket a fűtési időszakokra, a legkisebbeket a nyári időszakokra kaptam. Ezt követően elemeztem a szinoptikus helyzet hatását az órás átlagokból számolt koncentrációk napi átlagára. A koncentráció-értékek változása jól értelmezhető a ciklonális és anticiklonális hatások következtében. Erre az egyik jó példa a szeptemberi időszak. Az időszak elején és végén ciklonális hatások uralkodtak, ami a koncentráció értékek csökkenését eredményezte, az időszak közepén pedig a koncentráció értékek megemelkedése anticiklonális hatásnak köszönhető.

Bemutattam az optikai abszorpció hullámhosszfüggését leíró Angström exponens napi menetét a paksi és budapesti fűtési időszakokra, illetve a paksi nyári időszakokra, a teljes hullámhossztartományra, majd különböző tartományokra. A fűtési időszakok esetén az Angström exponensnek jellegzetes menete volt. Kimutatható a biomassa tüzelés és közlekedés hatása. A nyári időszakban a kitevő 1 körüli értéket vesz fel és nincs jellegzetes napi menete, ez a közlekedés hatásának következménye. A különböző hullámhossztartományok alapján kimutatható volt, hogy télen az aeroszokok több UV elnyelő anyagot tartalmaznak a fűtési időszakokban, mint nyáron. Ezt követően meghatároztam a közeledésből és biomassa tüzelésből származó részecskék hozzájárulását az aeroszol $PM_{2.5}$ frakciójához a szegedi és paksi fűtési időszakokra egy modellbecslés alapján. A fűtési időszakokban a $PM_{2.5}$ részecskékhez Pakson 18% a

fatüzelésből 24,6% a közlekedésből; Szegeden 28,5%-a fatüzelésből, 18,1%-a a közlekedésből származó hozzájárulás a becslés szerint. A $PM_{2.5}$ 7,8%-a volt koromrészecske Pakson és 8%-a Szegeden.

További célkitűzésnek tartom a filteres mérési technikákra alkalmazott korrekciók mellett egy adatszűrési eljárás kidolgozását a 2 perces koromkoncentráció-adatok feldolgozására.

A dolgozathoz rövidebb mérési időszakok adatsorai álltak rendelkezésemre, ezért távlati terv hosszabb időszakra a fontosabb közlekedési csomópontokban a koromkoncentráció monitorozása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Legelőször szeretném megköszönni témavezetőmnek, dr. Osán Jánosnak a dolgozatomhoz nyújtott segítséget és támogatását. Köszönettel tartozom dr. Baranka Györgyinek a meteorológiai adatokért, és hasznos tanácsaiért. Szeretném megköszönni tanszéki konzulensemnek, dr. Mészáros Róbertnek a dolgozathoz fűzött segítő megjegyzéseit. Szeretném külön megköszönni mindenkinek a lektorálást. Köszönöm dr. Török Szabinának, hogy bekapcsolódhattam a levegőminőséget célzó mérési munkába.

IRODALOMJEGYZÉK

- Alföldy, B., Giechaskiel, B., Hofmann, W., and Drossinos, Y., 2009: Size-distribution dependent lung deposition of diesel exhaust particles. *Aerosol science* 40, 652–663
- Andreae, M.O., and Gelencsér, 2006: Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 3131–3148
- Arnott, W.P., Moosmuller, H., Rogers, C.F., Jin, T., and Bruch, R., 1999: Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosols: Instrument description. *Atmospheric Environment* 33, 2845–2852
- Berner A., Sidla S., Galambos Z., Kruisz, C., Hitzenberger, R., ten Brink, H.M., Kos, G.P.A., 1996: Modal character of atmospheric black carbon size distributions. *Journal of Geophysical Research* 101, 19559–19565
- Bond, T.C., Streets D.G., Yarber K.F., Nelson S.M., Woo J.H., and Klimont, Z., 2004: A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J. Geophys. Res* 109, D14203
- Cao J.J., Zhu C.S., Chow J.C., Watson, J.G., Han Y.M., Wang, G., Shen, Z., An, Z.S., 2009: Black carbon relationship with emissions and meteorology in Xi'an, China. *Atmospheric Research* 94, 194–202
- Coen, C.M., Weingartner, E., Apituley, A., Ceburnis, D., Fierz-Schmiedhauser, R., Flentje, H., Henzing, J.S., Jennings, S.G., Moerman, M., Petzold, A., Schmid, O., and Baltensperger, U., 2010: Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: evaluation of five correction algorithms. *Atmospheric Measurements Techniques* 3, 457–474
- Cook, W.F., and Wilson, J.J.N., 1996: A global black carbon aerosol model. *J. Geophys. Res.* 101, 19395–19409
- Favez, O., Cachier, H., Sciare, J., Sarda-Esteve, R., and Martinon, L., 2009: Evidence for a significant contribution of wood burning aerosol to PM_{2.5} during winter season in Paris, France. *Atmospheric Environment* 43, 3640–3644
- Gieré, R. and Querol, X., 2010: Solid Particulate Matter in the Atmosphere. *Elements* 6, 215–222
- Giechaskiel, B., Alföldy, B., Drossinos, Y., 2009: A metric for health effects studies of diesel exhaust particles. *Aerosol Science* 40, 639–651

- Highwood E., J., and Kinnersley, 2006: When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health. *Environment International* 32, 560–566
- Hansen, A. D. A., 2005: *The Aethalometer*. Magee Scientific Company Berkeley, California, USA
- Hitzenberger, R., Ctyroky, P., Berner, A., Tursic, J., Podkrajsek, B., and Grgic, I., 2006: Size distribution of black (BC) and total carbon (TC) in Vienna and Ljubljana. *Chemosphere* 65, 2106–2113
- Hitzenberger, R., and Tonho S., 2001: Comparison of black carbon (BC) aerosols in two urban areas – concentration and size distributions. *Atmospheric Environment* 35, 2153–2167
- Holst, J., Mayer, H., and Holst, T., 2008: Effect of meteorological exchange conditions on PM₁₀ concentration. *Meteorologische Zeitschrift* 17, 273–282
- Husain, L., Dutkiewicz, V.A., Khan, A.J., and Ghauri B.M., 2007: Characterization of carbonaceous aerosols in urban air. *Atmospheric Environment* 41, 6872–6883
- IPCC 2001: *Climate change 2001: The scientific basis*. Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson, Cambridge University Press, Cambridge and New York
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Johnson B., Shine K., and Forster P., 2004: The semi-direct aerosol effect: impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 130, 1407-1422
- Kertész, Zs., 2000: *Városi és barlangi aeroszokok vizsgálata pixe és mikro-pixe módszerrel*. Doktori értekezés
- Kertész, Zs., Szoboszlai, Z., Angyal, A., Dobos, E., and Borbély-Kiss, I., 2010: Identification and characterization of fine and coarse particulate matter sources in a middle European urban environment. *Nuclear instruments and method in physics research B268*, 1924–1928

- Kirchstetter, T., and Novakov, T., and Hobbs, P.V., 2004: Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon. *Journal of Geophysical Research* 109, D21208
- Kirchstetter, T., and Novakov, T., 2007: Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating BC measurements methods. *Atmospheric Environment* 41, 1874–1888
- Kleefeld, S., Hoffer, A., Krivácsy, Z., and Jennings, S.G., 2002: Importance of organic and black carbon in atmospheric aerosols at Mace Head, on the West coast of Ireland. *Atmospheric Environment* 36, 4479–4490
- Kovács Kis, V., Pósfai, M., and Lábár, J.L., 2006: Nanostructure of atmospheric soot particles. *Atmospheric Environment* 40, 5533–5542
- Liousse, C., Cachier, H., and Jennings, S.G., 1993: Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments: Variation of the specific attenuation cross-section, sigma. *Atmospheric Environment* 27, 1203–1211
- Mészáros, E., 1977: *A levegőkémia alapjai*. Akadémiai Kiadó
- Mészáros, E., 1997: *Levegőkémia*. Veszprémi Egyetemi Kiadó
- Mészáros, E., 2001: *A környezettudomány alapjai*. Akadémiai Kiadó
- Muir, D., 2000: New Directions: The suitability of tapered element oscillating microbalances (TEOMs) for PM10 monitoring in Europe. The use of PM10 data as measured by TEOM for compliance with the European Air Quality Standard. *Atmospheric Environment* 34, 3209–3211
- Nemmar, A., Hoylaerts, M.F., Hoet, P.H.M., and Nemery B., 2004: Possible mechanisms of the cardiovascular effects of inhaled particles: systemic translocation and prothrombotic effects. *Toxicology letters* 149, 243–235
- Pakkanen, T.A., Kerminen V.A., Ojanen C.H., Hillamo, R.E., Aarnio, P., and Koskentalo, T., 2000: Atmospheric black carbon in Helsinki. *Atmospheric Environment* 34, 1497–1506
- Park, S.S., Hansen A.D.A. and Cho, S.Y., 2010: Measurement of real time black carbon for investigating spot loading effects of Aethalometer data. *Atmospheric Environment* 44, 1449–1455
- Penner, J.E., Eddleman, H., and Novakov, T., 1993: Towards the development of a global inventory for black carbon emissions. *Atmospheric Environment* 27, 1277–1295

- Petzold, A., Kopp, C., and Niessner, R., 1997: The dependence of the specific attenuation cross-section on black carbon mass fraction and particle size. *Atmospheric Environment* 31, 661–672
- Pilinis, C., Pandis, S. N., and Seinfeld, J. H., 1995: Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosol to aerosol-size composition. *J. Geophys. Res.* 100, 18739–19754
- Ramanathan, V., and Crutzen, P.J., 2003: New directions: atmospheric brown clouds. *Atmospheric Environment* 37, 4033–4035
- Salma, I., Maenhaut, W., Zemplén-Papp, E. and Bobvos, J., 1998: Characteristics of size-fractionated urban aerosols and trace gases in Budapest. *Microchemical Journal* 58, 291–305
- Salma, I., Chi, X., and Maenhaut, W., 2004: Elemental and organic carbon in urban canyon and background environments in Budapest, Hungary *Atmospheric Environment* 38, 27–36
- Sandradewi, J., Prevot, A.S.H., Weingartner, E., Schmidhauser, R., Gysel, M., and Baltensperger, U., 2008: A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmospheric Environment* 42, 101–112
- Sandradewi, J., Prevot, A.S.H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M.R., Lanz, V.A., Weingartner, E., and Baltensperger, U., 2008: Using aerosol light absorption and measurement for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environmental Science and Technology* 42, 3316–3323
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S.N., 2006: *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley and Sons, New York
- Viana, M., Pérez, C., Querol, X., Alastuey, A., Nikovic, S. and Baldasano, J.M., 2005: Spatial and temporal variability of PM₁₀ levels and composition in a complex summer atmospheric scenario in Barcelona. *Atmospheric Environment* 39, 5343–5361
- Virkkula, A., Makela, T., Hillamo, R., Yli-Tuomi, T., Hirsikko, A., Hameri, K., Koponen, I.K., 2007: A simple procedure for correcting loading effects of Aethalometer. *Journal of the Air & Waste Management Association* 57, 1214–1222
- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B. and Baltensperger, U., 2003: Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers. *Journal of Aerosol Science* 34, 1445–1463

- Zappoli, S., Andracchio, A., Fuzzi, S., Facchini, M.C., Gelencsér, A., Kiss, Gy., Krivácsy, Z., Molnár, A., Mészáros, E., Hansson, H.-C., and Rosman, K., Zebühr, Y., 1999: Inorganic, organic and macromolecular components of fine aerosol in different areas of Europe in relation to their water solubility. *Atmospheric Environment* 33, 2733–2743
- Zichler, Sz., Ocskay, R. and Salma, I., 2007: Budapest levegőszennyezettségének története. Levegőmunkacsoport

<http://eur-lex.europa.eu>

<http://www.grimm-aerosol.com>

<http://www.kvvm.hu/olm>

<http://mageesci.com>

<http://www.met>

<http://www.wetterzentrale.de>