

# Krétapor a levegőben

Az aeroszol forrásai, tulajdonságai és nyelői egy egyetemi előadóteremben

A szorgalmas egyetemi hallgatók idejük jó részét előadótermekben töltik. Közérzetüket a tanterem mikrometeorológiai viszonyai és a beltéri levegő minősége is befolyásolja. Milyen a levegő egy előadóteremben? Honnan származnak és hogyan változnak a fontosabb légszennyező anyagok? Vajon mindig az előadás válik kevésbé érdekessé, amikor lankad a hallgatók figyelme? Ezekre a kérdésekre kerestük a választ egy multidiszciplináris kutatómunka során.

## Az előadóterem és a mérések

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem látványosi központja Budapesten a Duna-parton található. Az északi épület egyik korszerű, nagyméretű (120 férőhelyes, 126 m<sup>2</sup> alapterületű), emelkedő padosrendszerű, Ortvy-

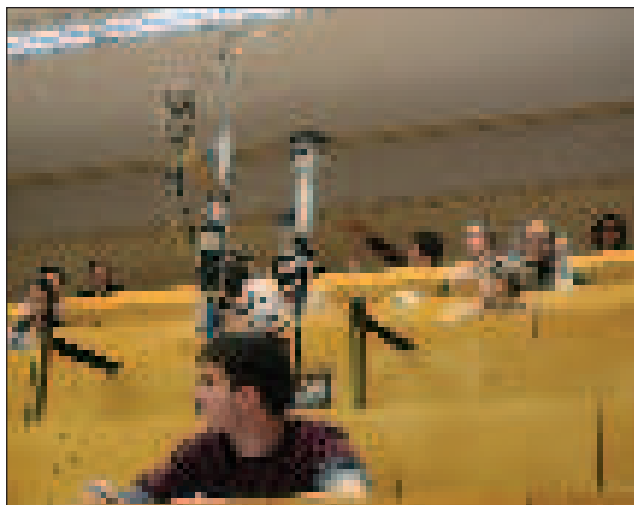
rem alatti raktárhelyiségben helyeztük el (1. ábra). A berendezések így nem zavarták az oktatást, és a szorgalmi időszak alatt egy hétfő folyamatosan működhettek 2010. április 8. és 15. között.

A 10 µm-nél kisebb átmérőjű aeroszol részecskék (amelyek egészségügyi kockázata jelentős; ezt nevezzük PM<sub>10</sub> méretfrakciónak) tömegét oszcilláló mikromérleggel, a részecskék számát és méreteloszlását differenciális mozgékonyág analizátorral, a CO<sub>2</sub> koncentrációját infravörös spektrométerrel mértük. A meteorológiai mennyiségeket (léghőmérséklet, falhőmérséklet, relatív nedvesség, levegő áramlási sebesség, fénysugárzás) 1 perces időfelbontású módszerekkel mértük, továbbá durva és finom mérettartományú aeroszol részecskéket gyűjtöttünk szűrőkön a későbbi kémiai analízis céljából. A mintákat nukleáris és termikus analitikai módszerekkel elemeztük. Azért a

érkezése és távozlása, a táblatörlés ideje) feljegyeztünk a mérési naplóba. A vizsgált időszak elején meleg, száraz tavaszi időjárás volt. Április 10-től viszont minden napon esett az eső, és a levegő lehűlt. Összességében nem történt különleges időjárási esemény.

## Átlagos koncentrációk és időbeli változékonyság

A PM<sub>10</sub> tömegkoncentráció heti átlaga az előadóteremben 15,3 µg/m<sup>3</sup> volt. Az érték lényegesen kisebb, mint a legközelebbi városi légszennyezettségi monitorállomáson (a Kosztolányi Dezső téren) mért értékek átlaga (22 µg/m<sup>3</sup>), sőt kisebb a lakásokban és irodákban előforduló tipikus értékeknél is. Nyilvános belső terekre nem vonatkoznak egészségügyi határértékek, ezért jobb

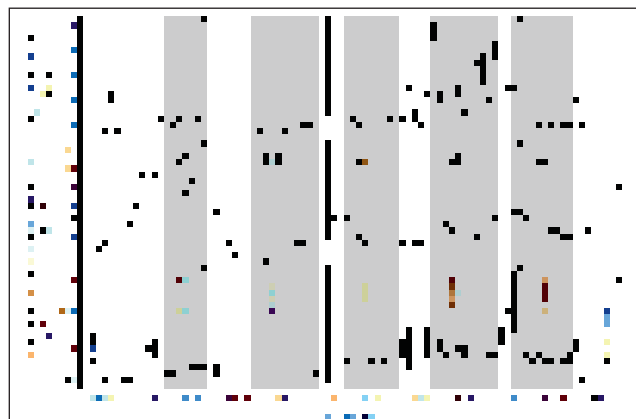
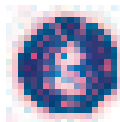


1. ábra. A műszerek elhelyezkedése az előadóteremben és az alatta található raktárban

Rudolf fizikusról elnevezett előadótermét választottuk kísérleti munkánk helyszínéül. Az előadóterem szellőzését munkanapokon 6 és 21 óra között központilag vezérelt légkondicionáló rendszer biztosítja szűrt, kültéri levegővel. A működés a tanteremben elhelyezett kézi kapcsolóval is vezérelhető. A vizsgálatainkban alkalmazott érzékelőket és mintavevőket az előadóterem közepén, 1,5–2 méter magasan, míg az adatgyűjtőket, a mérőműszereket és a szivattyúkat a tante-

felsorolt mennyiségeket választottuk, mert ezek egészségügyi hatása, valamint a komfortérzet kialakulásában betöltött szerepük nagy lehet. A pontszerű mérésekből a tanterem egészére vonatkozó térbeli eloszlásokat és aeroszol terjedési dinamikát számoltunk CFD (*Computational Fluid Dynamics*) modellezési módszerrel. A tanteremben állandó felügyeletet tartottunk reggeltől estig, és minden jelentősnek ítélt eseményt (például az ajtók nyitása és csukása, a hallgatók

hiján a kültéri, 24 órás határértékhez (ami 50 µg/m<sup>3</sup>) tudjuk viszonyítani mérésünk eredményét. Az előadóterem tiszta levegőjének minősül az átlagot tekintve. A tanteremben átlagosan 3700 aeroszolz részecske volt egy köbcentiméter levegőben, ami körülbelül a harmada a belvárosban szokásos kültéri értéknek, és nagyjából a városi háttérnek felel meg. A legkisebb, ún. ultrafinom aeroszolz részecskék (átmérőjük < 100 nm) aránya az összes részecskéhez viszonyítva



**2. ábra.** Az aeroszolrészecskék tömeg- és darabszám koncentrációjának, valamint a CO<sub>2</sub>-koncentrációnak az időbeli változása április 12-én, hétfőn. A sűrű színű mezők az előadásokat (E1-E5) jelzik. Az előadóteremben lévő hallgatók számát is feltüntettük

69% volt, ami kevesebb a városra vonatkozó 80% körüli értéknél. Mindez azt jelzi, hogy az aeroszolrészecskék legnagyobb számban az előadóteremtől távolabb keletkeznek vagy kerülnek a levegőbe.

A CO<sub>2</sub> koncentrációját gyakran összegparaméterek tekintjük nyilvános belső teremben, mert jól jellemzi a levegőminőséget. Az 1000 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>, tehát milliomodnyi rész) körüli koncentrációk már rossz közérzetet okoznak, míg a 2000 ppm fölötti értékeknel csökken mind a fizikai, mind a szellemi teljesítőképesség, és fejfájás is kialakulhat. A nem kívánatos következmények elkerülhetőek, ha a belső terek CO<sub>2</sub> koncentrációja nem haladja meg 600 ppm-nél nagyobb mértékben a kültéri értéket (ami Budapesten 392 ppm körüli). Az előadóteremben a CO<sub>2</sub>-koncentráció heti átlagértéke 402 ppm volt, tehát jóval kisebb a 992 ppm (=392 + 600 ppm) irányértéknél. A tanterem levegője tehát a CO<sub>2</sub> átlagos koncentrációja szempontjából is teljesen megfelelt az elvárásoknak.

A mért mennyiségek az átlagértékek körül ingadoztak a hét folyamán, és általában az említett határértékek alatt maradtak. A PM<sub>10</sub>-koncentráció ugyan csak pár percre, de több tíz alkalommal és igen nagymértékben (akár 100%-kal) is meghaladta a 24 órás kültéri egészségügyi határértéket. Néhányszor a CO<sub>2</sub>-koncentráció is túllépte az irányértéket. Ez utóbbi azon időszakban történt, amikor a szellőztető rendszert (feltehetően) a tanteremben vélt hideg vagy zaj miatt, esetleg akaratlanul manuálisan kikapcsolták.

### Emissziós források és nyelők

A koncentrációk időbeli változását a hétfői napra vonatkozóan a **2. ábrán** mutat-

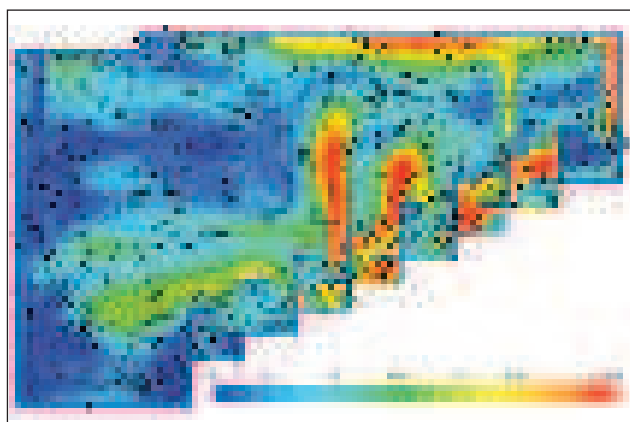
juk be. Ezen a napon 5 előadást (E1-E5) tartottak a tanteremben. A szellőztetés folyamatosan működött. Az előadások alatt a CO<sub>2</sub>-koncentráció közel állandó volt, alig változott előadásról előadásra. A szellőztető rendszer kellően hatékony ahhoz, hogy a koncentrációt alacsony szinten tartsa. A CO<sub>2</sub>-koncentráció meneten csúcsok jelentek meg a szünetekben. A csúcsokat a folyosóról beáramló, CO<sub>2</sub>-ban dúsabb levegő okozza. A csúcs

nagysága attól függ, hogy milyen gyakran nyitottak ajtót, és az mennyi ideig maradt nyitva (hány hallgató érkezett a tanterembe). Az E2 előadás előtti csúcs nem észlelhető, amit az órára érkező hallgatók kis száma (8 fő) és az elnyúlt szünet magyaráz. Az E4 és az E5 előadások között a két csúcs egyetlen csúcsává vált a rövid (15 perces) szünet miatt. A forrás azonosítását megerősíti a 16:05 órakor megjelenő csúcs, ami egybeesik az egyik ajtó néhány perces nyitva tartásának idejével az előadás elején, amelyet a mérési naplóba a felügyelő feljegyzett.

A PM<sub>10</sub>-koncentráció meneten az első markáns csúcs 7:05 óra körül jelent meg. Ekkor történt a tanterem takarítása, ami az aeroszolrészecskék számát és a CO<sub>2</sub> koncentrációját nem befolyásolta. A tömegkoncentrációban később is előfordultak jelentős változások. Kisebbs csúcsok a szünetekben alakultak ki, amelyeket a hallgatók által létrehozott mechanikus és termikus turbulencia (helyváltoztatás és mozgás) eredményezett. Ezek a tevékenységek főleg a nagyobb (durva) részecskék reszuszpenzióját okozzák. Egy másik lehetséges forrás az emberi bőr hámlása lehet, ami átlagosan 14 µm átmérőjű részecskéket juttat a levegőbe, és ezért nagy járulékos aeroszoltömeg-növekedést okoz. A legnagyobb csúcsok azonban bizonyos előadá-

sok közben jelentkeztek. Az E4 előadáson az oktató krétával írt és rajzolt a táblára, míg a többi előadáson csak szóbeli magyarázat zajlott vagy írásvetítőt használtak. A mérési napló szerint 14:15, 14:43, 14:58, 15:08, 15:21 és 15:32 órákor törölték le a tábláról száraz szivaccsal. Ezen időpontok után körülbelül 3 perc késéssel maximumok jelentek meg a mért PM<sub>10</sub>-koncentrációban. A táblatörlés után néhány percre meglehetősen nagy, akár 100 µg/m<sup>3</sup> (!) tömegkoncentrációk alakultak ki a tanterem közepén. Ha az egészségügyi határérték feletti koncentrációk időintervallumait összeadjuk, akkor az összeg jelentős (akár 50%-os) relatív időtartamot képvisel az előadás idejét tekintve, ugyanakkor a 24 órához viszonyítva elhanyagolható.

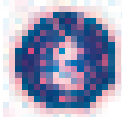
A PM<sub>10</sub>-koncentráció nagy és különálló csúcsai lehetővé tették a durva aeroszolrészecskék átlagos tartózkodási idejének meghatározását a tanteremben. Kétféle, durva aeroszolrészecske jelenlétét mutatuk ki. Az egyik típus tartózkodási ideje 17 perc volt, míg a másikat 34 perces időállandó jellemezte. A hosszabb idő valószínűleg az általános, beltéri porral, míg a rövidebb idő a krétaporral hozható kapcsolatba. A táblatörlésről továbbá azt is megállapítottuk, hogy igen nagy a forrásintenzitása: a művelet átlagosan (11,1±2,6) mg krétaport juttat a levegőbe percnként – a táblatörlés intenzitásától és a tábla krétával való boritottságától függően. Ez az érték jóval nagyobb, mint a belső terekben szokásos emissziós források intenzitása, például sütés (étolajban) vagy grillzés esetén (2–3 mg/min), de szerencsére a táblatörlés



**3. ábra.** A levegő áramlása a tanterem hosszanti irányú, középső síkjában. A sebesség nagyságát színekkel jeleltük, amelynek mértékegysége m/s

rövidebb ideig tart, és ezért nem alakulnak ki összehasonlíthatatlan koncentrációk.

A részecskék számának időbeli változását nem lehet a már említett folyamatokkal



magyarázni. Új aeroszolrészecskék az előadóteremben – jelentős magas-hőmérsékletű forrás és nukleáció hiányában – lényegében nem keletkeznek, hanem a külső levegőből jutnak a tanterembe a szellőztető rendszeren keresztül. A távolabbi, térben és időben összetett emissziós és képződési folyamatok miatt a részecskék számkoncentrációjának időbeli változása inkább véletlenszerű ingadozásra (fluktuációra) emlékeztet.

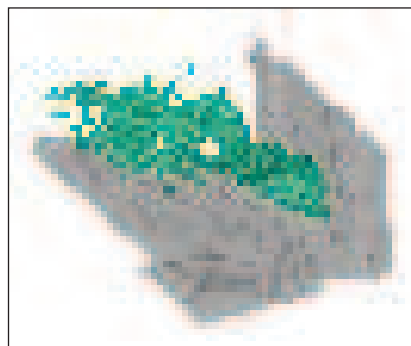
A mért koncentrációk közötti párhuzamosságok kis együtthatója arra utal, hogy a mennyiségek forrásai és nyelői közvetlenül nem kapcsolódnak egymáshoz. A hőmérséklet és a CO<sub>2</sub>-koncentráció azonban együtt változott abban a nappali időszakban, amikor a szellőztető rendszer ki volt kapcsolva. A két mennyiség közötti kapcsolatot a tanteremben lévő hallgatók anyagcsere-folyamatai teremtik meg: légzés és testhő formájában. Ülő tevékenység alkalmával a kilélegzett levegő megközelítőleg 4% CO<sub>2</sub>-ot tartalmaz (százszor többet, mint amennyi a belélegzett levegőben van), emellett az emberi test tipikusan 105 W hőteljesítményt eredményez.

### Térbeli eloszlás az előadóteremben

A hőmérséklet, a légáramlás és a PM<sub>10</sub>-tömegkoncentráció térbeli eloszlását a tanteremben háromdimenziós modellszámításokkal becsültük meg. A hőmérséklet eloszlása függőleges rétegződést mutatott. A beáramló, hűvösebb levegő kismértékben keveredett a tanteremben lévő melegebb levegővel. Ennek következtében a levegő a tanterem alsó részében és a padsorokban volt a leghidegebb. A legalsó és a legfelső padsorok között 3 °C eltérés alakult ki. A tanterem hosszanti irányú, középső síkjában kialakuló áramlási képet a 3. ábrán szemléltetjük.

A tanteremben lévő légáramlás (sebességtér) meglehetősen összetett. A szellőztetés okozta, irányított légáramlás mellett több köráramlat is kialakul. Az áramlási sebességek általában csak kismértékben különböztek. Nagyobb áramlási sebességek csak a középső padsorokban, valamint a hallgatók testhője miatt kialakuló közvetlen feláramlási zónákban jöttek létre. Az első két padsor szellőztetése kisebb mértékű, míg az utána következő sorokban intenzívebb áramlás valósult meg. A táblától az áramlás vízszintes összetevője hosszanti irányban, a tanterem (felső) végébe vezetett, amelynek során az áramlás a középső padsoroknál felemelkedett. Oldalirányban sokkal lassabb volt a krétapor terjedése, mint hosszanti irányban.

Ez az áramlás meghatározta az aeroszolrészecskék transzportját is. A krétapor a táblától fonalas mintázatban, csóvaként terjedt. Ennek eredményeként heterogén térbeli eloszlás jött létre táblatörés után. A tanterem hosszanti, középső sávjában nagyobb krétapor-koncentrációk alakultak ki. Ezt szemléltetjük a 4. ábrán. A csóvát érdemes összehasonlítani a 3. ábra részleteivel is. A csóva – a kísérleti adatokkal megegyezően – 3 perc alatt elérte a mérőhelyet, és körülbelül 5 percig tartott, amíg eljutott a tanterem távoli végébe. Az előadó – aki krétával ír és rajzol, majd száraz szivaccsal töröli a táblát – lélegzi be a legtöbb krétaport. Az aeroszol-expozíció (kitettség) szempontjából a legelőnyösebbnek a szélső ülőhelyek látszanak. Az



4. ábra. A krétapor-csóva az előadóteremben 5 perccel a táblatörés után

írókréta természetes összetétele és a keletkező, szuszpendált részecskék méreteloszlása miatt azonban a krétapor nem tartozik a különösen veszélyes anyagok közé.

### Kémiai összetétel

Az aeroszolrészecskék kémiai összetételét, valamint a komponensek dúsulását a durva és finom méretfrakciókban vizsgálva megállapítottuk, hogy az előadóteremben mindegyik aeroszolösszetevő koncentrációja jelentősen kisebb a városi kültéri levegő tipikus értékeinél. Az összetevők tehát főleg a külső környezetből származnak. Kivételt csak a Ca, a S és a durva méretfrakció tömege képez, amelyek jelentős mértékben keletkeznek a tanteremben. Kimutattuk továbbá, hogy ennek a belső forrásnak aprózódási folyamatnak kell lennie. A tanteremben használt írókréta kémiai összetételét megvizsgálva kiderült, hogy az nem krétaközből (mikroszkopikus CaCO<sub>3</sub>-üledékből), hanem főleg gipszből (CaSO<sub>4</sub>×2 H<sub>2</sub>O) készült. A krétahasználat így megmagyarázza az említett összetevők forrását és dúsulását is. A tanteremben az aeroszolösszetevők – a kültéri városi aero-

szollal összehasonlítva – nagyobb arányban vannak a finom méretfrakcióban, mint a durva részecskékben, amit a beszívott levegő szűrése okoz.

### Összefoglalás

Az ELTE Ortvyai-előadóteremben a levegő minősége az átlagos aeroszol és CO<sub>2</sub>-koncentráció szempontjából kiválóan tekinthető a vizsgált, tavaszi időszakban. Az aeroszolösszetevők leginkább a külső levegőből jutnak be az előadóterembe a szellőztető rendszeren keresztül. A részecskék tömegkoncentrációjának jelentős beltéri forrásai a krétahasználat (különösen a táblatörés száraz szivaccsal), valamint a hallgatók által keltett szuszpenzió/resuszpenzió. A PM<sub>10</sub>-tömegkoncentráció időnként és néhány percre meghaladja a kültéri levegőre vonatkozó 24 órás egészségügyi határértéket. A krétaporfelhő térbeli eloszlása nem egyenletes. Legnagyobb aeroszolexpozíciót az írókrétát használó oktató kapja. A hallgatók, különösen a szélső padokban ülők helyzete kedvezőbb. A szellőztető rendszer kellően hatékony a CO<sub>2</sub>-koncentráció alacsony szinten tartásához. A mért mikrometeorológiai állapotváltozókból becsült komfortérzet alapján a „nem elégedett közérzetű” hallgatók aránya ilyenkor 5% körül lehetett. A tanteremben manuálisan kikapcsolt szellőztetés esetén azonban olyan koncentrációk alakulhatnak ki az előadások végére, amelyek a hallgatók figyelmének és koncentráloképességének csökkenését, vagy fáradtságérzetet okozhatnak.

További információ és részletesebb magyarázat található a Salma *et al.*, *Atmos. Environ.* 64 (2013) 219–228, doi: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.070 szakmai cikkben, a [www.salma.elte.hu](http://www.salma.elte.hu) weblapon, valamint a kapcsolódó TDK- és szakdolgozatokban. Köszönjük Emódi Flóra, Mészáros Tímea, Mónos Lilla, Nagy Dániel, Pollák Bence, Takács Zita és Vörös Alexandra kémia, környezettan, illetve meteorológus szakos hallgatók segítségét a tanterem állandó felügyeletében. A tantermi mérősorozat az oktatási dékánhelyettes, Homonnay Zoltán támogató engedélyével történt. Köszönetünket fejezzük ki az épület főmérnökének, Révész Máriának és az üzemeltetés vezetőjének, Horváth Henriknek az előkészületek segítségével. A kutatást az OTKA (K61193) és a TÁMOP (4.2.1./B-09/1/KMR-2010-000) támogatta. ■

DOSZTÁLY KATINKA–BORSÓS  
TIBOR–GYÖNGYÖSI ZÉNÓ–PÉTER  
NORBERT–KRISTÓF GERGELY–  
WEIDINGER TAMÁS–SALMA IMRE