

ÁLDÁS VAGY ÁTOK?

A nanotudomány és nanotechnológia eredményei életünk egyre több területén éreztetik kedvező hatásukat, kaput nyitnak eddig nehezen elképzelhető lehetőségekhez, és nemegyszer átalakítják mindennapjainkat is. Ezen nagyszerű előrehaladás azonban más kérdéseket is felvet. A nanoanyagok előállításának, illetve használatának elterjedése rendkívül kis méretű, szilárd részecskéket juttathat a levegőbe.

Gondoltunk-e már valaha arra, hogy egy irodai lézernyomtatóból – bizonyos körülmények mellett – nanoméretű festékszémcsék kerülnek a levegőbe? Belégzéssel azután a szervezetünkbe jutnak. Ha nagy számban vannak jelen közvetlen környezetünkben, akkor befolyásolják egészségünket. Szennyezett városokban és munkahelyeken káros hatásuk van – a részecskék rendkívül kis mérete és kémiai összetétele miatt. De mik is valójában a levegőben lévő nanorészecskék? Miből és hogyan keletkeznek, milyen hatásaik lehetnek?

Ultrafinom légköri aeroszol és az éghajlat

A levegőben lévő nanoméretű részecskék a légköri aeroszolok egyik csoportját alkotják, amelyet ultrafinom aeroszolnak nevezünk. Természetes folyamatok és az emberi tevékenység egyaránt eredményeznek ilyen részecskéket és a Föld légkörének alsó részében mindenütt megtalálhatók. Elsősorban ammónium-szulfátból és -nitrátból, valamint szerves vegyületekből állnak. Városokban újabb kémiai anyagok, főleg korom és más szerves vegyületek keverednek az említett összetevőkhöz. A nanorészecskék száma egy köbcentiméter levegőben óceánok felett néhány száz, vidéki levegőben néhány ezer, míg városok szennyezett területein a százazret is elérheti.

Az ultrafinom részecskéknek fontos szerepük van a felhők keletkezésében. A feláramló nedves levegő általában lehűl, ami a benne lévő vízgőz túltelítettségéhez vezet. Ilyenkor a levegő több vízgőzt tartalmaz, mint amennyit képes magában tartani, és ezért felhőcseppek válnak ki benne. Ezt a fázisváltást (amikor vízgőzből folyadék keletkezik) a víz nukleációjának

nevezzük. A természetben előforduló túltelítettségek (amelyek kisebbek 2–3%-nál) esetén a cseppképződés energetikai okok miatt nem valósulhat meg önmagában. Az átmenethez szükség van az ultrafinom aeroszolrészecskékre (ígynevezett felhőkondenzációs magvakra), amelyeken a kicsapódási folyamat lejár sződik. Bizonyos körülmények között a felhőcseppek tovább nőnek, és eső vagy más csapadék formájában hullnak a felszínre. Szárazabb levegőbe jutva viszont a cseppek újra elpárolognak. Ha nincsenek jelen aeroszolrészecskék vagy ionok a levegőben, akkor a túltelítettség önmagában nem eredményez sem felhőket, sem csapadékot. Ilyenkor a meteorológusok szikkség esetén „esőágyúval” megfelelő aeroszolrészecskéket juttatnak a levegőbe, és esőt hoznak létre.

Műholdfelvételeken is látható, hogy a Föld felszínének közel felét általában felhők borítják. A felhők fehér színűek, ezért jelentős mértékben (30%-ban) visszaverik a napfényt az

űrbe. A fényvisszaverés mértéke (a planetáris albedó) fontos szerepet játszik a Föld energiamelegében. A Föld légkörében lévő vízgőz teljes mennyisége lényegében állandó, de az ultrafinom aeroszolrészecskék száma jelentősen nőhet – például az emberi tevékenység hatására. Ilyenkor az állandó mennyiségű vízgőzből sokkal több felhőcsepp alakul ki, ami azt jelenti, hogy a cseppek mérete kisebb, számuk pedig nagyobb lesz. Az ilyen felhők egyrészt jobban visszaverik a nap-sugárzást („fehérebbek”), másrészt az átlagos élettartamuk hosszabb, tehát a fényvisszaverő hatásukat is hosszabb ideig fejtik ki. A felhők szerkezetének változását a tengeri hajózási útvonalak mentén jól meg lehet figyelni, mert ezek tágabb környezetében tiszta a levegő.

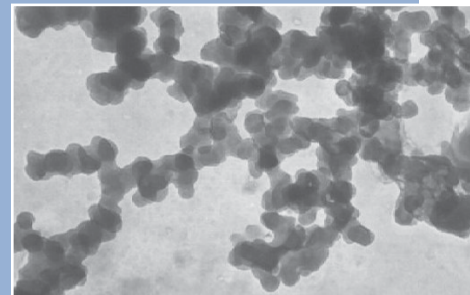
A kisebb cseppeket tartalmazó felhőkből ráadásul ritkábban hullik csapadék, mert a sok csepp nem tud kellően nagyra nőni (a vízpára korlátozott mennyisége miatt) ahhoz, hogy távozzon a levegőből. Az aero-

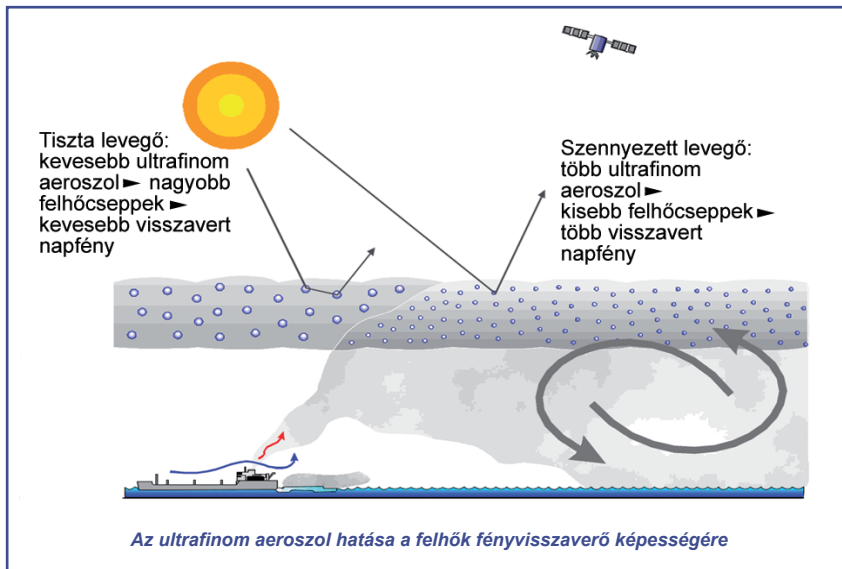
Az írás az OTKA és az Élet és Tudomány közös cikkpályázatán 2. díjat nyert.



FÜST, KÖD, POR

A levegőben finoman eloszlott szilárd és folyékony részecskék rendszerét nevezzük aeroszolnak. Ilyen például a füst, a köd vagy a por. Gyakran vírusok és baktériumok is tapadnak a részecskékhez. Méretük a makromolekulák tartományától (néhány nanométertől) az emberi hajszál vastagságáig (kb. 100 mikrométerig) terjed. A részecskék durva, finom és ultrafinom (kisebkek, mint 100 nanométer) csoportokba oszthatóak. Az aeroszol egészségügyi és környezeti hatásai erősen függenek a részecskék méretétől és keletkezési módjától. Az ábra egy dizelautó kipufogó gázából származó koromrészecske elektronmikroszkópos képét mutatja. Megfigyelhető, hogy a részecske füzérekbe rendeződött gömbökből áll össze.



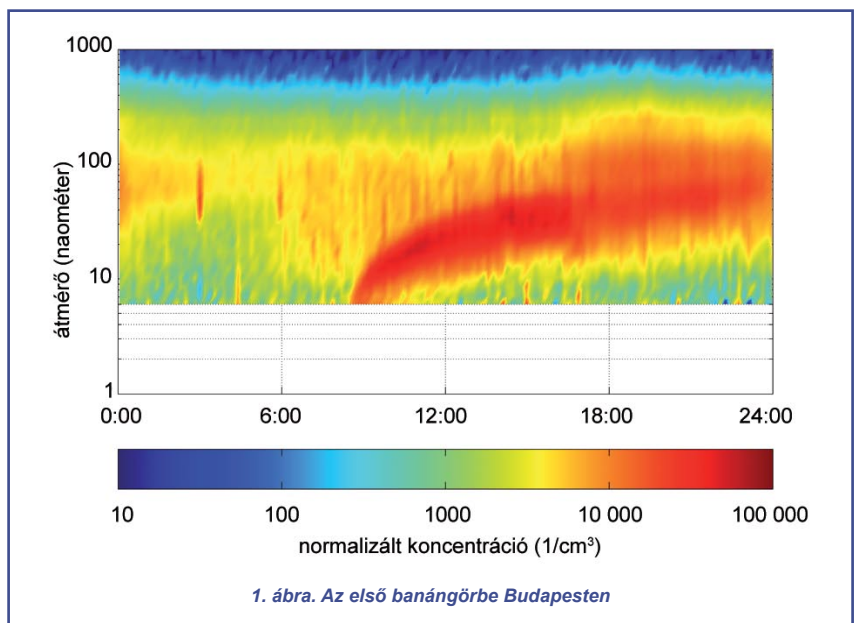


tuk, a piros a legnagyobb, a kék pedig legkisebb koncentrációkat jelöli. November 7-én délután hidegfront vonult át a főváros felett. Ennek hatására a város levegője kitisztult. Az ábrán jól látszik, hogy ez a folyamat szombat hajnalban is tartott: a narancssárga szín fokozatosan megszűnik az ábra bal oldalán, a sárga sáv is összeszűkül, majd szinte eltűnik. Szombat reggel azonban megnőtt a gépjármű-forgalom, és a kibocsátott légszennyező gázok koncentrációja újra növekedett. A szennyező gázok elegyét 8 óra után már erősebb napsütés érte. A napsugárzás hatására kémiai reakciók mentek végbe a levegőben. A reakciók a gázokat általában kevésbé illékony, tehát kon-

szolrészecskék tehát a felhőcseppek révén egyrészt befolyásolják a víz körforgását, másrészt a fényvisszaverés miatt „hűtik” a Földet. Ezzel komolyan ellensúlyozzák az üvegházhatású gázok melegítő hatását, és hozzájárulnak az éghajlat fenntartásához és szabályozásához. Jelenlegi ismereteink az ultrafinom aeroszorról meglehetősen hiányosak, ami az éghajlati modellek egyik legnagyobb bizonytalanságát eredményezi. Ez az egyik fő oka annak, hogy ezen részecskék képződési, növekedési és átalakulási folyamatai az elmúlt tíz évben a tudományos érdeklődés előterébe kerültek.

Mérések Budapesten

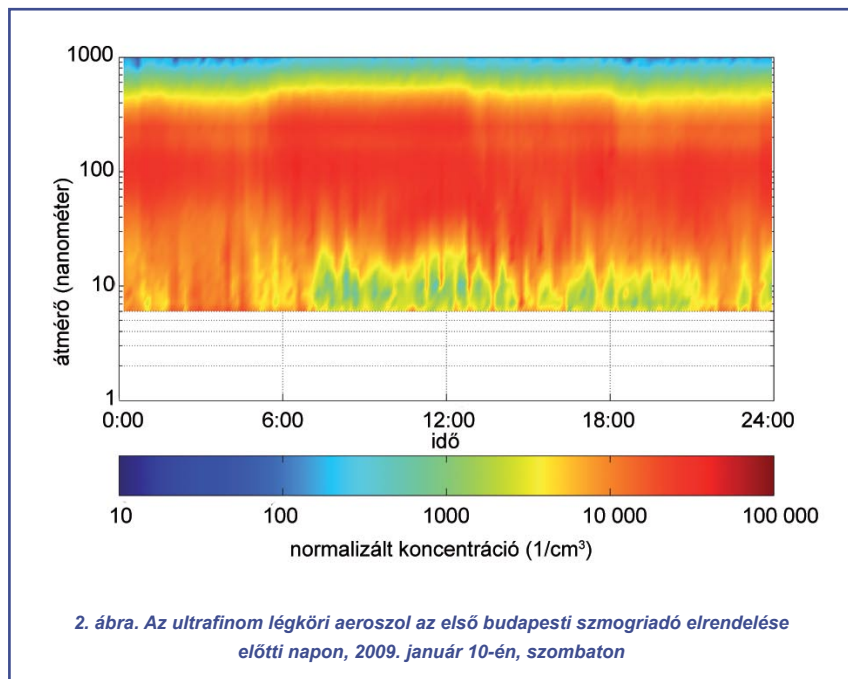
Magyarországon az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kémiai Intézetében folynak a légköri ultrafinom aeroszollal kapcsolatos kutatások az OTKA támogatásával. Fő célunk, hogy megismerjük a nukleáció folyamatát városi környezetben, tanulmányozzuk az ultrafinom részecskék tulajdonságait, dinamikáját és éghajlati hatásait, valamint megbecsüljük a város lakóinak egészségére kifejtett hatásait. Több kísérleti módszer alkalmazunk, amelyek központi részét egy korszerű mérőrendszer, a DMPS (Differential Mobility Particle Sizer, azaz elektromos mozgékonyaságon alapuló részecskeméret szeparátor) alkotja. A műszer a nanoméretű aeroszolrészecskék természetes elektromos töltését használja fel arra, hogy szabályozza a



nagyfeszültségű elektrosztatikus térben végzett áramlásukat. Az egyetlen lágymányosi telephelyén egy éven keresztül 10 percenként mértük a légköri nanorészecskék koncentrációját és méreteloszlását azért, hogy megismerjük a nukleáció folyamatát, évszakos változékonyságát, valamint a budapesti jellegzetességeket. Az eredményekből most kiemelünk néhányat.

Először sikerült azonosítanunk új aeroszolrészecskék képződését Budapesten. A legelső ilyen eseményt a 2. ábrán mutatjuk be, amely a nanoméretű részecskék koncentrációjának időváltozását szemlélteti 2008. november 8-án, szombaton. A részecskék számát színekkel ábrázol-

denzálódó gőzökké alakítják. A gőzök a meglévő aeroszolrészecskék felületére kondenzálódnának. Csak-hogy a levegőben lévő aeroszolrészecskék koncentrációja abban az időszakban a hidegfront miatt kicsi volt, és így nem állt rendelkezésre elegendően nagy felület a kondenzáció számára. A gőzök koncentrációja a levegőben egyre csak nőtt. Hamarosan egy viszonylag ritka jelenség feltételei alakultak ki. Új, tehát rendkívül kis méretű aeroszol részecskék keletkeztek. Ez is nukleáció, amelyben légszennyező gőzök vesznek részt. A folyamat általában sok részecske képződésével jár. A létrejött részecskék tovább nőttek a nap folyamán, mert a gőzök ezután már a



nanorészecskékre kondenzálódtak, illetve a részecskék egymással is ütköztek és összetapadtak (koagulálódtak). A növekedés néhány órától akár több napig is tarthat a koncentrációtól és a helyi meteorológiától függően. Az új részecske-képződés gyakorisága az évszaktól is függ. Télen kevesebbszer (2008 decemberében csupán egyszer) észleltük, míg tavasszal gyakrabban keletkeztek új aeroszolrészecskék (2009 áprilisában tizenhét eseményt regisztráltunk). A részecskék keletkezési és növekedési sebességeit pedig kiszámoljuk, hogy jobban megértsük a levegőben lejátszódó folyamatokat.

Az ultrafinom aeroszolrészecskék száma egyelőre nem szerepel a levegőminőségi mutatók között sem hazánkban, sem a fejlettebb gazdaságú országokban. Annak ellenére sem, hogy a nanorészecskék a tüdőbe kerülve légzőszervi panaszokat okozhatnak, mivel a légzőszervek védekező mechanizmusai nincsenek felkészülve rendkívül nagy számú idegen anyagszemcsék eltávolítására. Sőt, a legkisebb részecskék átjuthatnak a sejtmembránon is, és bekerülhetnek a vérkeringésbe, amely egyrészt elszállítja őket szervezetünk más részeibe, másrészt a vér egyes funkcióinak vagy tulajdonságainak (például az alvadákonyság) megváltoztatása révén súlyos következményekhez vezet-

hetnek a keringési betegségben szenvedők esetében. A 2. ábrán egy szennyezett napot mutatunk be. 2009. január 11-én, vasárnap először rendeltek el szmogriadót Budapesten (lásd Élet és Tudomány 2009/10. szám). A riadó kihirdetése előtti napon Lágymányoson a nanorészecskék száma tartósan 60 ezer körül volt köbcentiméterenként, ami ötszöröse az éves átlagnak. Az ábra végig vörös színű a sok nanorészecske miatt. Belvárosi forgalmas utak mentén és közúti csomópontokban a helyzet ennél is rosszabb lehetett. A szennyezett levegő több napig a városban rekedt. A közúti közlekedés korlátozása nem volt kellően előkészítve, és így lényegében hatástalan volt. Szerencsére az időjárás friss és tiszta levegőt hozott napokon belül.

Nem várhatjuk azonban, hogy a természet oldja meg kritikus helyzetünket. Átgondolt intézkedési tervekre van szükség, amelyekben az ultrafinom aeroszolra külön tekintettel kell lenni, mert másként viselkedik a levegőben, mint a többi aeroszolcsoport. Az elképzelések megfelelő színvonalú megvalósítása nagy kihívást, illetve önmérsékletet jelent a város lakosainak, de elsősorban a vezetők, döntéshozók és a környezeti állapottal foglalkozó szervezetek számára. Ebben a folyamatban a tudományos vizsgálatok során meg-

szertett ismeretek kitűnően használhatóak, ezért a kutatók és a szabályozás területén dolgozó szakemberek szorosabb együttműködése szükséges a jövőben.

Lehet megoldás

Az emberek általában rosszra gondolnak és veszélyt sejtjenek, ha a légköri ultrafinom részecskékről vagy az aeroszorról hallanak. Pedig tudatosítanunk kell, hogy a légköri aeroszol természetes környezetünk része. Szükségünk van rá; nélküle nem lennének felhők az égen, és csapadék sem hullana. A következményeket elgondolni is borzasztó.

Az ultrafinom aeroszolrészecskék számának növekedése és kémiai összetételének megváltozása azonban ellentmondásos hatású lehet. Egyrészt kedvező, mert közvetett hűtő hatásuk révén ellensúlyozzák a Föld globális felmelegedését. Másrészt viszont hátrányos, mert szervezetünket olyan mértékű és minőségű egészségügyi kockázatoknak teszik ki, amelyekre nem vagyunk felkészülve. A fejlettebb gazdaságú országok az elmúlt években sikeres egészségvédelmi intézkedéseket valósítottak meg a levegőszennyezés csökkentése terén. Ezzel azonban az éghajlat érzékenységet és a globális felmelegedést is növelték. Mi lehet tehát a megoldás? Véleményünk szerint az ellentmondás feloldható, sőt a lehetséges válasz jól példázza egy új szemlélet kialakulását a környezettel való kapcsolatunkban. Az emberiség legnagyobb kihívásaira (amelyek között a népességgel, az éghajlatváltozással, az energiatermeléssel, az élelem- és vízellátással, valamint a környezetszennyezéssel kapcsolatos elképzelések feltétlenül szerepelnek) nem léteznek külön-külön megoldások, hanem ezekre összegző választ kell keresnünk. Ennek keretében az éghajlatváltozás és a légszennyezés mérséklése együtt is megvalósítható, ha a fenntarthatóság fogalmát és a kiotói jegyzőkönyv szellemiségét végre komolyan vesszük. Az új szemlélet és magatartás kialakításában, illetve meghonosításában az ismeretterjesztés szerepe semmivel sem pótolható.

**BORSÓS TIBOR
SALMA IMRE**