

## LÉGSZENNYEZÉS-METEOROLÓGIAI KUTATÁSOK AZ ELTE METEOROLÓGIAI TANSZÉKÉN

Mészáros Róbert, Lagzi István László, Leelőssy Ádám, Ludányi Erika Lilla,  
Kovács Attila, Szabó Zoltán

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.  
e-mail: mrobi@nimbus.elte.hu

### Bevezetés

A légszennyezettségi problémák és a levegőminőség előrejelzése az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb jelentőséggel bír a meteorológiai előrejelzések között. A WHO jelentése szerint a világon 2010-ben 3,4 millió ember halt meg a légszennyezés egészségügyi hatásai következtében, az anyagi károk ugyanebben az évben az OECD országokban 1700 milliárd dollárra, Kínában és Indiában együttesen 1900 milliárd dollárra rúgtak (OECD, 2014). Ezek a számok jól mutatják, hogy a légszennyezés mind az élet-, mind pedig a vagyonvédelem terén kiemelt fontosságú probléma, amelyet napjainkban a közvélemény és a döntéshozók is egyre nagyobb figyelemmel követnek. Az egészségügyi és anyagi károk mellett a légszennyezés az időjárás alakulását is számos úton befolyásolja, például a sugárzási viszonyok vagy a felhőképződés terén. Ennek köszönhetően a meteorológiai kutatások egyre inkább az időjárás és a levegőminőség együttes, integrált tárgyalását és előrejelzését tűzik ki célul (Sofiev et al., 2009).

A légszennyezéssel kapcsolatos tudományos kutatásokban megkülönböztetünk baleseti és folytonos kibocsátásokat, globális (~10000 km), regionális (~100-1000 km) és lokális (~10-100 km) skálájú problémákat. A különböző típusú és skálájú légszennyezési folyamatok többféle légköri terjedési modellt igényelnek.

A baleseti kibocsátások következményeit előrejelző terjedési és ülepedési modellek fejlesztése és alkalmazása több mint egy évtizede zajlik az ELTE Meteorológiai Tanszékén. Az elmúlt években a folytonos kibocsátások lokális és regionális skálájú modellezése, egy jelenlegi projektben pedig egy különleges jelentőségű alkalmazási terület, a városi légszennyezettség modellezése és előrejelzése is a kutatások tárgyát képezi.

Az elmúlt években, illetve jelenleg is végzett modellfejlesztéseket, alkalmazásokat és az eredményeket az *1. táblázat*ban foglaljuk össze (A modellek összefoglalását ld. pl. Kovács et al., 2012; Leelőssy et al., 2014).

### Baleseti kibocsátások modellezése regionális skálán

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén kifejlesztett TREX (Transport-Exchange) modell egy elsősorban radioaktív szennyezőanyagok terjedésének és ülepedésének modellezésére alkalmazható szoftver, amely az ALADIN mezoskálájú előrejelző modell adatait használja (Lagzi et al., 2006; Mészáros et al., 2006; Mészáros et al., 2010). A TREX Közép-Európára vonatkozóan, euleri megközelítéssel szimulálja az advekción, turbulens diffúzió, radioaktív bomlás, száraz és nedves ülepedés folyamatait. A kibocsátás 30 km-es körzetén belül a TREX Lagrange-típusú változata biztosít pontosabb eredményeket.

A baleseti kibocsátások modellezésénél elsődleges fontosságú az alacsony számítási igény, hogy a szükséges döntések meghozatalához minél több idő álljon rendelkezésre. A TREX grafikus processzorokon történő párhuzamosításával húszszoros gyorsulást értünk el, amely megalapozta a modell gyakorlati alkalmazhatóságát (Mészáros et al., 2012a).

A Közép-Európán túlterjedő, illetve azon kívüli baleseti kibocsátások szimulációjára a PyTREX trajektóriamodell áll rendelkezésre. A PyTREX globálisan használható Lagrange-i szemléletű modell, amely GFS meteorológiai adatok alapján egyaránt képes koncentrációk előrejelzésére és visszakövetésre, valamint forrásazonosításra is. A PyTREX segítségével a világ bármely pontjáról kibocsátott passzív és radioaktív szennyezőanyagok terjedése modellezhető. A modell a roueni Lubrizol gyár üzemzavara, az ETEX verifikációs kísérlet, illetve a budapesti jódizotóp-kibocsátás kapcsán más modellekkel és mérésekkel való összevetés során is megbízható eredményeket adott (Leelőssy et al., 2013).

1. táblázat: Szennyezőanyagok légköri terjedésének és ülepedésének becslésére végzett modell-számítások összefoglalása

	Modell	Vizsgált terület	Meteorológiai mezők	Eredmény	Részletek
ESETI KIBOCSÁTÁS	TREX-Euler	Közép-Európa	ALADIN, GFS	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Esettanulmányok</li> <li>▪Statisztikai elemzések</li> </ul>	Mészáros et al., 2010 Mészáros et al., 2012a Kovács et al., 2012
	TREX-Lagrange	100×100 km	ALADIN Pontbeli mérések	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Operatív futtatás</li> <li>▪Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	Molnár et al., 2010 Molnár et al., 2011
	PyTREX	Globális	GFS	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Trajektóriák</li> <li>▪Forrás-azonosítás</li> <li>▪Koncentrációbecslés</li> </ul>	Leelőssy et al., 2013
	Open-FOAM	1×1 km	Pontbeli mérések	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Tesztfuttatások,</li> <li>▪Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	Leelőssy et al., 2012
FOLYAMTOS KIBOCSÁTÁS	ALOHA	10×10 km	Pontbeli mérések	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Hosszú távú terhelések</li> </ul>	Leelőssy et al., 2011 Mészáros et al., 2012a
	TREX-Gauss	10×10 km	ALADIN, GFS Pontbeli mérések	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Hosszú távú terhelések</li> </ul>	Ludányi, 2014
	TREX-Euler	Magyarország	ALADIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Tér- és időbeli eloszlás</li> <li>▪Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	Mészáros et al., 2012b
	TREX-ülepedés	pont- és térbeli számítások Európa, Magyarország	Pontbeli mérések, Éghajlati modell outputok	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪Tér- és időbeli eloszlás</li> <li>▪Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	Mészáros et al., 2009a,b Kolozsi-Komjáthy et al., 2011

### Baleseti és folytonos kibocsátások modellezése lokális skálán

Míg a TREX modellcsalád euleri és lagrange-i típusú modellekből áll, felmerült az igény az azonnali eredményt biztosító Gauss-típusú modellek alkalmazására is. Bár a gaussi modellek pontossága nem éri el a fejlettebb modellek eredményeit, baleseti kibocsátások esetén azonnali információt nyújthatnak, hosszabb távú, folytonos kibocsátások esetén pedig elkerülhetők a kifinomultabb modellek rendkívül költséges számításai. Első lépésben a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) által fejlesztett ALOHA modellel, később egy saját fejlesztésű gaussi modellel végeztünk hosszú időtávra vonatkozó modellezéseket a kibocsátás néhány tíz kilométeres körzetében várható átlagos és kumulatív terhelések becslésére.

A Fukushimai Atomerőmű balesete után a radioaktív anyagok kibocsátása egy hónapon keresztül tartott, ilyen hosszú szimulációk futtatása euleri vagy lagrange-i modellekkel rendkívül sok időt vett volna igénybe. Az ALOHA gaussi modellel végzett óránkénti futtatások összegzéséből azonban információt kaphattunk az erőmű körüli területeket ért terhelés térbeli eloszlásáról (Leelőssy et al., 2011). Hasonló vizsgálatokat végeztünk az ajkai vörösiszap-tározókból származó porkibocsátás környezeti terhelésének becslésére is (Ludányi, 2014).

A folytonos kibocsátások vizsgálata során lehetőség nyílik a terjedési viszonyok szinoptikus helyzet alapján történő tipizálására. Az objektív vagy szubjektív szempontok

alapján meghatározott szinoptikus kategóriához tartozó jellemző szélirányok és stabilitási viszonyok segítségével előzetes becslés adható a terhelések várható mértékéről. A tapasztalatok szerint folytonos kibocsátás esetén az előzetes eredmények jól megközelítik a kifinomultabb modellszámítások adatait. Eddigi vizsgálatainkban szubjektív szinoptikus kategóriák, a Péczely-féle makroszinoptikus osztályozás segítségével tipizáltuk az időjárási helyzetet (Mészáros et al., 2012b), a jövőben elsődleges terveink között szerepel objektív kategóriák felállítása.

A kibocsátás közvetlen közelében, 1 km alatti méretskálán az épületek és felszíni akadályok áramlómódosító hatása már jelentősen befolyásolja a terjedési viszonyokat. Ezen a méretskálán elkerülhetetlen a terjedési modell mellett az áramlások CFD (Computational Fluid Dynamics) szimulációja, amely képes a bonyolult geometriájú területek áramlási viszonyainak modellezésére. A Paksi Atomerőmű üzemi területén kialakuló áramlások és esetleges szennyezőanyag-koncentrációk szimulációjára az OpenFOAM szabad hozzáférésű CFD szoftvert alkalmaztuk, amely 500 méteres tartományon, mindössze 10 méteres vízszintes felbontás mellett képes az áramlási mező és a koncentráció eloszlás becslésére.

### **Ózonterhelés becslése**

Korábbi kutatások során végzett vizsgálatok azt mutatták, hogy Közép-Európa és benne Magyarország az egyik legnagyobb troposzférikus ózonterhelésű terület Európában. A Kpusztai mérőhelyen az elmúlt évekhez hasonlóan még mindig változatlanul magas értékeket regisztrálnak, és a határérték-túllépések is gyakoriak. Ez nemcsak az emberi egészségre, hanem a természetes és a mezőgazdasági növényzetre is ártalmas. A magas ózonkoncentráció gátolja a növények fejlődését, gyengíti ellenálló képességüket, ezáltal termés-csökkenést okoz. Mivel a növényeket érő ózonterhelés a légköri koncentráció mellett számos egyéb tényező függvénye, a tényleges terhelés különböző fluxus alapú mérőszámok, illetve az ülepedési sebesség segítségével jellemezhető. Az ülepedési sebesség egyaránt jelentősen függ az időjárási helyzettől, a növény fajtájától és fiziológiai tulajdonságaitól, a talajnedvességtől és a fizikai talajfőleségtől. Meghatározása bonyolult, számos bemenő adatot igényel, de segítségével pontosabb kép adható a környezeti terhelésről.

Vizsgálataink során meghatároztuk a különböző koncentráció- és fluxus alapú mérőszámokkal jellemzett terhelés mértékét is különböző vegetációs periódusokra. Az eredmények során tapasztaltuk, hogy az ülepedési sebesség értéke nagy eltéréseket mutat az egyes növényállományokra, és az eltérő időjárási helyzet miatt még azonos hónapokban is jelentős különbségek alakulhatnak ki az egyes évek között, ami elsősorban a talajnedvességre mutatott nagyfokú érzékenységnek köszönhető (Mészáros et al., 2009a, b; Kolozsi-Komjáthy et al., 2011).

### **Városi légszennyezettséggel kapcsolatos kutatások**

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén egy éve indult a légszennyezettség és a városi növényzet kapcsolatának kutatása. A városi légszennyezettség modellezése az érintett lakosság nagy száma miatt kiemelt fontosságú feladat, a bonyolult áramlási viszonyok, az erősen tér- és időfüggő emisszió, a reaktív szennyezőanyagok és a felszín sokfélesége azonban különleges kihívás elé állítja a modelleket. A budapesti légszennyezettségi viszonyok szimulációjára jelenleg is zajlik a WRF-Chem csatolt meteorológiai és légszennyezési modell adaptálása, amely a mezoskálájú légköri jelenségeket és a légszennyezés folyamatait integráltan kezeli. A modell eredményeit a városi mérőhálózat adatai alapján ellenőrizzük és pontosítjuk, a növényzettel való kölcsönhatást pedig a Buda-

pesti Corvinus Egyetem Kertészettudományi Karával együttműködve, mérések alapján becsüljük.

## Összefoglalás

Kutatásaink során folyamatos és eseti kibocsátások révén a légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének és környezeti hatásainak felmérését végezzük el különböző skálájú és szemléletű modellekkel. Kifejlesztettük egy olyan kifinomult modellrendszer tagjait, melyekkel pontforrásból a légkörbe kerülő anyagok terjedését és ülepedését tudjuk becsülni. A modellek alkalmazásával fontos óvintézkedéseket lehet tenni, amely nemcsak az esetleges anyagi károkat csökkentheti, hanem emberi életet is menthet. Szinoptikus klimatológiai elemzések során szubjektív módszerrel feltártuk a Kárpát-medencére jellemző különböző időjárási helyzetek és a légköri szennyezőanyag terjedése közti kapcsolatokat, jelenleg az objektív osztályozás megvalósítását tűztük ki célul. A nagy számításigényű modellszámítások gyorsabb és hatékonyabb futása érdekében a programkódokat párhuzamosítottuk. A kutatás keretében több tudományos diákköri dolgozat, szakdolgozat, diplomamunka is született, a munkafolyamatokba doktoranduszokat is be tudtunk vonni.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatásokat az OTKA K109109 és K109361 kutatási pályázatok támogatják.

## Hivatkozások

- Kolozsi-Komjáthy, E., Mészáros, R., Lagzi, I., 2011: Effects of the climate change on regional ozone dry deposition. *Advances in Science and Research*, 6, 103–107.
- Kovács, T., Lagzi, I., Leelőssy, Á., Mészáros, R., 2012: Simulations of Atmospheric Dispersion from Point Sources. In: *III. Terrestrial Radioisotopes in Environment – Proceedings of International Conference on Environmental Protection*, Veszprém, 103–106.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Ács, F., Tomlin, A.S., Haszpra, L., Turányi, T., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model: Part I: model development. *Időjárás*, 110, 349–363.
- Leelőssy Á., Mészáros R., Lagzi I., 2011: Short and long term dispersion patterns of radionuclides in the atmosphere around the Fukushima Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, 102, 1117–1121.
- Leelőssy Á., Lagzi I., Mészáros R., 2012: Sensitivity study of OpenFOAM model for local scale atmospheric dispersion simulations. *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-11925.
- Leelőssy Á., Ludányi E.L., Kohlmann M., Lagzi I., Mészáros R., 2013: Comparison of two Lagrangian dispersion models: a case study for the chemical accident in Rouen, January 21-22, 2013. *Időjárás*, 117, 435–450.
- Leelőssy, A., Molnár, F. Jr., Izsák, F., Havasi, Á., Lagzi, I., Mészáros, R., 2014: Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, DOI: 10.2478/s13533-012-0188-6
- Ludányi, E., 2014: Vörösiszap-tározókból származó szennyezőanyagok légköri terjedésének modellezése. Tudományos Diákköri Dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- Mészáros, R., Lagzi, I., Juhász, Á., Szinyei, D., Vincze, Cs., Horányi, A., Kullmann, L., Tomlin, A.S., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model: Part II: sensitivity analysis and application. *Időjárás*, 110, 365–377.
- Mészáros, R., Zsély, I.Gy., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., 2009a: Sensitivity analysis of an ozone deposition model. *Atmospheric Environment*, 43, 663–672.

- Mészáros, R., Horváth, L., Weidinger, T., Neftel, A., Nemitz, E., Dämmgen, U., Cellier, P., Loubet, B., 2009b: Measurement and modelling ozone fluxes over a cut and fertilized grassland. *Biogeosciences*, 6, 1987–1999.
- Mészáros, R., Vincze, Cs., Lagzi, I., 2010: Simulation of accidental release using a coupled transport (TREX) and numerical weather prediction (ALADIN) model. *Időjárás*, 114, 101–120.
- Mészáros, R., Leelőssy, Á., Vincze, Cs., Szűcs, M., Kovács, T., Lagzi, I., 2012a: Estimation of the dispersion of an accidental release of radionuclides and toxic materials based on weather type classification, *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 375–387.
- Mészáros, R., Molnár F. Jr., Izsák, F., Kovács, T., Dombóvári, P., Steierlein, Á., Nagy, R., Lagzi, I., 2012b: Environmental modeling using graphical processing unit with CUDA. *Időjárás*, 116, 237–254.
- Molnár, F. Jr., Szakály, T., Mészáros, R., Lagzi, I., 2010: Air pollution modelling using a Graphics Processing Unit with CUDA. *Computer Physics Communications*, 181, 105–112.
- Molnár, F., Izsák, F., Mészáros, R., Lagzi, I., 2011: Simulation of reaction-diffusion processes in three dimensions using CUDA, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. (DOI:10.1016/j.chemolab.2011.03.009)
- OECD, 2014: The Cost of Air Pollution: Health Impacts of Road Transport. OECD Publishing, doi: 10.1787/9789264210448-en
- Sofiev, M., Miranda, A.I., Sokhi, R., (eds.), 2009: Review of the capabilities of meteorological and chemistry-transport models for describing and predicting air pollution episodes. GAW Report No 187., WMO, Geneva.