

## **BALESETI ÉS FOLYAMATOS KIBOCSÁTÁS RÉVÉN A LÉGKÖRBE KERÜLŐ SZENNYEZŐANYAGOK MONITOROZÁSA ÉS TERJEDÉSÜK MODELLEZÉSE.**

BESZÁMOLÓ A 81933 ÉS 81975 SZÁMÚ KONZORCIÁLIS OTKA PROGRAM KERETÉBEN VÉGZETT KUTATÁSRÓL

Vezető kutatók: Mészáros Róbert<sup>1</sup>, Kovács Tibor<sup>2</sup>

A kutatási beszámolót készítették: Mészáros Róbert<sup>1</sup>, Lagzi István<sup>1</sup>, Kovács Tibor<sup>2</sup>, Somlai János<sup>2</sup>

<sup>1</sup>: ELTE Meteorológiai Tanszék, <sup>2</sup>: Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézet

### **1. BEVEZETÉS**

A légszennyezési problémák kezelése, a levegőminőség felmérése és előrejelzése az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb jelentőséggel bír, melyet a tudományos közélet mellett a közvélemény és a döntéshozók is növekvő figyelemmel követnek. Az elmúlt időszakban történt ipari katasztrófák és eseti kibocsátások, valamint a folyamatosan a légkörbe juttatott szennyezők emissziójának növekvő tendenciái ráirányították a figyelmet a légköri szennyezőanyagok terjedésének és az általuk okozott környezeti károknak a megbízható, pontos becslésére. A számítástechnikai háttér rohamos fejlődése, valamint a számítási idő csökkentését eredményező korszerű módszerek megjelenése egyben megteremtették a lehetőséget az egyre finomabb tér- és időbeli felbontású modellszimulációk, valamint mérések elvégzésére.

Egyes ipari tevékenységek során mindenképpen számolnunk kell hosszú távú, folyamatos egészségkárosító hatással is, amely nemcsak baleseti körülmények között, de normál üzemműködés során is fellépnek. E tevékenységeken belül különösen kiemelt szerepet kapnak a folyamatok során keletkező melléktermékek tározói, amelyek jelentős légszennyezést idézhetnek elő. Bizonyos esetekben a melléktermék (pl. vörösiszap) radiológiai szempontból is veszélyes lehet.

### **2. TUDOMÁNYOS HÁTTÉR**

Kutatási pályázatunk célja folyamatos és eseti kibocsátások révén a légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének és környezeti hatásainak felmérése volt speciális mérések és modellezés segítségével. A munkában az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék valamint a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézet munkatársainak mérési és modellezési tapasztalatait hasznosítottuk.

A légköri szennyezőanyag-terjedés szimulációja a numerikus áramlásmodellezés egyik legösszetettebb feladata. A probléma méretskálájától és a konkrét feladattól függően eltérő szemléletmódokat alkalmazhatunk. A pályázat keretében különböző skálájú és eltérő szemléletmódú terjedési modellek fejlesztését, adaptálását és alkalmazását végeztük el. A modellrendszer hatékony eszközt jelenthet döntéshozók számára is különböző típusú légszennyezési események kezelése során.

Munkánk másik pillérét a mérések jelentették. Ehhez az Ajka térségében elhelyezkedő vörösiszap tárolót vettük alapul, amely jelentős rádium és tórium tartalommal rendelkezik, valamint igen nagy arányban bocsát ki aeroszoloikat a környezetbe. A magas rádium és tórium tartalom miatt a tározóból nagy mennyiségben kerül ki radon/toron gáz, amelyek a környéken élő embereket érő sugárterhelést nem elhanyagolható mértékben megnövelhetik. További problémát jelentenek a radon izotópok leányelemei, amelyek a levegőben lévő aeroszol részecskékhez tapadhatnak, tovább növelve a sugárterhelés mértékét. A munka során számos radiológiai mérést végeztük a vörösiszap tározó környezetében: meghatároztuk a tározó radon potenciálját, a tározó környezetében lévő házakban a radon/toron és leányelem koncentrációt, valamint az aeroszolok „attached/unattached” arányát. Ezen mérési eredmények, valamint a meteorológiai viszonyok ismeretében meghatároztuk a tározó környezetében a szennyezettség mértékét.

### 3. FOLYAMATOS ÉS BALESETI KIBOCSÁTÁSOK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA MODELL SZIMULÁCIÓKKAL

A légköri szennyezőanyagok terjedésének és ülepedésének szimulációjára különböző léptékű és szemléletű modelleket alkalmaztunk (részletes összefoglalást l. *Mészáros et al.*, 2010a; *Kovács et al.*, 2012a; *Lagzi et al.*, 2013; *Leelőssy et al.*, 2014).

A különböző mérési programok, valamint a folyamatos modellezési munka során nyert tapasztalatok megteremtették a lehetőséget arra, hogy létrehozzuk és folyamatosan fejlesszük a szennyezőanyagok légköri terjedésének és az általuk okozott környezeti terhelésnek a szimulálására alkalmas *TREX* terjedési-kicszerélődési modellcsomagot.

E modellcsalád elemeivel az elmúlt években különböző szimulációkat végeztünk lokális, regionális és kontinentális skálán. Ez alapvetően kétfajta vizsgálatot jelent: egyrészt eseti kibocsátások során a légkörbe jutó szennyeződések diszperziójának becslését, másrészt a folyamatos környezeti terhelés számítását. E munkafolyamatokat, a kutatások során fejlesztett, illetve alkalmazott modelleket, valamint az eredményeket az 1. táblázatban foglaljuk össze.

1. táblázat: Szennyezőanyagok légköri terjedésének és ülepedésének becslésére végzett modellszámítások összefoglalása

	Modell	Vizsgált terület	Meteorológiai mezők	Bemenő adatok					Eredmény	Részletek
				talaj	felszín	növény	légkör	emisszió		
ESETI KIBOCSÁTÁS	TREX-Euler	Közép-Európa	ALADIN, GFS	✓	✓	✓			<ul style="list-style-type: none"> <li>Esettanulmányok</li> <li>Statisztikai elemzések</li> </ul>	<i>Mészáros et al.</i> , 2010 <i>Mészáros et al.</i> , 2012a <i>Kovács et al.</i> , 2012a
	TREX-Lagrange	100×100 km	ALADIN Pontbeli mérések	✓	✓	✓			<ul style="list-style-type: none"> <li>Operatív futtatás</li> <li>Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	<i>Molnár et al.</i> , 2010 <i>Molnár et al.</i> , 2011
	PyTREX	Globális	GFS						<ul style="list-style-type: none"> <li>Trajektóriák</li> <li>Forrás-azonosítás</li> <li>Koncentrációbecslés</li> </ul>	<i>Leelőssy et al.</i> , 2013
	OpenFOAM	1x1 km	Pontbeli mérések	✓	✓	✓			<ul style="list-style-type: none"> <li>Tesztfuttatások, Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	<i>Leelőssy et al.</i> , 2012
FOLYAMATOS KIBOCSÁTÁS	ALOHA	10×10 km	Pontbeli mérések				✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hosszú távú terhelések</li> </ul>	<i>Leelőssy et al.</i> , 2011 <i>Mészáros et al.</i> , 2012a
	TREX-Gauss	10x10 km	ALADIN, GFS Pontbeli mérések				✓	✓	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hosszú távú terhelések</li> </ul>	<i>Ludányi</i> , 2014
	TREX-Euler	Magyarország	ALADIN	✓	✓	✓	✓		<ul style="list-style-type: none"> <li>Tér- és időbeli eloszlás</li> <li>Érzékenységi vizsgálat</li> </ul>	<i>Mészáros et al.</i> , 2012b
	TREX-ülepedés	Európa, Magyarország	Éghajlati modell outputok	✓	✓	✓	✓		<ul style="list-style-type: none"> <li>Tér- és időbeli eloszlás</li> </ul>	<i>Kolozsi-Komjáthy et al.</i> , 2011

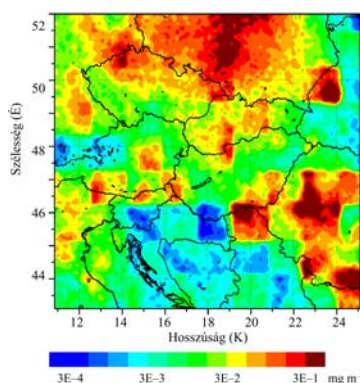
A TREX-Euler modell alkalmas különböző szennyezőanyagok terjedésének és kémiai reakcióinak leírására. A modellt elsősorban pontforrásokból származó radioaktív szennyezőanyagok terjedésének és ülepedésének modellezésére alkalmaztuk (*Mészáros et al.*, 2010; 2012a), de megfelelő emissziós adatok ismeretében folyamatos kibocsátások során a légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének, valamint koncentráció és ülepedési mezőinek meghatározására is alkalmassá tettük (*Mészáros et al.*, 2012b).

Elkészítettünk egy háromdimenziós *Lagrange-típusú* terjedési modellt is (TREX-Lagrange). A programmal különböző célokra alkalmas szimulációk végezhetők pontforrások környezetében (operatív használat, éles baleseti helyzet modellezése, gyakorlatok, tesztek végzése).

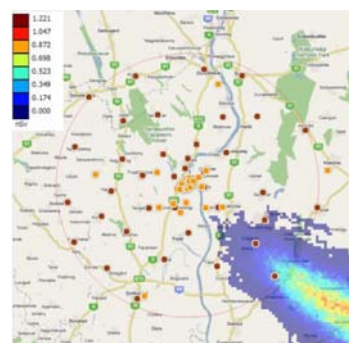
A baleseti kibocsátások modellezésénél elsődleges fontosságú az alacsony számítási igény, hogy a szükséges döntések meghozatalához minél több idő álljon rendelkezésre. A TREX modellek grafikus processzorokon történő párhuzamosításával húszszoros gyorsulást értünk el, amely megalapozta a modell gyakorlati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

A Közép-Európán túlterjedő, illetve azon kívüli baleseti kibocsátások szimulációjára a PyTREX trajektória modellt fejlesztettük. A PyTREX globálisan használható Lagrange-i szemléletű modell, amely GFS meteorológiai adatok alapján egyaránt képes koncentrációk előrejelzésére és visszakövetésre, 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).

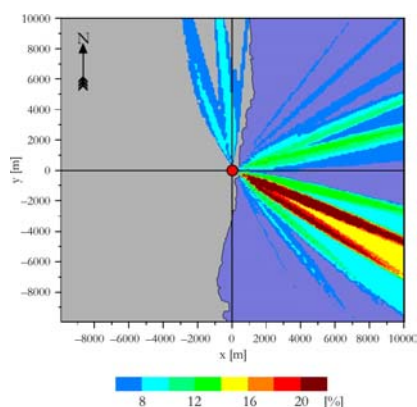
Pontforrások néhány km-es környezetére *Gauss-típusú* modelleket is adaptáltunk és fejlesztettünk. A Gauss-típusú modelleket elterjedten alkalmazzák a légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének szimulálására. Ezek a modellek nagyobb távolságokra történő terjedés szimulálására nem alkalmasak, viszont lokális skálán azonnali eredményt adnak valós időben, ezért kiválóan alkalmazhatók statisztikai vizsgálatok elvégzésére, hatástanulmányok készítésére is. Kutatásaink során modellszimulációkat végeztünk az amerikai NOAA által kifejlesztett ALOHA gaussi-típusú modellel. A modellt alkalmassá tettük nagy mennyiségű adat automatikus kezelésére, és éves terhelések területi eloszlását határoztuk meg különböző források környezetére (Paksi Atomerőmű, Izotóp Intézet, Fukushimai Atomerőmű – Leelőssy *et al.*, 2011; Kovács *et al.*, 2012a). A tapasztalatok alapján elkészítettük a PyTREX modellcsalád Gauss-típusú modelljét is.



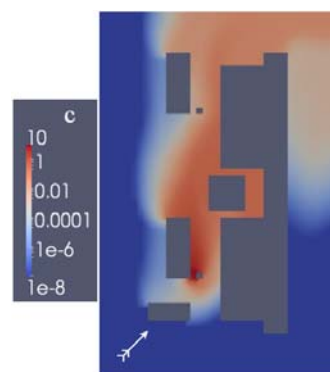
Példa a **TREX-Euler** modell alkalmazására: SO<sub>2</sub> koncentráció mező 2 m-en egy Közép-Európát lefedő rácson (2006. márc. 24, 12 UTC) EMEP emissziós adatok és az Aladin modell mezőinek felhasználásával.



Példa a **TREX-Lagrange** modell alkalmazására: a lakosságot ért pajzsmirigy dózis megjelenítése a Paksi Atomerőmű környezetében egy feltételezett baleset után.



Példa az **ALOHA** (egyszerű Gauss-típusú modell) alkalmazására: Szennyezőanyag csóva átlagos relatív eloszlása a Fukushima 1 Atomerőmű 10 km-es környezetében a 2011. március 12 és április 15 közötti időszak során.

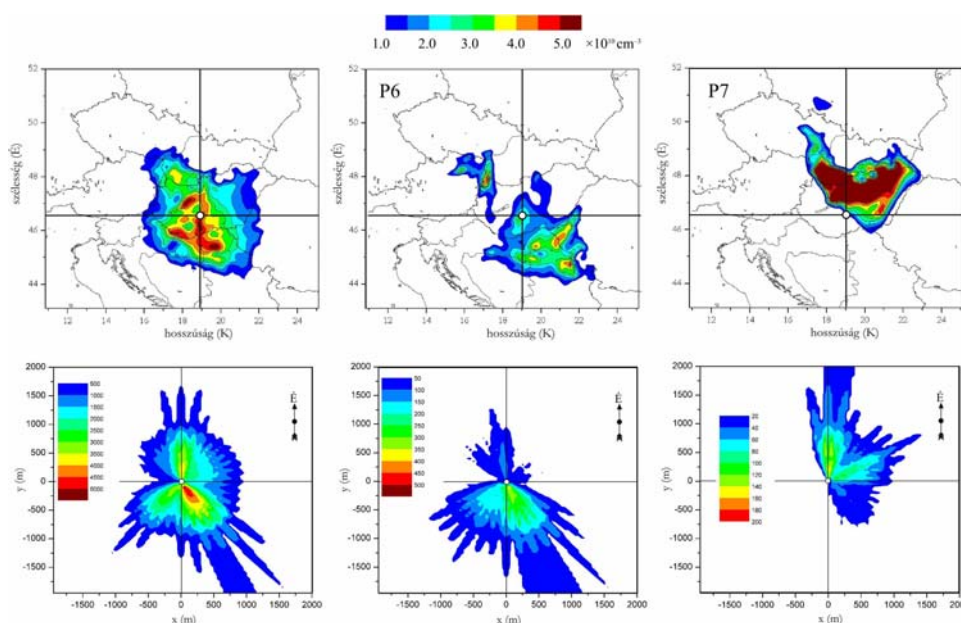


Példa az **OpenFOAM** CFD modell alkalmazására: délnyugati szélirány esetén kialakuló <sup>131</sup>I koncentráció mező (cm<sup>-3</sup>) egy feltételezett jód izotóp kibocsátás kezdete után 5 perccel a Paksi Atomerőmű területén, 10 m-en.

1. Ábra: Légköri szennyezőanyagok terjedésének és térbeli eloszlásának szimulálása különböző szemléletű és skálájú modellekkel.

A kibocsátás közvetlen közelében, 1 km alatti méretskálán az épületek és felszíni akadályok áramlásmódosító 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 m-es tartományon, mindössze 10 m-es vízszintes felbontás mellett képes az áramlási mező és a koncentráció eloszlás becslésére (Leelőssy et al., 2012). A különböző típusú modellekről az 1. ábrán mutatunk be példákat.

A különböző időjárási helyzetekre végzett esettanulmányok (Mészáros et al., 2010) és részletes érzékenységi vizsgálatok mellett egy hosszabb időszakra (1 év) folyamatosan is végeztünk szimulációkat (az év minden egyes napján egy baleseti kibocsátást feltételezve és a diszperziót szimulálva), ami már statisztikai elemzéseket is lehetővé tett (Mészáros et al., 2012a). Ennek keretében a Kárpát-medence időjárási helyzeteit leíró Péczely-féle makroszinoptikus helyzetek (13 típus) szerint rendszereztük a modellfuttatásokat. E módszernek köszönhetően lehetőség nyílik arra, hogy már a nagy pontosságú baleseti modellek lefuttatása előtt is egy elsődleges közelítést adhassunk a szennyeződés várható terjedésére és a baleset következményeire (2. ábra). Ez természetesen nem helyettesíti a dinamikus modelleket, de rendkívül hasznos segítség lehet olyan szituációban, amikor minden pillanat számít a lakosság védelme érdekében meghozott döntéseknél.



2. ábra: Statisztikai eloszlások a Paksi Atomerőmű térségében az TREX-Euler (felső sor) és az ALOHA Gauss modellel (alsó sor). Az első oszlop az összes futtatás átlaga (365, illetve kb. 35 000 futtatás), a második oszlop a 6-os (mediterrán ciklon előoldali áramrendszere), míg az utolsó 7-es (zonális, ciklonális áramlás) Péczely-kód esetén előforduló csóvák átlagait mutatja (forrás: Mészáros et al., 2012a).

#### 4. FOLYAMATOS KIBOCSÁTÁSOK MONITOROZÁSA VÖRÖSISZAP TÁROZÓK KÖRNYEZETÉBEN

A kutatási pályázatunk másik fő pillérét a vörösiszap tározók környezetében végzett mérések, valamint a mérési adatok feldolgozása, elemzése jelentették. A vörösiszap tározó ideális mérési terület, jelentős rádium és tórium tartalma, illetve aeroszol-képző tulajdonsága miatt. A belélegzett radon és leányelemei, illetve az aeroszolképzés által okozott sugárterhelés hosszú távon nem elhanyagolható. A sugárterhelés becsléséhez az aeroszol-szemcsékre tapadt radionuklidok eloszlásának és koncentrációjának ismerete elengedhetetlen. A munka során a tározó radon potenciálját, az aeroszolképzés „attached/unattached” arányát, a radon/toron méréseit végeztük el.

A pályázat kezdeti szakaszában elvégeztük a tározó radiológiai felmérését. Különböző elemzéseket végeztünk vörösiszap mintákon: gamma spektrometriai mérések, aeroszol minták elemzése. A gamma spektrometriai elemzések során megállapítottuk, hogy a vörösiszap jelentős urán, tórium és rádium tartalommal bír. Az aeroszol részecskék elemzésekor megvizsgáltuk a méreteloszlást is. Ennek eredményeként azt kaptuk, hogy a részecskék ~95%-a a 20 µm alatti tartományban található.

A vörösiszap tározó környezetében több településen is végeztük beltéri radon felméréseket. A felmérések eredményeképpen megállapítottuk, hogy a lakásokban mérhető radon koncentráció magasabb, mint a világtálag.

A 2010 októberében bekövetkezett vörösiszap katasztrófa megváltoztatta a mérési körülményeket. Egyrészt az általunk kiválasztott házak jelentős része megsemmisült, így új mérési pontokat kellett kijelölnünk. Másrészt mind a beltéri radon, mind a légkörben jelenlévő aeroszolkoncentrációjában növekedést figyeltünk meg. Ennek következtében teljesen átalakult az általunk vizsgált terület szerkezete (*Kovács et al.*, 2012b).

A vörösiszap magas tórium tartalma miatt a környező lakásokban megnövekedett toronkoncentrációval kellett számolnunk. Emiatt szükség volt a toron és radon párhuzamos mérésére is alkalmas passzív mérőrendszerek (nyomdetektorok) fejlesztésére. A nyomdetektorok fejlesztésének első lépése egy stabil paraméterekkel (toron és leányelem koncentráció, hőmérséklet, páratartalom) rendelkező kalibrációs kamra kialakítása. Ehhez szükségünk van megfelelő morfológiai tulajdonságokkal rendelkező forrásra. Az általunk elkészített toron forrás egy kerámia alapú, tórium-nitrát tartalmú forrás, amelyet megfelelő hőmérsékleten kiégettünk. Ezt követi a nyomdetektorok kalibrációja, amely során a detektorokat besugározzuk ismert toronkoncentráció mellett és meghatározzuk a kalibrációs faktort. Az általunk kalibrált nyomdetektorokkal részt vettünk a japán NIRS (National Institute of Radiological Sciences) által szervezett nemzetközi összemérésen, ahol méréseink a referencia értékhez képest 2% alatti eltérést mutattak.

Ezt követően a gyakorlatban is megvizsgáltuk ezeknek a detektoroknak az alkalmazhatóságát. A tározó környezetében lévő településeken több lakóházat is kiválasztottunk, ahol a nyomdetektoros mérés mellett aktív mérőműszerekkel is végeztünk radon és toronkoncentráció meghatározást. A detektorok alkalmazhatóságának bizonyítása végett nemcsak a környező településeken, hanem egyéb, a tározótól független mérési pontokon is végeztünk radon és toron felméréseket aktív és passzív mérőrendszerekkel (*Németh et al.*, 2010). A terepi méréseket elemezve összességében elmondhatjuk, hogy a passzív és aktív mérőrendszerek közötti különbség alacsony volt. Képesek voltunk kimutatni az átlagtól való jelentős eltéréseket is.

Az embert érő sugárterhelés becsléséhez nagyon fontos ismernünk a leányelemek „attached/unattached” frakciójának arányát. Ennek jelentőségét tovább növeli, hogy a tározó környezetében kialakuló aeroszol koncentráció jelentősen meghaladja az egészségügyi határértéket. Ennek meghatározására több mérést is végeztünk, először laborkörülmények között, majd később a radon és toronkoncentráció mellett ezek arányát is meghatároztuk a mérési pontokon (*Fábián et al.*, 2014).

A retrospektív radonkoncentráció meghatározásokat 20 lakóház esetében végeztük el (CD lemez és üvegfelületek felhasználásával), mely felméréssel bekapcsolódtunk egy nemzetközi kutatásba (V4) is. A rendelkezésre álló minták kiértékelése alapján nagyon jó egyezéseket kaptunk a mért éves radonkoncentrációkhoz képest (kisebb, mint 20% relatív eltérés). Ugyanakkor a hosszú távú (10–15 évre vonatkozó) számításokat jelentősen befolyásolja a 2010-es vörösiszap baleset, mivel a korábbi koncentrációknál nagyságrendileg nagyobb koncentrációk elfedik a mérhető értékeket.

Elvégeztük a vörösiszapok és a tározó közelében gyűjtött minták gamma spektrometriai elemzését, radon és leányelemeinek mérését, továbbá aeroszol mérések, alfa spektrometria mérések is történtek több mérési ponton.

A tározók környezetében lévő lakásokban integrális passzív és aktív radon/toronkoncentráció, gamma dózis méréseket végeztünk (*Szeiler et al.*, 2012) kiválasztva néhány települést (Ajka, Somlóvásárhely, Devecser, Túskevár). Ajka településen több mint 100 lakóházban végeztünk egy éves radon méréseket.

Mivel a 2010-es katasztrófa után megnövekedett a mérési pontok száma, ezért ki kellett fejleszteni egy olyan rendszert, amely a korábbi, elavult mikroszkópos kiértékelő rendszernél gyorsabb adatfeldolgozásra képes. Ennek alapjául egy scanner szolgál. Az így kifejlesztett rendszerrel kiértékelünk több ezer nyomdetektort. Az eredmények alapján azt mondhatjuk, hogy a rendszer megfelelően működik és a továbbiakban ennek segítségével végezzük a detektorok elemzését (Bátor *et al.*, 2014).

A meteorológiai adatok és a radiológiai mérések birtokában meghatározhatók az erősebben szennyezett területeket. A folyamatos mérések költségei modellszámításokkal csökkenthetők, ezért modellszimulációkat is végeztünk a vizsgált területen. Az ajkai zagyatározókból a kiporzás által kikerült részecskék légköri terjedését szimuláltuk a kutatási pályázat keretében kifejlesztett Gauss-típusú terjedési modellel. E modellel a 2011-es évre végeztünk szimulációkat 3 órás meteorológiai adatbázis felhasználásával. Meghatároztuk a tározóból származó por által okozott éves porterhelés mértékét a vörösiszap-tározó 10 km-es környezetében (Ludányi, 2014).

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A projekt során folyamatos és eseti kibocsátások révén a légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének és környezeti hatásainak felmérését végeztük el speciális mérések és modellezés segítségével. A hazai vörösiszap tározókból származó természetes eredetű radionuklidok mérésével pontos és átfogó képet kaptunk az egyes esetekben roppant elhanyagolt állapotban lévő bányaterületekről származó szennyezőanyagok terjedéséről és hatásairól. 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 életeket is menthet. Szinoptikus klimatológiai elemzések során feltártuk a Kárpát-medencére jellemző különböző időjárási helyzetek és a légköri szennyezőanyag terjedése közti kapcsolatokat. A nagy számításigényű modellszámítások gyorsabb és hatékonyabb futása érdekében elvégeztük a programkódok párhuzamosítását. A pályázat célkitűzéseit az ELTE Meteorológiai Tanszék és a Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézet munkatársai közösen végezték. Eredményeinket hazai és nemzetközi konferenciákon, referált folyóiratokban mutattuk be. A „Leelőssy *et al.*, 2011 cikkünk a *Journal of Environmental Radioactivity* című folyóirat legtöbbet letöltött cikkei között szerepelt 2012-ben. A kutatás keretében több tudományos diákköri dolgozat, szakdolgozat, diplomamunka is született, a munkafolyamatokba doktoranduszokat is be tudtunk vonni.

## HIVATKOZÁSOK:

- Bátor, G., Csordás, A., Horváth, D., Somlai, J. and Kovács, T., 2014: Comparing track shape analysis-based automated slide scanner system with traditional methods. *The Second International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research (RAD 2014) and the Second East European Radon Symposium (SEERAS) Book of Abstracts: #92.*
- Fábián, F., Csordás, A., Shahrokhi, A., Somlai J. and Kovács, T., 2014: *Radiation Protection Dosimetry (in press).*
- Kolozsi-Komjáthy, E., Mészáros, R. and 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. and Mészáros, R., 2012a: *Simulations of Atmospheric Dispersion from Point Sources*, III. Terrestrial Radioisotopes in Environment. Proceedings of International Conference on Environmental Protection., Veszprém, 103–106.
- Kovács, T., Sas, Z., Somlai, J., Jobbágy, V. and Szeiler, G., 2012b: Radiological investigation of the effects of red mud disaster. *Radiation Protection Dosimetry*, 152. 1–3. 76–79.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, Gy. and Leelőssy, Á., 2013: *Atmospheric Chemistry (elektronikus jegyzet)* Budapest: ELTE TTK FFI Meteorológiai Tanszék, 207 p.  
<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/atmospheric/index.html>

- Leelőssy Á., Mészáros R. and 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. and 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. and 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. and 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
- Mészáros, R., Lagzi I., Komjáthy E. and Leelőssy Á., 2010: Légköri szennyezőanyag terjedés és terhelés modellezése különböző skálán. In: Mészáros, R., Komjáthy, E (szerk.) *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 23. 51-56.
- Mészáros, R., Leelőssy, Á., Vincze, Cs., Szűcs, M., Kovács, T. and 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. 3-4. 375-387.
- Mészáros, R., Molnár F., Jr., Izsák, F., Kovács, T., Dombóvári, P., Steierlein, Á., Nagy, R. and Lagzi, I., 2012b: Environmental modeling using graphical processing unit with CUDA. *Időjárás* 116, 237-254.
- Molnár, F. Jr., Szakály, T., Mészáros, R. and 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. and 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)
- Németh, Cs., Jobbágy, V., Kávási, N., Somlai, J., Kovács, T. and Tokonami, S., 2010: Radon and thoron parallel measurements in dwellings nearby a closed Hungarian uranium mine. *Nukleonika* 55. 4. 459-462.
- Szeiler, G., Somlai, J., Ishikawa, T., Omori, Y., Mishra, R., Sapra, B.K., Mayya, Y.S., Tokonami, S., Csordás, A. and Kovács, T., 2012: Preliminary results from an indoor radon thoron survey in Hungary. *Radiation Protection Dosimetry*, 152.1-3. 243-246.