

LÉGKÖRI DISZPERZIÓ MODELLEZÉSE KÜLÖNBÖZŐ SKÁLÁKON

Leelőssy Ádám(1), Mészáros Róbert(1), Kovács Attila(1), Lagzi István László(2)

(1) ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

(2) BMGE Fizikai Intézet, 1111 Budapest, Budafoki út 8.

e-mail: leelossyadam@gmail.com

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben bekövetkezett ipari balesetek és az ezekkel kapcsolatos kibocsátások ráirányították a figyelmet a szennyezőanyagok légköri terjedésének, valamint az általuk okozott környezeti károknak a gyors és megbízható becslésére. A számítástechnikai háttér rohamos fejlődése, az egyre részletesebb meteorológiai adatbázisok és az egyre pontosabb időjárás előrejelzések megteremtették a lehetőséget, hogy egyre finomabb tér- és időbeli felbontásban tudjuk szimulálni a légköri diszperziót. A légkörben történő terjedés és szennyezőanyag eloszlás eltérő skálájú és szemléletű diszperziós modellekkel szimulálható a konkrét feladat függvényében.

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén több mint másfél évtizede végezzük szennyezőanyagok légköri terjedésének szimulálására alkalmas modellek adaptálását, fejlesztését és alkalmazását. Kutatásaink során a különböző skálájú és szemléletű modellekkel valós és fiktív szennyezőanyag kibocsátások hatásait, valamint a szennyezőanyagok légköri diszperzióját vizsgáltuk és elemeztük.

Különböző típusú szennyezőanyag terjedési modellek

A légszennyezők terjedésének és immissziójának (koncentráció mezőinek) becslésére különböző modellek állnak rendelkezésre (ld. Leelőssy et al., 2014). Az egyes modellek eltérő bemenő adatbázisokat használnak, különböző fizikai/kémiai folyamatokat vesznek figyelembe, illetve más-más tér- és időskálán dolgoznak. Adott feladatra a különböző modellek előnyeit és hátrányait, illetve korlátait mérlegelve választhatjuk ki a legmegfelelőbb módszert.

A diszperziós modellek által felhasznált bemeneti adatok különbözők, és azok pontossága, részletessége a szimuláció eredményét is nagymértékben befolyásolja. A futtatásokhoz szükségesek a kibocsátás(ok)ra vonatkozó adatok, meteorológiai információk és különböző részletességű környezeti adatok, paraméterek.

A kibocsátás (emisszió) pontos mértéke az egyik legbizonytalanabb tényező a modellekben és a bizonytalanság a forrás jellegétől is függ. Például egy pontforrás esetén a kibocsátás helye pontosan ismert lehet, de egy baleset során a kibocsátott anyag mennyisége általában csak becsülhető. Folyamatos jellegű kibocsátás esetén pedig az emisszió időbeli menetének meghatározása jelenthet gondot.

A szennyezőanyagok légköri terjedését, hígulását meghatározó meteorológiai adatok pontbeli mérésekből, vagy numerikus időjárás modellek szimulációiból származtathatók. A pontbeli mérések pontosabbak, de csak korlátozottan állnak rendelkezésre, a numerikus modellek eredményei ezzel szemben akár nagyobb térségre vonatkozóan is részletesebb tér- és időbeli felbontásban rendelkezésre állnak, de némileg pontatlanabbak a mérési adatoknál. A részletesebb adatbázis használata egyben a számítási idő növekedését is eredményezi.

A környezeti adatok szükséges pontossága és részletessége az adott modelltől, illetve az adott feladattól függhet. Ilyen adatok lehetnek a felszín jellegére vonatkozó információk (pél-

dául felszín típusa, albedója, érdességi magassága, stb.), a domborzat, vagy akár az épületek, tereptárgyak geometriája.

Egy adott feladatra a pontosságot és a szimuláció idejét egyaránt szem előtt tartva kell a megfelelő modellt kiválasztani. Így például eltérő szemléletre van szükség egy nagytávolságú léggöri terjedés szimulációjára, vagy a lokális szennyezettség meghatározása esetén. Hasonlóan, eltérő fontosságú a számítási idő lerövidítése egy utólagos elemzés, vagy egy krízishelyzet, például egy esetleges baleseti kibocsátás során. Utóbbi esetben kiemelten lényeges, hogy a döntéshozók szinte azonnal képet kapjanak a szennyezés léggöri terjedéséről és a várható hatásokról.

Az egyes modelltípusok

A diszperziós modellek általános osztályozása alapján megkülönböztethetünk statisztikus és dinamikus modelleket. Az adott feladat, a rendelkezésre álló adatok és infrastruktúra, a megkívánt számítási idő és egy sor egyéb tényező függvényében más-más típusú és szemléletű léggöri szennyezőanyag terjedési modell alkalmazására lehet szükség. A statisztikus modellek korábbi mérések statisztikai elemzésein alapulnak. Egyszerűek, számítási igényük kicsi, ugyanakkor nem képesek az időben változó folyamatokat nyomon követni, így nem tudják figyelembe venni a szennyezőanyag kibocsátás mennyiségének, összetételének és területi eloszlásának évek során bekövetkezett változását, valamint a meteorológiai tényezők időbeli menetéből fakadó hatásokat. A légszennyezők terjedése pontosabban írható le a dinamikus modellekkel. A legelterjedtebben használt dinamikus modell típusokat az alábbiakban mutatjuk be röviden.

Gauss-típusú modellek

A gaussi terjedési modellek a szennyezőanyag koncentrációjának függőlegesen és szélirányra merőlegesen a forrás tengelyétől számított Gauss-eloszlását feltételezik, amelyhez hozzáadódik a szél irányába történő transzport. A terjedés mértékét – az eloszlás szélességét – a léggöri stabilitás, illetve a kibocsátástól eltelt idő alapján számítják. Ez egyszerű matematikai kezelést tesz lehetővé, de csak álló forrás esetén, stacionárius és homogén áramlásban, valamint lassan ülepedő szennyezőanyagra ad jó közelítést. A modell egyszerűsége ellenére képes figyelembe venni a felszínről és a planetáris határregről való visszaverődést és egyszerű kémiai reakciókat is. A gaussi modellek a lokális, néhány kilométertől néhány tíz kilométerig terjedő skálájú levegőminőségi vizsgálatokban alkalmazhatók (pl. Mészáros et al., 2012), használatuk az ipari létesítmények környezetvédelmi hatástanulmányainak is részévé vált. Ezek a modellek pontbeli meteorológiai adatokat használnak, melyek például a kibocsátás közelében található meteorológiai mérésekből adóttak. A pontszerű meteorológiai mérésekből különböző parametrizációk révén állíthatók elő a légkör vertikális szerkezetére és a stabilitási viszonyokra vonatkozó információk.

Euler-típusú modellek

Az euleri modellek a nyomgázok időbeli változását leíró transzport egyenlet numerikus megoldásán alapulnak (Mészáros et al., 2010). E modellek a szél által történő advekción, a turbulens diffúzió, valamint a kibocsátásból, kémiai reakciókból, radioaktív bomlásból és a száraz, illetve nedves ülepedésből származó forrás- és nyelő tagok alapján rácpontokban adják meg a koncentráció értékét (Lagzi et al., 2006; Mészáros et al., 2006). Az áramlási mező tér- és időbeli változásának, valamint a domborzatnak a figyelembe vétele miatt az euleri

modellek néhány tíz kilométerestől akár a szinoptikus, ezer kilométeres méretskáláig is használhatók. A számításokhoz szükséges meteorológiai mezőket numerikus modellek eredményei szolgáltatják.

Lagrange-típusú modellek

A nagyskálájú szennyezőanyag-terjedés modellezésére alkalmazott másik, ún. Lagrange-i modelles család egyes részecskéknek az időjárás előrejelző modellből rendelkezésre álló szélmezőben történő sodródását szimulálja, és egy adott helyről indított szennyezőanyag-csomag trajektóriáját rajzolja ki (Leelőssy et al., 2013; Mészáros et al., 2016). A részecske időegység alatti elmozdulását az áramlás iránya, a sűrűségkülönbségből származó felhajtóerő, vagy az ülepedés és a véletlen bolyongással modellezett turbulens diffúzió adja meg. A Lagrange-i modellek a kibocsátás közelében fellépő nagy gradienseket az euleri modelleknél nagyobb pontossággal adják vissza. További előnyük az egyszerűbb matematikai megoldás, hiszen a rendszer időbeli változását egy közönséges differenciál-egyenletrendszer írja le, melynek létezik egyértelmű megoldása megfelelő kezdeti feltételek mellett. Hátrányuk viszont, hogy csak egyetlen légelem útja követhető, továbbá a függőleges anyagáramlásokat csak nagyon pontatlanul tudják leírni. E hátrányok azonban kiküszöbölhetők, ha a vizsgált részecskék számát nagymértékben növeljük, ez viszont a számítási idő drasztikus növekedését eredményezi. Kellően nagyszámú részecske trajektóriájának kiszámítása esetén a kibocsátott szennyezőanyag-csomagok (ún. puffok) szuperpozíciójából a koncentrációmezőre lehet következtetni.

Szimulációk különböző skálákon

Szimulációk globális skálán

Globális skálán a 2011 márciusában, Japánban történt fukushimai reaktorbaleset során a légkörbe kerülő ¹³¹I izotóp terjedését szimuláltuk az ELTE Meteorológiai Tanszéken fejlesztett RAPTOR Lagrange-i részecskemoddellel a kibocsátás kezdete utáni 35 napos periódusra (Mészáros et al., 2016) GFS¹ meteorológiai háttérmezők alkalmazásával.

A modellszimuláció eredményeit a CTBTO² Nemzetközi Atomsorompó Egyezményt aláíró országok által működtetett IMS globális megfigyelőrendszer állomásainak adataival (az északi félgömbön 187 ilyen állomás üzemel) vetettük össze. Ez egyben a modell verifikációjára is lehetőséget adott. Az eredmények rávilágítottak az aktuális időjárási helyzet pontos ismeretének fontosságára is.

A szimulációk alapján a szennyezőanyag felhő a poláris jet által rendkívül gyorsan, 5 nap alatt elérte Észak-Amerikát, majd 12 napon belül Európa légterét is betértette, és 20 nap múlva a teljes északi hemiszférát megkerülve visszaért Japánba. A vizsgálati időszak végére mérhető aktivitás-koncentrációt tapasztaltak az északi félgömb teljes légterében, amit a modellel is sikerült kimutatni.

A nagy mennyiségű mérési adat hozzájárult a légszennyezés terjedésének globális léptékű azonosításához, valamint a terjedési modelleredmények és a bizonytalan emisszió scenáriók értékeléséhez. A modelleredmények értékelése rávilágított a turbulens folyamatok szabad légkörben történő minél pontosabb parametrizálásának szükségletére is.

¹ Global Forecasting System

² Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization

Szimulációk nagy mezo skálán

A Fukushimai Atomerőmű baleset után néhány hónappal, 2011. októberben és novemberben újra megemelkedett radioaktív jódizotóp koncentrációt detektáltak Európa több mérési pontján. A kibocsátási adatok és időpontok ismeretében feltételezhető volt, hogy az egyes állomásokon mért megnövekedett jódkoncentráció forrása a budapesti Izotóp Intézet Kft. telephelye volt. A detektált értékek rendkívül alacsonyak voltak, sok esetben éppen csak elérték a kimutatási határt, amit az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) és a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) is közleményekben szögezett le. Ennek ellenére a japán atomerőmű baleset után a közvélemény jóval érzékenyebben reagált a még ilyen csekély mértékben megnövekedett értékekre is, és mind a lakosság, mind a tudományos élet részéről jogos igényként merült fel a kibocsátó forrás pontos meghatározása, és a részletek tisztázása.

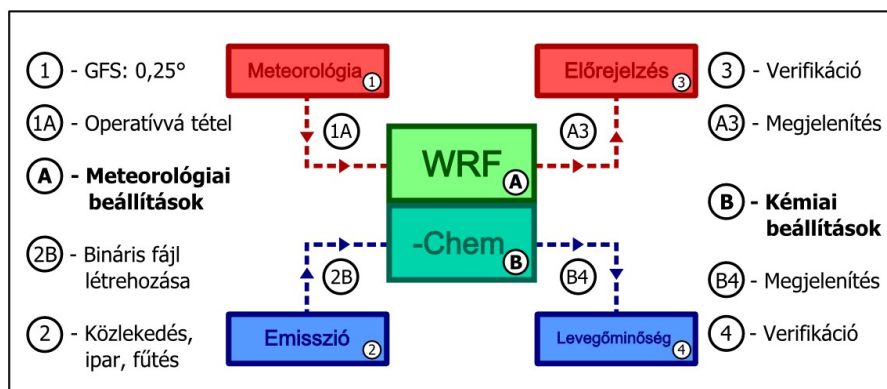
A jódizotóp terjedésének szimulálására különböző terjedésszimuláló modelleket használtunk. A 2011. évi, jódizotóp gyártása során bekövetkezett emisszió adatokat az Izotóp Intézet Kft. bocsátotta rendelkezésünkre. E kibocsátási adatokat felhasználva a megadott időpontokra szimuláltuk a jódizotóp léggöri terjedését a HYSPLIT, valamint a RAPTOR Lagrange-i szemléletű trajektória modellekkel és a WRF-Chem euleri modellel egy Közép-Európát lefedő tartományra.

A modelleredmények elemzése, mérési adatokkal való összevetése hozzájárult az egyes modellek közötti különbségek megértéséhez és a további fejlesztési irányvonalak kijelöléséhez.

Szimulációk városi skálán

A léggöri szennyezőanyagok terjedésének és térbeli eloszlásának városi környezetben történő modellezésére a WRF-ARW³ modellt és annak levegőkémiai kiegészítését⁴ adaptáltuk és kezdtük el alkalmazni. Az integrált modell-rendszerrel a légkörben lévő nyomgázok és aeroszolok emissziós, transzport, keveredési és kémiai átalakulási folyamatai szimulálhatók. Megfelelő verifikációval a WRF-Chem modell pontos emissziós adatok ismeretében képes operatív és valós idejű levegőminőség előrejelzések készítésére is. A modell által készített időjárás-előrejelzések a levegőkémiai folyamatok figyelembevételével pedig adott meteorológiai helyzetekben akár pontosabbá is válhatnak, mint azok nélkül.

A WRF-Chem modell adaptálása során a modellt alkalmazhatóvá tettük egy adott számítástechnikai környezetben, a rendelkezésre álló meteorológiai és emissziós mezők ismeretében a levegőkémiai szimulációk elvégzésére (1. ábra).

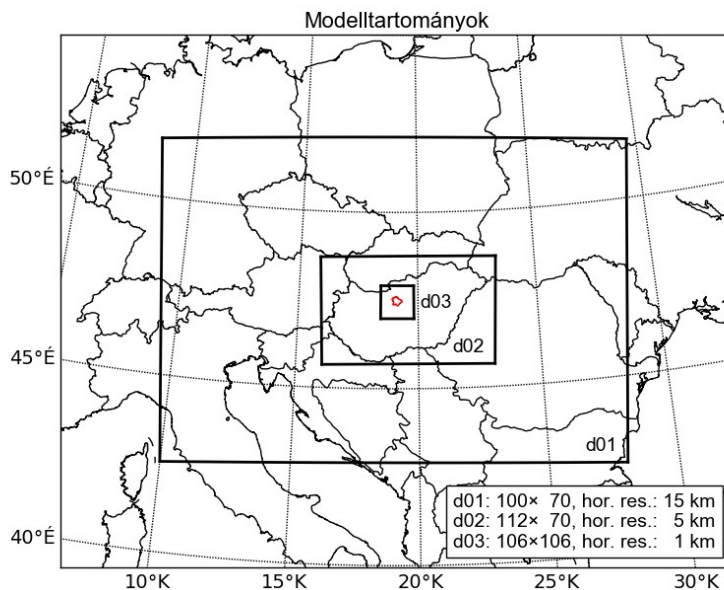


1. ábra: A WRF-Chem modell adaptálásának folyamatábrája.

³ The Weather Research & Forecasting Model - Advanced Research WRF, v3.6, 2014

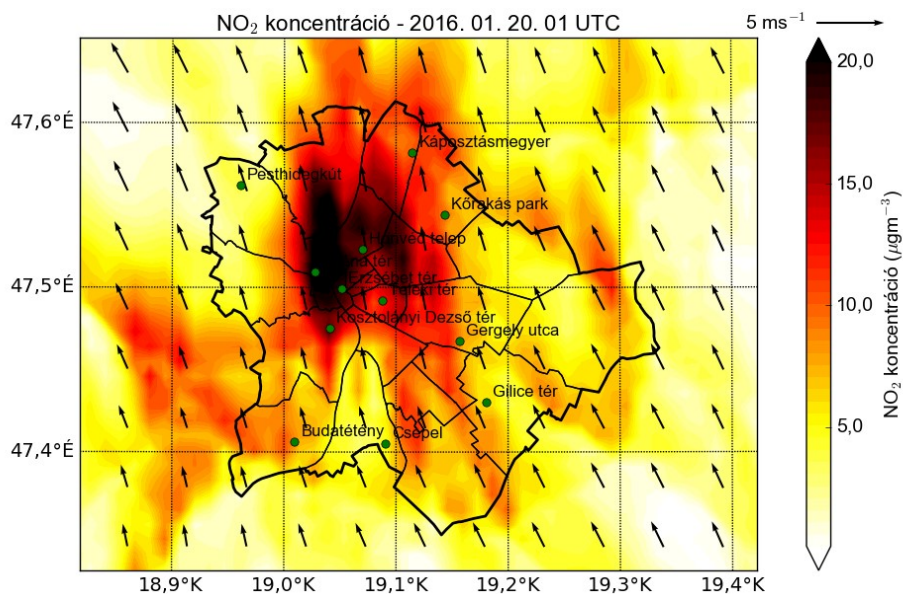
⁴ WRF-Chemistry, v3.6, 2014

A külső szimulációs tartományokat (Közép-Európa, Kárpát-medence) határfeltételként használva a Budapest térségét reprezentáló modell-beágyazásban (2. ábra) szimulálható a légszennyező anyagok térbeli eloszlása, illetve annak időbeli változása.



2. ábra: A WRF-Chem modell egymásba ágyazott szimulációs tartományai.

A modell alkalmazása során rendkívül nagy bizonytalanságot jelent az emisszió. Az emisszió minél pontosabb becslésére a modell rácsműködésére vonatkozó emisszió katasztereket állítunk elő a rendelkezésre álló adatok alapján. Ehhez közlekedési adatokat, éves emisszió értékeket, tipikus napi, heti meneteket veszünk figyelembe, és azt vizsgáljuk, hogy ezek megváltozása hogyan hat a kialakuló koncentráció mezőkre. Vizsgálatainkhoz nagy segítséget jelentenek az Országos Légszennyezettségi Mérés Hálózat budapesti immisziós adatai is, amivel a modell eredményeket tudjuk ellenőrizni. A 3. ábrán egy fiktív emissziós mező alkalmazásával kapott koncentráció mezőt mutatunk be a nitrogén-dioxidra vonatkozóan.



3. ábra: A WRF-Chem modellel számított nitrogén-dioxid koncentráció térbeli eloszlása fiktív emissziós mezőket felhasználva.

A különböző skálájú modellek fejlesztése, alkalmazása, az időjárási helyzet és a légekri diszperzió kapcsolatának feltárása, a modelleredmények értékelése nagy kihívást, de mindenképpen érdekes és izgalmas feladatot jelent. Ehhez a munkához továbbra is várjuk a hallgatók részvételét.

Köszönetnyilvánítás

A kutatásokat az OTKA K109109, K109361 és K116506 kutatási pályázatok támogatják.

Hivatkozások

- Lagzi, I., Mészáros, R., Ács, F., Tomlin, A.S., Haszpra, L. and Turányi, T., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model: Part I: model development. *Időjárás*, 110(3–4): 349–363.
- 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. 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
- 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(3–4): 365–377.
- Mészáros, R., Vincze, Cs., Lagzi, I., 2010: Simulation of accidental release using a coupled transport (TRES) and numerical weather prediction (ALADIN) model. *Időjárás*, 114: 101–120.
- Mészáros, R., Leelőssy, Á., Vincze, Cs., Szűcs, M., Kovács, T., Lagzi, I., 2012: 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., Leelőssy, Á., Kovács, T., Lagzi, I., 2016: Predictability of the dispersion of Fukushima-derived radionuclides and their homogenization in the atmosphere. *Scientific Reports*, 6: 19915.