

# CMAQ (TÖBBLÉPTÉKŰ KÖZÖSSÉGI LEVEGŐMINŐSÉGI) LÉGKÖRI TERJEDÉSI MODELL ADAPTÁLÁSA MAGYARORSZÁGRA

## CMAQ (COMMUNITY MULTI-SCALE AIR QUALITY) ATMOSPHERIC DISTRIBUTION MODEL ADAPTATION TO REGION OF HUNGARY

Lázár Dóra<sup>1</sup>, Bájhóber Eszter<sup>1</sup>, Weidinger Tamás<sup>1</sup>, Ferenczi Zita<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, ldora1989@gmail.com, bajhobereszti@gmail.com, weidi@caesar.elte.hu <sup>2</sup>Országos Meteorológiai Szolgálat, 1675 Budapest, Pf. 39., ferenczi.z@met.hu

**Összefoglalás.** Napjainkban fontossá vált a légköri szennyezőanyagok – az egészségre káros összetevők, mint például a szálló por, a különböző mérettartományú aeroszol részecskék, a nitrogénvegyületek, vagy az ózon – koncentrációjának mérése és előrejelzése. Az ELTE Meteorológiai Tanszéken több éve működik a WRF modell, amely alkalmas időjárás előrejelzési feladatokra, illetve bemenő adatokat szolgáltat különböző környezeti modellekhez (pl. DNDC). A CMAQ (Többléptékű Közösségi Levegőminőségű Modell – Community Multiscale Air Quality) regionális terjedési modell adaptálásával egy csatolt meteorológiai-levegőkörnyezeti modell kialakítást terveztünk. Ehhez alkalmazni kell különböző emissziós adatbázisokat, illetve a szennyezőanyag kezdeti eloszlását leíró háttérmodellt is. A CMAQ modellrendszer – operatív és kutatási céllal – többek között már Horvátországban és Bulgáriában is fut.

**Abstract.** Today, it became important to measure and predict concentration of the harmful atmospheric pollutants, such as dust aerosol particles of different size ranges, nitrogen compounds, and ozone. Department of Meteorological, Eötvös Loránd University has been applying the WRF model several years ago, which is suitable for weather forecasting tasks and provides input data for various environmental models (e.g. DNDC). By adapting the CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) model we have designed a combined ambient air-meteorological model. In this research it is important to apply different emission databases and the background model describing the initial distribution of the pollutant. The CMAQ model system for operational and research purposes has been established in several countries (e.g. Croatia or Bulgaria).

**Bevezetés.** Manapság a terjedési modellek jelentősége egyre inkább növekszik, ugyanis a városi levegő szennyezettségének mértéke nemcsak természetvédelmi, de egészségügyi szempontból is fontos. Az egyes városokban kialakuló szmog például nemcsak a látási viszonyokat rontja, de az egészségre is káros. Ennek következtében a légszennyező anyagok koncentráció mérlegének mérése mellett annak előrejelzése is egyre inkább előtérbe kerül. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál kifejlesztett operatíván működő levegőkörnyezeti rendszer Európában egyedülállónak tekinthető, mivel Budapest egész területére 1 órás felbontással 2 napra előrejelzi a főbb légszennyező anyagok koncentrációjának jövőbeli alakulását. Az 1. ábrán – példaként – az Országos Meteorológiai Szolgálat Budapestre való ózonkoncentráció előrejelzését láthatjuk  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -ben.

A levegőszennyezés modellezése egy numerikus eszköz arra, hogy leírjuk az ok-okozati összefüggéseket az emisszió, a meteorológia, a légköri koncentrációk, az ülepedés és más tényezők között. A levegőminőségi mérések fontos információt adnak a környezeti koncentrációról és az ülepedési folyamatokról, leírják a levegőminőséget adott helyen és időben, illetve útmutatást adnak a levegőminőségi problémák okaihoz. A levegőminőségi modellek olyan eszközök, amelyek számszerűsítik a kapcsolatot a kibocsátás és a koncentráció között. Az első ilyen számítási modell a Gauss-modell volt (Daly and Zanetti, 2007), melyet az 1960-as évektől használják hazánkban a légszennyezés kutatására (Szepesi, 1967). Az 1970-es években megállapították, hogy a túlzott  $\text{SO}_2$  és  $\text{NO}_x$  kibocsátás a környezet savasodását okozhatja a forrástól távolabbi területeken is, valamint az urbanizálódott és iparosodott területeken további problémát jelent a felszín közeli ózon koncentrációjának megnövekedése (Daly and Zanetti, 2007). Később az Euler-féle és a Lag-

range-féle modellek kerültek előtérbe, majd az 1980-as években megjelentek az immisziós adatokat felhasználó városi közlekedési és települési terjedési modellek (Radnainé Gyöngyös, 2004). E terjedési modellek osztályozása is sokféleképpen történhet (Bozó et al., 2006, Daly and Zanetti, 2007). Beszélhetünk tér- és időbeli osztályozásról, de a számítási módszerben is van különbség.

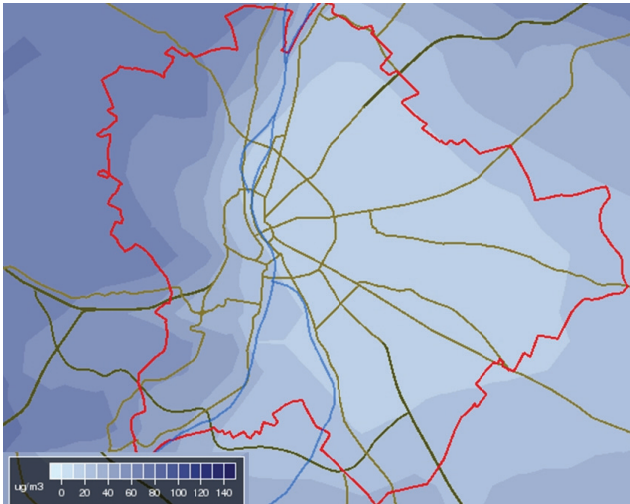
Az időjárás-előrejelző modellek és a légköri kémiai transzport modellek összekapcsolásával úgynevezett kémiai időjárás-előrejelző modelleket kapunk (Baklanov et al., 2010). A légkör kémiai összetételének rövid idejű változékonysága (kevesebb, mint 2 hét) szabja meg a kémiai időjárást. Magyarországon légszennyező anyagok hosszú- és középtávú terjedésének modellezését az 1990-es évektől a FLEXPART modellel végzik. Figyelembe veszi az advekciót, a diffúziót, a száraz és nedves ülepedést, a radioaktív bomlást, viszont a kémiai átalakulásokat nem tartalmazza. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál a modellt operatív célokra használják, és forward módban futtatják, vagyis a szennyezőanyagot szállítás útján kapjuk meg. A modellt használhatják ipari (pl. nukleáris) balesetek, vagy vulkánkitörések esetén, a levegőbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének és eloszlásának az előrejelzésére is (Bájhóber, 2014).

A továbbiakban bemutatjuk a CMAQ légköri terjedési modellrendszer főbb elemeit, majd egy, az Egyesült Államokra vonatkozó, konkrét eset alapján megismertetjük a modell tulajdonságait és főbb paramétereit. Végezetül láthatjuk a Magyarországra való adaptálás főbb lépéseit és az emissziós adatbázist.

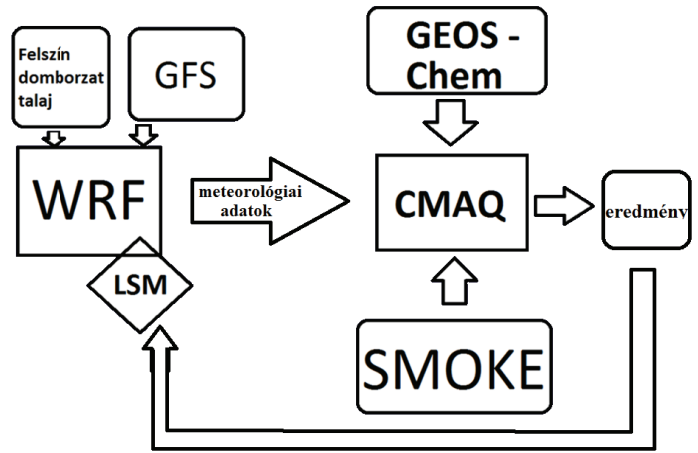
**Légköri terjedési modellrendszer.** Ahhoz, hogy az adott szennyezőanyag mennyiségét és annak mozgását előrejelezzük, szükségünk van különböző ismeretekre. Ilyen például az adott anyag természetes és mesterséges,

emberi kibocsátásának mennyiségi ismerete, vagy például az adott időpontban a léghőmérséklet alakulása és a léghőmérsékletben lejátszódó kémiai reakciók ismerete. Ezek viszont nem egyszeri folyamatok, hanem folyamatosan változnak, így a pillanatnyi állapot figyelembevétele helyett e folyamatokat is előre kell jelezni. Tehát nem egy, hanem három modell kialakítása is szükséges. Az emissziós

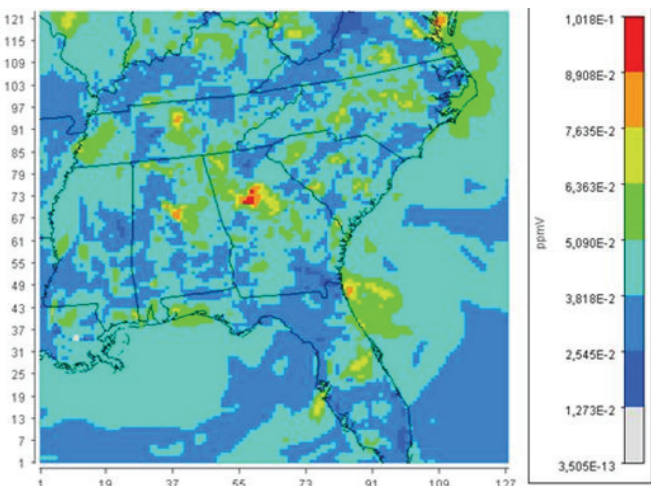
adatait ez a modell rendezi olyan formátumba, melyet könnyedén be tudunk olvasni. Erre azért is van szükség, mert az emissziós adatbázisok más-más formátumban és eltérő felbontásban vannak. A SMOKE az adott emissziós adatokat a CMAQ számára különböző kémiai mechanizmusokkal át tudja rendezni, és a különböző anyagokat tudja származtatni.



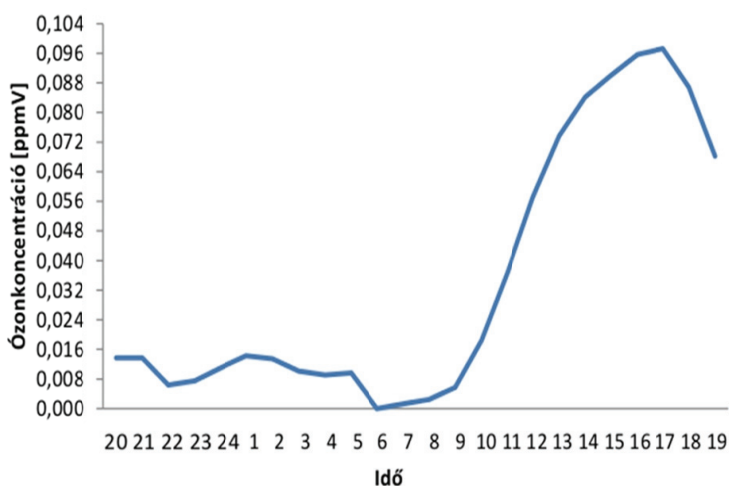
1. ábra: Ózonkoncentráció előrejelzés Budapestre 2014.10.30. 13 UTC-re (10.30. 00 UTC futtatás alapján; <http://www.met.hu/omsz/>)



2. ábra: WRF-SMOKE-CMAQ modellrendszer felépítési rajza



3. ábra: Ózonkoncentráció előrejelzés ppmV/négyzetrácsra normálva Florida térségére 2006. augusztus 8. 23 UTC-re



4. ábra: Ózonkoncentráció időbeli alakulása Atlanta városában 2006. augusztus 8-án

szíós adatok előrejelzéséhez a SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions = *Emissziós Kataszter Számító Modell*) modellt használjuk, míg az időjárási paramétereket a WRF (Weather Research and Forecasting = *Időjárás-kutató és Előrejelző*) modell biztosítja. A CMAQ modell ezeket az adatokat használja fel a légkörkémiai reakciók futtatásához, így egy adott anyag előrejelzéséhez. Először az emissziós modell kerül bemutatásra, majd rátérünk az időjárási modell után a kémiai transzport modell ismertetésére.

**Emissziós (SMOKE) modell.** A SMOKE modell egy, az Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség által kifejlesztett modell, ami nagy felbontású emissziós adatokat szolgáltat a kémiai transzport modelleknek. Ezért ez az egyik legelterjedtebb ilyen modell a világon. Esetünkben is főként azért használjuk, mert a CMAQ modell emissziós

A modell egyik nagy előnye, hogy nyílt forráskódú, így ingyenesen hozzáférhető és alakítható. Ez a WRF-hez hasonlóan egy regionális modell, tehát nem a Föld teljes területére számol, hanem meg lehet határozni egy adott kivágatot, jelentősen csökkentve a számolási időt. A modell nemcsak emissziós adatbázisok kiépítéséhez használható, hanem különböző emissziós vizsgálatokra is. Számos ország – például Horvátország és Bulgária – végzett különböző szennyezőanyagok emissziójával kapcsolatban vizsgálatokat, így ismerve meg a modell tulajdonságait.

A SMOKE modell az emissziós adatbázist kétfajta megközelítés felhasználásának segítségével állítja elő. Az antropogén forrásokból származó kibocsátást az ún. „top-down”, míg a természetes forrásokból eredő emissziót a „bottom-up” módszerrel határozza meg. A „top-down”

eljárás akkor alkalmazható, ha nem rendelkezünk létesítményekre (pl. erőmű) lebontott pontos kibocsátási adatokkal. Ilyenkor a nemzeti statisztikai adatokból lehet kiindulni, és ezeket az információkat oszthatjuk szét a létesítmények között egyéb információk (pl. erőmű mérete, típusa) felhasználásával egy adott szektor (pl. energetika) rácsponthoz emissziójának a meghatározásához. A „bottom-up” megközelítés akkor alkalmazható, ha létesítményekre lebontva rendelkezünk pontos kibocsátási adatokkal. Ebben az esetben megfelelő emissziós faktorok használatával lehet szennyezőanyag és szektor specifikus emissziós adatbázist előállítani.

Természetesen az emissziós adatok előállításához a modellnek szüksége van különböző meteorológiai paraméterekre is. Ilyen a nedvesség, a hőmérséklet, vagy a szél, ugyanis például egy anyag nedves ülepedésének kiszámításához esetlegesen szükséges tudni a légkörben lévő nedvesség mennyiségét. Ezeket a paramétereket a WRF modellből származtatjuk. A következőkben áttérünk az időjárási paramétereket szolgáltató modell ismertetésére.

#### **Időjárási (WRF) modell.**

Mint ahogy a fenti alfejezetben említettük, mind a CMAQ, mind a SMOKE modellnek szüksége van bizonyos meteorológiai háttér ismeretre. E paraméterek kiszámításához a szintén nyílt forráskódú WRF (Weather Research and Forecasting) numerikus időjárás-előrejelző modellt használjuk, mely már több éve sikeresen fut operatíván az Országos Meteorológiai Szolgálatnál.

Ezt a modellt az NCAR (National Center for Atmospheric Research – Nemzeti Léggörkutató Központ) és az NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – Amerikai Nemzeti Óceáni- és Meteorológiai Szolgálat), valamint több kutatóegyetem és -intézet fejleszti. Szerke a világon használják kutatási és oktatási célra egyaránt. Az ELTE Meteorológiai Tanszékén is használják oktatási céllal különböző kurzusokon. Számos tudományos diákköri dolgozat is született e témában.

A modell két dinamikai felülettel rendelkezik, amiből mi az ARW (Advanced Research WRF) modellt választottuk. A másik a NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model), ami a nevéből is adódóan egy nemhidrosztatikus mezoskálájú modell. Az elsőt az NCAR, az utóbbit pedig a NOAA fejleszette. Az ARW-nek 4 fő programegysége van: a WPS, ami a WRF előfeldolgozó rendszere; a WRF 3D VAR egy háromdimenziós variációs adatasszimilációt tesz lehetővé; az ARW megoldó szegmense; és a ne-

gyedik, az utófeldolgozó és grafikus megjelenítésért felelős programegysége (Wendl, 2009). A WRF előfeldolgozó rendszer definiálja a felhasználó által megadott horizontális modelltartományt (Nagy, 2010), amelyre interpolálja a felszíni adatokat (talajtípus, földhasználat típusa), illetve a más modellekből nyert meteorológiai adatokat, amelyeket a program interpolál horizontálisan a megadott területre, majd a folyamat során előállítja a kezdeti feltételeket (inputokat) a WRF modell számára. Ezután ezek az input adatok kerülnek be a WRF-ARW modellbe, ahol elvégzi az adatok vertikális interpolációját, majd elkészíti az előrejelzést.

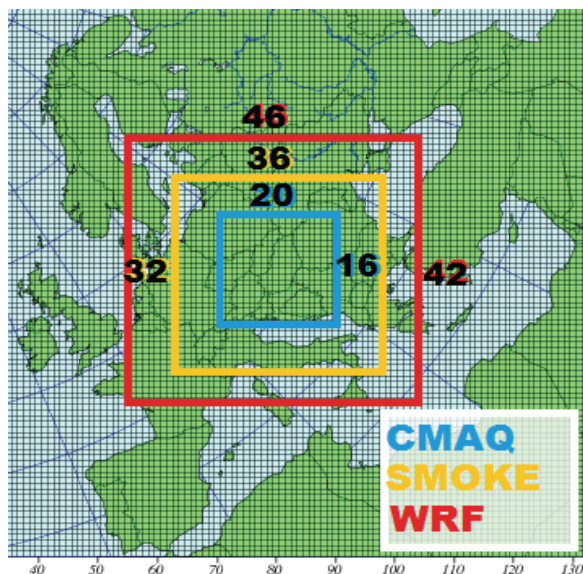
**Terjedési (CMAQ) modell.** Az almodell bemutatása után térünk rá a modell bemutatására, a Community Multiscale Air Quality – Többléptékű Közösségi Levegőminőségű Modellre! A CMAQ modellt az amerikai EPA Atmoszféra Kutató Modellező osztálya fejlesztette ki.

Ez egy harmadik generációs, dinamikusan fejlődő, sokoldalú, szabadon hozzáférhető és fejleszthető modell. Szimulációkat készíthetünk vele az egész troposzférára a szálló porról (PM), az ózonnól, a levegőben lévő mérgező szennyezőanyagokról, a látótávolságról, a savas kimosódásról. Könnyen alkalmazható

kutatási, szabályozási és előrejelzési célokra is. A 3D-s Euler-típusú modell az egyes cellákban kiszámolja az anyagmérleget, majd ezt az információt „továbbadja” a szomszédos ráscelláknak. Képes különféle levegőminőségi szempontokat egyidejűleg kiszámolni eltérő térbeli skálákon (a kisebb területek modellezésétől akár az egész hemiszféra modellezéséig is kiterjedhet). Ezenkívül a látástávolság, a savas összetevők, valamint a kimosódással talajba kerülő egyéb anyagok ülepedésének becslésére is alkalmas, így kapcsolatot teremt a légkör, az emissziós források és a kémiai átalakulási folyamatok között.

A modell rendszerét 5 fő program egység (processzor) alkotja, amelyek a következők:

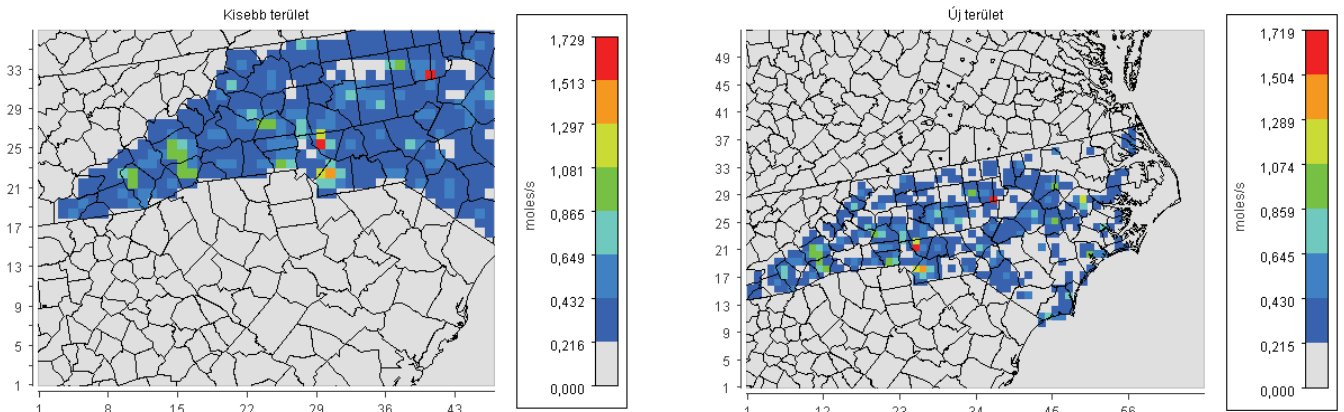
- (1) kezdeti feltételek meghatározása (ICON – The Initial Conditions Processor),
- (2) peremfeltételek meghatározása (BCON – The Boundary Conditions Processor),
- (3) tiszta égboltú fotolízis mértékének meghatározása (JPROC – The clear-sky photolysis rate calculator),
- (4) meteorológiai-kémiai határfelület programegység (MCIP – The Meteorology- Chemistry Interface Processor),
- (5) CMAQ kémiai transzport modell (CCTM – The CMAQ Chemistry-Transport Model).



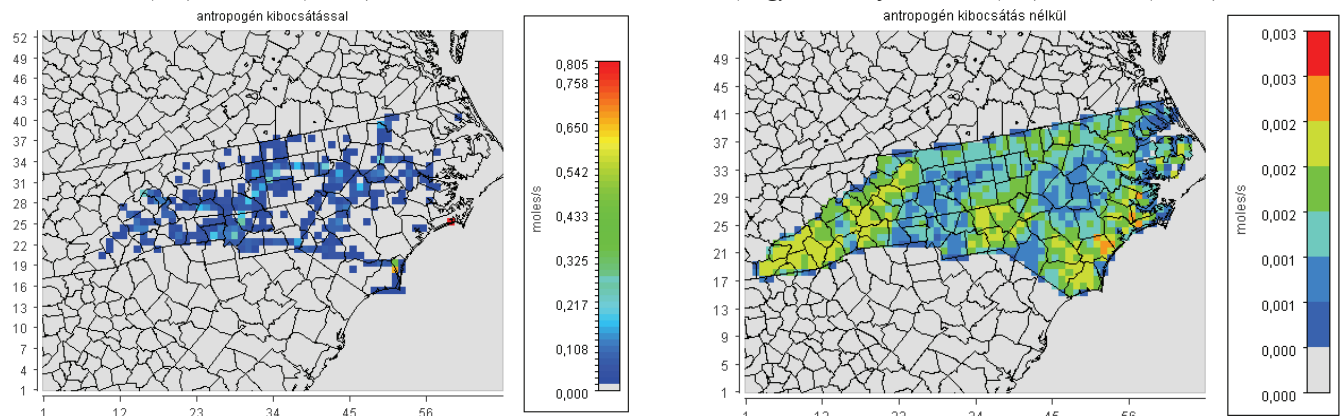
5. ábra: Az általunk definiált rácshálózatok egy hivatalos EMEP által készített térkép hálózaton

Az MCIP a meteorológiai adatokat dolgozza fel, míg az ICON és a BCON a kezdeti és peremértékek meghatározásáért felel, a JPROC pedig a tiszta égbolt esetén történő fotolízis mértékét számítja ki. Utoljára a CCTM fut le, ami előállítja többek között a szennyezőanyag koncent-

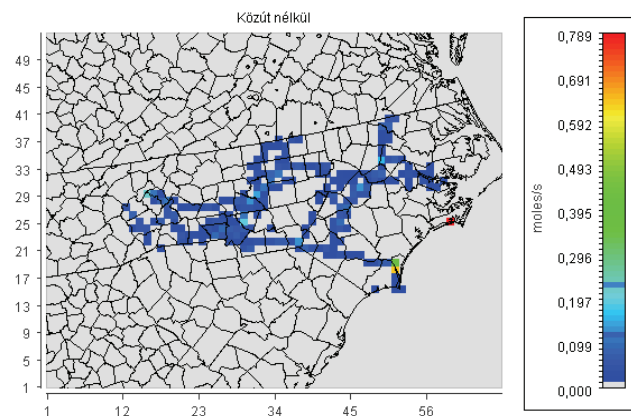
li interpolációja és a légköri szennyezők visszacsatolásának hiánya. Ezek kiküszöbölésére fejlesztették ki a kétirányú rendszereket. A kétirányú csatolt rendszer előnye például, hogy így a kémiai folyamatok modellezésével nemcsak a szennyezőanyag terjedési és mennyiségi elő-



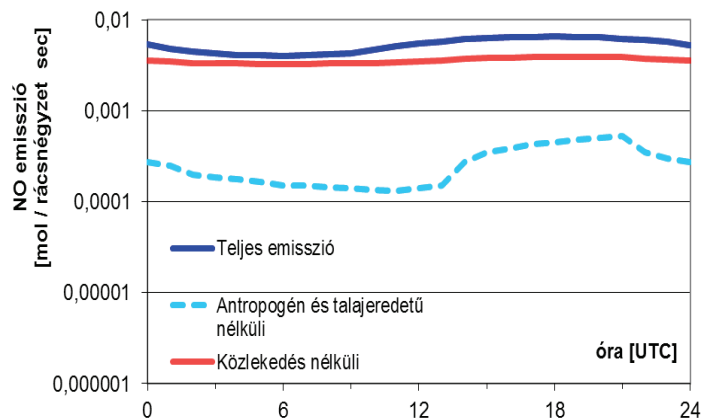
6. ábra: Terület definiálási vizsgálatok bal oldalon kisebb területre, jobb oldalon egy eltolt területre 2005. 07. 10. 20 UTC-re  
bal: Min (1,1)=0; Max (29,25)= 1,633 CO kibocsátás, mol/sec(négyzetrács, jobb: Min (1,1)=0; Max (25,21)= 1,617



7. ábra: Az eredeti, teljes NO emisszió, antropogén kibocsátás és közlekedés nélküli kibocsátási értékek 2005.07.10. 17 UTC-re  
bal: Min (1,1)=0; Max (59,25)= 0,805 NO kibocsátás, mol/sec(négyzetrács, jobb: Min (1,1)=0; Max (57,25)= 0,003



7. ábra: Eredeti, teljes NO emisszió kibocsátás, az antropogén kibocsátás és közlekedés nélküli kibocsátási értékek 2005.07.10. 17 UTC-re



8. ábra: NO koncentráció időbeli alakulása különböző kibocsátáskor 2005. július 10.-én

rációjának becslött értékét, a nedves és a száraz ülepedés mértékét, és a láthatósági viszonyokat.

**A három modell összekapcsolása.** Végezetül ezen három modell kapcsolatát összegezzük, amit a 2. ábra szemléltet. Láthatjuk, hogy itt nemcsak egy egyirányú csatolt rendszer lehetséges, hanem két irányú csatolás is megvalósítható. Az egyirányú csatolt rendszerekre jellemző a mentett meteorológiai input adatok túlzott időbe-

rejelzését valósítja meg, hanem megfigyelhetjük ezen anyagok időjárásban való szerepét és jelentőségét is. Például: mennyire változik meg egy konvekciós helyzet előrejelzése, ha az időjárási modellbe nem a származtatott mennyiségeket, hanem a terjedés-emissziós modell eredményeit (aeroszol koncentráció) építjük be. De például úgy is be tudjuk állítani a WRF és a CMAQ modellt, hogy egyensúly legyen a szimuláció pontossága és a rendszer számítási ideje között, valamint a kétirányú

csatolt rendszernek köszönhetően tanulmányozhatjuk a gázok és aeroszolok visszacsatolásait a meteorológiai folyamatokra, a rövidhullámú sugárzáson keresztül. A kétirányú modellek sugárzási visszacsatolásainak köszönhetően észrevehetően csökken az eltérés a szimuláció során a felszíni rövidhullámú sugárzás és a 2 m-es felszíni hőmérséklet kapcsolata között, és szintén javul az ózon és PM2.5 viszonylagos és mért mennyisége közötti kapcsolatot a tesztek alapján.

**Modellrendszer megismerése egy konkrét eseten keresztül.** A következő fejezetben a modell megismeréséhez szükséges test futtatás eredményeit szemléltetjük. Az ELTE Atlasz számítógépén reprodukáltuk az Egyesült Államokra vonatkozó futtatásokat. A tesztfuttatás 2006. augusztus 8-i adatokkal számol a floridai kivágratra. Megnéztük a szén-monoxid (CO), nitrogén-dioxid (NO<sub>2</sub>) és az ózon (O<sub>3</sub>) adatok alakulását (3. ábra). A térképekből jól láthatóan kirajzolódik egy nagyobb kibocsájtási forrás, amelyről a koordináta adatokból kiderült, hogy Atlanta városát jelenti. A városra vonatkozó ózon előrejelzést a 4. ábra szemlélteti. Jól megfigyelhető, hogy az ózonkoncentráció jelentősen növekszik a délután folyamán, és 16–17 óra között csúcsosodik ki.

**Emissziós adatbázis.** Ahhoz, hogy a fenti egyesített modellt Magyarország és a Kárpát-medence területére alkalmazzassuk, saját emissziós adatbázist kell kiépítenünk. Ehhez az EMEP (Európai Megfigyelési és Értékelési Program) adatbázisát használjuk. Az EMEP egy európai szervezet, melynek célja az európai levegőszennyezettség vizsgálata. A szervezet több, feladat specifikus központtal működik. A központok egyikének (CEIP-Centre on Emission Inventories and Projections) feladata a nemzeti emisszió bevallások begyűjtése, majd ezen információk alapján rácsponti emissziós adatbázis kidolgozása Európára. Jelenleg elérhető rácsponti adatbázis a központ honlapjáról ([www.ceip.at](http://www.ceip.at)) ingyenesen letölthető és 50 x 50 km térbeli felbontású. Komoly fejlesztő munka és nemzetközi összefogás eredményeként néhány éven belül várható az adatbázis térbeli felbontásának jelentős javulása (kb. 10x10km).

A következő ábrán egy térképmetszetet láthatunk, melyben feltüntettük a futtatáshoz szükséges rácshálózat nagyságát. Az adatok különböző felbontáson is elérhetőek egészen 2012-ig, mi az 50 x 50 km-es rácshálózat választottuk. Az 5. ábrán megfigyelhető, hogy a WRF modellnek egy 46 x 42-es, a SMOKE modellnek egy 36 x 32-es és a CMAQ modellnek egy 20 x 16-os rácshálózatot definiáltunk, melyben a magyarországi terület mellett a Kárpát-medence teljes területét próbáltuk elhelyezni, remélve, hogy így a Magyarországot befolyásoló külföldi emissziókat is belefoglaljuk.

Az adatok rendszerezéséhez tudni kell a SMOKE modellben használt mennyiségek dimenzióit, a modellben definiált egyéb értékeket és a rendszer viselkedését a

bemenő adatok megváltoztatásakor. Vizsgálatunk során megnéztük az amerikai teszt-adatsorban a terület definiálásának módját (6. ábra) és hogy a különböző anyagok különböző forrásainak kivonása hogyan befolyásolja az adatok területi és időbeli alakulásait. A terület definiálásakor meghatároztunk egy kisebb és egy eltolt területet. Az anyagvizsgálatkor a NO antropogén forrásokkal és antropogén források nélkül, majd a közlekedésből származó forrásokkal végeztünk vizsgálatot. A 7. ábrán láthatóak e terület kibocsájtási adatai, melyekből megfigyelhető, hogy a mol/sec/négyzetrácsra számolt kibocsájtási értékek az antropogén NO kibocsájtás nélkül lényegesen csökkentek az egész területen. Ha a közlekedést nézzük, megfigyelhető, hogy a skála értéke csökkent, és egy rácsponton a kibocsájtás csökkent, vagy ezen definiált skálán 0 körüli. Ha ezt az egész területre átlagolt értéket egy időskálán (8. ábra) nézzük, láthatjuk, hogy a közlekedés nélküli értékek a teljes emisszió és az antropogén források között, az előbbihez közelebb helyezkednek el.

**Összefoglalás.** Láthattuk, hogy a légköri terjedési modell rendszerek számos új lehetőséget nyújtanak számunkra az előrejelzések terén; a szennyezettégek kimutatásával nem csupán egészségügyi szempontból nyerünk fontos adalékokat, de általuk a légkörben zajló folyamatokat is jobban megismerhetjük. Jövőbeli kutatásaink szerves részét képezi a Magyarországra vonatkozó emissziós adatbázis elkészítése, melynek segítségével a modellek egyesítéséből származó tudásanyagot alkalmazni és kamatoztatni tudjuk.

## Irodalom

- Baklanov, A., 2010: Chemical weather forecasting: a new concept of integrated modeling, *Advances in Science and Research* 4, 23–26.
- Baklanov, A., Mahura, A. and Sokhi, R., 2010: Integrated systems of meso-meteorological and chemical transport models, Springer, 190 p., ISBN 978-3-642-13979-6, 9-10.
- Bozó, L., Mészáros, E. és Molnár, Á., 2006: Levegőkörnyezet modellezés és megfigyelés, Akadémia Kiadó, 75., 81., 84-85., 91. 92., 127.
- Daly, A. and Zannetti, P., 2007: Air Pollution Modeling – An Overview. Chapter 2 of ambient air pollution, The Arab School for Science and Technology (ASST) and The EnviroComp Institute, 15–28.
- Nagy, A., 2010: A WRF-modell alkalmazása mezo-gamma skálájú folyamatok modellezésére, MSc diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (témavezetők: Horváth Ákos, Ács Ferenc), 10–11.
- Radnainé Gyöngyös, Zs., 2004: Levegőtisztaság-védelem, Pécsi Tudományegyetem, 79–81.
- Szepesi, D., 1967: Légszennyező anyagok turbulens diffúziójának meteorológiai feltételei Magyarországon, Országos Meteorológiai Intézet Hivatalos Kiadványai XXXII. kötet, 8.
- Wendl, B., 2009: A WRF modell működése az ELTE Meteorológiai Tanszék számítógépes rendszerében. Szélprofil becslések. Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (témavezető: Gyöngyösi András Zénó), 11–13.