

LÉGSZENNYEZETTSÉG-ELŐREJELZÉSI LEHETŐSÉGEK

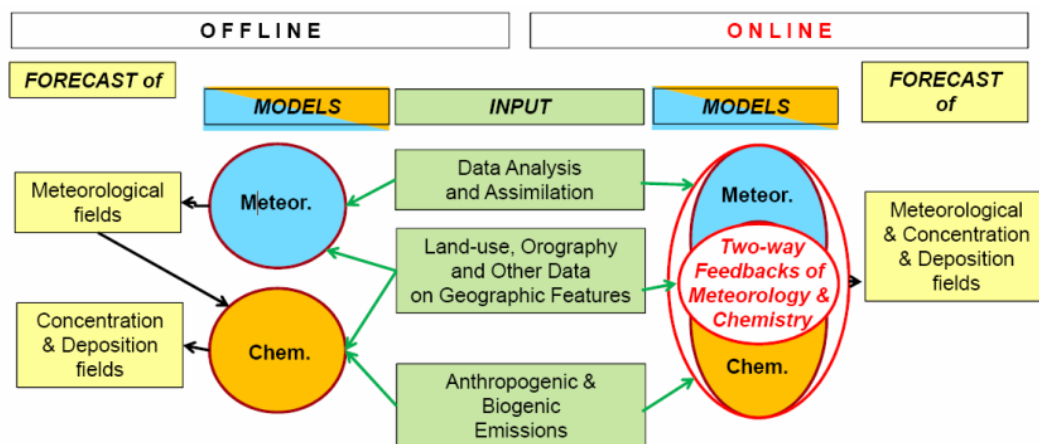
Ferenczi Zita

Országos Meteorológiai Szolgálat, 1181 Budapest, Gilice tér 39.
e-mail: ferenczi.z@met.hu

Bevezetés

Az elmúlt években bebizonyosodott, hogy a légszennyezés káros hatással van az emberi egészségre és a környezetre egyaránt. A városokban élők, akik leginkább kitéttek a légszennyezés kedvezőtlen hatásainak, egyre inkább igénylik azokat a tájékoztató rendszereket, amelyek a légszennyezettség mértékéről informálják a lakosságot, és amelyek esetleg a levegőminőségére vonatkozó előrejelzéseket is tartalmaznak. Alapvetően statisztikai módszerekkel valamint numerikus modellekkel lehet a légszennyezettséget előrejelezni. A statisztikai módszerek közül a többváltozós statisztikai analízis tekinthető klasszikusnak, de a mesterséges neuron hálózatok is egyre népszerűbbé válnak (Caselli et al., 2009). A statisztikai módszereken alapuló légszennyezettségi előrejelző eljárások nem veszik figyelembe a légkörben lejátszó fizikai és kémiai folyamatokat, változásokat, ezért leginkább ultra rövid távon képesek a szennyezőanyagok koncentrációját előrejelezni.

A fizikai és kémiai törvényszerűségekre matematikai leírásán alapuló levegőminőségre vonatkozó előrejelzések (Kukkonen et al., 2012) olyan modellrendszerekkel készíthetők, amelyek két lényeges információt, az időjárás és az emisszió alapján számolják a jövőre vonatkozó légköri koncentrációkat. A levegőszennyezettség-előrejelző modelleket alapvetően két csoportba sorolhatjuk (Baklanov et al., 2014): az off-line és az on-line módon működő rendszerek (1. ábra).



1. ábra: Az off-line és az on-line levegőminőség előrejelző modellek működésének sematikus ábrája

Az off-line modellrendszerek tartalmaznak egy numerikus előrejelző és egy kémiai transzport modellt, amelyek esetében csak az időjárás hatása van figyelembe véve a levegőminőségre. Ezeknél a rendszereknél először az időjárás előrejelzés készül el, majd az előrejelzett meteorológiai paraméterek felhasználásával történik a levegőminőség előrejelző modell futtatása. Az on-line modellrendszerek esetében azonban van visszacsatolás, a kémiai transzport modell által számolt szennyezőanyagok hatása az időjárás

előrejelzésében figyelembe van véve. A visszacsatolás módja alapján megkülönböztetünk integrált és access on-line modelleket. Az integrált modellek esetében egyetlen modellben, időben párhuzamosan kerülnek meghatározásra a meteorológiai paraméterek értékei és a szennyezőanyagok koncentrációja. Tehát az időjárás folyamatosan hatással van a légszennyezőanyagok koncentrációjára, de a légköri nyomgázok és aeroszolok időjárás módosító szerepe (pl. aeroszol részecskék hatása a felhőképződésre) is folyamatosan figyelembe van véve a számítások során. Az access modellek esetében az off-line modellekhez hasonlóan két modell, egy numerikus előrejelző és egy kémiai transzport modell végzi a számításokat, de a két modell között folyamatos a paraméterek cseréje, tehát ebben az esetben is a hatások visszacsatolása mindkét irányban figyelembe van véve.

Napjainkban Európában elsősorban az off-line típusú modellek terjedtek el, amely elsősorban az on-line modellek bonyolultságával és jelentős számítási igényével magyarázható. Rövid időn belül azonban várható, hogy a numerikus előrejelző és a kémiai transzport modellek egybeolvadnak (on-line modellek) és a mindennapi időjárás és levegőminőség előrejelzések egyazon modellel fognak elkészülni.

Kémiai transzport modellek felépítése és a figyelembe vett fizikai folyamatok rövid leírása

A kémiai transzport modellek a légszennyezőanyagok térbeli és időbeli eloszlását határozzák meg oly módon, hogy bonyolult egyenletekkel írják le a légkörben lejárló fizikai és kémiai folyamatokat, majd ezeket a differenciál egyenleteket numerikus sémák alkalmazásával oldják meg. A számítások során figyelembe vett legfontosabb folyamatok az advekción, a turbulens diffúzió, a légkörben lejárló kémiai átalakulások, az aeroszolok összetett hatásai, az ülepedések (száraz és nedves) valamint az antropogén és természetes eredetű emissziók időbeli és térbeli változékonysága.

A légköri szennyezőanyagok terjedése magában foglalja mind az advekción mind pedig a diffúzió hatását. Az advekción során a szennyezőanyag az átlagos szélmezővel szállítódik, míg a diffúzió a szennyezőanyag turbulens elkeveredését jelenti a környező levegővel. Definición szerint, míg a szennyezőanyagok advekción nem okoz koncentráció változást egy adott térfogat elemében, addig a diffúzió a szennyezőanyagok hígulását eredményezi, amelynek következménye a koncentráció csökkenése. A modellekben jellemzően a horizontális irányú advekción a meghatározó és gyakori az a feltételezés, hogy vertikális irányban számítási terület felső határa zárt. Annak érdekében, hogy a sztratoszférának a troposzférára gyakorolt hatását is figyelembe lehessen venni a számítási térfogat felső határán megfelelő határfeltételeket kell definiálni. Gyakorlatban azonban a sztratoszféra hatása a modellekben még nem megfelelően van kezelve.

Jelentős vertikális irányú mozgások elsősorban komplex domborzat esetén, valamint cumulus felhők esetében figyelhető meg, így a modellek is elsősorban ezekben az esetekben számolnak a vertikális advekción hatásával.

A kémiai transzport modellekben számos közelítés létezik a turbulens diffúzió leírására. Mivel a turbulens diffúzió véletlen folyamat, ezért a modellekben a parametrizációja közelítéseken alapszik, hatása pedig jelentős a modell számítási eredményekre.

A szélmező és a turbulens folyamatokat jellemző paramétereknek az előrejelzése a numerikus előrejelző modellekkel jelentős bizonytalansággal terhelték. Ezek a bizonytalanságok továbbbővídnének a kémiai transzport modellekbe és hozzáadódna a terjedésszámítások bizonytalanságaihoz.

Korlátos tartományú kémiai transzport modell futtatásánál megfelelő kezdeti és kémiai határfeltételekre is szükség van. A kémiai határfeltételek megadásánál legáltalánosabb gyakorlat a klíma átlagok használata, de egyre inkább kezd elterjedni a globális kémiai

transzport modellek által biztosított határfeltételek használata. Kezdeti feltételek megadása a kémiai transzport modellek esetében operatív módon még nem oldható meg, mivel a légszennyezőanyagokra vonatkozó mérési adatok valós időben csak korlátozott mértékben hozzáférhetők. Jelenleg ezen a területen a kezdeti feltételek minél pontosabb előállítására az adatasszimilációs technika segítségével jelenti az egyik legkomolyabb kihívást.

Manapság Európában a leglényegesebb levegőminőségi kérdés a PM_{10} ($PM_{2.5}$) és a talajközeli ózon hatása az emberi egészségre. E két legfontosabb szennyező mellett meg kell említeni a nitrogén-dioxidot, a kén-dioxidot, a szén-monoxidot, az ólmot és a benzolt, amelyek hatását mindenképpen figyelembe kell venni a modellezés során. A talajközeli ózon, amely a légkörben fotokémiai reakciók eredményeként keletkezik, az ózon elővegyületeit (NO_x , VOC) is a figyelem középpontjába emelte. A légkörben lezajló gáz fázisú kémiai átalakulásokat a modellekben kémiai sémákkal írjuk le. A szakirodalomban több ilyen kémiai séma található, amelyek részleteikben eltérőek (szervetlen, szerves komponensek), de mindegyikük tartalmazza a légkörben lezajló alapvető kémiai átalakulásokat. Azt, hogy egy adott modellben melyik sémát célszerű beépíteni, alapvetően a tudományos cél és a modell alkalmazási területe határozza meg.

Az elmúlt években jelentősen megnőtt az az igény, hogy a légköri aeroszolok méreteloszlását, mikrofizikáját, kémiját egyre pontosabban tudjuk a modellekben leírni, figyelembe venni. Ennek egyik oka az, hogy az aeroszolok jelentik a legnagyobb bizonytalanságot a klíma modellekben a sugárzási kényszer előrejelzésével kapcsolatban, másrészt a részecskék mérete, kémiai összetétele, morfológiája lényeges összefüggésben van a részecskék egészségügyi hatásaival.

A légszennyezők száraz és nedves ülepedéssel távoznak a légkörből. A kiülepedett szennyezőanyagok hatással vannak a talajra, a növényzetre (savasodás) és a vizekre (eutrofizáció). Éppen ezért a száraz és nedves ülepedés elsősorban nem lokális skálájú probléma, térbeli eloszlásának meghatározása elsősorban a nagytávolságú transzport modellekkel lehetséges. Légkörben a száraz ülepedést a turbulens és a molekuláris diffúzió, valamint a gravitációs ülepedés határozza meg. A turbulens és a molekuláris diffúzió a talajfelszín, a növényzet és az ülepedő szennyeződés fizikai és kémiai tulajdonságaitól függ. Gravitációs ülepedéssel elsősorban a durva aeroszol részecskék esetében kell számolnunk. A nedves ülepedés lényegében két folyamat eredménye, a felhők alatti (wash out) és a felhőkben való kimosódás (rain out). A két folyamatot külön-külön szokás parametrizálni, mivel más-más fizikai folyamatról van szó. Felhő alatti kimosódásról beszélünk, mikor a felhőből kihulló csapadék-cseppek kimossák a levegőből a szennyeződések. Felhőkben történő kimosódásról pedig akkor beszélünk, mikor a szennyezőanyag részecskék, mint kondenzációs magvak viselkednek, és rajtuk jönnek létre a felhőcseppek.

Kémiai transzport modellek input adatai (emisszió, meteorológiai paraméterek)

A kémiai transzport modellek nélkülözhetetlen bemenő információja a légkörbe juttatott szennyezőanyagok mennyiségére vonatkozó emissziós adatok. Az emisszió alapvetően természetes vagy antropogén eredetű lehet. A természetes eredetű emisszió forrása a növényzet, az állatok, a talaj, a vízfelületek, a tengeri só, a vulkánok, az erdőtüzek, a villámok, stb... Ezeknek a természetes folyamatoknak a hatására a légkörbe elsősorban NO_x , SO_2 , NH_3 , PM, CO, CH_4 és NMVOC kerül. Az antropogén eredetű emisszió elsősorban az emberi tevékenységgel hozható összefüggésbe, amely ipari területek és nagyvárosok környezetében jelentős mértékű. Európában jelenleg a legelterjedtebben használt emissziós adatbázis az EMEP emissziós leltárja, amely tartalmazza a kén-dioxidot (SO_2), a nitrogén-oxidokat ($NO_x = NO + NO_2$), az ammóniát (NH_3), a nem metán illékony

szerves vegyületeket (NMVOC), a szén-monoxidot (CO) és az aeroszol részecskéket (PM_{2.5}, PM₁₀). Az emissziós leltár az országok által éves rendszerességgel elkészített nemzeti emissziós becsléseken alapszik, és jelenleg 50×50km-es térbeli felbontású.

A kémiai transzport modellek másik alapvető bemenő adata a meteorológiai viszonyokra vonatkozó információk. Abban az esetben, ha levegőminőség előrejelzése a cél, a meteorológiai információknak is előrejelzett adatokat kell tartalmazniuk. A modell-futtatás szempontjából előnyös, ha a kémiai transzport modell rácsfelbontását a numerikus előrejelző modell által számolt meteorológiai paraméterek rácsfelbontásához igazítjuk.

A hazai levegőszennyezettség-előrejelző modell-rendszer rövid áttekintése

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) működő előrejelző rendszer alapja az a francia fejlesztésű CHIMERE kémiai transzport modell, amely az internetről szabadon letölthető. A modell a szennyezőanyagok transzportjának meghatározásához figyelembe veszi a légköri advekciót, konvekciót, turbulenciát, valamint számol a kémiai anyagok száraz és nedves ülepedésével. A légkörben lezajló kémiai átalakulásokat több mint 300 kémiai reakción keresztül határozza meg, amely közel 80 kémiai anyag között játszódik le. A modell rendszer segítségével jelenleg Budapest területére, 2 napra vonatkozóan készül előrejelzés a légszennyező anyagok koncentrációjának várható alakulására, amelyek alapot adhatnak a különböző levegőminőségi riasztási fokozatok elrendelésére, illetve visszavonására (2. ábra).



2. ábra: 24 órás előrejelzés a NO₂ koncentráció várható budapesti területi eloszlására (balra) és a NO₂ koncentráció várható időbeli menete a Gillice téri mérőállomáson (jobbra lent)

A CHIMERE kémiai transzport modell futtatásához megfelelő meteorológiai adatokra van szükség (*1. táblázat*). Mivel előrejelzés készül, a meteorológiai adatoknak is előrejelzett adatoknak kell lenniük. Ahhoz, hogy a szennyezőanyagok időbeli változását óras felbontással tudjuk nyomon követni, a meteorológiai adatok óránkénti változását is figyelembe kell vennünk. A kémiai modell a bemenő input meteorológiai adatokat rácspontokban várja. Ez a rács kb. 1,5 km × 1,5 km térbeli felbontású és a meteorológiai előrejelző modellünk ezekben a rácspontokban határozza meg óráról órára a meteorológiai paraméterek értékeit. A meteorológiai adatokat jelenleg a WRF finom felbontású numerikus előrejelző modell szolgáltatja Budapest területére.

1. táblázat. A CHIMERE modell futtatásához szükséges meteorológiai paraméterek listája

	<i>Meteorológiai paraméter</i>
a légkör talajközeli rétegére	2 m-es hőmérséklet légnomás csapadék felhőzet felszíni szenzibilis hőáram felszíni látens hőáram súrlódási sebesség határréteg magasság
a légkör több vertikális rétegére	szélsebesség horizontális és vertikális komponensei hőmérséklet specifikus nedvesség

A meteorológiai adatok mellett fontos bemenő adat az emisszió. Sajnos Budapestre vonatkozóan hivatalos emissziós kataszter nem létezik, ezért ennek az adatbázisnak az előállítása az OMSZ-nál történt. Az input emissziós rácsponti adatbázis kialakításához felhasználásra kerültek a pontforrásokra és lakossági kibocsátásra vonatkozó hivatalos jelentések, a közlekedési eredetű emisszió meghatározásához pedig a fővárosi zajtérkép készítéséhez végzett forgalomszámlálások adatai. A közlekedésből származó emisszió meghatározásánál figyelembe lett véve a rács celláira eső útszakasz hossza, járműkategóriák szerint a megengedett sebesség, valamint a forgalom intenzitása járműkategóriák és napszak szerint. A rendelkezésre álló adatokból készült el Budapest területére az emissziós kataszter 3 km × 3 km-es felbontással.

Nemzetközi kitekintés

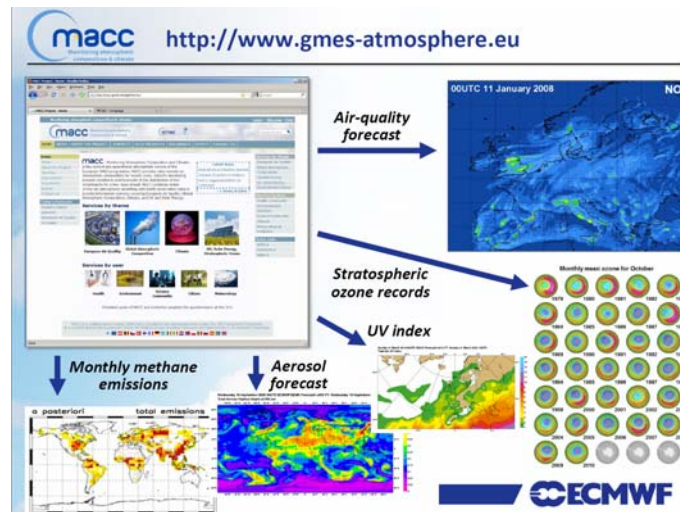
Az utóbbi évek egyik legjelentősebb, európai szintű összefogással megvalósult levegőkörnyezeti programja a MACC-II (Monitoring Atmospheric Composition and Climate) projekt, amelyet az Európai Unió 7. kutatási keretprogramja támogatott. A projektben 13 országból 36 partner intézmény vett részt, amelyek közül a konzorcium vezetője az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) volt. A projekt célja, hogy olyan lényeges információkkal lássa el az európai szakembereket az éghajlatváltozás és a levegőminőség témakörében, amelyek e két legkritikusabb környezeti probléma kezeléséhez, megoldásához segítséget nyújthatnak.

A projekt egyesíti a globális és az európai skálán a légköri modellezés eredményeit a földi megfigyelési adatokkal annak érdekében, hogy kialakítson egy információs rendszert Európában a levegőminőségről, a globális légköri összetevőkről, az éghajlati kényszerről, az ózonrétegről, az UV sugárzásról és a napenergiáról. A projekt keretében megvalósult információs rendszer 2014 második felétől operatívan működik.

A rendszer 5 napra vonatkozóan készít előrejelzést globális skálán a légkör összetevőire és 4 napos előrejelzést az európai levegőminőségre vonatkozóan. A levegőminőség és az éghajlati kényszer szempontjából lényeges összetevőkre vonatkozóan re-analízis is készül. A projekt keretében az elkészült produktumok minőségi validálása folyamatos.

A MACC-II által szolgáltatott adatok, információk felhasználói elsősorban a levegőkörnyezettel foglalkozó szakemberek, de a lakosság körében is egyre többen használják a honlapon elérhető információkat.

A projekt az alábbi címen érhető el: <https://www.gmes-atmosphere.eu/> (3. ábra). Ezen az oldalon az egész Földre vonatkozóan található levegőminőségi analízis és előrejelzési adatok. Európára vonatkozóan sokkal részletesebb információk, előrejelzések találhatóak a MACC honlapján. A projekt keretében 7 kémiai transzport modellel (CHIMERE, EMEP, EURAD, MATCH, MOCAGE, LOTOS-EUROS, SILAM) készülnek szimulációk folyamatosan 6 (O₃, NO₂, SO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5}) légszennyezőre vonatkozóan (rövidesen pollen előrejelzés is fog készülni). Az egyes kémiai transzport modellek számítási eredményei külön-külön is megtekinthetők térképes formában és az egyes modellek számítási eredményei is összehasonlíthatók. Az európai fővárosokra epsgrammok is készülnek a 4 (O₃, PM₁₀, NO_x és SO₂) leglényegesebb szennyezőanyagra vonatkozóan.



3. ábra: A MACC-II (Monitoring Atmospheric Composition and Climate) projekt keretében megvalósult levegőkörnyezeti szolgáltatások

Hivatkozások

- Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., Carmichael, G., Douros, J., Flemming, J., Forkel, R., Galmarini, S., Gauss, M., Grell, G., Hirtl, M., Joffre, S., Jorba, O., Kaas, E., Kaasik, M., Kallos, G., Kong, X., Korsholm, U., Kurganskiy, A., Kushta, J., Lohmann, U., Mahura, A., Manders-Groot, A., Maurizi, A., Moussiopoulos, N., Rao, S.T., Savage, N., Seigneur, C., Sokhi, R.S., Solazzo, E., Solomos, S., Sørensen, B., Tsegas, G., Vignati, E., Vogel, B., Zhang, Y., 2014: Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: current status and prospects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 1, 317–398.
- Caselli, M., Trizio, L., De Gennaro, G., Ielpo, P., 2009: A simple feedforward neural network for the PM10 forecasting: comparison with a radial basis function network and a multivariate linear regression model. *Water, air, and soil pollution*, 201, 1–4, 365–377.
- Kukkonen, J., Olsson, T., Schultz, D.M., Baklanov, A., Klein, T., Miranda, A.I., Monteiro, A., Hirtl, M., Tarvainen, V., Boy, M., Peuch, V.-H., Poupkou, A., Kioutsioukis, I., Finardi, S., Sofiev, M., Sokhi, R., Lehtinen, K.E.J., Karatzas, K., San José, R., Astitha, M., Kallos, G., Schaap, M., Reimer, E., Jakobs, H., Eben, K., 2012: A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 1, 1–87.