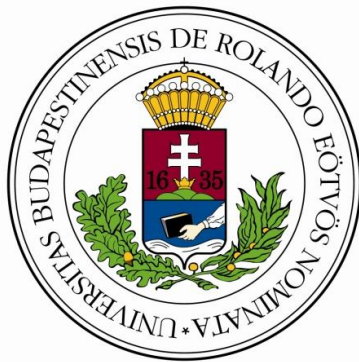


Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Környezettudományi Centrum

Légköri szennyezőanyag terjedést leíró modellek

SZAKDOLGOZAT



Készítette: **Ling Bertold András**

KÖRNYEZETTAN ALAPSZAKOS HALLGATÓ
METEOROLÓGIA SZAKIRÁNY

Témavezető: **Dr. Mészáros Róbert**
adjunktus

Budapest
2012

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	3
2. LÉGKÖRI SZENNYEZŐANYAG TERJEDÉSI MODELLEK ÁTTEKINTÉSE	4
2.1 STATIKUS MODELLEK.....	5
2.1.1 CAR modell.....	6
2.2 DINAMIKUS MODELLEK.....	7
2.2.1 Gauss modell	7
2.2.1.1 UDM modell.....	9
2.2.1.2 ALOHA modell.....	10
2.2.2 Lagrange-féle modell.....	11
2.2.2.1 HYSPLIT modell.....	13
2.2.3 Euler-féle modell	14
2.2.3.1 ECHAM modell.....	16
2.2.3.2 EMEP modellcsalád	17
2.2.4 Doboz- (boks-) modell.....	19
3. HAZAI MODELLEZÉS ÁTTEKINTÉSE	22
4. EGY EGYSZERŰ TERJEDÉSI MODELL ALKALMAZÁSA	32
4.1 A MODELL BEMENŐ ADATAI.....	32
4.2 EREDMÉNYEK.....	33
5. ÖSSZEFOGLALÁS	36
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	36
IRODALOMJEGYZÉK	37
INTERNETES FORRÁSOK	39

1. Bevezetés

A különböző forrásokból származó légköri szennyezőanyagok diszperziójának a modellezése összetett és nagy számításigényű feladat. A modellek használatát az indokolja, hogy a természetben végbemenő folyamatokat és kölcsönhatásokat laboratóriumi körülmények között nem tudjuk megfelelő szinten tanulmányozni. A modellekkel viszont a természeti rendszerek kielégítő mértékben közelíthetők. A szennyezőanyagok hatása – a különböző tartózkodási idejük, kémiai reakcióik és a meteorológiai viszonyok következtében – eltérő. Ezen problémák megoldására különféle szemléletmódú, illetve tér- és időbeli felbontású modellek szükségesek.

Az utóbbi évek katasztrófáinak egészségügyi, társadalmi és gazdasági következményei jelentősen ösztönözték a kibocsátási modellek – főleg a baleseti modellek – fejlődését. A megnövekedett felhasználói igény miatt jelentős fejlesztések tapasztalhatók a légszennyezés modellezése terén. A hazai gyakorlatban is egyre korszerűbb modelleket adaptáltak, illetve fejlesztenek.

Szakedolgozatom első felében a szennyezőanyagok légköri terjedését leíró különböző skálájú és szemléletű modelleket tekintem át, melyekre bemutatok egy-két példát is. A modellek nemzetközi áttekintése után a hazai modellezés történetét és fejlődését szemléltetem. Dolgozatomat az *ALOHA* (**A**real **L**ocations of **H**azardous **A**tmospheres) modellel végzett tanulmány bemutatásával zárom.

2. Légtörri szennyezőanyag terjedési modellek áttekintése

A történelem során az első légszennyezést leíró modellt az 1930-as években készítették, célja a pontforrásból (elsősorban gyárkéményből) származó szennyezőanyag csóva modellezése volt. Erre a célra egy nagyon sikeres és egyszerű modellt fejlesztettek ki (Sutton 1932, Bosanquet 1936), ez volt az ún. Gauss modell. Az 1960-as évekre a Gauss modell használata az egész világon elterjedt, és lendületet vett a fejlesztése is. Az 1970-es években a Gauss modellt már tudták alkalmazni vonal- és területforrásokra is, az elkövetkező években pedig egy forradalmi fejlesztést hajtottak végre; ekkortól vették figyelembe a keveredési réteg magasságát, amely meghatározza azt a vertikális tartományt, amelyben a szennyezőanyag elkeveredhet, ezáltal fontos paramétere a felszíni koncentráció alakulásának.

Az 1970-es években a tudósok felismerték, hogy a légszennyezés nem csupán helyi probléma. Európában a kén-dioxid (SO_2) és a nitrogén-oxidok (NO_x) kibocsátása következtében a savasodás, az USA-ban az iparosodott területeken az ózon (O_3) jelentett egyre nagyobb problémát. Felismerték, hogy regionális skálán történő modellezésre nem alkalmas az egyszerű Gauss-típusú megközelítés. A probléma megoldása érdekében két különböző megközelítést alkalmaztak; s megalkották a Lagrange-típusú, illetve az Euler-típusú modelleket. A lagrangei szemléletmódnál egy légelem útját követjük, vizsgáljuk a tulajdonságait, feltételezve, hogy a légréteg megőrzi identitását. A Lagrange modellt leginkább Európában használták nagy távolságra terjedő, hosszú tartózkodási idejű szennyezőanyagok (főleg SO_2) vizsgálatára. Az euleri szemléletmódnál a modellezni kívánt teret egy rácshálózattal fedjük le, és a rácspontokon vizsgáljuk a térelem tulajdonságait (hőmérséklet, nyomás, stb.). Az Euler-típusú modellt elsősorban az USA-ban alkalmazták városi területeken történő időszakos kibocsátások modellezésére (*Daly and Zanetti, 2007*).

A regionális modellezés megismerése után a globális modellezés leírása következett. 1978-ban Isaksen megalkotta az első 2 dimenziós modellt, egy évvel később pedig Peters leírta az első 3 dimenziós modellt is (e modellek leírásait l. *Daly and Zanetti, 2007*). Az 1980-as évektől a számítástechnikai és tudományos fejlődésnek köszönhetően ezen alapvető szemléletű modellek fejlesztése, finomítása zajlik. A légtörri dinamika, a levegőkémia, valamint a felszín és a légtörri közti kölcsönhatások egyre kifinomultabb parametrizációjának eredménye, hogy egyre pontosabban tudjuk

szimulálni a légkörben található anyagok terjedéseit. Ezen anyagok a tartózkodási idejük és a meteorológiai viszonyok következményeként a kibocsátási helyüktől messze elkerülhetnek, hatásuk különböző mértékű lehet. A hatás megfelelő vizsgálatának céljából különböző tér- és időbeli felbontású modelleket alkalmazunk napjainkban: ezek a globális léptékű, a kontinentális és regionális léptékű, továbbá a lokális és városi léptékű terjedési modellek (*1. táblázat*).

Lépték elnevezése meteorológiai gyakorlatban	Térbeli lépték (km)	Időbeli lépték	Nyomanyagok terjedésére vonatkozó jellemzők
Globális	4000–40000	5 nap–több év	Félgömbi és globális terjedés, hosszú légköri tartózkodású nyomanyagokra jellemző
Szinoptikus	2000–4000	1–5 nap	Kontinentális léptékű terjedés, erősen változó nyomanyagok átalakulási és kihullási folyamatai kontinentális léptékben
Mezo-alfa	200–2000	12–48 óra	Kontinentális és regionális léptékű terjedés, erősen változó nyomanyagok átalakulási és kihullási folyamatai regionális léptékben
Mezo-béta	10–30	2–12 óra	Terjedés egyedi források környezetében, konvektív hatások és orografikus örvények
Mezo-gamma	1–20	0,1–3 óra	Terjedés és diszperzió városi léptékben, illetve a légszennyező források környezetében
Mikro-skála	0,00001–2	1–1800 másodperc	Diszperzió utca-kanyonokban, jelentős termikus, fizikai és kémiai inhomogenitás

I. táblázat. Légköri mozgások tér- és időléptékei, illetve a nyomanyagok terjedésére vonatkozó jellemzők (Bozó et al., 2006)

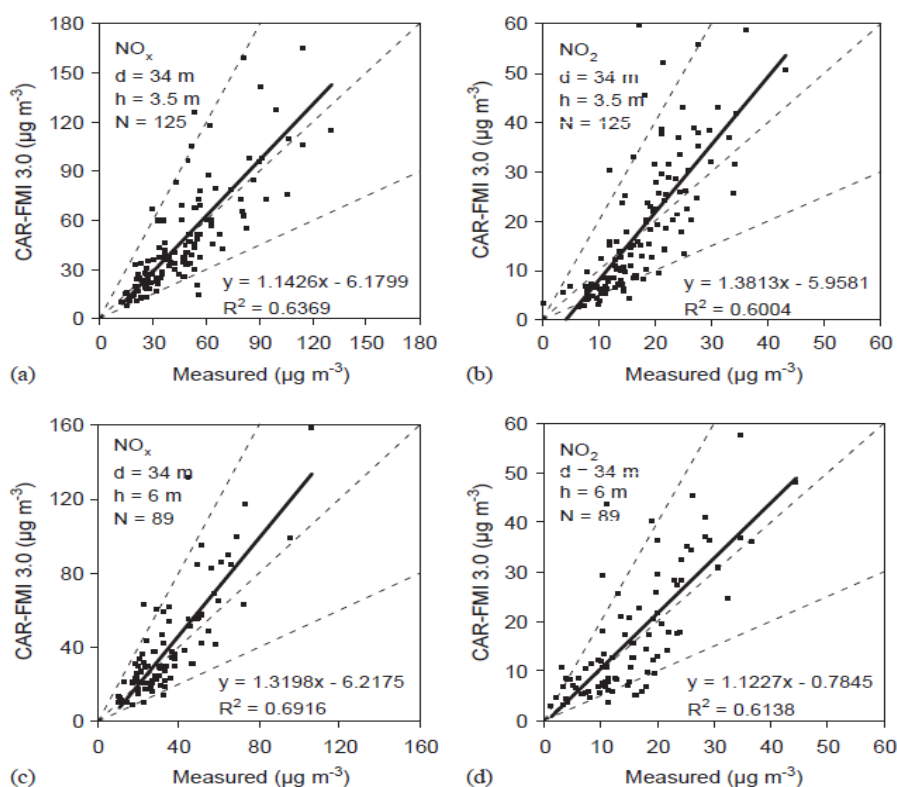
2.1 Statikus modellek

A statikus modellek korábbi mérések statisztikai elemzésén alapulnak, az adatsorok homogenitását feltételezve. Ezeknek a modelleknek az előnye az egyszerű kezelhetőség és a kis számítástechnikai kapacitási igény. Ellenben számos hátrányuk van; nem tudják leírni az időben változó folyamatokat, ezáltal figyelmen kívül hagyják a szennyezőanyag kibocsátás mennyiségének, összetételének és területi eloszlásának változását, valamint a meteorológiai tényezők időbeli menetéből fakadó hatásokat. Mivel az értelmezési tartományuk korábban megtörtént, ismert statisztikai becslésekből adódik, így különböző beavatkozási stratégiák hatásának előzetes becslésére nem

alkalmasak. Szmogriadó-tervekben és egyéb eddig elő nem forduló kritikus szituációkban sem tudják felmérni a beavatkozási stratégiák hatását.

2.1.1 CAR modell

Az utcai szinten történő levegőminőség-ellenőrzés céljából került kifejlesztésre Hollandiában a CAR (Calculation of Air pollution from Road traffic) modell, mely egy könnyen paramétereztető és egyszerűen alkalmazható statisztikus modell. A modellel kiszámítható a közlekedés által kibocsátott éves átlagolt koncentráció és összetevői (NO₂, CO, ólom, benzol stb. – l. pl. **1. ábra**). A modell segítségével értékelték a forgalmi helyzetek és a beépítettség hatását. A modellel készített elemzés és az átfogó szélcsatorna kísérletek segítségével vizsgálták a kibocsátást és a koncentrációt különböző konfigurációk esetén (eltérő méretek, távolságok és formák az utcák, az épületek és a fák között). Ezen vizsgálatok alapján kerültek kiválasztásra azok a paraméterek, amelyek a legnagyobb mértékben befolyásolják a levegő minőségét az utcákban (Moussiopoulos *et al.*, 1996).



1. ábra. A műszerrel mért (x tengely) és a CAR-FMI modellel szimulált (y tengely) NO_x (bal panelek) és NO₂ (jobb panelek) koncentrációknak az összehasonlítása. A mérést az úttól d=34 méter távolságban lévő cellákon, valamint h=3,5 méter (felső panelek) és h=6 méter (alsó panelek) magasságban végezték. N a mérések száma (Levitin *et al.*, 2005). Látható, hogy a modellel végzett szimuláció h=6 méter magasságban pontosabb eredményeket ad (l. R² értékek).

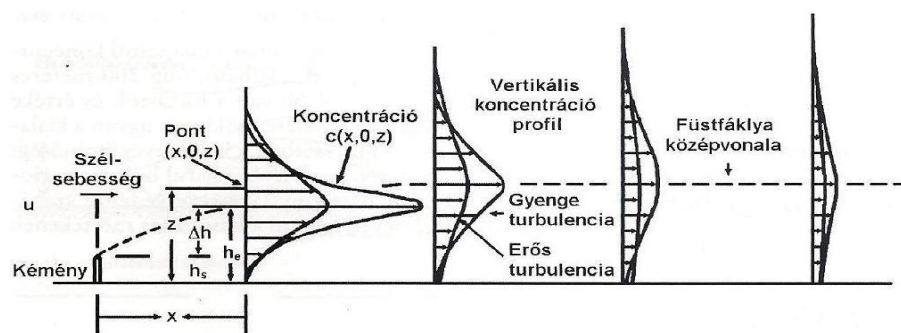
A CAR modellt a Finn Meteorológiai Intézet (FMI) továbbfejlesztette egy online forráskódú Gauss-modellé. A modell magában foglal egy diszperziós modellt, egy kibocsátási modellt, a koncentrációk számított idősorának statisztikus elemzését és egy Windows-alapú grafikus felhasználói felületet. A modell a diszperziós egyenlet alapján oldja meg a Gauss-féle diffúziós egyenletet véges vonalforrásra (Kukkonen *et al.*, 2001). Az FMI által végzett legfontosabb újítások a következők: (1) kiterjesztették a modellt a PM_{2.5} kibocsátásának és ülepedésének szimulálására, (2) továbbfejlesztették a grafikus felhasználói felületet, (3) javították a számítógép forráskódjának a strukturálását (Levitin *et al.*, 2005). Modellezték az úgynevezett diszkrét parcella módszert, így a modell kezelni tudja a nitrogén-oxidok, az oxigén és az ózon alapvető egyenleteit (Moussiopoulos *et al.*, 1996).

2.2 Dinamikus modellek

A dinamikus modellek a fizikai és kémiai folyamatok matematikai leírásával becslik az adott légszennyező koncentrációjának időbeli és térbeli alakulását. Előnyük, hogy képesek leírni az időben változó folyamatokat, így alkalmazhatók beavatkozási stratégiák hatásának előzetes vizsgálatára, például szmogriadó esetén. Hátrányuk, hogy fejlesztésük drága és komoly kutatás-fejlesztést igényel. Továbbá használatukhoz gyors és nagykapacitású számítógépek kellenek.

2.2.1 Gauss modell

A legrégebbi, de sok esetben ma is jól alkalmazható modell a Gauss modell. Elsősorban magas pontforrásokból származó légszennyeződés terjedésének leírására alkalmazható. A légszennyező anyagok eloszlását az x - z síkban a **2. ábra** szemlélteti:



2. ábra. A Gauss modell sematikus ábrája (Bozó *et al.*, 2006).

Ez az úgynevezett Gauss-fáklya, amiben a koordináta-rendszer kezdőpontja a kémény talppontja, a szél pedig az x tengely irányában fúj. Az y tengely a vízszintes, a z tengely a függőleges síkban erre merőlegesen helyezkedik el. A mérni kívánt szennyezőanyag h_s kéménymagasságban kerül a levegőbe, ezt a pontot nevezzük fizikai kéménymagasságnak. Ezen kívül definiálnunk kell h_e effektív és Δh kiegészítő kéménymagasságot. A Δh értékét a kibocsátott gázok hőmérséklete és sebessége, valamint a környezeti levegő hőmérséklete, stabilitása és áramlási viszonyai határozzák meg (Bozó *et al.*, 2006). Az effektív, vagy más néven tényleges kéménymagasság az a pont, ahol a kéményből kiinduló füstfáklya középvonala vízszintessé válik. (Radnainé Gyöngyös, 2004). A forrásból kikerülő szennyezőanyagot az x tengely mentén rendezett mozgás szállítja. A szennyezőanyag x tengelyre merőleges irányú terjedését a turbulencia határozza meg, minél erősebb a turbulencia annál jelentősebb a hígulás és a koncentráció eloszlásának szórása a füstfáklya középvonala körül (Bozó *et al.*, 2006).

A modell alapegyenlete a kontinuitási egyenletből, több egyszerűsítési feltétel alkalmazásával írható fel. Ezen feltételek a következők:

- a meteorológiai helyzet stacionárius,
- a forrást pontszerűnek tekintjük, melynek kibocsátása folytonos és időben állandó,
- a szélmezőnek csak az x irányú komponense nem nulla,
- adott irányban csak advekciónak van, turbulens diffúzió nincs,
- a földfelszín sík és a szennyezőanyagok ülepedése elhanyagolható,
- a kémiai átalakulásokat figyelmen kívül hagyjuk.

A feltételek teljesülése esetén a Gauss modell alakja a következő:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zV_x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) \left[\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h_e}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h_e}{\sigma_z}\right)^2\right) \right],$$

amelyben a Q a kibocsátott szennyezőanyag mennyiségét, σ_y és σ_z a szóródási paramétereket jelöli. A szóródási paraméterek a pontforrástól való távolság és a légköri stabilitás függvényében empirikus úton meghatározhatók (Lagzi, 2003).

A modell egyszerűsége ellenére képes figyelembe venni a felszínről és a planetáris határregről történő visszaverődést. A Gauss modellt általában lokális és városi léptékű szennyezőanyag terjedés modellezésére alkalmazzuk. Modellezési szempontból a

legösszetettebb feladat a nyomanyagok lokális és városi léptékű diszperziójának és kémiai átalakulásának szimulálása. Több fontos körülményt kell figyelembe venni a modell felállításánál:

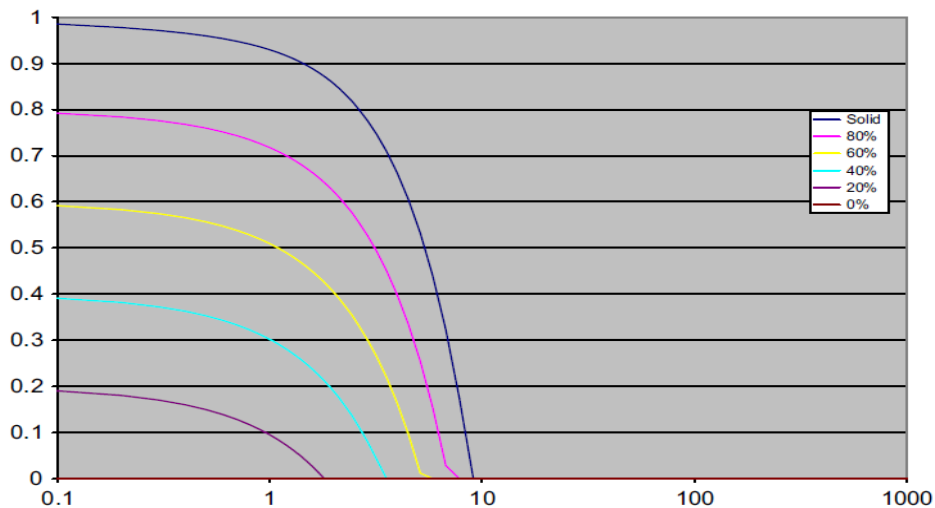
- A légáramlásokat az épületek és egyéb mesterséges akadályok jelentős mértékben módosítják, így egy adott pontban kialakuló koncentráció nagyságrendileg különbözhet egy be nem épített területen kialakuló koncentrációhoz képest. Ebből következik, ha leegyszerűsítve vesszük figyelembe az akadályokat lokális lépték modellezésénél, jelentős hibát követünk el.
- Hosszabb tartózkodási idejű anyagok esetén a helyi kibocsátás mellett a kontinentális-regionális léptékű légköri terjedést is figyelembe kell venni.
- A városi és lokális légkörben történő gyors kémiai átalakulások különböző időléptékben mennek végbe (Bozó *et al.*, 2006).

2.2.1.1 UDM modell

Az *UDM* (**Unified Dispersion Model**) egy diszperziós gaussi modell, melyet az Oslo központú DNV (**Det Norske Veritas**) független alapítvány dolgozott ki a Phast (**Process Hazard Analysis Software Tool**) kockázatkezelő szoftver keretében. A DNV célja egy olyan átfogó veszélyelemző szoftver tervezése és üzemeltetése, amely azonosítja és értékeli a kockázatot, továbbá útmutatást ad ennek kezelésére (<http://www.dnv.com/>). Ezen Phast program keretében hozták létre az *UDM* modellt, mely Fortran77 programozási nyelvet és C/C++ felhasználói felületet használ. A modell megfelelő működéséhez a következő bemenő adatok szükségesek: a levegő hőmérséklete, a vizsgált anyag bomlási sebessége, folyékony tömegfrakció értéke, a cseppek átlagos átmérője, a kibocsátott anyag tömege és a kibocsátás időtartama (erre csak folyamatos kibocsátás esetén van szükség), továbbá a kibocsátási hely magassága. Az *UDM* lehetővé teszi különféle vertikális profilok alkalmazását, így a hőmérséklet, a szélesebbesség, a légnyomás és a légköri keveredési adatok variációját. A modell segítségével többek között az alábbi fizikai folyamatok szimulálhatók:

- cseppek párolgása és kimosódása, cseppek és az ideális gázok termodinamikája, anyagok tulajdonságainak hőmérsékletfüggése,
- légbeszívás, az aljzat hő- és vízgőz-transzportja,
- különböző légszennyezők diszperziója.

A programmal futtatott eredmények szöveges vagy grafikus formában jeleníthetők meg. A modell az eredményt két differenciálegyenlet megoldásával állítja elő; az egyik egyenletet a cseppekre, míg a másikat a csóvára írja fel. A cseppek egyenlete írja le a cseppek párolgását és trendjeit. A másik egyenlet írja le a csóva összetevőit, tömegáramlását, pozícióját és a hőmérsékletét. A két differenciálegyenletet külön-külön numerikusan integrálva kapjuk meg az eredményt. A 3. ábrán az UDM modellel készített esettanulmány látható. Ezen tanulmány a CO₂ (0, 20, 40, 60, 80, 100% szilárd frakció tartalom) keveredését mutatja be 70% páratartalmú levegőben, 280K (7°C) hőmérsékleten és 1 atmoszféra nyomáson. A tanulmányról leolvasható, hogy a szilárd CO₂ minden esetben szublimál tíz méteren belül (Witlox et al., 2009).



3. ábra. CO₂ keveredésének szimulálása UDM modellel. Az y tengelyen a CO₂ szilárd tömeghányada, az x tengelyen a méterben mért távolság látható (Witlox et al., 2009).

2.2.1.2 ALOHA modell

Az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet (NOAA) által kifejlesztett ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) modell egy egyszerű gaussi terjedési modell. A fejlesztők célja egy olyan számítógépes rendszer előállítása volt, amely egy esetlegesen bekövetkező vegyi baleset esetén megfelelő információt szolgáltat a levegőbe kerülő vegyi anyagokról (Benei, 2008). Mivel közvetlen veszélyhelyzetek elhárítására készült, ezért egyszerű kezelőfelülettel és rövid futási idővel rendelkezik (Leelőssy, 2010). Az ALOHA közel 1000 veszélyes vegyi anyag jellemzőit tartalmazza, ezeknek tudja kiszámítani és grafikusán megjeleníteni a terjedését. Számítása során figyelembe veszi az adott anyag fizikai és toxikológiai jellemzőit, a meteorológiai viszonyokat, a kibocsátás körülményeit, valamint az érintett terület jellemzőit is (Benei,

2008). Az *ALOHA* külön modult használ a levegőnél sűrűbb gázok terjedésének szimulálására. Ezen modul alapja a DEGADIS (**D**ense **G**as **D**ispersion) modell, amely a levegőnél sűrűbb anyag lefelé és széllel szemben történő mozgását modellezi. Az *ALOHA* modell előnye, hogy a kibocsátott anyag ismeretében automatikusan kiválasztja, hogy gaussi vagy nehézgáz-megközelítésben indítja a modellt (Leelőssy, 2010). A modell további előnye a rendkívül rövid futási ideje, amelynek köszönhetően a beavatkozás rövid időn belül megkezdhető, ezen kívül előny a felhasználóbarát kialakítás; minden párbeszédpanel kitöltése után a rendszer ellenőrzi a hibákat, így csökkentve az emberi tévedések lehetőségét (Benei, 2008). Az *ALOHA* hátránya, hogy számos körülmény kizárja a modell működését:

- szélcsend (2 m/s alatti szélesség), mivel ekkor nem alkalmazható a Gauss-féle közelítés, mert nem a szél által történő szállítás lesz a meghatározó a terjedés szempontjából,
- jelentős horizontális szélnyírás a forrás 10 km-es körzetében,
- jelentős vertikális szélnyírás az alsó 1500 méteren, vagy az inverzió magasságáig,
- a szél jelentős változása a szimuláció 1 órás időtartama alatt,
- csapadékos vagy ködös idő, mert ekkor a nedves ülepedés jelentősen befolyásolja a koncentrációmező alakulását,
- rendkívül stabil légrétegződés, mert ilyen esetben a felszíni koncentráció lényegesen nagyobb lehet a gaussi modellekkel előrejelzetténél,
- domborzat és az épületek áramlasmódosító hatása,
- kémiai reakciók, radioaktív bomlás (Leelőssy, 2010).

Ezen működést kizáró tényezők ellenére, az *ALOHA* kétdimenziós gaussi modellt egyszerű használhatósága és rövid futási ideje miatt napjainkban is számos helyen használják. Vegyi anyagok modellezése mellett használható érzékenységi és statisztikai vizsgálatokhoz, valamint bonyolultabb modellek ellenőrzésére.

2.2.2 Lagrange-féle modell

A Lagrange-féle módszernél a koordináta-rendszer együtt mozog a légáramlással, egy légrész útját követjük nyomon. A modell térben homogén összetételű légcellát feltételez, amiben a légrész tömege nem, a térfogata viszont változik. Ezen

térfogatváltozást és az egységnyi tömegű levegőrész sűrűségváltozását írjuk le. Egy-egy légcella koncentráció-változása az alábbi egyenlettel írható fel:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{Q}{H} - k_1 C_1 - k_2 C_1 - k_3 C_1,$$

ahol C_1 a légrész koncentrációja, Q az emisszió, H a doboz magassága, k_1 , k_2 , k_3 a kémiai átalakulás, továbbá a száraz és nedves ülepedés együtthatója. A légcellák rögzített emissziós lépték felett mozognak, így minden időlépték alatt meghatározott mennyiségű anyag kerül beléjük (*Radnainé Gyöngyös*, 2004). A modell előnye, hogy figyelembe veszi a sűrűségkülönbségből adódó felhajtóerő és a turbulens sebességingadozás miatti korrekciókat, továbbá az áramvonalmenti mozgást is. Hátránya, hogy matematikailag sokkal bonyolultabb az euleri szemléletmódnál, továbbá nagyon pontatlanul kezelik a vízszintes és függőleges anyagáramokat, és a szennyeződés hígulását. A Lagrange-féle eljárással végzett számítások éves szinten jól leírják a tényleges helyzetet, de egyes napokon a számítások és mérések közötti különbség jelentős mértékű lehet. Ebből következik, hogy ez a modell nem használható olyan reaktív, rövid tartózkodási idejű, térben és időben gyorsan változó koncentrációjú anyagok mérésére, mint például az ózon. Alkalmazási területe elsősorban a kontinentális és regionális léptékű légköri transzportfolyamatok modellezése. Ezen modellszámítások eredményei térben és időben is folytonos lefedettséget nyújtanak, ezáltal lehetőség van a koncentráció- és ülepedés mezők különböző átlagolási időkkal történő meghatározására. Ezen adatok pedig nagymértékű segítséget nyújtanak a környezet állapotának vizsgálatához és értékeléséhez, ezáltal egyszerűbbé teszik az alábbi kérdésekre történő válaszadást:

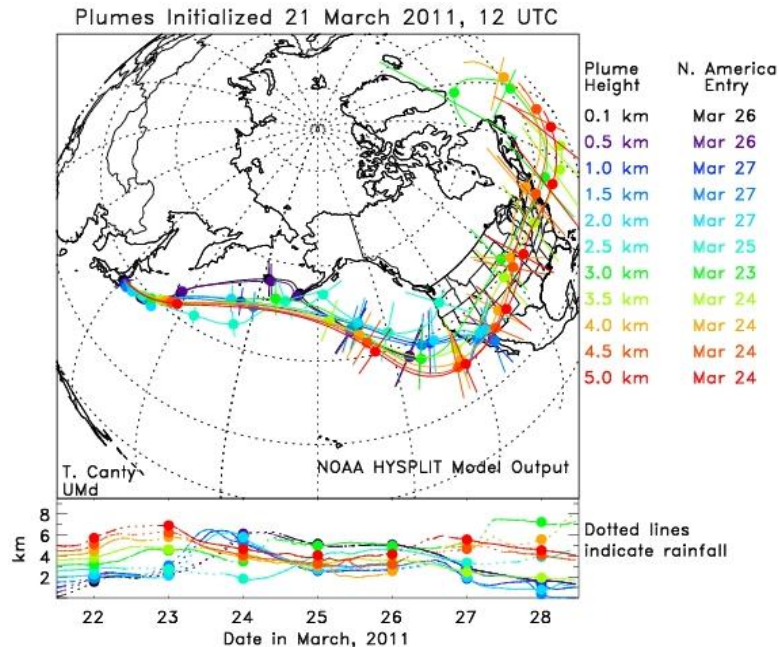
- levegőminőség értékelése és előrejelzése,
- levegőminőségi határértékek meghatározása, túllépésének becslése,
- légszennyező anyagok forrásainak azonosítása,
- levegőminőség javításához szükséges környezetpolitikai kérdések,
- lokális és nagy távolságú levegőkörnyezeti hatások szétválasztása (*Bozó et al.*, 2006).

2.2.2.1 HYSPLIT modell

A *HYSPLIT* (**H**ybrid **S**ingle-**P**article **L**agrangian **I**ntegrated **T**rajectory) modellt az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet (NOAA) fejlesztette ki. A modell egy olyan komplett programrendszer, amely az egyszerű trajektória leírása mellett akár komplex szennyezőanyag terjedést és ülepedést is tud szimulálni. A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően a *HYSPLIT* modellnek négy verziója jelent meg, így napjainkban is tökéletesen használható. Az első verzió még csak rádiószondás megfigyeléseken alapult és egyenletes átkeveredést feltételezett. A második verzióban már bevezették a változó keveredési erősséget, míg a harmadik változatban a rádiószondás adatokat cserélték le rácson tárolt meteorológiai adatokra (Szabó, 2007). A legújabb és napjainkban is használt verzió a *HYSPLIT4*, amelyet az alábbi új tulajdonságokkal bővítettek ki; az advekción algoritmus időbeli interpolációval bővült, aktualizálták a stabilitási és diszperziós egyenleteket, új grafikus felhasználói felületet hoztak létre, a modulok le tudják írni a kémiai átalakulásokat, valamint egy háromdimenziós részecske-diszperzió került be a koncentráció-számításba (<http://www.defra.gov.uk/>). A modell előnye, hogy egy vagy több (térben vagy időben) pályavonalat is képes futtatni opcionális kiindulási rácspontról, továbbá figyelembe veszi a nedves és száraz ülepedést, a radioaktív bomlást és a reszuszpenziót is. Modellezhetünk vele pont- vagy terület-forrásból származó pillanatnyi vagy folyamatos kibocsátást is (<http://www.arl.noaa.gov/>). Az egyszerűsége és ingyenes elérhetősége miatt számos helyen használják. Többek közt *HYSPLIT4* modellt alkalmaznak az Egyesült Királyságban a levegő minőségének előrejelzésére; minden nap a korai órákban a modell automatikusan lefut 32 királyságbeli és vele határos mérőállomáson, a kimenő adatokat ábrázolja, így az általa szolgáltatott információk segítségével az Egyesült Királyság felé érkező légtömegek már 96 órával az érkezés előtt érzékelhetők (<http://www.defra.gov.uk/>).

A *HYSPLIT4* modellel számos felmérést készítettek a levegőbe került radioaktív szennyezőanyagok pályáiról a fukushimai atomerőműben történt incidenst követően. A **4. ábrán** látható példával szeretnék szemléltetni egy ilyen tanulmányt. A felső panel mutatja a szennyezőanyagok trajektóriáját. A pályavonalon látható körök az adott napi 12 UTC állapotot szemléltetik, a rajtuk áthúzott vonalak pedig a számításokból adódó hibát jelzik. Az alsó panelen a szennyezőanyag pályájának a magassága látható. A szaggatott vonalak jelzik, hogy hol fordul elő csapadék, mert a csapadékkal nagy

mennyiségű szennyezőanyag kerülhet a földfelszínre. A felső panel jobb oldalán látható, hogy a különböző színel jelzett szennyezőanyagok mikor és milyen magasságban érték el az Egyesült Államok területét.



4. ábra. A marylandi egyetem által a HYSPLIT modellel készített tanulmány, a fukushimai balesetből származó, az Egyesült Államok területére lépő szennyezőanyag útjáról (<http://www.freerepublic.com/focus/f-news/2692551/posts>).

2.2.3 Euler-féle modell

Az Euler-féle modellnél az anyagmozgást a Földhöz rögzített koordináta-rendszerben vizsgáljuk. Ezen 2- vagy 3-dimenziós Euler-típusú modellek rácshálóval bontják fel a légkör meghatározott részét és ennek pontjaira oldják meg a fizikai és kémiai folyamatokat leíró matematikai egyenletrendszereket (Vincze *et al.*, 2006). Ezen szemléletmódnál egy adott mennyiség teljes időbeli megváltozását a lokális időbeli megváltozás mellett az x és y irányú advekción és a z irányú konvekción határozza meg. Ezen terjedési modellek az anyagszállítási egyenlet numerikus megoldásán alapulnak, melynek alakja egy háromdimenziós Descartes-féle koordináta-rendszerben (x, y, z) a következő:

$$\frac{\partial \mathbf{c}}{\partial t} = -\nabla(\mathbf{Vc}) + \nabla D \nabla \mathbf{c} + S(\mathbf{c}, x, y, z, t),$$

ahol $\mathbf{c} = (c_1, c_2 \dots c_n)^T$ az anyagfajták koncentrációvektora, $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$ a háromdimenziós szélmező, $\mathbf{D} = (D_1, D_2, \dots D_n)^T$ a molekuláris diffúziós együtthatók vektora, n az anyagfajták száma. $S(\mathbf{c}, x, y, z, t)$ az anyagfajták forrásait és nyelőit írja le, ami lehet száraz és nedves ülepedés, kémiai reakció és emisszió. A Nabla operátort $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ alakban írhatjuk fel. Az egyenlet bal oldala az anyagfajták koncentrációinak időbeli változását adja meg. Az egyenlet jobb oldalát egy advekciós és egy diffúziós tagra bonthatjuk fel. Az advekciós tag az anyagfajták szél hatására bekövetkező transzportját írja le, míg a diffúziós tag a molekuláris diffúzió hatását jellemzi (Lagzi, 2003). Az egyenlet egyszerűbb matematikai kezelhetősége miatt a legtöbb meteorológiai modellben ezt a szemléletmódot alkalmazzák. A módszer előnye, hogy a kémiai reakciók jól paraméterezhetőek vele, továbbá az általános áramlási modellekhez könnyen illeszthető. A modell hátránya, hogy bizonyos határon túl használhatatlanul pontatlan eredményeket ad, mivel a ráctávolság vagy az időlépés növelése nagymértékben növeli a véges felbontásból adódó numerikus hibát, továbbá stabilitási és konvergencia hibákat is eredményezhet. Napjainkban kvázi 3-dimenziós Euler-típusú modelleket alkalmazunk, melyek a légkör vizsgálni kívánt részét függőleges irányban rétegekre bontják, mely rétegekben a koncentráció-változást külön-külön 2-dimenziós modellekkel írják le. A rétegek között történő függőleges anyagátvitelt a megfelelő fizikai modellekkel adják meg. Az Euler-típusú modelleket elsősorban globális léptékű terjedés leírására alkalmazzuk, mivel ezek a modellek tudják legpontosabban leírni a nyomanyagok nagy távolságú terjedését. A globális modellezés legfőbb célja a szennyezőanyag-koncentráció, illetve az ülepedés mezők tér- és időbeli eloszlásának leírása. A globális léptékű szennyeződést elsősorban az ember által kibocsátott hosszú tartózkodási idejű gázok okozzák. Ezen gázok közül a legfontosabbak a CO_2 , CH_4 , N_2O , halogénezett szénhidrogének; freonok. Ezek üvegházhatású gázok, azaz a Naptól érkező rövidhullámú sugárzást átengedik, de a földfelszín hosszuhullámú kisugárzását elnyelik, ezáltal fontos szerepet játszva a Föld hőmérsékletének szabályozásában. Továbbá hosszú légköri tartózkodásuk miatt elérik a sztratoszférát, ahol fotokémiaiag elbomlanak. Az ekkor keletkező szabad gyökök pedig kivonják a magaslégköri ózont. A nemzetközi egyezményeknek köszönhetően a legtöbb gáz antropogén kibocsátását mérsékeltek, de légköri mennyiségük továbbra is magas, vagy növekszik, ami indokoltá teszi a felsorolt gázok terjedésének modellezését. A számítástechnika fejlődésével lehetőség nyílt arra, hogy ezeknek a légköri anyagoknak a

viselkedését minél pontosabban nyomon kövessük két- vagy háromdimenziós globális kémiai/éghajlati modellek segítségével. A globális léptékű modellek az alábbi problémakörök vizsgálatához nyújtanak segítséget:

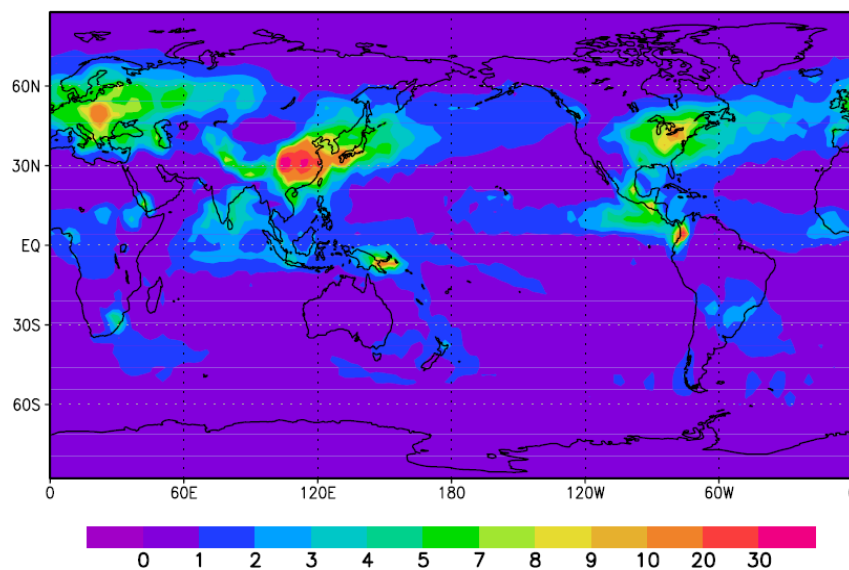
- a nyomanyagok koncentrációjának globális eloszlása a troposzférában és a sztratoszférában,
- az emberi tevékenység szerepe a koncentráció- és ülepedés mezők kialakításában,
- a globális koncentráció eloszlásban milyen szerepe van a természetes forrásoknak és nyelőknak,
- a nyomanyagok légköri összetételének és tartózkodási idejének becslése,
- a nyomanyagok tér- és időbeli eloszlását hogyan befolyásolják a légkör dinamikai folyamatai,
- az előrejelzett globális emissziós forgatókönyvek hogyan módosítják a vizsgált nyomanyagok globális eloszlását (*Bozó et al., 2006*).

2.2.3.1 ECHAM modell

Az Euler-típusú globális léptékű modellek alkalmazására tipikus példa a légköri kénvegyületek globális eloszlásának a leírása. Az antropogén eredetű szulfátrészecskék fontos szerepet játszanak az éghajlat szabályozásában, ezért fontos a globális eloszlás ismerete. A felszíni kibocsátási adatok megfelelő mértékben csak az iparilag fejlett térségekben állnak rendelkezésünkre, ezért szükség van háromdimenziós modellekre, hogy térben folytonos képet kapjunk a koncentráció globális léptékű eloszlásáról (*Bozó et al., 2006*). Erre ad lehetőséget a Max Planck Meteorológiai Intézet által 1990-es évektől folyamatosan fejlesztett *ECHAM* modelleszalád, amely egy általános cirkulációs modell. Ezen modellekkel elsősorban az alsó légkört tudjuk tanulmányozni 10 hPa-ig, de használható a sztratoszféra és az alsó mezoszféra tanulmányozására is. Az *ECHAM* modelleszalád legújabb tagja az *ECHAM5*, mely az elődeihez képest jobban hordozható és rugalmasabban használható (<http://www.mpimet.mpg.de/en>). A modellel számított kén-dioxid és szulfátkoncentrációk éves zonális átlagai megmutatták, hogy a legmagasabb értékek – nem meglepő módon – az északi félteke közepes szélességi köreinek alsó troposzférájában figyelhetők meg.

Az *ECHAM5* cirkulációs modellt kibővítették egy komplex aeroszol modellel (*HAM*), amely lehetővé teszi az aeroszol éghajlatra való hatásának értékelését (*Stier et*

al., 2005). Az *ECHAM5-HAM* lehetőséget ad arra, hogy tanulmányozzuk a változások együttes hatását az üvegházhatású gázok és az aeroszolok tekintetében. Ez az integrált megközelítés fontos, mivel az üvegházhatású gázok koncentrációjának változása különböző hatással lehet az éghajlatunkra. Ez a modell képes leírni a legfontosabb légköri aeroszol vegyületeket, mint például a szulfátot (l. pl.: **5. ábra**), feketeszenet, tengeri sókat és a könnyen módosítható vegyületeket (http://ccaqu.jrc.ec.europa.eu/climate_impact.php).

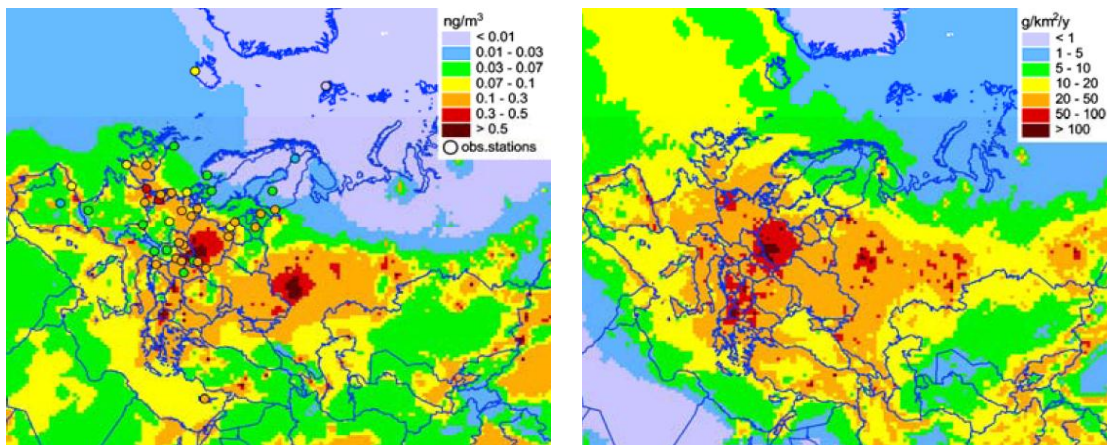


5. ábra. SO_4 éves átlagos nedves ülepedése (kg/hektár) ECHAM5-HAM modellel ábrázolva (Croft et al., 2009)

2.2.3.2 EMEP modellcsalád

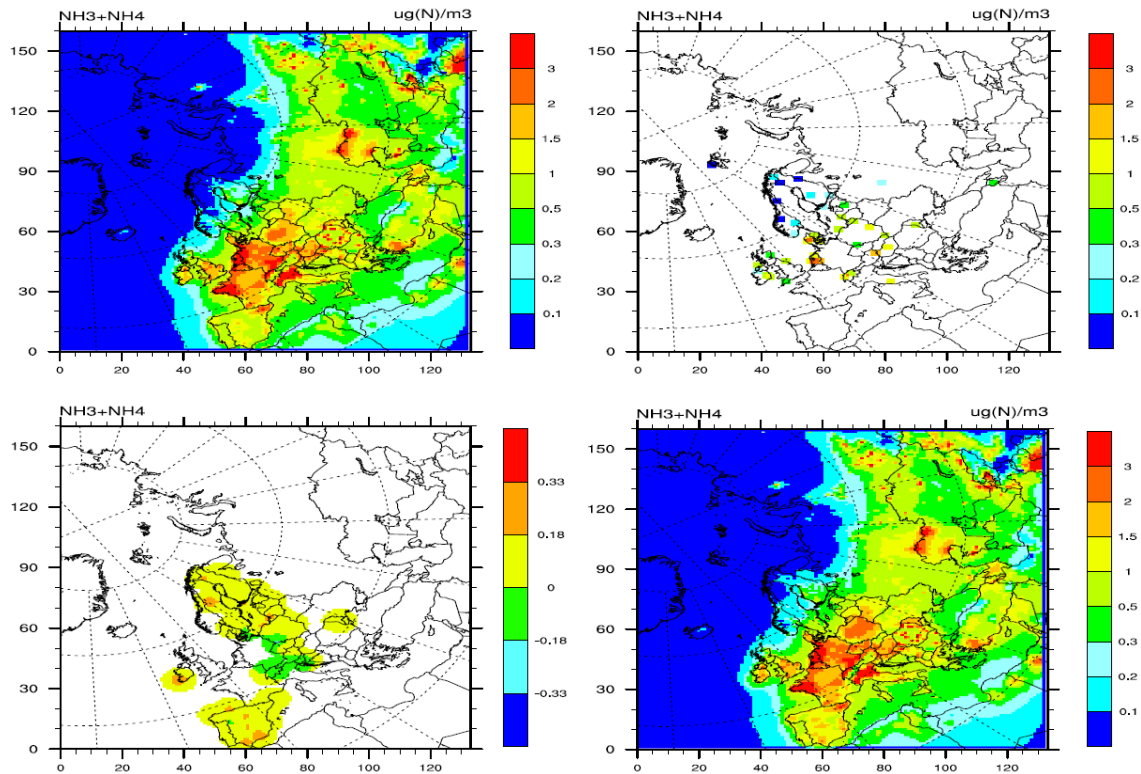
Ugyancsak Euler-féle globális léptékű modell az Egyesült Európai Nemzetek Gazdasági Bizottsága (UNECE) által támogatott Európai Megfigyelő és Kiértékelő Program (EMEP). Az *EMEP* modellcsalád kifejlesztésével a kormányoknak és egyéb alárendelt szerveknek lehetőségük nyílt az általuk a LRTAP Egyezményben (Long-range Transboundary Air Pollution – Nagy távolságra jutó országhatárokon áterjedő levegőszennyezés) aláírt fejlesztéseket és kibocsátás-csökkentéseket tudományos adatokkal alátámasztani (<http://www.unece.org/env/lrtap>). Kezdetben az *EMEP*-program központjában a határokon átnyúló savasodás és eutrofizáció problémájának modellezése és értékelése állt. Később a program kibővült, így modelleket írtak a talajközeli ózon kialakulásának vizsgálatára, továbbá a környezetben tartósan megmaradó szennyezőanyagok (POP), nehézfémek és a por vizsgálatára. Az *EMEP*-programok három fő elemből állnak: (1) a kibocsátási adatok gyűjtése, (2) a levegő és a

csapadék minőségének mérése, és (3) a légszennyező anyagok lerakódásának és légköri szállításának modellezése. Ezen három elem kombinációjának felhasználásával rendszeresen kapunk információt a levegőt szennyező anyagok kibocsátásáról, koncentrációjáról és ülepedéséről. Továbbá modellezni tudjuk a légszennyezők országhatárokon áterjedő terjedését, és az ehhez kapcsolható helyi kritikus terheléseket és túllépéseket. Az *EMEP* két összegző központot hozott létre, melyek fő feladata a kutatás, fejlesztés, modellezés és az információszolgáltatás. Az egyik központ a moszkvai *EMEP/MS-C-E*, amely nehézfémek (Cd, Pb, Hg) és perzisztens szerves szennyezőanyagok (POP, PCB, PAH) terjedését és ülepedését írja le (l. pl.: **6. ábra**) (<http://www.emep.int/>).



6. ábra. *EMEP/MS-C-E* Központ által 2009-ben végzett mérés a kadmium-koncentrációra Európában és Közép-Ázsiában. A bal oldali ábrán a levegőben számított és mért felületi kadmium-koncentráció látható, míg a jobb oldali ábrán az egy év alatt lerakódott kadmium mennyisége figyelhető meg. (Ilyin et al., 2011)

A másik központ az *EMEP/MS-C-W*, melynek székhelye a Norvég Meteorológiai Intézet. Ezen központ fő feladata a savasodást és eutrofizációt okozó vegyületek (S, N), a talajközeli ózon (O₃) és a szilárd részecskék (PM_{2.5}, PM₁₀) diszperziójának és lerakódásának a leírása (l. pl.: **7. ábra**) (<http://www.emep.int/>).



7. ábra. EMEP/MSC-W Központ által 2009-ben végzett tanulmány a levegőben található ammónia (NH_3) és ammóniumion (NH_4^+) koncentráció éves átlagáról. A bal felső ábrán a modellezett, a jobb felső ábrán a mért ammónia és ammóniumion koncentráció látható. A bal alsó ábrán az interpolált normalizált eltérések vannak feltüntetve. A jobb alsó ábrán a kombinált ammónia és ammóniumion koncentráció figyelhető meg. (Fagerli et al., 2011)

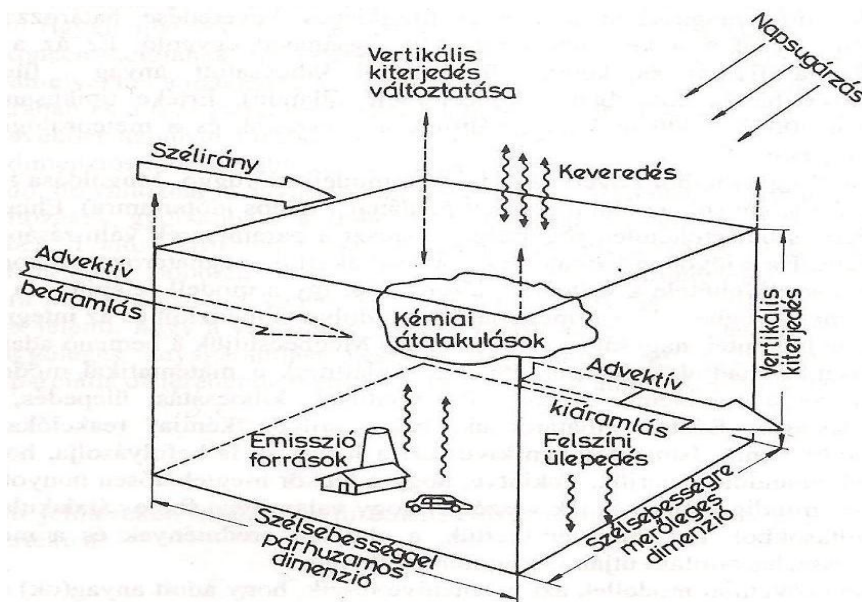
2.2.4 Doboz- (boks-) modell

A levegőkémiai folyamatok jellegzetességeinek, a környezeti viszonyok hatásának a leírását a 0-dimenziós Doboz- vagy más néven Boks- modellekkel (8. ábra) tehetjük meg a legegyszerűbben. A modell feltételezi, hogy a térfogatában ideális a keveredés és nincs turbulencia. Így a koncentrációváltozást az ülepedés és a kémiai reakciók okozzák. A dobozban lévő koncentráció (C_i) időegység alatti megváltozása a következő lesz:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{u(C_{i0} - C_i)}{l} + S_i \pm R_i + \frac{w_v(C_{ih} - C_i)}{h} - \frac{v_{id}}{h} C_i.$$

A doboz által határolt térfogatba kémiai anyag (pl.: i komponens) csak a felszínen lévő forrásokból (S_i) juthat. Az egyenlet első tagja az advekciót fejezi ki, ami a vízszintes mozgásból (u sebesség) adódik. A második tag a felszínen lévő forrásokat (S_i) adja.

A harmadik tag a dobozban lejároló fotokémiai és termikus kémiai folyamatokat (R_i) fejezi ki. Ez lehet pozitív és negatív is. Negatív előjelű a tag, ha a folyamatok által csökkentet reaktív komponensek száma nagyobb, mint a növelt végtermék koncentráció. Fordított esetben pozitív előjelű a tag. Az egyenlet negyedik tagja a turbulens diffúzió miatt kialakult keveredést fejezi ki. Ez a tag is lehet pozitív illetve negatív előjelű, attól függően, hogy a doboz előtti, illetve fölötti koncentráció (C_{ih}) hogyan viszonyul a dobozban lévő koncentrációhoz. A negyedik tagban található w_v ventilációs sebesség a vertikális irányú átkeveredés mértékét adja meg. Végül az egyenlet ötödik tagja az ülepedést fejezi ki (ahol v_{id} ülepedési sebesség), amely mindig negatív előjelű és a koncentrációval arányos tömeget juttat a felszínre.



8. ábra. Doboz-modell elvi vázlat (Mészáros, 1997)

Az l és a h a doboz dimenziói, melyeknek a megválasztása a vizsgált problémától függ. Tipikus példa egy adott város emissziójának a levegő minőségére való hatásának az elemzése. Ekkor az l dimenzió a város kiterjedésével egyenlő, míg a h dimenziót – a magasságot – a levegő függőleges keveredése határozza meg, a magasság így egyenlő a keveredési réteg vastagságával. A keveredési réteg az a magasság, ameddig a kémiai és fizikai forrásokból származó szennyezőanyag függőlegesen összekeveredik. Ennek értéke általában 500 és 2000 méter között változik az évszakok és a meteorológiai helyzet függvényében.

A Doboz-modellel két módon végezhetünk számításokat. Az egyik mód, az Euler-féle közelítés. Ekkor a doboz a felszínhez van rögzítve, azaz a kémiai változásokat adott

földrajzi helyre vonatkozóan határozzuk meg. Előnye, hogy mivel a mérőállomások helye rögzített, így a mérési és számítási eredményeket egyszerűen és egyértelműen össze tudjuk hasonlítani.

A másik mód, a Lagrange-féle közelítés, amikor a doboz együtt mozog a légáramlással. Ezzel a modellel a mozgó levegőben végbemenő kémiai folyamatokat írjuk le. Ezen mód hátránya, hogy a mérési eredmények összehasonlítása a számított eredményekkel bonyolultabb.

A Doboz modellek előnye az egyszerűség, ami egyben hátrányt is jelent, mivel további térdimenziók figyelembe vételével javíthatjuk a számításaink eredményét és pontosságát (*Mészáros, 1997*).

3. Hazai modellezés áttekintése

Magyarországon a kezdeti modellezések egyszerű Gauss-féle közelítésre épültek, melyek figyelembe vették a hazai környezetvédelmi jogi szabályozás követelményeit, ezáltal lehetőséget biztosítva a hazai környezetvédelmi hatóságoknak a levegőminőség ellenőrzésére (Bozó *et al.*, 2006). Ezek kezdetleges modellek voltak, melyek csupán egyszerűbb számítások megoldására voltak képesek. A meteorológiai mérési módszerek fejlődése, a planetáris határréteg dinamikájának pontosabb megismerése és a számítástechnika nagymértékű újításai következtében egyre fejlettebb modellek jöttek létre.

1984 és 1989 között a Központi Kémiai Kutató Intézet és az Országos Meteorológiai Szolgálat egy Lagrange-típusú modellt dolgozott ki Budapest légszennyezettségének vizsgálatára. A modell magába foglalt egy részletes, fotokémiai szmog leírására alkalmas kémiai mechanizmust, továbbá figyelembe vette a száraz- és nedves ülepedést. A keveredési réteg vastagságának változásával fellépő légcserét is figyelembe tudta venni a modell. A meteorológiai állapothatározók közül a hőmérséklet, a légnedvesség, a szélirány, a borultság, a csapadékintenzitás és a keveredési réteg vastagsága szerepeltek. Az emisszió, továbbá a szél iránya és sebessége hely- és időfüggő volt. A modell legfőbb hátránya a meglehetősen durva rács használata volt; 7×7 km-es rácsokra osztotta fel a fővárost. További hátrány, hogy homogén száraz ülepedési sebességet vett számításba a modell, ezen felül a szél kivételével az összes többi meteorológiai változó esetén homogén meteorológiai mezőt feltételezett. Ezen hátrányok következtében a modellel végzett számítások durva közelítései voltak a valóságnak (Lagzi, 2003).

Az 1990-es évek közepén a Központi Fizikai Kutató Intézet Atomenergia Kutatóintézete adaptálta az *ISC2* (Industrial Source Complex 2) programot, amely pontforrásból kibocsátott szennyezőanyag leírására alkalmas. Ez egy Gauss-típusú modell, melyet hazánkban, főleg az erőműveinkből kibocsátott kén-dioxid és vanádium terjedésének szimulálására használtak. A program által mért eredményeket az *ArcView* nevű térinformatikai programcsomaggal jelenítették meg (Lagzi, 2003).

Ugyancsak az 1990-es években került sor az *ADMS-Urban* (Atmospheric Dispersion Modeling System) modell adaptálására. A modell rendelkezik egy meteorológiai előfeldolgozó résszel, amely a meteorológiai állapothatározókat

különböző bemenő adatokból számítja ki, melyek lehetnek óránként átlagolt vagy statisztikai adatok. A modell előnye a korabeli társaival szemben a részletes (1 km × 1 km-es) térbeli felbontás, és a részletes emisszió-adatbázis használata. A számított eredmények megjelenítése az *ISC2*-höz hasonlóan, itt is az *ArcView* térinformatikai programcsomaggal történik. A modell további előnye, hogy figyelembe veszi a kémiai reakciók hatását, továbbá rendelkezik beépített utcahasadék, összetett domborzat feletti és épületek körüli légáramlás szimulációjára képes modullal (*Lagzi, 2003*).

2003-ban az EU Phare program támogatásával telepítették Magyarországon a *RODOS* (**R**ealtime **O**nline **D**ecision **S**upport) rendszert. Ez egy integrált modell, mely összekapcsolja az előrejelzési modellt a döntéshozó és tanácsadó szoftverekkel, így kulcsfontosságú adatokat szolgáltat vészhelyzet esetén a megfelelő védelmi stratégia kidolgozásához. Ez egy EU követelményeinek megfelelő nukleáris baleset-elhárítási döntéstámogató rendszer. A *RODOS*-t a legtöbb EU tagország használja, így egy esetleges országhatárokon átnyúló nukleáris csóva modellezésére is alkalmas. A rendszer emellett vegyi és biológiai vészhelyzetek kezelésére is használható (*Vincze et al., 2006*). A magyarországi *RODOS* rendszer az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (OKF) bázisán működő Nukleáris Baleseti és Értékelő Központban üzemel. A rendszer fix- (pl.: DTA-50 típusú, magyarországi 1:50000-es digitális térképészeti adatbázis) és on-line (pl.: az OMSZ által *ALADIN* modellel 12 óránként készített, órás felbontású, 36 órára vonatkozó országos prognózis adatok) adatokat és adatbázisokat használ a működéséhez. A *RODOS* rendszer előnye a többi hasonló rendszerrel szemben a négy szintű döntéstámogatás. Ezen négy szint a következő:

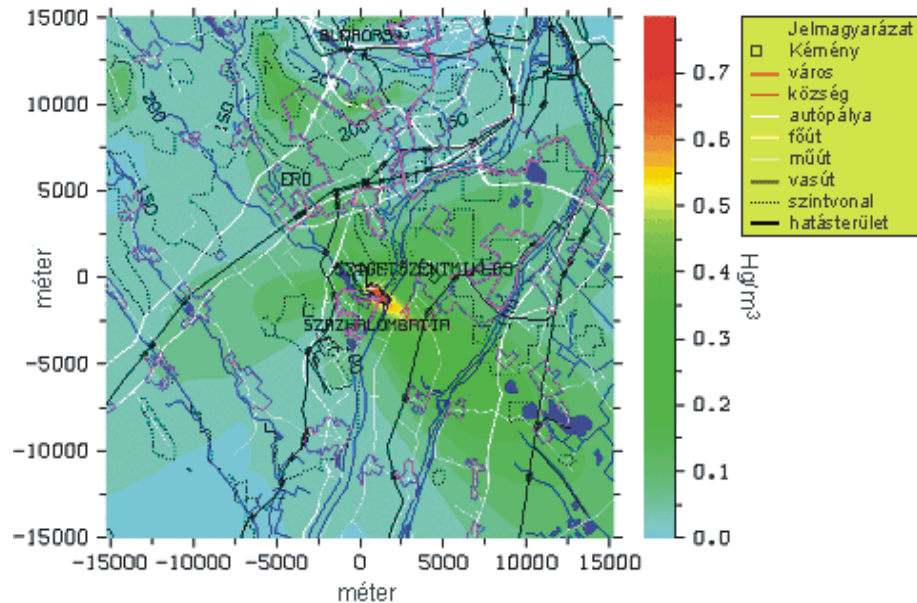
- *0. szint*: radiológiai adatok gyűjtése, ellenőrzése és megjelenítése,
- *1. szint*: radiológiai helyzet tér- és időbeli megjelenítése,
- *2. szint*: lehetséges beavatkozások szimulációja
- *3. szint*: alternatív óvintézkedési stratégiák értékelése és rangsorba állítása előnyeik és hátrányaik alapján.

Ezeket az elemzéseket a *RODOS* rendszer három alrendszere végzi. Első alrendszer az *Elemzést végző alrendszer*, amely a *0.* és az *1. szint* feladatait hajtja végre. A második az *Óvintézkedéseket kidolgozó alrendszer*, amely a lehetséges beavatkozásokat szimulálja (*2. szint*). A *3. szint* feladatait pedig az *Értékelő alrendszer* végzi. Magyarországon a *RODOS* a nemzeti döntéstámogató rendszerrel (*SINAC*) párhuzamosan kerül

felhasználásra. A *SINAC* a Központi Fizikai Kutató Intézet Atomenergia Kutató Intézetében kifejlesztett nemzeti programrendszer, amely az atomerőműi balesetek környezeti hatásainak elemzéséhez nyújt segítséget. Ez egy off-line rendszer, azaz közvetlen mérési adatok felhasználása nélkül működik. A program megbecsüli a radioaktív csóva terjedési útvonalát, a csóvából származó külső és belső sugárterheléseket és a radioaktív anyagok talajra történő kiülepedését. A lakosság területi eloszlását figyelembe véve a modell kiszámítja a kollektív dózisokat (amely egy csoport vagy akár a népesség sugárterhelését mutatja; értéke a sugárterhelést szenvedett egyedek számának és az egyedek átlagos dózisának a szorzata (*Somlai et al.*, 1999)). A modell a szimulált órák végén az addigi eredmények elemzése és mérlegelése alapján óvintézkedési javaslatokat ad (<http://www.katasztrofavedelem.hu/>).

2004-ben került bevezetésre Magyarországon az USA Környezetvédelmi Hivatala által fejlesztett *AERMOD*, amely egy lokális szennyezőanyag terjedést leíró modell. Az *AERMOD* modellrendszer a főprogramból (*AERMOD*) és három preprocesszorból (*AERMAP*, *AERMET* és *INTERFACE*) áll. Az *AERMAP* a koncentráció eloszlás vizsgálatához szükséges receptorpont-hálózat előállítását végzi. Az *AERMET* a planetáris határréteg jellemzéséhez szükséges meteorológiai információt szolgáltatja. Az *INTERFACE* meghatározza a szél, a hőmérséklet, a vertikális potenciális hőmérsékleti gradiens, a vertikális és horizontális turbulencia profiljait, és ezen információkat továbbítja a főprogram számára (*Bozó et al.*, 2006). Az *AERMOD* egy második generációs diszperziós modell, mellyel főleg ipari forrásokból (pont, terület, térfogat) származó szennyezőanyagok modellezését végezzük (<http://www.met.hu>). A modell legnagyobb előnye az elődeihez képest, hogy a legújabb elméleteket használva a felszíni és felszínközeli réteg hőtani és áramlástan paramétereinek kiszámításával lehetőséget nyújt planetáris határréteg dinamikájának jellemzésére. A modell figyelembe veszi a planetáris határréteg vertikális szerkezetét és az inhomogenitását (*Bozó et al.*, 2006). További előny, hogy a modell a domborzat áramlásmódosító hatását is kezelni tudja. Az *AERMOD* futtatásához felszíni és magassági adatokra van szükség. A felszíni meteorológiai mezők órás bontásban, míg a magaslégköri mezők napi bontásban állnak rendelkezésre. Az alábbi felszíni meteorológiai input paraméterek szükségesek a modell futtatásához: szél iránya és sebessége, hőmérséklet, nedvesség, valamint a felhővel való borítottság. A magassági adatok közül a szél iránya és sebessége, a hőmérséklet, a nedvesség, továbbá a felszíntől számított 500 hPa-ig a geopotenciál értékek szükségesek a modell működéséhez (<http://www.met.hu>).

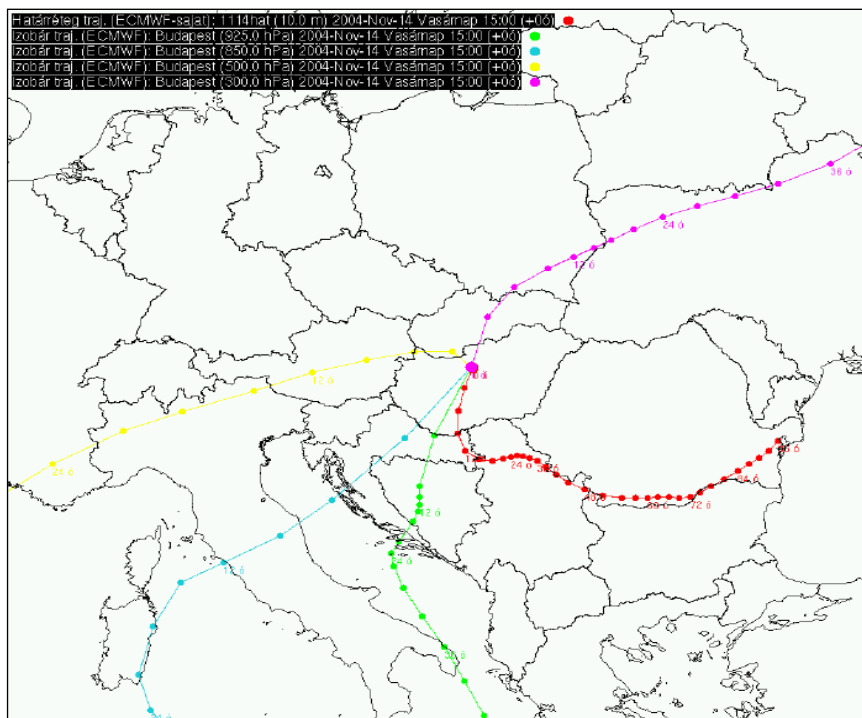
Magyarországon az *AERMOD* modellt az ipari szennyeződések terjedésének lokális skálán történő modellezésére, továbbá a Környezetvédelmi Felügyelőség számára készített hatásvizsgálatokra használják.



9. ábra. Éves átlagos NO_x koncentráció eloszlás megjelenítése az *AERMOD* rendszerben (<http://www.met.hu>).

Az Országos Meteorológiai Szolgálat és az Országos Atomenergia Hivatal között 2004-ben létrejött együttműködés keretében került adaptálásra a *FLEXTRA 3.0* modell, amely egy trajektória számoló programcsomag. A program a hagyományos izobár szintekre készített légrézecske-pályák mellett más típusú trajektóriákat is képes számolni. A modell 5 féle trajektóriát számol backward (a szennyezés eredetét határozza meg) és forward (a szennyeződés várható térbeli mozgását jelzi előre) módon: izobár szintekre (l. pl.: 10. ábra), modell szintekre, a keveredési rétegben, izentróp felületekre, továbbá a vertikális komponens figyelembe vételével 3 dimenziós módon. A modell bemenő adatait az *ALADIN/HU* (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) és az *ECMWF* (European Centre for Medium Range Weather Forecasts) modellek adják. A *FLEXTRA*-val elkészített trajektóriák grafikus megjelenítésére az OMSZ által kifejlesztett *HAWK* (Hungarian Advanced Workstation) nevű, térképes megjelenítésre alkalmazható rendszert használjuk. A trajektória megjelenítése a felhasználó által megadott tetszőleges pontra, időpontra és trajektória típusra történik. A modellel ezen kívül csoportos trajektóriákat is ábrázolhatunk,

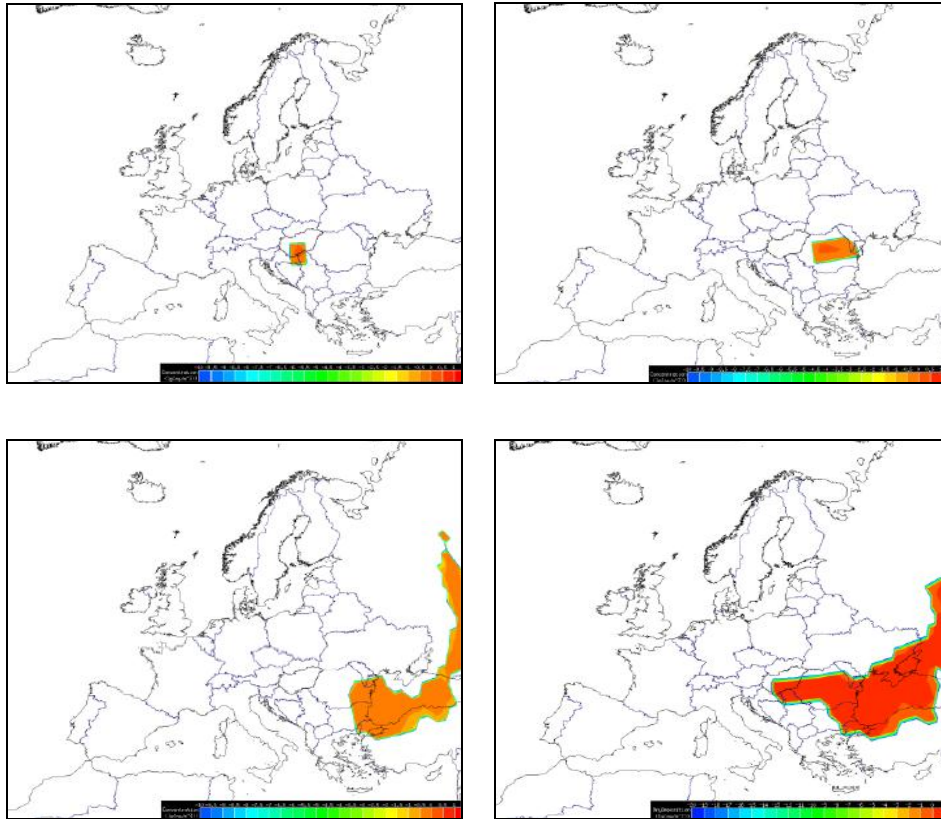
továbbá lehetőség van a trajektóriák bizonytalanságának kiszámítására is (Labancz, 2004).



10. ábra. Határréteg és izobár trajektóriák, 2004.11.14., 15:00 UTC, Budapest (Labancz, 2004).

Az Országos Meteorológiai Intézet által használt modellek között érdemes megemlíteni a Norvég Levegőkutató Intézet (NILU - Norwegian Institute for Air Research) által kifejlesztett *FLEXPART* modellt (<http://transport.nilu.no/flexpart>). Ez egy Lagrange-típusú diszperziós modell, melynek segítségével a szennyezőanyagok nagytávolságú transzportját, diffúzióját, száraz- és nedves ülepedését tudjuk meghatározni (Stohl *et al.*, 2010). A *FELXTRA*-hoz hasonlóan ez is egy nyílt forráskódú modell, mely használható backward és forward módban is; pont, vonal, területi vagy térfogati szennyeződéscsúszás esetén. További hasonlóság a két modell között, hogy mindkettő bemenő adatait az *ECMWF* modell adja. Az operatíván futtatott *ECMWF* modell 3 órás időlépcsővel tudja számolni a hő- és momentum fluxusokat, így a *FLEXPART* a dinamikus sebességet és hőmérsékletet ki tudja számolni operatív módon. Ennek következtében a *FLEXPART* a legmodernebb meteorológiai egyenleteket tudja felhasználni a planetáris határréteg magasságának és parametrizációjának meghatározásához (Mészáros *et al.*, 2009). A 11. ábrán a Paksi Atomerőműben bekövetkező feltételezett nukleáris baleset szimulációja látható. A szimuláció kezdete:

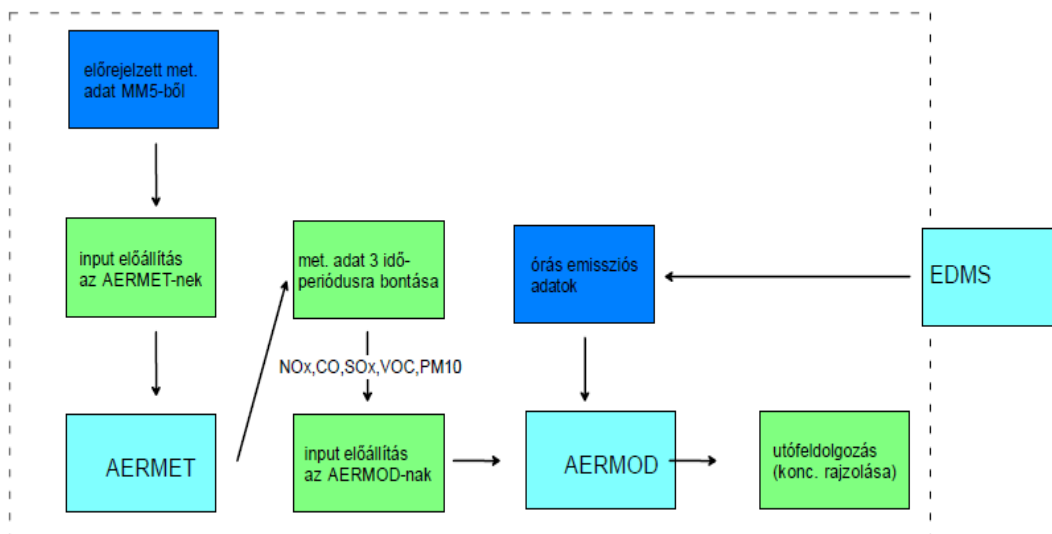
2004.06.15. 12 UTC, a kibocsátás időtartama 2 óra, magassága 120-125 méter. A kibocsátott szennyezőanyag teljes mennyisége 1 kg, a kibocsátott részecskék száma 1000.



11. ábra. Szennyezőanyag csóva koncentráció mezőjének a kibocsátástól számított +6 óra (bal felső panel), +24 óra (jobb felső panel), + 60 óra (bal alsó panel) elteltével, illetve a teljes ülepedésnek (jobb alsó panel) a szimulációja egy, a Paksi Atomerőműben feltételezett baleset esetén (Mészáros et al., 2009).

A Központi Fizikai Kutató Intézet koordinálásával az Országos Meteorológiai Szolgálat elvállalta, hogy diszperziós számításokat végez a Liszt Ferenc repülőtér környékén, erre a célra pedig adaptálták az **EDMS** (**E**missions and **D**ispersion **M**odeling **S**ystem) modellt. Ezen modell diszperziót számláló modulja, az OMSZ által évek óta használt – általam fentebb ismertetett – **AERMOD** diszperziós modell. Ezen modellek használatával a Meteorológiai Szolgálat kidolgozott egy új előrejelző modellrendszert, mellyel az elvárt mértékben képes a légszennyezettség előrejelzésére a Liszt Ferenc repülőtéren és annak közvetlen környezetében. A modellrendszer felépítése a **12. ábrán** látható. Az új rendszer öt különböző szennyezőanyagra (NO_x , SO_x , CO, VOC, PM10) képes napi átlagos diszperziós előrejelzéseket készíteni. Ezen légszennyezők forrásai eltérnek; az NO_x -ot főleg a repülőgépek bocsátják ki, CO és VOC a repülőtér

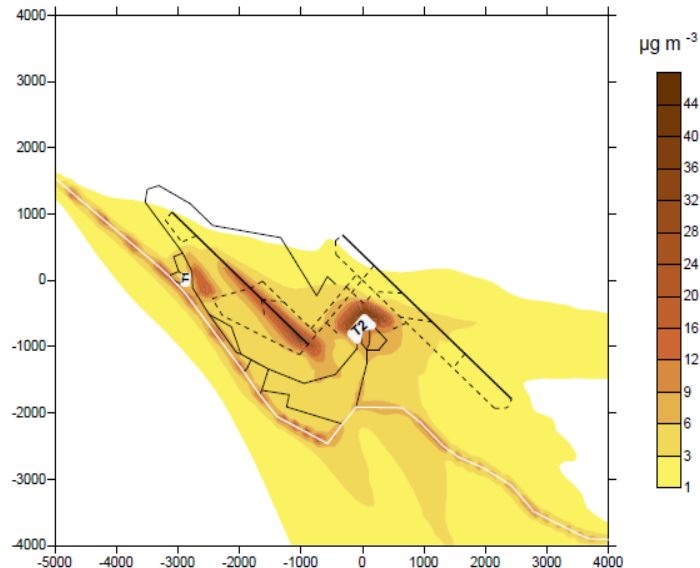
környezetében elhaladó gépjárműforgalomból adódik, míg a SO_x és PM_{10} koncentrációk a földi kiszolgáló egységek hatására alakulnak ki (Steib *et al.*, 2008).



12. ábra. OMSZ által kifejlesztett és 2008 júniusától használt előrejelző modellrendszer felépítése. A sötétkék téglalapok az input adatok, a zöld téglalapok az OMSZ által fejlesztett programok, míg a világoskék téglalapok a diszperziós számításokat végző programok (Steib *et al.*, 2008).

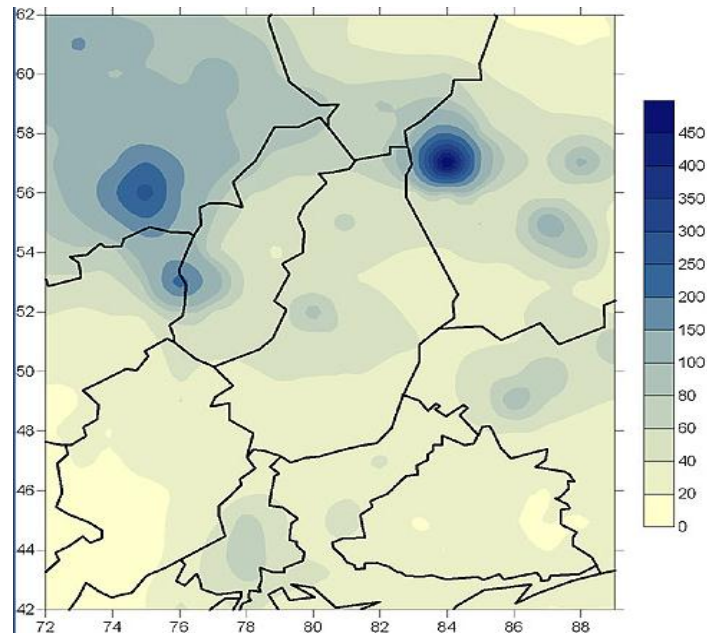
A modell számításaihoz szükséges input meteorológiai adatokat az OMSZ-nél operatíván működő *MM5* (PSU/NCAR mesoscale model) numerikus időjárás-előrejelző modell szolgáltatja. Az *EDMS* órás adatokat tartalmazó 24 órás diszperziós meteorológiai adatbázist állít elő, mely adatbázist 3 különböző részre oszt fel (0–12 óra, 12–18 óra, 18–24 óra). Ezekben az időintervallumokban történik meg a széladatok kiértékelése és átlagolása. Ez a három szellőkészkomponens határozza meg az adott időintervallumban felhasznált emissziós inputokat, ezután az intervallumokban külön-külön megtörténik a diszperzió számítása. A számítás végén előállnak a különböző szennyezőanyagokra vett napi átlagos koncentráció értékek az egyes időintervallumokban (Steib *et al.*, 2008). A **13. ábra** bemutat egy számítást, melyet a Liszt Ferenc repülőtér és környékén végeztek: A bemutatott ábrán a vastag fekete folytonos vonalak a kifutópályákat, a fekete szaggatott vonalak a „taxi-utakat”, a vékony fekete folytonos vonalak a repülőtérhez vezető utakat és a reptér belső útjait, a fehér vonal a repülőtér mellett elhaladó 4-es utat, míg a T1 és T2 feliratú két fehér poligon a két Terminált jelöli. A számítás azt mutatja, hogy a repülőtér és a mellette elhaladó 4-es út járulékos hatása a környezetre közel azonos nagyságrendű. Mivel a repülőgépek NO_x emissziója felszállás közben a legmagasabb, így nem meglepő módon a felszállási hely közelében figyelhető meg az NO_x maximuma. A két Terminál mellett

megfigyelhető magas NO_x koncentráció a földi kiszolgáló egységek miatt alakul ki. A két terminál között észlelhető NO_x koncentráció eltérés abból adódik, hogy az 1. Terminál (T1) forgalma a harmada a 2. Terminálnak (T2).



13. ábra. Napi átlagos NO_x koncentráció ÉNY-i szél esetén a Liszt Ferenc repülőtéren és közvetlen közelében (Mészáros et al., 2009).

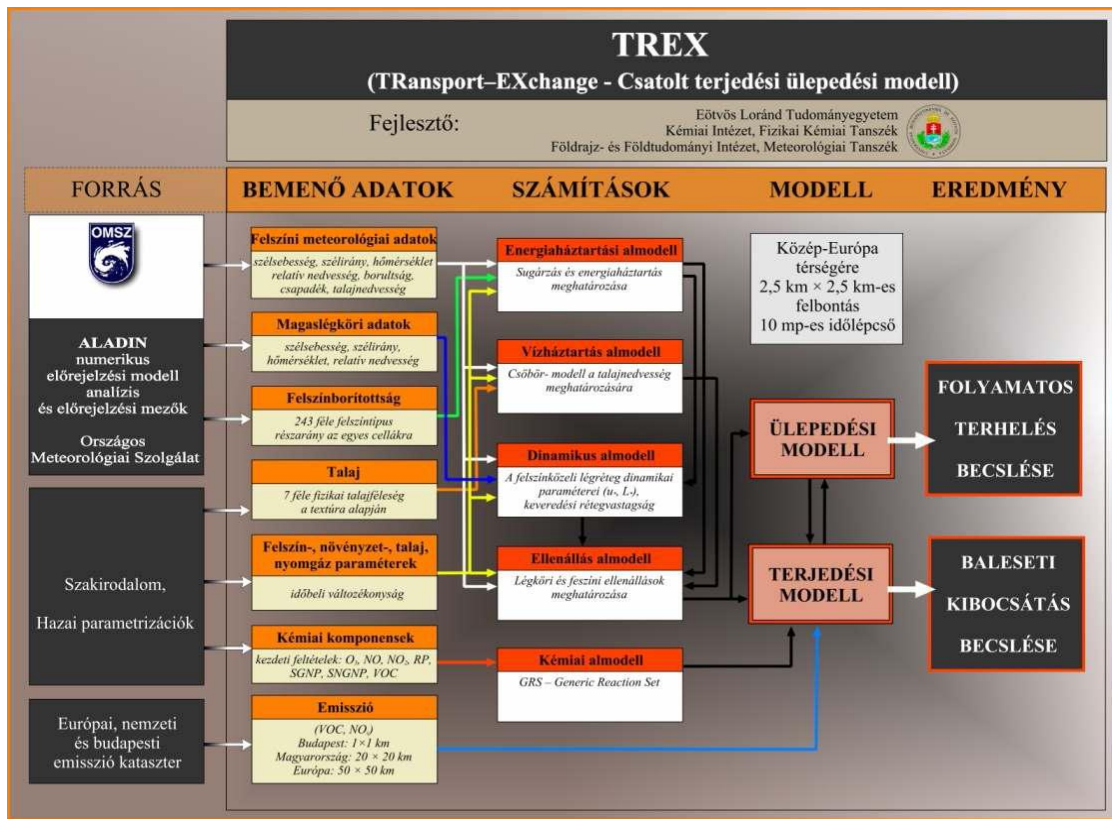
A fent említett Gauss- és Lagrange-típusú modellek mellett az általam a **2.2.3.2** fejezetben részletesen kielemezett Euler-típusú *EMEP* modellt is alkalmazzák hazánkban. Az *EMEP*-hez szükséges bemenő adatok (hőmérséklet, szél csapadék, sugárzás, felhőzet, borultság, stb.) az *ECMWF* mérései alapján állíthatóak elő. A legfejlettebb változata (melyet hazánkban is használnak) összesen húsz vertikális réteget tartalmaz és 49 légtörési komponens vizsgálatát egyidejűleg. Az *EMEP* modell nehézfémek (Cd, Pb, Hg), perzisztens szerves szennyezőanyagok (POP, PCB, PAH), savasodást és eutrofizációt okozó vegyületek (S, N), a talajközeli ózon (O_3) és a szilárd részecskék ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) diszperziójának és lerakódásának a leírása alkalmazható. Magyarországon, azonban a toxikus nehézfémek (ólom, kadmium, cink, arzén) leírására nem az *EMEP* modellt használják, hanem az Országos Meteorológiai Intézet (OMSZ) és a Nemzetközi Alkalmazott Rendszerelemző Intézet (IIASA) által közösen kifejlesztett *TRACE* nevű modellt alkalmazzák. Ez a modell is megfelelő mértékben leírja a toxikus nehézfémekkel kapcsolatos nagytávolságú európai légtörési transzportot, illetve légtörési ülepedést. A **14. ábrán** egy *TRACE* modellel végzett tanulmány eredménye látható:



14. ábra. A légköri ólom teljes ülepedésének mértéke Közép-Európában 2002-ben ($\text{g}/\text{km}^2 \text{ év}$) (<http://www.met.hu>).

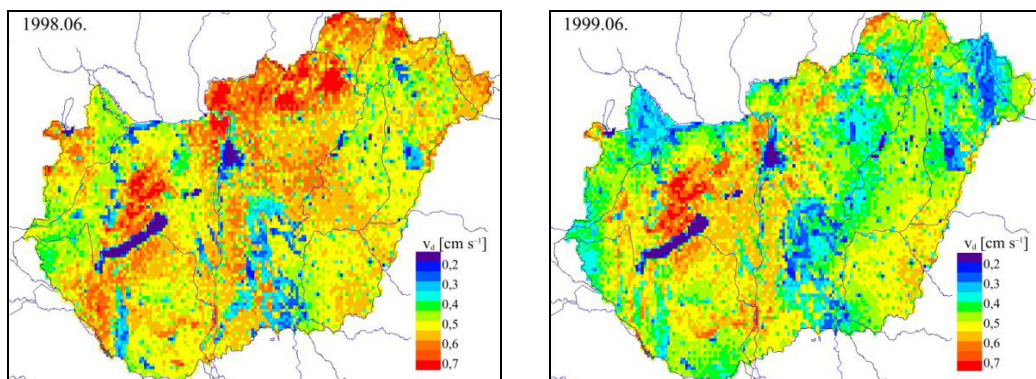
Végül, de nem utolsó sorban az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén kifejlesztett kvázi-3-dimenziós Euler-típusú *TREX* (**TR**ansport **EX**change) modellről tesztek említést. A *TREX*-et baleseti kibocsátások modellezéséhez (elsősorban Paksi Atomerőmű) alkották, alkalmas különböző szennyezőanyagok terjedésének és kémiai reakcióinak a leírására. A modell a légkör vizsgált részét függőleges irányban rétegekre bontja, mely rétegekben külön-külön 2-dimenziós modellek írják le a koncentráció változását. A rétegek közötti függőleges anyagtranszportot a turbulens diffúziós egyenlet alapján számítjuk. A modell 32 magassági szintet különböztet meg, melynek következtében minél pontosabban írja le a vertikális keveredést (*Vincze et al.*, 2006). A *TREX* modell működése a **15. ábrán** tekinthető át. A modell a szükséges bemenő meteorológia adatokat az OMSZ-nél futtatott *ALADIN* előrejelző rendszerből veszi. A program a megfelelő bemenő adatokból számítással állítja elő az almodelleket. Ezen almodellekből áll össze a terjedési és ülepedési modell, melyekkel becsülni tudjuk a folyamatos és a baleseti terheléseket (*Dombóvári et al.*, 2008). A modell vezérlőegysége végzi az adatok beolvasását, a különböző függvények meghívását és ciklusba szervezését, továbbá az eredmény kiírását. Az első almodul a horizontális és vertikális feltételeket adja meg. Külön modul végzi az advekciónak a számítását, a magassági szintek meghatározást, illetve horizontális és vertikális diffúzió számítását is (*Vincze et al.*, 2006). A program minden időlépésben kiszámolja a légkörben lévő részecskék

koordinátáit, továbbá megvizsgálja, hogy az adott részecskének az adott időlépésben megfigyelhető-e kiülepedése vagy elbomlása (Dombovári et al., 2008).



15. ábra. A TREX modell felépítése (Dombovári et al., 2008).

A 16. ábrán az ózon száraz ülepedésének térbeli eloszlása látható, melyet a TREX-el modelleztek. A bemenő meteorológiai mezőket az ALADIN modell szolgáltatta, a számításokat 2,5 km × 2,5 km-es felbontású szabályos rácson végezték. Az ábráról leolvasható, hogy az azonos hónapokban is jelentős eltérések alakulhatnak ki az eltérő időjárási helyzet miatt, továbbá az ülepedési sebesség értékére nagy befolyással van a növényállomány fajtája is.



16. ábra. Az ózon átlagos 12 UTC-s ülepedési sebessége 1998 és 1999 júniusában (Mészáros et al., 2009).

4. Egy egyszerű terjedési modell alkalmazása

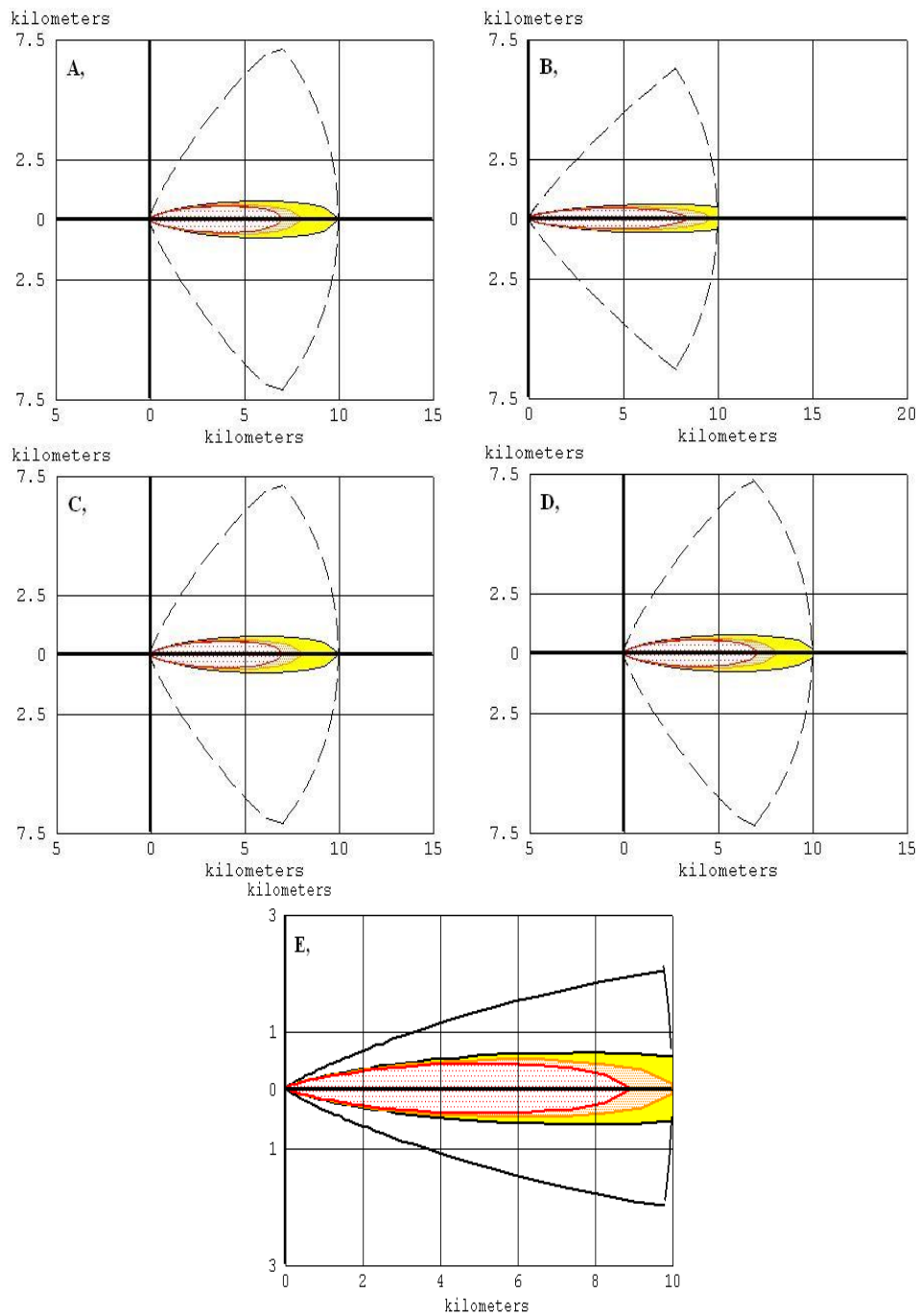
4.1 A modell bemenő adatai

Ezen fejezetben a 2.2.1.2 pontban bemutatott *ALOHA* (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) egyszerű gaussi modellel végeztem számításokat. Ez az egyszerű kezelőfelületű és gyors futási idejű modell megfelelően alkalmazható egy esetlegesen bekövetkező vegyi katasztrófa esetén. Gyors eredményei miatt nagymértékű segítséget nyújt a beavatkozó szerveknek, így a beavatkozás rövid időn belül megkezdhető. A modell alkalmas érzékenységi vizsgálatok végzésére is (*Bubbico and Mazzarotta*, 2008).

Munkámban egy Budapest területén esetlegesen bekövetkező kibocsátás következményeit mutatom be, különböző meteorológiai körülmények között. A vizsgálatok során fiktív baleseteket szimuláltam. Ezek során a xenon, mint normál körülmények között inaktív gáz terjedését elemeztem, azt vizsgálva, hogy az egyes légköri állapotváltozók milyen mértékben befolyásolják a szennyezőanyag diszperzióját. A bemenő adatokat a modell grafikus felületén kell megadni, melyek közül állandónak tekintettem az alábbiakat: 1, északnyugati szélirány (Budapest átlagos széliránya), 2, 1500 méter az inverzió magassága (amikor a meleg légtömeg felsiklik a hidegebbre). A változó adatok a következők: a kibocsátás magassága, a szélesség, a borultság mértéke, a hőmérséklet, illetve a relatív nedvesség értéke. A modell futtatása során egy eseti és egy folyamatos kibocsátást modelleztem különböző meteorológiai körülmények között. Az eseti kibocsátás forrása 3 méter magasan van (pl.: egy teherautó közúti balesete), a kibocsátott xenon mennyisége 100 kilogramm. A folyamatos kibocsátás forrása 100 méter magasan található (pl.: egy gyárkémény), a kibocsátott anyag mennyisége 0.1 kg/s, mely 30 percig tart. A modell alapértékei a következők: szélesség 3 m/s, borultság 2 okta, hőmérséklet 15 °C, relatív nedvesség 25%. Ezen meteorológiai változókat egyenként módosítottam, így vizsgálva, hogy milyen hatással vannak a szennyezőanyag terjedésére. A modell a szimulációt a felszíntől számított 10 méter magasságban végzi. A modell eredményei megadják azon területeket, ahol a szennyezőanyag koncentrációja előre definiált határértékeket túllép, valamint a terjedés irányát, továbbá a csóva által érintett területen és a rajta található házakban a szennyezőanyag koncentráció időbeli lefutását.

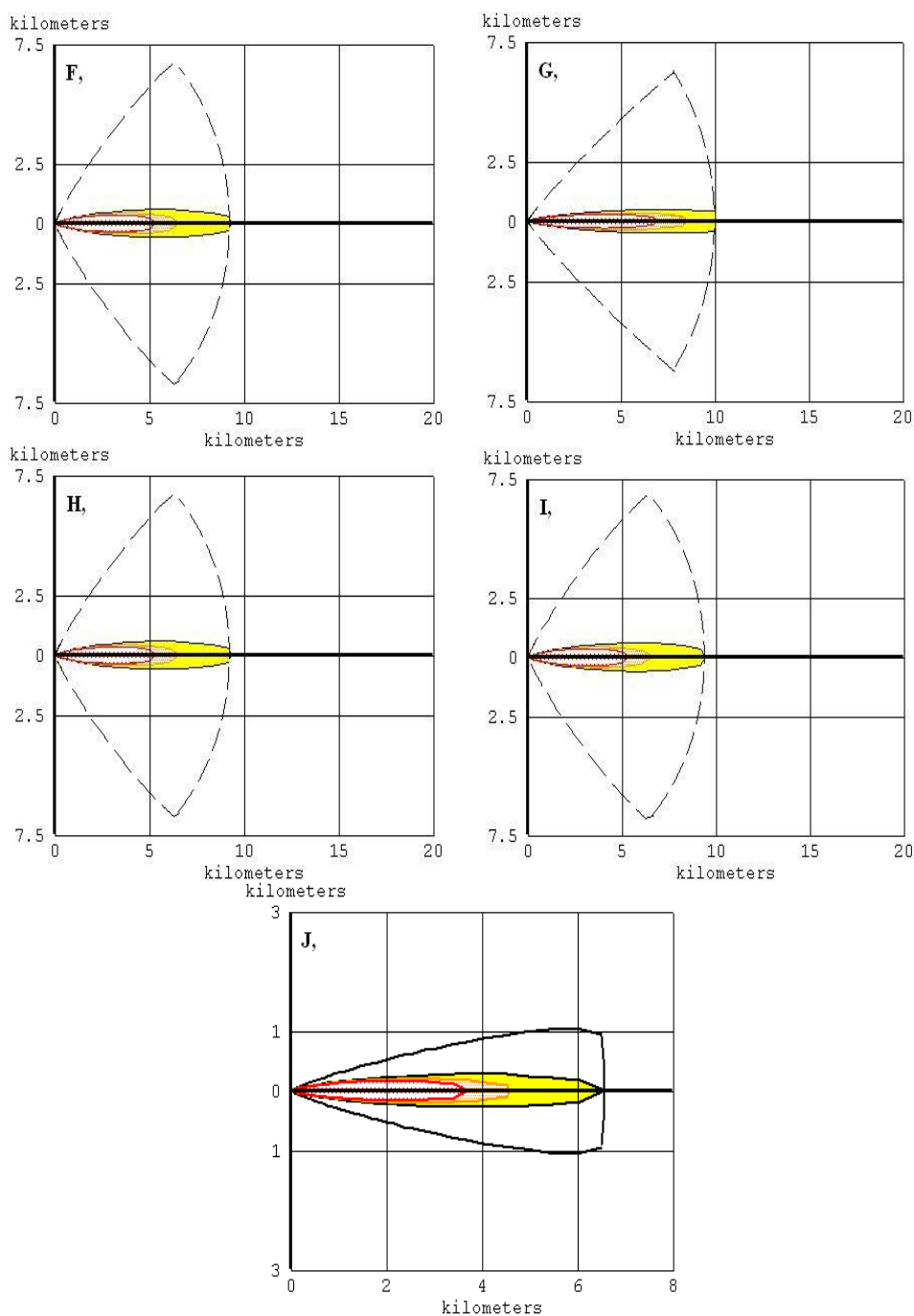
4.2 Eredmények

Az ALOHA térképen jeleníti meg azokat a területeket, ahol a szennyezőanyag koncentrációja eléri az ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) határértékek valamelyikét. A piros, narancssárga és sárga színű területek az ERPG-3, ERPG-2, illetve az ERPG-1 határértékek túllépését jelentik (Leelőssy, 2010).



17. ábra. Eseti kibocsátás modellezése az ALOHA-val. Az „A” ábra jelöli az alaphelyzetet: szélsebesség 3 m/s, borultság 2 okta, hőmérséklet 15 °C, relatív nedvesség 25%. B-E ábrákon egy-egy meteorológiai állapotjelző változik: borultság 8 okta (B), relatív nedvesség 75% (C), hőmérséklet 25 °C (D), illetve szélsebesség 10 m/s (E).

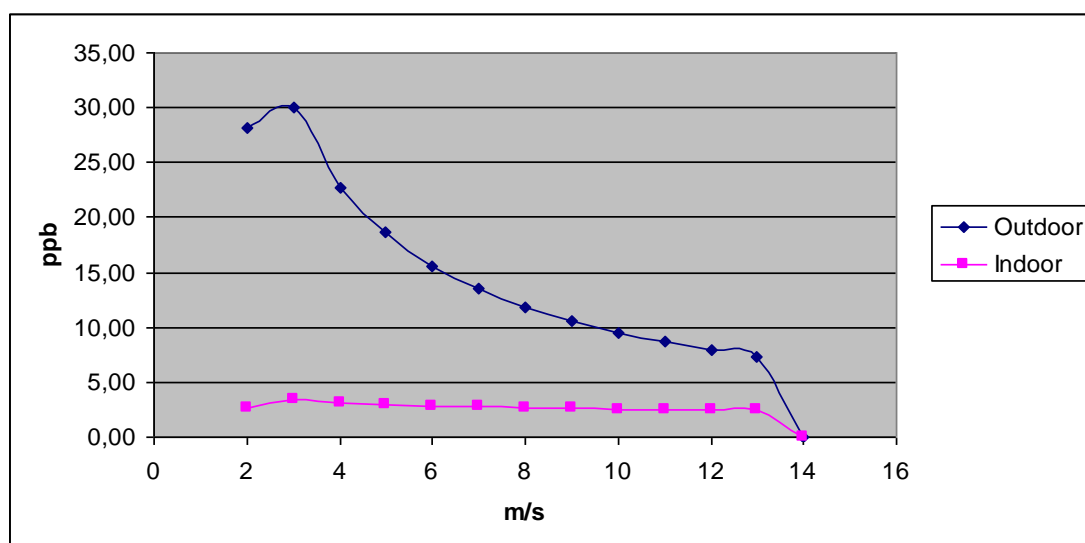
Természetesen egyéni határértékek is beállíthatók, a munkámban én ezt alkalmaztam. Az általam beállított határértékek a következők: piros terület 30 ppb, narancssárga terület 20 ppb, míg a sárga terület 10 ppb. A **17. ábrán** az egyszeri kibocsátás következtében kikerült xenon terjedése, míg a **18. ábrán** a 30 percig tartó folyamatos kibocsátásban kikerült xenon terjedése látható, különböző meteorológiai helyzetekben.



18. ábra. Folyamatos kibocsátás modellezése az ALOHA-val. Az „F” ábra jelöli az alaphelyzetet: szélesség 3 m/s, borultság 2 okta, hőmérséklet 15 °C, relatív nedvesség 25%. G-J ábrákon egy-egy meteorológiai állapotjelző változik: borultság 8 okta (G), relatív nedvesség 75% (H), hőmérséklet 25 °C (I), illetve szélesség 10 m/s (J).

A két ábráról leolvasható, hogy a szennyezőanyag terjedésére a szélesség van a legnagyobb hatással, de a borultság mértéke is fontos tényező. Ellenben a relatív páratartalom és a hőmérséklet értéke nem, vagy csak nagyon csekély mértékben befolyásolja a légszennyezés terjedését. Folyamatos kibocsátásnál nagyobb szélesség mellett a modell kisebb szennyezőanyag koncentrációt szimulál. Ez annak köszönhető, hogy ez esetben a kibocsátás magassága 100 méter volt, ezzel szemben a szimuláció a 10 méter magasán lévő koncentrációmennyiséget jelzi. A kibocsátási magasságban az erősebb szél „elfújhatja” a szennyezőanyagot, így a csóvának csak a kisebb része éri el a lentebbi területeket.

A szennyezőanyag terjedése mellett, a kibocsátó forrástól tetszőleges távolságra lévő helyen mért szennyezőanyag koncentráció is modellezhető. A **19. ábrán** a fentebb feltételezett pontforrástól (gyárkémény) dél-keleti irányban 100 méterre lévő ponton mért szennyezőanyag koncentrációja látható, eltérő szélesség értékek esetén. A modell segítségével meghatározható, hogy ebben a pontban mennyi a kültéri (outdoor) és a beltéri (indoor) koncentráció.



19. ábra. Pontforrástól 100 méterre lévő helyen mért szennyezőanyag koncentráció folyamatos kibocsátás esetén. A szimuláció során eltérő szélesség értékeket feltételezve (a többi meteorológiai adat nem változik a futtatások során).

A diagramról leolvasható, hogy a kültéri koncentráció kis szélesség esetén lesz a legnagyobb, mivel ekkor a szennyezőanyag lassan távolodik a kibocsátási helytől és leülepszik annak közelében. A szélesség növekedésével a kültéri és a beltéri koncentráció értéke is csökken. 15 m/s-os szélességnél már nem észlelhető a szennyezőanyag a szimulált magasságban.

5. Összefoglalás

A 19. századi ipari forradalom és a 20–21. századi fogyasztó társadalmi igények következtében megnövekedett a légkörbe jutó szennyezőanyagok mennyisége. A légszennyezés problémáját először az 1930-as években ismerték fel, s rájöttek, hogy az anyagok légkörben való terjedését különböző modellekkel le tudják írni. A tudomány és a számítástechnika fejlődésének köszönhetően egyre korszerűbb és pontosabb modelleket fejlesztettek ki.

A légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének modellezésére különböző szemléletű és skálájú modellek léteznek. Dolgozatomban áttekintettem a légköri szennyezőanyagok terjedését leíró modellek történetét és fejlődését. A modellek részletes leírása mellett, egy-egy példával is szemléltettem a működésüket. Külön figyelmet fordítottam a hazai modellezésben használt programok részletes leírására.

Munkámat egy modell alkalmazásának bemutatásával zártam, melyet egy Budapest területén esetlegesen bekövetkező vegyi balesetre alkalmaztam. Kimutatást készítettem az esetleges szennyezőanyag terjedéséről, továbbá a kibocsátási helytől számított 100 méter távolságban lévő területen mért szennyezőanyag koncentrációját is ábrázoltam, eltérő szélességek esetén.

További terveim között szerepel a dolgozatban tárgyalt és újabb modellek részletesebb megismerése, valamint további baleseti kibocsátások modellezése.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek dr. Mészáros Róbertnek, aki segített a témaválasztásban, időt és energiát nem kímélve rendelkezésemre állt, hasznos tanácsokkal látott el. Köszönettel tartozom neki, hogy mindig fordulhattam hozzá problémáimmal.

Köszönettel tartozom páromnak, családomnak, és barátaimnak is a kitartásra való ösztönzésért.

Irodalomjegyzék

- Benei T., 2008: Az „ALOHA” vegyi terjedési modell; A gyakorlati alkalmazás lehetőségei a lakosságvédelemben. *III. Polgárvédelmi Kirendeltség vezetői konferencia, Balatonföldvár 2008. március 17-19.*, 1-7.
- Bozó, L., Mészáros, E. és Molnár, Á., 2006: Levegőkörnyezet. *Akadémiai Kiadó*, 89-142.
- Bubbico, R. and Mazzarotta, B., 2008: Accidental release of toxic chemicals: Influence of the main input parameters on consequence calculation. *Journal of Hazardous Materials 151 (2008) 394-406*, 1-13.
- Croft, B., Lohmann, U., Martin, R. V., Stier, P., Wurzler, S., Feichter, J., Posselt, R. and Ferrachat, S., 2009: Aerosol size-dependent below-cloud scavenging by rain and snow in the ECHAM5-HAM. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 9, 7873-7925.
- Daly, A. and Zanetti, P., 2007: Air Pollution Modeling – An Overview. *The Arab School for Science and Technology (ASST) and The EnviroComp Institute, 2007*, 15-28, 1-5.
- Dombovári P., Ranga T., Nényei Á., Bujtás T., Kovács T., Jobbágy V., Vincze Cs. és Molnár F., 2008: Új terjedésszámító szoftver fejlesztése és bevezetése a Paksi Atomerőműnél. *Sugárvédelem, I. Évf. 1. szám 30-36, 2008 szeptember*, 4-7.
- Fagerli, H., Gauss, M., Benedictow, A., Griesfeller, J., Jonson, J.E., Nyíri, Á., Schulz, M., Simpson, D., Steensen, B.M., Tsyro, S., Valdebenito, Á., Wind, P., Aas, W., Hjellbrekke, A.G., Mareckova, K., Wankmüller, R., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, Ø. and Vieno, M., 2011: Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe in 2009. *EMEP Status Report 2011; July 19, 2011*, 46.
- Ilyin, I., Rozovskaya, O., Travnikov, O., Varygina, M., Aas, W. and Uggerud, H.T., 2011: Heavy Metals: Transboundary Pollution of the Environment. *EMEP Status Report 2/2011*, 51-52.
- Kukkonen, J., Härkönen, J., Walden, J., Karppinen, A. and Lusa, K., 2001: Evaluation of the CAR-FMI model against measurements near a major road. *Atmospheric Environment 35 (2001) 949-960*, 4.

- Labancz K., 2004: Izentróp és 3D trajektóriák számolása a flextra modell adaptálásával; III. Különböző trajektóriák összehasonlító vizsgálata, tesztelése. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, 3-7.
- Lagzi, I., 2003: Magyarország levegőszennyezettségének modellezése adaptív térbeli rács alkalmazásával, *PhD. értekezés*
- Leelőssy Á., 2010: Az ALOHA lokális szennyezőanyag-terjedési modell vizsgálata és alkalmazási lehetőségei. *TDK dolgozat*, 6-10.
- Levitin, J., Härkönen, J., Kukkonen, J. and Nikmo, J., 2005: Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road. *Atmospheric Environment, Volume 39, Issue 25, August 2005, Pages 4439–4452*, 4-5.
- Mészáros E., 1997: Levegőkémia. *Veszprémi Egyetemi Kiadó*, 131-140.
- Mészáros R., Lagzi I., Ferenczi Z., Steib R. és Kristóf G., 2009: Skálafüggő légszennyezettség előrejelzések. *34. Meteorológiai Tudományos Napok, 2009*, 144-154.
- Moussiopoulos, N., Berge, E., Bohler, T., de Leeuw, F., Gronski, K.-E., Mylona, S. and Tombrou, M., 1996: Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models. *European Topic Centre on Air Quality*, 49-50.
- Radnainé Gyöngyös Zs, 2004: Levegőtisztaságvédelem. 79–81.
- Somlai J., Tarján S. és Kanyár B., 2000: „A bomlás virágai”: Radioaktív sugárzások és környezetük. *Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület*, 7.
- Steib, R., Ferenczi, Z. and Labancz K., 2008: Air quality forecasting system at Ferihegy Airport – Hungary. *Croatian meteorological journal, Vol. 43 No. 43/2 December 2008.*, 1-4.
- Stier, P., Feichter, J., Kinne, S., Kloster, S., Vignati, E., Wilson, J., Ganzeveld, L., Tegen, I., Werner, M., Balkanski, Y., Schulz, M., Boucher, O., Minikin, A. and Petzold, A., 2005: The aerosol-climate model ECHAM5-HAM. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1125-1156.
- Stohl, A., Sodemann, H., Eckhardt, S., Frank, A., Seibert, P. and Wotawa, G., 2010: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 8.2. 1-2.
- Szabó T., 2007: A szén-dioxid koncentráció változékonyságának vizsgálata európai toronymérések adatai alapján. *ELTE Meteorológia Tanszék*, 8-9.

Vincze Cs., Lagzi I. és Mészáros R., 2006: Húsz éve történt a csernobili katasztrófa: baleseti kibocsátás modellezése. *Légkör, 51. évfolyam, 2006, 2. szám, 11-14.*

Witlox, H.W.M., Harper, M. and Oke A., 2009: Modelling of discharge and atmospheric dispersion for carbon dioxide releases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 (2009) 795-802, 4-6.*

Internetes források

<http://www.dnv.com/>

<http://www.defra.gov.uk/>

<http://www.arl.noaa.gov/>

<http://www.freerepublic.com/focus/f-news/2692551/posts>

<http://www.mpimet.mpg.de/en>

http://ccaqu.jrc.ec.europa.eu/climate_impact.php

<http://www.unece.org/env/lrtap>

<http://www.emep.int/>

<http://www.katasztrofavedelem.hu/>

<http://www.met.hu>

<http://transport.nilu.no/flexpart>