

# LÉGKÖRI SZENNYEZŐANYAGOK DISZPERZIÓJÁNAK VIZSGÁLATA A HYSPLIT MODELL SEGÍTSÉGÉVEL

Szakdolgozat

Földtudomány alapszak

Meteorológia szakirány



Készítette:

**SÁBITZ JUDIT**

ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék

Témavezetők:

**DR. BARCZA ZOLTÁN**

ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék

**DR. SOLYMOSI NORBERT**

Alkalmazkodás a Klímaváltozáshoz Kutatócsoport, MTA-BCE

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz- és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2010

# TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés .....	3
1. Diszperziós modellek.....	6
1.1 Diszperziós modellek áttekintése.....	6
1.2 Diszperziós modellek összehasonlítása .....	6
2. A HYSPLIT 4.9 modell.....	7
2.1 A modellről .....	7
2.2 Meteorológiai adatmezők.....	9
2.3 Felhasznált adatbázis.....	10
2.4 Diszperziószámítás.....	11
2.5 Modellbeállítások.....	12
3. Alkalmazási területek .....	16
3.1 Magyarországi hőerőművek szén-dioxid kibocsátásának vizsgálata.....	16
3.1.1 Vizsgálatok a HYSPLIT modellel .....	16
3.1.2 Eredmények.....	19
3.1.3 Meteorológiai háttér .....	23
3.2 Meteorológiai célú terjedési modell használata az állategészségügyben .....	26
3.2.1 Esettanulmány.....	27
3.2.2 Vizsgálatok a HYSPLIT modellel .....	29
3.2.3 Eredmények.....	31
3.2.4 Fejlesztés .....	33
Összefoglalás .....	35
Köszönetnyilvánítás.....	36
Irodalomjegyzék .....	37

## Bevezetés

Napjaink egyik legnagyobb kihívása az éghajlatváltozás problémájának feltárása és megértése. A globálisan átlagolt felszíni levegő- és óceánhőmérséklet emelkedése, a hó- és jégtakaró kiterjedt olvadása és a tengerszint globális emelkedése egyértelműen igazolja a globális változásokat. Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) állásfoglalása szerint a XX. század közepe óta megfigyelt globális átlaghőmérséklet-növekedés elsődleges oka az antropogén üvegházhatású gázok koncentrációnövekedése (IPCC, 2007).

Már a XIX. század óta foglalkoznak azzal a jelenséggel, hogy a felszínközeli légréteg átlaghőmérséklete magasabb, mint az a napból érkező sugárzás alapján várható lenne. Már akkor felmerült a szén-dioxid éghajlat-módosító szerepe. A légköri szén-dioxid-mennyiség folyamatos mérése azonban csak a megfelelő pontosságú mérési módszer kidolgozása után, a XX. században indult meg. Charles D. Keeling az 1950-es évek közepén dolgozta ki a ma is használatos mérési módszert, amely már képes kimutatni a szén-dioxid légköri koncentrációnövekedését (Haszpra és Barcza, 2001). Ennek hatására egyre több helyen kezdődött meg a légköri CO<sub>2</sub>-koncentráció mérése, amely mára már kötelező feladatává vált a Meteorológiai Világszervezet (WMO) háttérlevegőszennyezettség-mérő állomásainak.

A mérés technika fejlődésével lehetővé vált az évezredekkel korábban a sarkvidéki jégbe fagyott levegőzárványok szén-dioxid tartalmának meghatározása is. Ezek a mérések azt mutatták, hogy a legutolsó nagy eljegesedés után a szén-dioxid koncentrációja a légkörben 270-280 ppm (270-280 milliomod térfogatrész) körül stabilizálódott, majd a XVIII. századtól kezdve egyre gyorsulva emelkedni kezdett a széntartalmú, fosszilis tüzelőanyagok egyre nagyobb mennyiségű felhasználásával. Az 1980-90-es években már elegendő adat és pontos globális cirkulációs modell állt rendelkezésre ahhoz, hogy összefüggésbe hozzák a mért eredményeket a szén-dioxid-nyelőkkel és -forrásokkal, valamint ezek földrajzi elhelyezkedésével (Haszpra és Barcza, 2001). A vizsgálatok elvégzéséhez olyan modellekre volt szükség, amelyek segítségével a légkörbe jutó szén-dioxid terjedése leírható. A jelenleg is zajló kutatások nagyban építenek a korszerű diszperziós modellekre, amelyek pontossága nagymértékben függ a felhasznált meteorológiai adatbázistól is (Lin et al., 2003). A vizsgálatok rámutattak, hogy az északi félgömb mérsékelt övezetében több CO<sub>2</sub> nyelődik el, mint azt korábban feltételezték. Mérésekkel igazolták, hogy ezek az ismeretlen nyelők a kontinentális területek ökológiai rendszerei.

Az 1980-as években kezdtek el foglalkozni a világméretű felmelegedést némileg visszafogó, globális elsötétülés („global dimming”) néven ismertté vált jelenséggel. Elsőként Atsumu Ohmura tette közzé megdöbbentő felfedezését, miszerint évről évre egyre kevesebb napfény éri el a Föld felszínét. Az 1960-as évektől kezdődően átlagosan 7-10 W/m<sup>2</sup>-rel csökkent a felszínre érkező napsugárzás (Stanhill és Cohen, 2001). Bár ez a folyamat lassú, a globális felmelegedésnél mégis sokszorta gyorsabban zajlott az elmúlt évtizedekben. A világméretű sugárzáscsökkenés egy részét feltehetően a légkörbe jutó aeroszolok szórása, míg a nagyobb hányadát az okozza, hogy a meleg felhőkben az aeroszolok elszaporodása módosítja a cseppek szerkezetét. Az 1990-es években mintha megállt volna a „elsötétülés” folyamata (Wild et al., 2005, 2009), sőt, egy globális „tisztulás” kezdődött, amely összefüggésbe hozható a szennyezőanyagok légkörbe juttatásának akkoriban beinduló világméretű korlátozásával. A globális elsötétülést okozó aeroszolok az emberi tevékenység hatására jutnak a légkörbe. Az aeroszolok légköri tartózkodási ideje általában néhány nap, szemben a hosszabb tartózkodási idejű üvegházgázokkal. Keveredésük, hígulásuk és kimosódásuk leírásához korszerű terjedési modelleket használnak.

A számos új kérdést és problémát felvető globális éghajlatváltozás olyan területekre is hatással lehet, amelyekre azelőtt nem is gondoltunk. A Föld számos helyén prognosztizálták a klímakutatók a melegebb és párásabb környezeti feltételek kialakulását, amelyek kedveznek a vírusok, baktériumok, gombák terjedésének, illetve hordozóik elszaporodásának. A klímaváltozás miatt az egyes kórokozókat terjesztő ún. vektorok olyan területeken is megélhetnek és szaporodhatnak, melyeken korábban nem. Egyes betegségek esetén a kórokozók a levegő útján nagyobb távolságokba is eljuthatnak fertőzőképes állapotban (Rubel et al., 2004). E kórokozók között előfordulnak a gazdasági haszonállatok, illetve az ember egészségét veszélyeztetők egyaránt. Éppen ezért fontosnak tartjuk, hogy közelebbről is megvizsgáljuk a kórokozók légköri terjedését. Míg a vírusok, spórák esetében diszperziós modellekkel szokták a légköri terjedést modellezni (Hess et al., 2007; Rubel és Fuchs, 2005), addig a vektorok (például szúnyogok) sodródásának modellezésében trajektóriákat használnak.

Kutatómunkánk célja az volt, hogy adaptáljunk egy olyan korszerű, légköri szennyezőanyagok és nyomelemek terjedését leíró modellt, amellyel többfajta, egymástól látszólag független kérdésre is választ kaphatunk. A modell adaptálásával és a szükséges meteorológiai háttér kialakításával egy olyan környezetet szerettünk volna létrehozni, amely több tudományterületet átfogóan segítheti a kutatók és döntéshozók munkáját a légkörbe kerülő veszélyes anyagok vonatkozásában.

Dolgozatom elején rövid áttekintést adok a légköri szennyezőanyagok terjedésének vizsgálatára alkalmas diszperziós modellekről. Mivel munkám a HYSPLIT modellhez kapcsolódik, ezért ezt a modellt jóval részletesebben ismertetem. Bemutatom, hogyan függ a szennyezőanyag terjedése a meteorológiai adatoktól, majd röviden ismertetem a számunkra fontos beállítási lehetőségeket, illetve a kutatás szempontjából optimális paramétereiket. Ezt követően a modellel végzett vizsgálatokat és eredményeinket mutatom be. Végül munkánk legfontosabb eredményeit foglalom össze.

# 1. Diszperziós modellek

## 1.1 Diszperziós modellek áttekintése

Ahhoz, hogy a légkörbe került szennyezőanyagok terjedését megfelelően tudjuk modellezni, fontos, hogy a számunkra legalkalmasabb diszperziós modellt válasszuk. Ezen modellek az advekciós- és diffúziós egyenletek megoldásán alapulnak. (Pudykiewicz et al., 1998). Ez alapján két csoportot különböztetünk meg: az Euleri és a Lagrange-i modelleket, amelyek alapegyenlete a turbulens diffúzió differenciálegyenlete. Az Euler típusú modellek használata több forrás esetén, európai skálán ajánlott, és alkalmas kémiai átalakulások modellezésére. A Lagrange-i modelleket pontforrás esetén, lokális- illetve mezoskálán használják. Ezek a modellek a légkörbe került szennyezőanyagok koncentrációját puff vagy részecske módszer segítségével számítják.

## 1.2 Diszperziós modellek összehasonlítása

Az ETEX (European Tracer Experiment) európai előrejelző kísérlet az Európai Közösség (EC), a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) és a Meteorológiai Világszervezet (WMO) kezdeményezésére 1992-ben létrehozott nemzetközi kísérleti projekt. Azzal a céllal hozták létre, hogy az 1986-os csernobili katasztrófa modellezése során felmerülő kérdéseket megválaszolják (Anderson, 2008). Úgy tervezték meg, hogy validálja azokat a nagy skálájú transzport modelleket, amelyeket baleseti helyzetek szimulálására alkalmaznak. A teszteléshez külön adatbázist fejlesztettek ki. A kísérleti program keretén belül megvizsgáltak három nagy skálájú transzport modellt: a CALPUFF 5.8, HYSPLIT 4.8 és a FLEXPART 6.2. modelleket. Mindhárom Lagrange-típusú diszperziós modellt jelölőanyag felhő diszperziójának szimulálására tesztelték. A modellek hatékonyságának összehasonlítását mutatja be az 1. táblázat.

1. táblázat. Az ETEX térbeli statisztikái

Modell	Statisztikai mérőszámok			
	Térbeli pontosság	Találati arány	Hibás találati arány	Kritikus sikerindex
CALPUFF	8,35	0,07	0,74	0,06
HYSPLIT	41,4	0,55	0,36	0,42
FLEXPART	30,07	0,27	0,54	0,20

Az összehasonlítást négy szempontból végezték el. Első mérőszám a *térbeli pontosság* (Figure of Merit in Space), amely a mért és a modellezett értékek viszonyát fejezi ki százalékban. Értelemszerűen a minél nagyobb pontosság az ideális. A *találati arány* (Probability of detection) a megfigyelt események és találatok arányát fejezi ki. Értéke nullától egyig terjed, ideális érték az egy. Érdeemes a *hibás találati aránnyal* (False alarm rate) együtt vizsgálni, amely a téves riasztások mértékét adja meg azokhoz az eseményekhez képest, amelyek nem következtek be. Értéke szintén nullától egyig terjed, ideális értéke viszont a nulla. A *kritikus sikerindex* (Threat Score/ Critical Success Index) hasonlóan a találati arányhoz nullától egyig terjedő értékekkel rendelkezhet, melyek közül az egy az ideális. A bemutatott statisztikai mérőszámok egyértelműen azt mutatják, hogy a legkedvezőbb tulajdonságokkal a HYSPLIT modell rendelkezik. Emiatt döntöttünk úgy, hogy munkánk során a HYSPLIT modell legkorszerűbb verziójával dolgozunk.

## 2. A HYSPLIT 4.9 modell

### 2.1 A modellről

A HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) modellt az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet Légköri Kutatólaboratóriuma (NOAA ARL) fejlesztette ki. A HYSPLIT egy olyan korszerű modellszféra, amely képes egyszerű trajektóriáktól kezdve akár több forrásból származó szennyezőanyag terjedést és ülepedést is szimulálni. A modell rácson tárolt adatokat használ a három konform vetület egyikéből (Polar, Lambert, Mercator). Mind a modell, mind pedig a hozzá tartozó adatbázisok elérhetők a NOAA honlapjáról. A HYSPLIT archív (Global Data Assimilation System, ECMWF

reanalízisek) és előrejelzett adatokkal is futtatható. Számítási módszerében ötvözi a Lagrange-i módszert - amely mozgó koordináta-rendszerben írja le a légréteg útját - az Euleri szemlélettel, amelyben egy rögzített háromdimenziós rács alkotja a koordináta-rendszert. A modell az advekción és a diffúzió-számításokhoz a Lagrange-módszert alkalmazza, vagyis követi a légréteg transzportját, míg a szennyező koncentrációkat egy rögzített rácson számolja. A NOAA és az Ausztrál Meteorológiai Iroda közös együttműködésének köszönhetően a modell advekcións algoritmusával, korszerűsített stabilitás és diszperziós egyenletekkel, grafikus felhasználói felülettel (GUI), és egy új opcióval bővült, amely képessé teszi a modellt vegyi átalakulások vizsgálatára is.

A modell első verzióját Draxler és Taylor fejlesztette ki 1982-ben (Draxler és Taylor, 1982). Az azóta eltelt mintegy negyed évszázad során a HYSPLIT fontos fejlődési állomásokat esett át. Az első változat csak rádiószondás méréseken alapult, és diszperziós része nappal egyenletes átkeveredésből, éjjel pedig a keveredés megszűnéséből állt. A szélnyírás okozta terjedéseknél minden éjszakára be kellett vezetni a nappali réteg kisebb rétegekre való feldarabolását. Néhány évvel később Draxler és Stunder már változó keveredési erősséget vezetett be, ami térbeli és időbeli keveredési profilon alapult (Draxler Stunder, 1988). A harmadik verzióban az 1990-es évek elején a rádiószondás adatok helyett rácson tárolt meteorológiai adatokat alkalmaztak. Ezek az adatok más meteorológiai adatanalízisből származó adatok, illetve numerikus időjárás-előrejelző modellekből kapott rövid távú előrejelzések (Draxler, 1990, 1992). A jelenlegi verziót Draxler és Hess dolgozta ki 1997-ben (Draxler és Hess, 1997). Az advekcións algoritmust időbeli interpolációval egészítették ki, ezen kívül egy háromdimenziós részecske-diszperzió opcióval bővült a koncentrációsámítás.

A modellt széles körben alkalmazzák vulkáni hamu, ózonkoncentráció, por vagy akár radioaktív anyagok bomlásának modellezésére is. A véletlen vagy szándékos eredetű kémiai, biológiai vagy nukleáris anyagok kibocsátása jelentősen befolyásolja egészségünket, biztonságunkat, vagy akár környezetünket. A HYSPLIT segítségével magyarázatot adhatunk arra, hogy az egyes anyagok merre és hogyan terjedhetnek a légkörben, illetve ülepedhetnek ki. Ezen folyamatok megértése alapvető fontosságú ahhoz, hogy megválaszolhassuk a felmerülő kérdéseket, és megakadályozzuk az esetleges katasztrófákat.

A modell trajektória számításaira irányuló kutatások már folytak az ELTE Meteorológiai Tanszékén (Szabó, 2007). Munkánk során mi kizárólag a légköri szennyezőanyagok terjedésével foglalkozunk.



## 2.2 Meteorológiai adatmezők

A HYSPLIT modell a meteorológiai modellek interpolált kimenő adatait nem tudja közvetlenül felhasználni. A diszperziós modell szerkezetén belül a meteorológiai profilok minden horizontális rácspontjukban lineárisan interpoláltak a modell belső felszínkövető ( $\sigma$ ) koordinátarendszerére, amely a következő alakban fejezhető ki:

$$\sigma = (Z_{\text{top}} - Z_{\text{msl}}) / (Z_{\text{top}} - Z_{\text{gl}}), \quad (1)$$

ahol  $Z_{\text{msl}}$  az adott szint átlagos tengerszint feletti magassága,  $Z_{\text{top}}$  a modell koordinátarendszerének teteje,  $Z_{\text{gl}}$  pedig a felszín magassága. A modell belső talajszint feletti magasságai minden intervallumban tetszőlegesen megválaszthatók. Ebben az esetben a négyzetes összefüggés a  $Z$  magasság és a modell szintje között úgy lett specializálva, hogy minden szint magasságára a modell belső  $k$  indexe vonatkozik:

$$Z = ak^2 + bk + c, \quad (2)$$

ahol  $a$ ,  $b$  és  $c$  értékei rendre 30, -25 és 5 (Draxler és Hess, 1997). Ebből ered, hogy a felszíntől távolodva a felbontás csökken, vagyis  $k=1$  esetén az első szint 10 méteren van, a második szint ( $k=2$ ) 75 méteren, a harmadik 200 méteren, és így tovább, a huszadik pedig 11500 méteren. Itt a szintek közötti különbség már körülbelül 1200 méter. A (2) egyenletben szereplő  $k$  konstans módosításával akármilyen vertikális felbontás előállítható. Fontos, hogy a modell belső felbontása legalább ugyanolyan, vagy jobb legyen, mint a bemenő adatoké.

A diszperziós modell horizontális rácshálózata a meteorológiai adatokéval azonos módon van megtervezve. Három különböző konform térképvetület támogatott: a polár sztereografikus, a Mercator- és a Lambert-vetület univerzális térkép transzformáló rutinokat használva (Taylor, 1997).

A meteorológiai mezők közötti időintervallum minden definiált rácsra állandó, azaz finom rácsfelbontású regionális adat esetén 3 óránként, míg durvább felbontású globális modelleknél 6 óránként állnak elő a mezők.

A meteorológiai adatmezők a négy vertikális koordináta rendszer egyikében vannak megadva: nyomási-sigma, nyomási-abszolút, felszínkövető-sigma vagy egy hibrid abszolút-nyomási-sigma. A modellhez szükséges minimális adatok:  $U$ ,  $V$  – horizontális szélkomponensek,  $T$  – hőmérséklet,  $Z$  – magasság vagy  $P$  – nyomás, és  $P_0$  - felszíni nyomás.

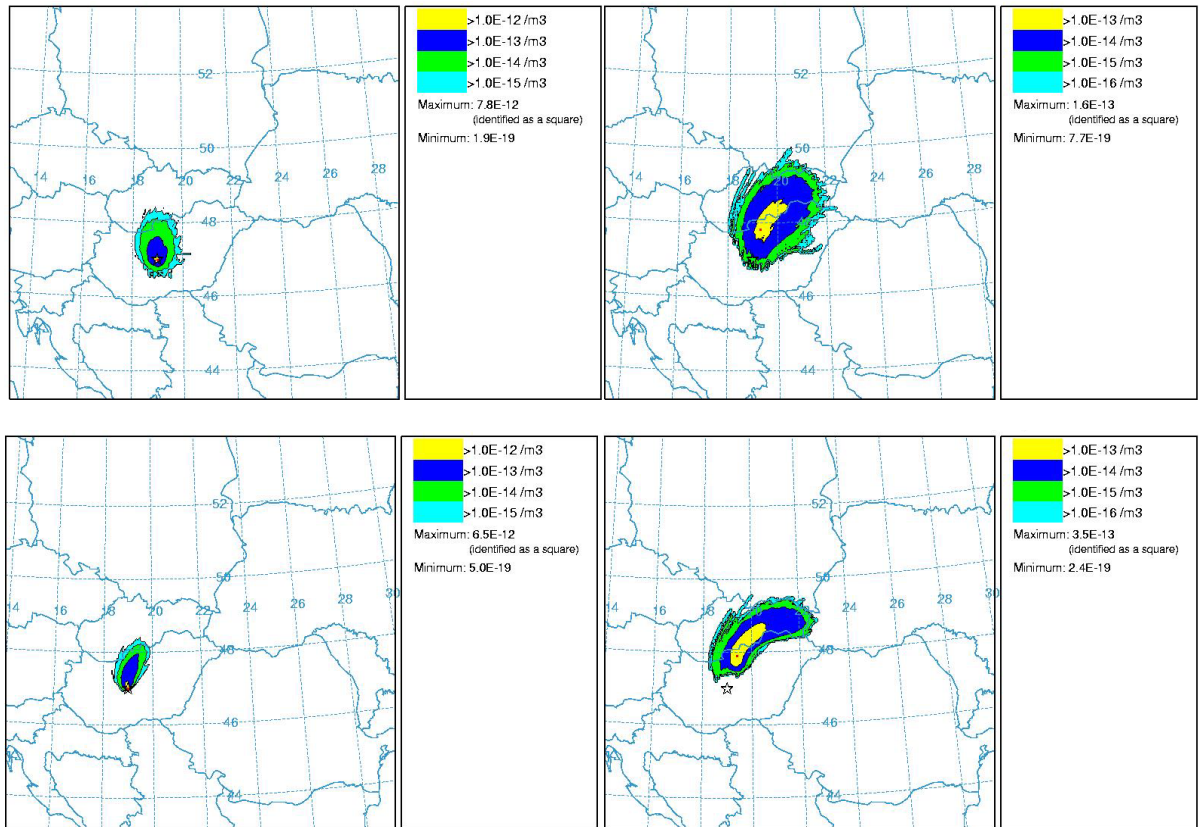
A páratartalom és a vertikális légmozgás megadása opcionális, de figyelembe kell venni, hogy a légmozgás milyen vertikális koordinátával van definiálva. Ha a nedves ülepedés folyamata az oldható gázokat és részecskéket is magába foglalja, akkor a modellnek csapadékmezőre is szüksége van.

## 2.3 Felhasznált adatbázis

A meteorológiai mezők előállításához az Európai Középtávú Időjárás-Előrejelző Központ (ECMWF) reanalízis projektjének legkorszerűbb adatbázisát, az ERA-Interim-et használtuk fel, amely felbontásában és minőségében is felülmúlja az ECMWF korábbi reanalízis adatbázisait. Az Interim adatok jelenleg 1989-től egészen 2010. január végéig állnak rendelkezésünkre (2010. május eleji állapot). Ez az adatbázis mindenki számára elérhető 6 órás időbeli, és  $1,5 \times 1,5$  fokos térbeli felbontásban, nekünk azonban lehetőségünk és szükségünk volt ennél finomabb,  $0,5 \times 0,5$  fokos térbeli felbontással dolgozni. A különböző térbeli felbontású adatbázisok eredményei között tapasztalt különbségeket szemlélteti az 1. ábra. Az ábráról leolvasható, hogy az eredmények nagymértékben függenek a felhasznált meteorológiai adatbázistól. Az adatok felbontásának összehasonlításához a futtatások azonos időben és azonos beállításokkal történtek, eltérés csupán a meteorológiai mező felbontásában volt.

Munkánk során fontosnak tartottuk, hogy az általunk feldolgozott adatok könnyen összevethetők legyenek korábbi eredményekkel. Az ERA Interim adatbázis mintegy 20 évre visszamenőleg készült, egységes adatasszimilációs technika (4Dvar) segítségével. Ennél korábbi adatokkal való összehasonlításhoz az ERA-40 adatbázisra van szükség, amely az 1957-2002 időszakot fedi le. Ezen reanalízis adatok meglehetősen durva,  $2,5 \times 2,5$  fokos térbeli felbontású rácshálózaton érhetők el bárki számára, míg az egyes ECMWF tagországok illetve társult országok számára  $1 \times 1$  fokos felbontásban nyerhetők ki.

Kutatásunkban elsősorban az ERA Interim meteorológiai mezőit használtunk (3.1-es fejezet), de a 3.2-es fejezetben leírt vizsgálatokhoz emellett szükségünk volt az ERA-40 adatbázisra is.



1. ábra. Az ERA Interim adatok térbeli felbontásának hatása a modelleredményekre. A felső két kép a  $1,5 \times 1,5$  fokos felbontású, az alsó két kép a  $0,5 \times 0,5$  fokos felbontású adatokból kapott eredményeket mutatja. A futtatások azonos időben (2006. július 28-29.), azonos forrásból és azonos beállításokkal készültek. A bal és a jobb oldali szennyezőanyag-csúcsa közti időeltérés 12 óra volt.

## 2.4 Diszperziószámítás

Egy Lagrange típusú modell alapvetően kétféle módszerrel tud légköri szennyezőanyag-koncentrációt számolni: puff és részecske módszer segítségével. A légrészecskék vagy a puff-ok a meteorológiai áramlási modellben meghatározott átlagos széllel advektálódnak. A részecskék mérete nem növekszik, ellentétben a puff-okkal.

Puff modellekben a forrást úgy szimulálhatjuk, hogy rendszeres időközönként egy szennyezőanyag felhőt bocsátunk ki a pontforrás helyén. Minél kisebb időintervallumokat veszünk, annál jobban közelítünk a valósághoz. Az idő helyes megválasztása rendkívül fontos a számítási idő szempontjából (Ludwig et al., 1977). Minden ilyen puff előre megadott koncentrációval rendelkezik. Egy tetszőleges pontban a légköri koncentrációt úgy

számíthatjuk ki, hogy összegezzük a pont felett lévő puff-okból meghatározott koncentrációkat. A puff haladása a középpontjának trajektóriája alapján történik, kiterjedését pedig a turbulens atmoszféra diszperzív természetének figyelembevételével számítják.

Egy Lagrange-i részecske modell esetén a forrás sok részecske folyamatos kibocsátásával szimulálható. Továbbá az egyes részecskék advekción mozgásához egy véletlen komponens is hozzáadódik minden lépésben, a légköri turbulenciának megfelelően. Ebben az esetben a részecskék egy csoportosulása térben kiterjed, időben szimulálva a légköri diffúziót. Ebben az esetben úgy határozhatjuk meg a koncentrációt, hogy összegezzük az egy kiválasztott pont feletti részecskéket.

Egy hibrid közelítést fejlesztett ki Hurley 1994-ben (Hurley, 1994), amelyben úgy egyesítette a két modellt, hogy a számítások során részecske diszperziót használ vertikális irányban és puff diszperziót horizontálisan. Attól függően, hogy melyik módszert használjuk, a stabilitás és a keveredési tényezőket is ki kell számítani a meteorológiai adatokból.

## **2.5 Modellbeállítások**

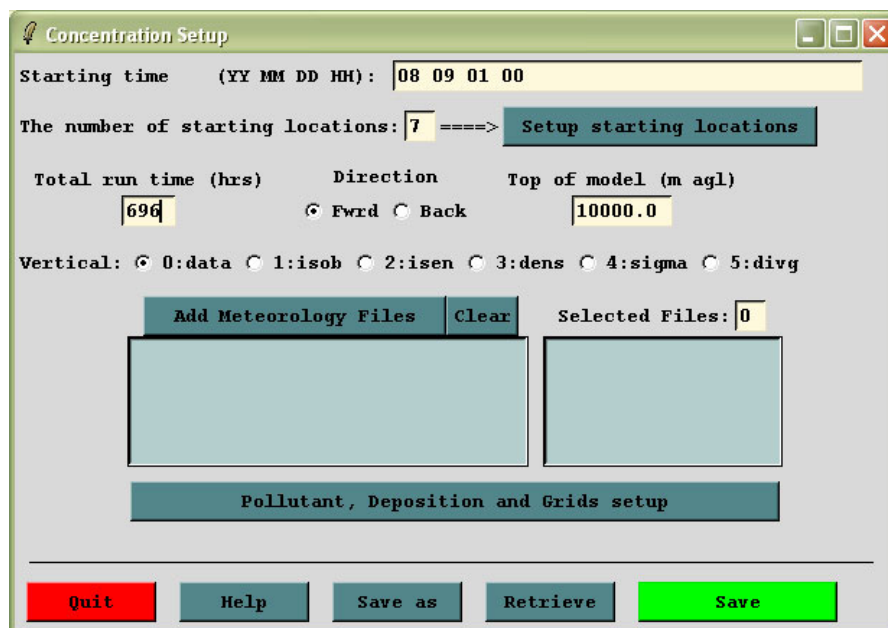
Munkánk során szükség volt a fontosabb modellbeállítások tanulmányozására és a megfelelő paraméterek meghatározására. Az általunk használt modellbeállítások dokumentálásának elsődleges célja az volt, hogy egyfajta használati útmutatót készítsünk, amelynek segítségével a modell használata mindenki számára könnyebbé válik. Mivel a modell trajektória részéről már készült részletes leírás (Szabó, 2004), ezért tartjuk hasznosnak a koncentrációszámítás menürendszerének ismertetését is.

Ebben a fejezetben a HYSPLIT modell általunk használt legfontosabb koncentráció-beállításait (Concentration Setup) mutatom be.

A Koncentráció menüpont hat fő részből áll: itt lehet felépíteni a szimulációt (Setup Run), futtatni a modellt (Run Model), ábrázolni a kapott koncentrációt (Display / Concentration / Contours), átkonvertálni a kimenő adatot más formátumba (Utilities / Convert to ASCII), kialakítani speciális szimulációkat (Special Runs), és itt lehet szimulálni multi-processzoros környezetben (Multi-processor). A menü segítségével a futtatás viszonylag egyszerűen megszerkeszthető. A Koncentráció-beállítások menüben a grafikus felhasználói felület (GUI) kialakítja a modell bemenő paramétereit tartalmazó CONTROL fájlt. Ha a modell lefutott, az ablak bezárható, és a Display menüpont alatt megjeleníthető az eredmény.

A modell futtatásához szükséges alapbeállítások láthatók a 2. ábrán. Először a kezdő időpontot kell megadnunk ÉÉ HH NN ÓÓ formátumban, UTC-ben. A számításokat

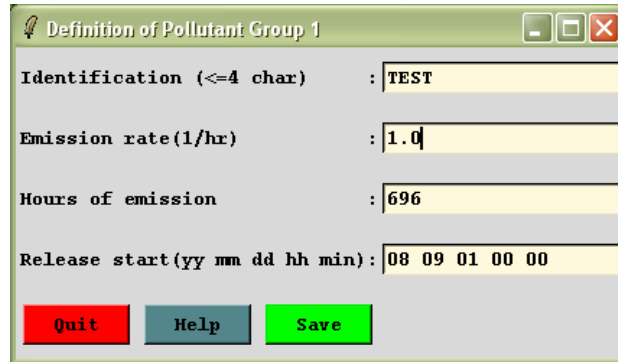
indíthatjuk egy vagy akár több helyről is, ezek darabszámát, földrajzi koordinátáját illetve magasságát itt kell megadnunk (Setup starting location). A földrajzi koordináták megadásánál tudnunk kell, hogy a negatív szám déli szélességet illetve keleti hosszúságot, a pozitív szám pedig északi szélességet illetve nyugati hosszúságot jelent. További szükséges alapbeállítás a modell futtatási ideje (Total run time) órában, valamint itt állíthatjuk be, hogy időben előre (Forward) vagy hátra (Backward) szeretnénk koncentrációt modellezni (Direction). Meg kell még adnunk a modell tetejének magasságát (Top of model) méterben. Ez a meteorológiai rácson vett adatok vertikális határa. A következő beállításban adhatjuk meg, hogy milyen vertikális mozgással számoljon a modell (Vertical motion option). Öt lehetséges beállítás van. Az alapbeállítás (0:data) esetében a meteorológiai adatbázis vertikális sebességmezőjét használja a modell. További lehetséges beállítások: izobár számítási módszer (1:isob), izentróp számítási módszer (2:isen), konstans sűrűséggel való számítás (3:dens), belső szigma koordinátával való számítás (4:sigma) vagy sebességdivergenciából számított vertikális légmozgás (5:divg).



2. ábra. A HYSPLIT modell koncentráció-beállításai

Ezután be kell állítanunk a szennyező anyagokra és a rácsra vonatkozó adatokat, és az ülepedést (Pollutant, Deposition and Grids setup). A szennyezőanyagra vonatkozó legfontosabb beállítás a kibocsátás időtartama órában (Hours of emission), és az emissziós ráta (Emission rate), vagyis az óránkénti kibocsátás mennyisége (3. ábra). A rács definiálásánál adhatjuk meg a kimenő fájl nevét (Output grid file name), a vertikális szintek

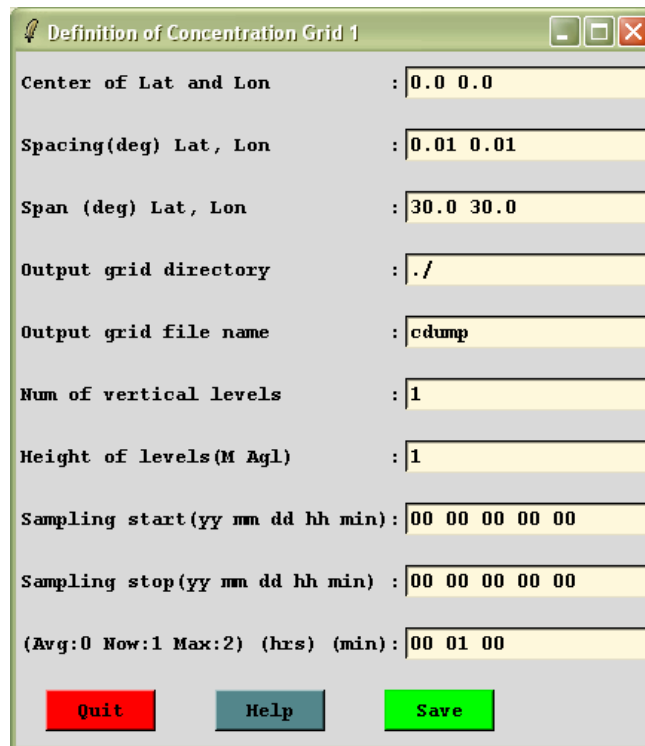
számát (Num of vertical levels), az egyes szintek magasságát (Hight of levels) a talajszinthez viszonyítva, és azt is, hogy hány óránként kérjük a kimenőfájlokat (4. ábra). Az ülepedés menüponton belül többek között kiválaszthatjuk, hogy részecskét vagy gázt, illetve annak nedves vagy száraz ülepedését vizsgáljuk (5. ábra).



Identification (<=4 char)	: TEST
Emission rate(1/hr)	: 1.0
Hours of emission	: 696
Release start(yy mm dd hh min)	: 08 09 01 00 00

Buttons: Quit, Help, Save

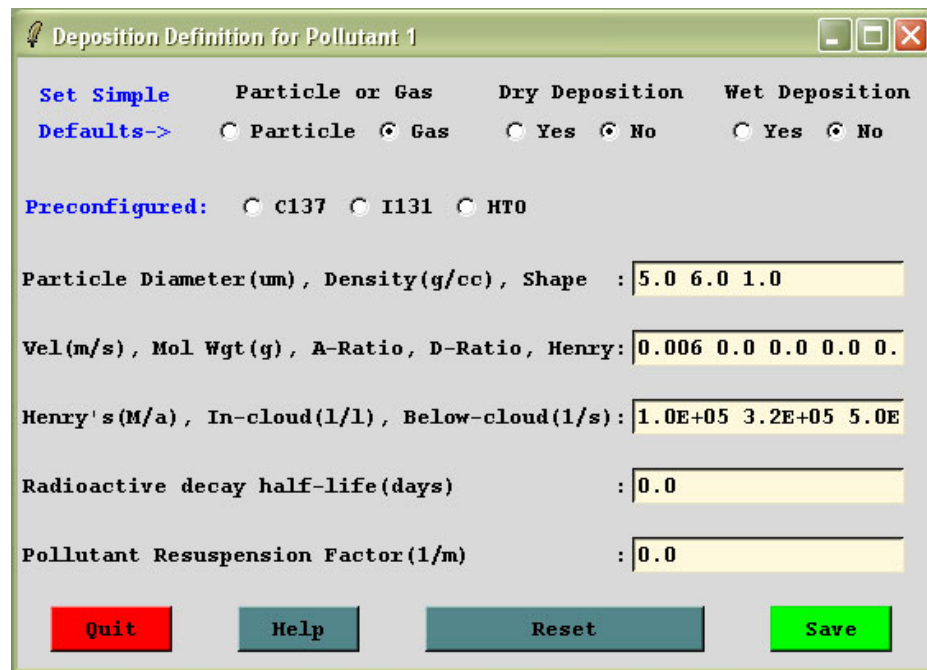
3. ábra. A HYSPLIT modell szennyezőanyagra vonatkozó beállításai



Center of Lat and Lon	: 0.0 0.0
Spacing(deg) Lat, Lon	: 0.01 0.01
Span (deg) Lat, Lon	: 30.0 30.0
Output grid directory	: ./
Output grid file name	: cdump
Num of vertical levels	: 1
Height of levels(M Agl)	: 1
Sampling start(yy mm dd hh min)	: 00 00 00 00 00
Sampling stop(yy mm dd hh min)	: 00 00 00 00 00
(Avg:0 Now:1 Max:2) (hrs) (min)	: 00 01 00

Buttons: Quit, Help, Save

4. ábra. A rács definiálása



5. ábra. A HYSPLIT modell ülepedésre vonatkozó beállításai

Az alapvető paraméterek megadása, valamint a modellfuttatás után lehetőség van arra, hogy konkrét pontokban is lekérjük a koncentrációértékeket. Ehhez csak a pont földrajzi koordinátáját kell megadnunk a megfelelő helyen (Concentration / Utilities / Grid to Station). Lehetőség van arra is, hogy az adatokat átkonvertáljuk könnyen kezelhető formátumba (Concentration / Utilities / Convert to ASCII). Csak ezután kerülhet sor a kapott eredmény grafikus megjelenítésére (Concentration / Display / Contours). A megjelenítésre a HYSPLIT több lehetőséget is felkínál. A kimenő fájlokat megjeleníthetjük az Aladdin Ghostscript / GhostView programmal, de akár a Google Earth segítségével is, ha ezt a megfelelő helyen beállítjuk. Ha korábban több vertikális szintet definiáltunk, itt kiválaszthatjuk, hogy mely szint(ek)en ábrázolja a modell az eredményt.

Vizsgálataink során hosszú távú futtatásokat is végeztünk (4.1 fejezet), amelyek során nagyszámú részecskét bocsátottunk ki. Ehhez szükség volt a kibocsátható részecskék számának növelésére (Maximum number of particles). Az erre vonatkozó beállítási lehetőségeket az Advanced menüpont Configuration Setup menüjében találhatjuk a Koncentráció menüpont alatt.

## **3. Alkalmazási területek**

### **3.1 Magyarországi hőerőművek szén-dioxid kibocsátásának vizsgálata**

Napjaink egyik aktuális problémája a legfontosabb antropogén eredetű üvegházhatású gáz, a szén-dioxid koncentrációjának minél hatékonyabb mérése és pontosabb meghatározása. Ezért munkánk során elsősorban ennek a gáznak a terjedésével foglalkoztunk.

A szén-dioxid globális légköri koncentrációja az iparosodás előtti 280 ppm értékről napjainkra 380 ppm-re nőtt. A koncentráció növekedését elsősorban a fosszilis üzemanyagok felhasználása és a megművelt földterület nagyságának változása okozza. Az Országos Meteorológiai Szolgálat által, az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) megbízásából készített üvegházhatású gázok legfrissebb kibocsátási adatai szerint a szén-dioxid hazánk teljes, szén-dioxid egyenértékben kifejezett üvegházgáz emissziójának 76 százalékáért felelős. Magyarország üvegházgáz kibocsátása az elmúlt öt év átlagában 79,2 millió, 2006-ban 78,6 millió tonna szén-dioxid egyenérték volt (Kis-Kovács et al., 2009). A szén-dioxid egyenérték az üvegházhatású gázok okozta hatások összehasonlítására szolgáló mértékegység, az adott gáz globális felmelegítési potenciáljának és tonnában megadott mennyiségének szorzata. A teljes szén-dioxid emisszió több mint háromnegyede az energiaszektorból származik. A legnagyobb kibocsátók az erőművek, mivel a hő- és a villamos energia jelentős részét fosszilis tüzelőanyagok elégetésével állítják elő.

#### **3.1.1 Vizsgálatok a HYSPLIT modellel**

A modell segítségével feldolgoztuk Magyarország legjelentősebb, fosszilis tüzelőanyagot használó erőműveinek szén-dioxid emisszióját. Az ország hét legnagyobb szén-dioxid kibocsátó erőművét vizsgáltuk, majd modelleztük ezek lehetséges hatását a hazai szén-dioxid koncentrációmérésekre. A vizsgálatokhoz az Országos Meteorológiai Szolgálat által rendelkezésünkre bocsátott 2006-os emissziós adatokat használtuk fel. Először finomabb,  $0,1 \times 0,1$  fokos rácson modelleztük a szén-dioxid terjedését egy teljes évre, majd egy durvább,  $0,5 \times 0,5$  fokos rácson is elvégeztük a szimulációt. Vizsgálatunk célja az volt, hogy figyelemmel kísérjük a kiválasztott erőművek okozta szén-dioxid kibocsátás hatását és a koncentrációfelhő terjedését. Arra voltunk kíváncsiak, hogy mekkora eltérés mutatkozik a

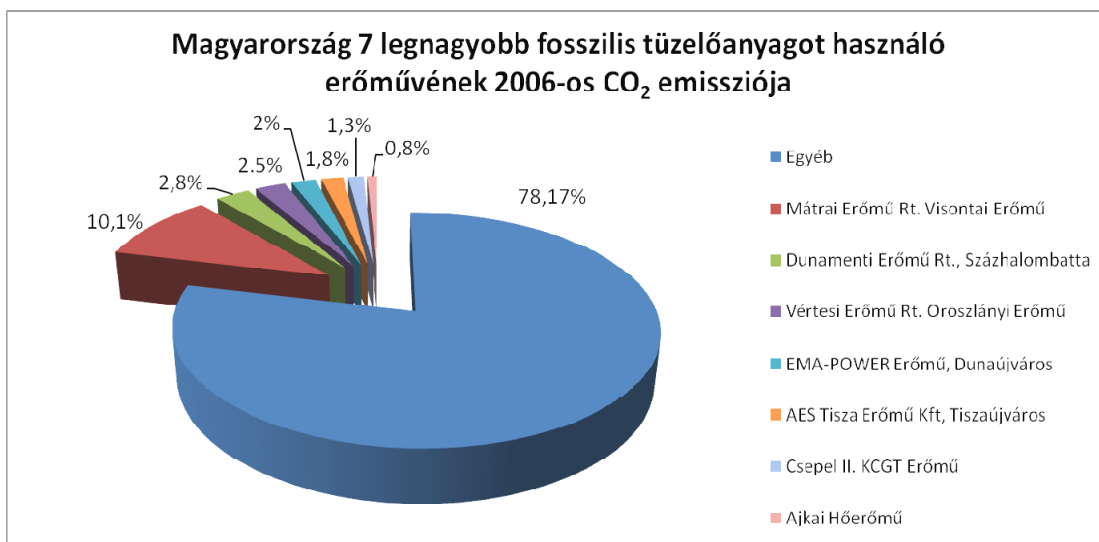


különböző rácsfelbontások alkalmazása esetén. A modellezést 2008. január 1-től indítottuk, és december 31-ig futtattuk. Ezután megvizsgáltuk a 2008. szeptember-december időszakot külön is, mivel 2008 szeptembere óta folynak havi átlagos radiokarbon ( $^{14}\text{C}$ ) mérések és állnak rendelkezésre adatok Debrecenből és Hegyhátsárlól. Az így kapott eredményekből becsültünk fosszilis járulékot. A radiokarbon méréseken alapuló módszerek esetén ahhoz, hogy megállapítsuk, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció növekedését milyen arányban okozzák természetes folyamatok, illetve az antropogén eredetű fosszilis szén-dioxid kibocsátás, elegendő a légköri szén-dioxid  $^{14}\text{C}$  tartalmát vizsgálni. Ugyanis a  $^{14}\text{C}$  olyan információt hordoz, amelyből megállapítható a szén-dioxid biogén, illetve fosszilis eredete, ugyanis ez utóbbi nem tartalmaz  $^{14}\text{C}$  izotópot (Molnár et al., 2009).

A vizsgálatok során Magyarország hét legnagyobb, fosszilis tüzelőanyagot kibocsátó erőművének szén-dioxid emisszióját tanulmányoztuk. A 2. táblázat a kiválasztott erőművek és az ország teljes, éves szén-dioxid kibocsátási adatait foglalja össze.

*2. táblázat. Magyarország hét legnagyobb, fosszilis tüzelőanyagot használó erőművének éves szén-dioxid emissziója 2006-ban*

<b>Erőmű</b>	<b>Kibocsátás (millió tonna)</b>
Mátrai Erőmű Rt. Visontai Erőmű	6,1
Dunamenti Erőmű Rt., Százhalombatta	1,7
Vértesi Erőmű Rt. Oroszlányi Erőmű	1,5
EMA-POWER Erőmű, Dunaújváros	1,2
AES Tisza Erőmű Kft, Tiszaújváros	1,1
Csepel II. KCGT Erőmű	0,8
Ajkai Hőerőmű	0,5
Egyéb források	47,5
Magyarország teljes kibocsátása	60,4

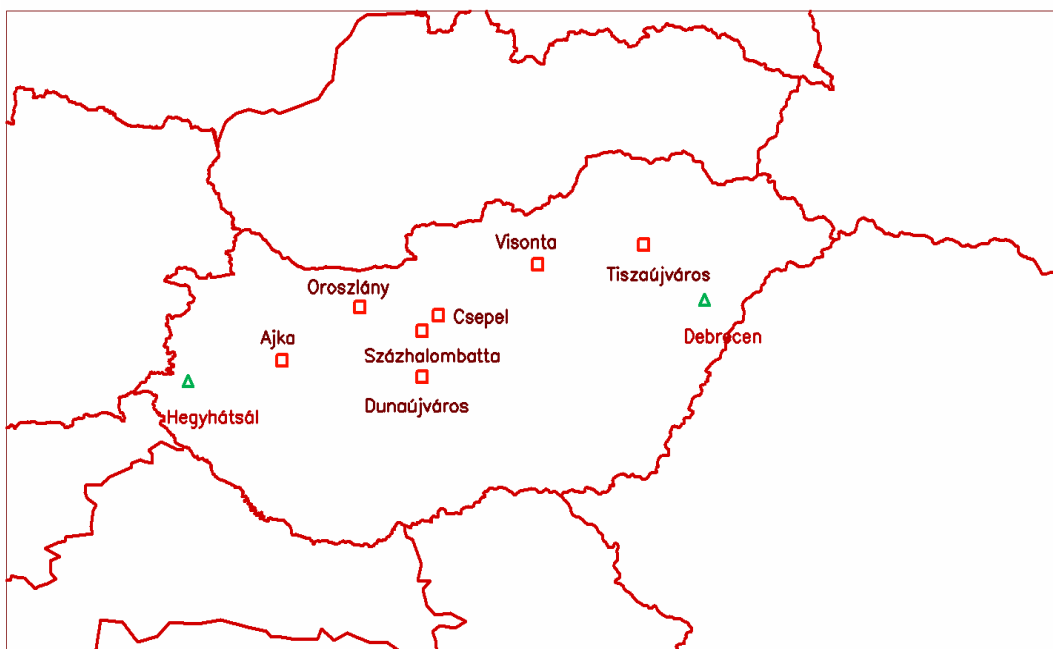


6. ábra. A vizsgált erőművek részesedése Magyarország teljes szén-dioxid kibocsátásából

Az egyes erőművek szén-dioxid emissziójának részesedését az ország teljes kibocsátásából a 6. ábra mutatja be százalékos arányban. Láthatjuk, hogy a kiválasztott hét erőmű az ország teljes szén-dioxid kibocsátásának több mint 20 százalékát adja. A fennmaradó rész főleg ipari és mezőgazdasági eredetű.

A 7. ábrán látható, hogy a vizsgált erőművek többsége az ország középső, illetve keleti részén helyezkedik el, a hegyhátsági mérőállomás pedig nyugaton. Tudjuk, hogy az uralkodó szélirány hazánkban északnyugati irányúnak tekinthető, így a vizsgált erőművek a hazai toronymérésre csak kis hatással lehetnek. Ezért megvizsgáltunk egy mérőállomást Magyarország keleti részén, Debrecenben is. Itt 2008 szeptembere óta mérik a városon belül a légköri szén-dioxid koncentrációt és annak <sup>14</sup>C tartalmát az antropogén eredetű kibocsátás okozta szén-dioxid többlet meghatározásához. Havi átlagot számítanak szén-dioxid keverési arányból és a szén-dioxidban jelenlévő radiokarbonból. A két hely összevetéséből kvantitatív módon számítanak fosszilis CO<sub>2</sub> többletet Debrecenre, Hegyhátsálhoz, mint viszonyítási szinthez képest.

Munkánk elsődleges célja az volt, hogy megvizsgáljuk, milyen hatása lehet az ország legnagyobb szén-dioxid kibocsátó erőműveinek a hegyhátsági és a debreceni mérésekre, valamint, hogy ezt a hatást számszerűsítsük.



7. ábra. Magyarország hét legnagyobb fosszilis tüzelőanyagot használó erőműve és a debreceni, valamint a hegyhátsáli mérőállomás földrajzi elhelyezkedése

### 3.1.2 Eredmények

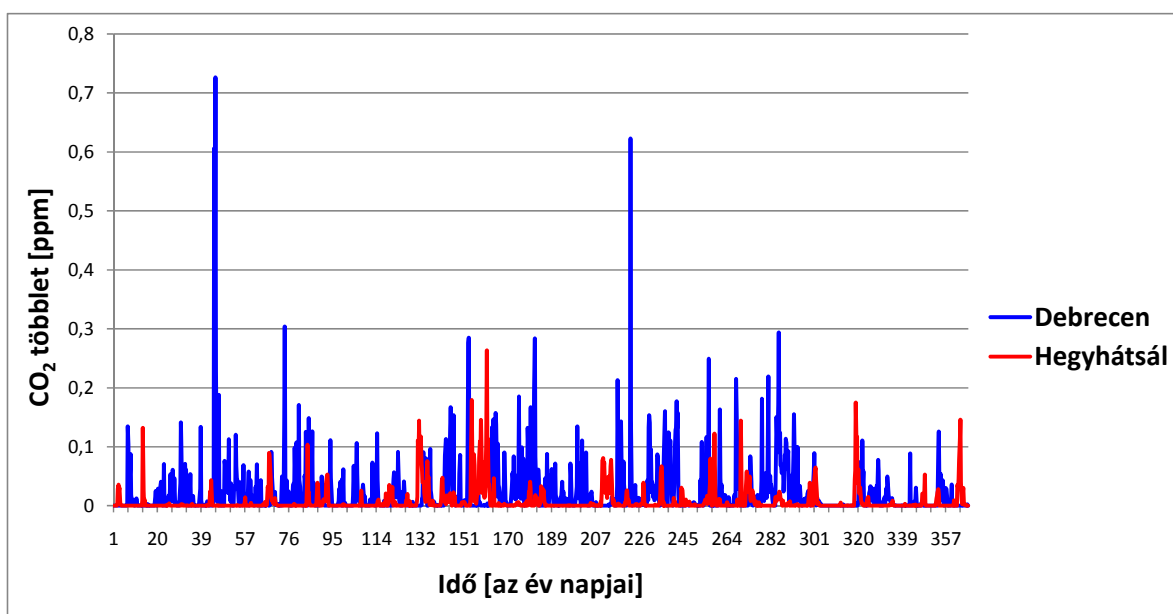
A vizsgálat során a hazai nagyobb hőerőművek szén-dioxid kibocsátását és terjedését modelleztük egy teljes évre, majd elemeztük a háttér-koncentrációhoz képest tapasztalt szén-dioxid koncentráció többletet a hegyhátsáli és a debreceni mérések esetében.

A kiválasztott erőművek szén-dioxid emisszióját azért vizsgáltuk, hogy az általuk okozott fosszilis hozzájárulást a mért szén-dioxid koncentrációban számszerűsíthessük. Ezt egy IDL nyelven kifejlesztett alkalmazásunk segítségével végeztük, amellyel a futtatások során kapott eredményeinket átszámítottuk szén-dioxid keverési aránnyá (ppm). A HYSPLIT modell nem konkrét mértékegységet használ az egyes anyagok légköri koncentrációjának számszerűsítésére, hanem tömeg egység/m<sup>3</sup>-ben végzi a számítást. Ezért technikai okokból a futtatás beállításakor t/h-ban adtuk meg a kibocsátási adatokat, majd az alkalmazás segítségével átváltottuk mg/m<sup>3</sup>-re. A program megírásakor figyelembe kellett venni, hogy a koncentráció-átszámításhoz szükséges a léghőmérséklet és a légnyomás ismerete is. A ppm-be történő átváltáskor az adott hónap átlagos napi középhőmérsékletével számoltunk, légnyomásnak pedig a standard légköri nyomást (1013,25 hPa) vettük. Az így kapott becslött hozzájárulásokat a 8. és 9. ábrán jelenítettük meg. A 8. ábrán a finomabb, 0,1×0,1 fokos rács,

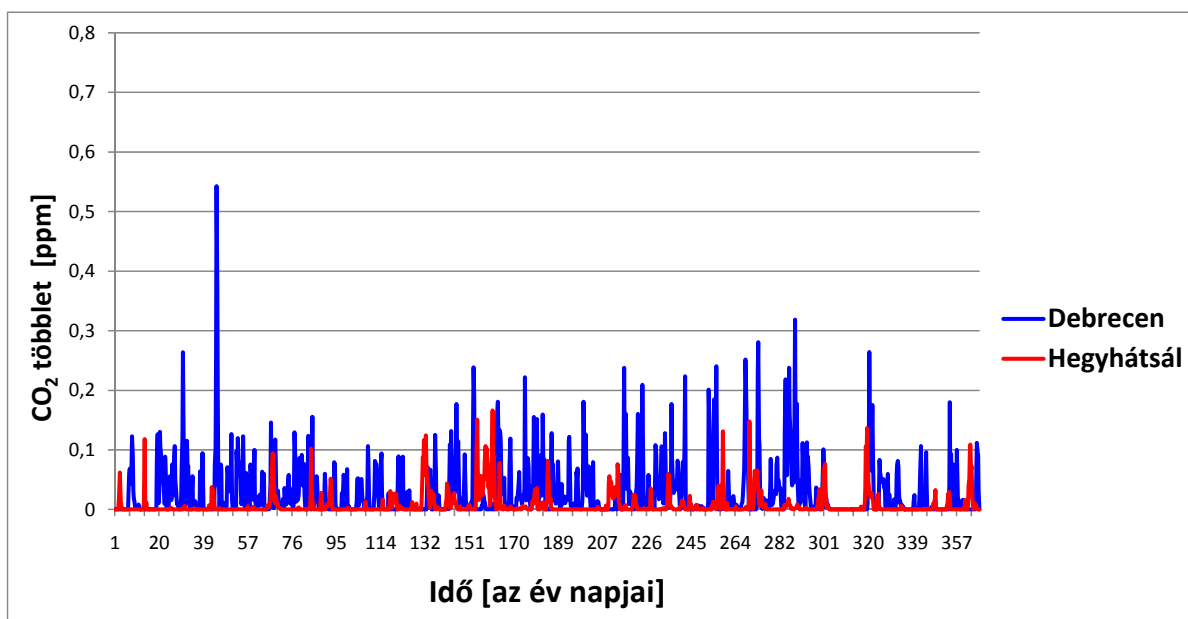
a 9. ábrán pedig a durvább felbontású  $0,5 \times 0,5$  fokos rács esetén számolt értékek láthatók. Mindkét esetben a kék szín jelöli a Debrecenre, a piros szín pedig a Hegyhátsálra becsült fosszilis többletet.

Azt vártuk, hogy Debrecenben nagyobb hatást tapasztalunk az erőművek közelsége és a hazánkban uralkodó nyugatias szelek miatt. A futtatás eredményeit elemezve azt mondhatjuk, hogy valóban itt tapasztalható nagyobb fosszilis hozzájárulás az általunk kiválasztott időszakban. A vizsgált év alatt tapasztalt fosszilis többlet éves összege Debrecenben több mint háromszorosa a Hegyhátsálon mért többletnek.

Látható, hogy a jobb felbontású futtatás (8. ábra) esetén a Debrecenre becsült fosszilis hozzájárulás akár a  $0,7$  ppm-es értéket is meghaladhatja, míg kisebb felbontású vizsgálat során ennél jóval kisebb értékeket láthatunk (9. ábra).



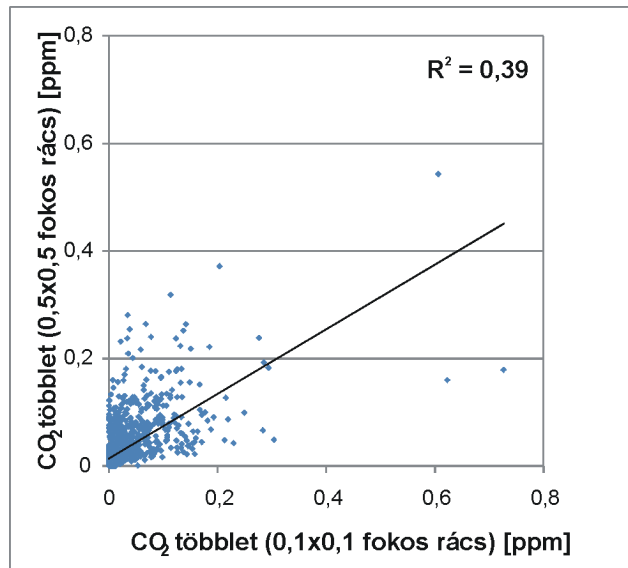
8. ábra. A 2008-ra becsült fosszilis többlet a  $CO_2$  koncentrációban Hegyhátsálon és Debrecenben ( $0,1 \times 0,1$  fokos rács)



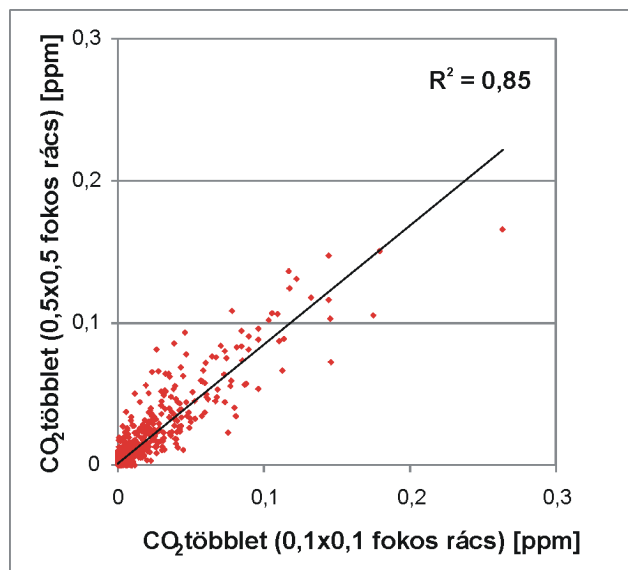
9. ábra. A 2008-ra becsült fosszilis többlet a CO<sub>2</sub> koncentrációban Hegyhátsálon és Debrecenben (0,5×0,5 fokos rács)

A két rácsfelbontás alkalmazásával kapott eredmények összehasonlításához mindkét állomáshoz készítettünk egy-egy ún. scatter-plot ábrát, amelyeken a finomabb felbontás eredményeinek függvényében (vízszintes tengely) ábráztuk a rosszabb felbontás eredményeit (függőleges tengely).

A kapott ábrákat (10. és 11. ábra) összehasonlítva jól látható, hogy a debreceni állomás esetén a két eredmény közötti korreláció jóval kisebb, mint a háttérállomásnak tekinthető hegyhátsáli mérőállomás esetében. Ez a jelenség a források és a mérőállások földrajzi elhelyezkedésével magyarázható. Mivel Magyarországon az uralkodó szélirány nyugatias, ezért a hegyhátsáltól keletre lévő erőművek által kibocsátott szén-dioxid ritkábban éri el a háttérállomást, mint a városi mérőhelyet, ám ezek az esetek valószínűleg sokkal markánsabb időjárási helyzetekhez köthetőek, így a két különböző felbontással kapott eredmény között kisebb a különbség, mint a forrásoktól keletre elhelyezkedő állomás esetében. Emiatt ajánlott a jobb felbontás használata, annak ellenére, hogy a számítási idő így jelentősen megnőhet.



10. ábra. A rosszabb felbontás eredményei (függőleges tengely) a finomabb felbontás eredményeinek függvényében (vízszintes tengely) a debreceni mérőállomáson



11. ábra. A rosszabb felbontás eredményei (függőleges tengely) a finomabb felbontás eredményeinek függvényében (vízszintes tengely) a hegyhátsáli mérőállomáson

A  $0,1 \times 0,1$  fokos rács felhasználásával kapott pontosabb eredményekből havi átlagos fosszilis többlet szén-dioxid koncentrációt számítottunk 2008. szeptember-decemberi időszakára. Ezután az így kiszámolt értékeket kivonva egymásból megkaptuk, hogy mekkora a Debrecenre becsült szén-dioxid fosszilis hozzájárulása Hegyhátsálhoz képest. A 3. táblázat az általunk számolt értékek mellett a debreceni mérések eredményét és a Levin et al. (2003) által kidolgozott módszerrel számított értékeket is tartalmazza (a részleteket lásd a Molnár et

al., 2009 tanulmányban). Ez a módszer azon alapul, hogy a szén-dioxid koncentráció és a légköri szén radiokarbon tartalmának mérésével a fosszilis eredetű szén-dioxid kibocsátás mértéke meghatározható.

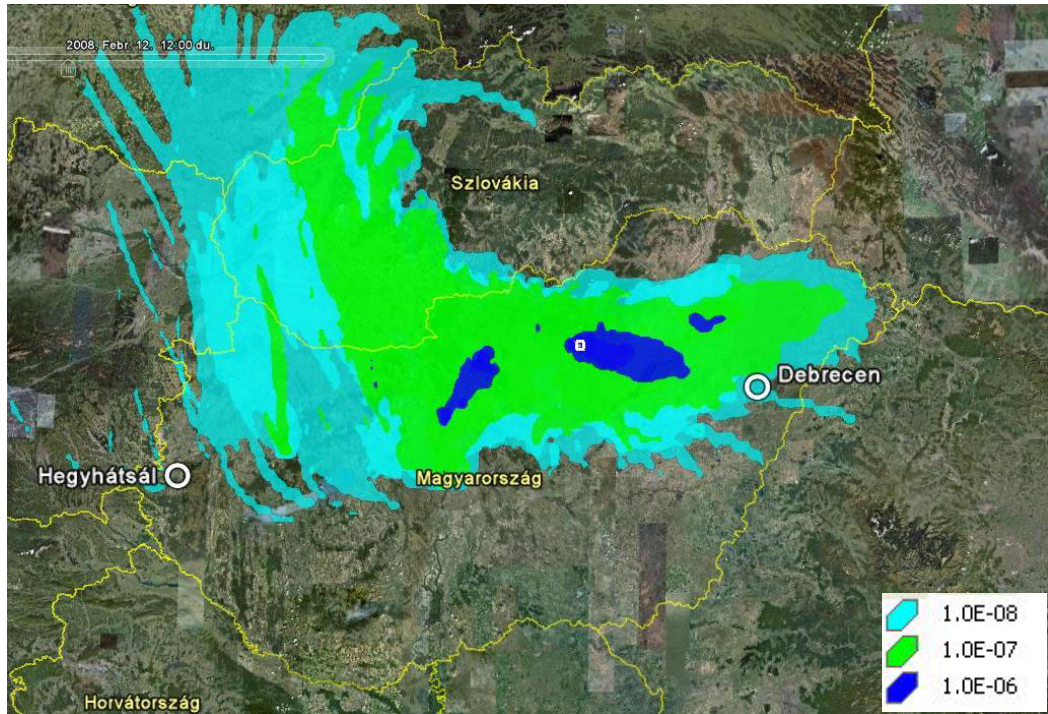
3. táblázat. A Debrecenben mért havi átlagos CO<sub>2</sub> koncentráció, a számított fosszilis többlet és a HYSPLIT modellel becsült hozzájárulás (2008. szeptember-december)

Vizsgált hónap	CO <sub>2</sub> / ppm		
	Debrecen, 3m (Molnár et al., 2009)	Számított (Levin et al., 2003)	Becsült (HYSPLIT)
Szeptember	400,9	2,26	0,01
Október	425,3	17,57	0,03
November	426,5	6,66	<0,01
December	414,6	6,35	<0,01

Összevetve a HYSPLIT modellel végzett vizsgálatainkból kapott becsült eredményeket a Levin et al. (2003) által kidolgozott módszerrel számított értékekkel nagy eltérést tapasztaltunk. Ennek magyarázata elsősorban az, hogy mi csak néhány kiválasztott hazai erőmű szén-dioxid kibocsátását vizsgáltuk, míg a számított értékekre nyilván hatással volt sok más hazai és külföldi forrás is. Ezen kívül a Debrecen belterületén elhelyezett állomás méréseit lényegesen befolyásolja a városi (lokális) fosszilis eredetű emisszió, amely nagymértékben növeli a debreceni fosszilis hozzájárulás mértékét. Összességében elmondhatjuk, hogy a debreceni lokális szén-dioxid kibocsátás hatása lényegesen nagyobb, mint a vizsgált hét erőmű hatása.

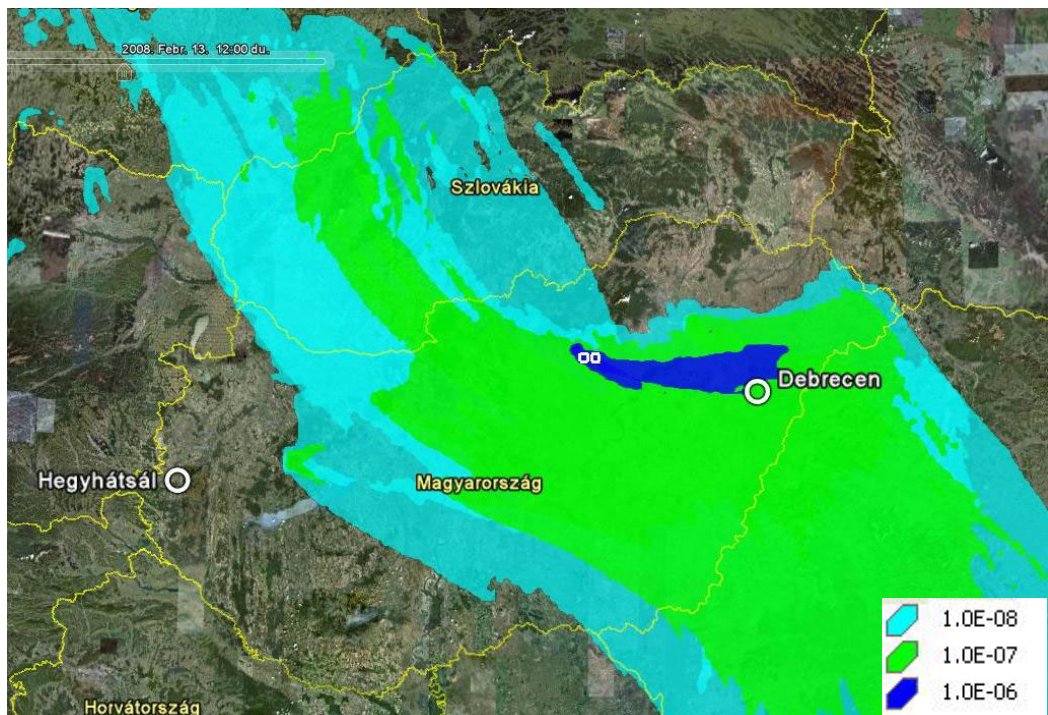
### 3.1.3 Meteorológiai háttér

A finomabb felbontású rács alkalmazásával kapott eredmények kiértékelésekor két kiugró értéket tapasztaltunk (8. ábra). Az egyik február 13-án, a másik pedig augusztus 9-én volt. Megvizsgáltuk, hogy ezekben az időpontokban volt-e olyan légköri folyamat, amely okozhatta ezeket a magas értékeket. A 12. és 13. ábrákon látható a február megfelelő időszakára futtatott szimuláció eredménye, majd a 14. és 15. ábrákon az ugyanerre az időszakra vonatkozó légnyomási térképek. Megfigyelhető egy gyenge áramlású anticiklon Közép-Európa felett. Ez az oka a szennyezőanyagfelhő óra járásával megegyező forgásának.



12. ábra. HYSPLIT modellel készült CO<sub>2</sub>-csóva szimuláció (2008. február 12. 12 UTC).

Háttér: Google Earth

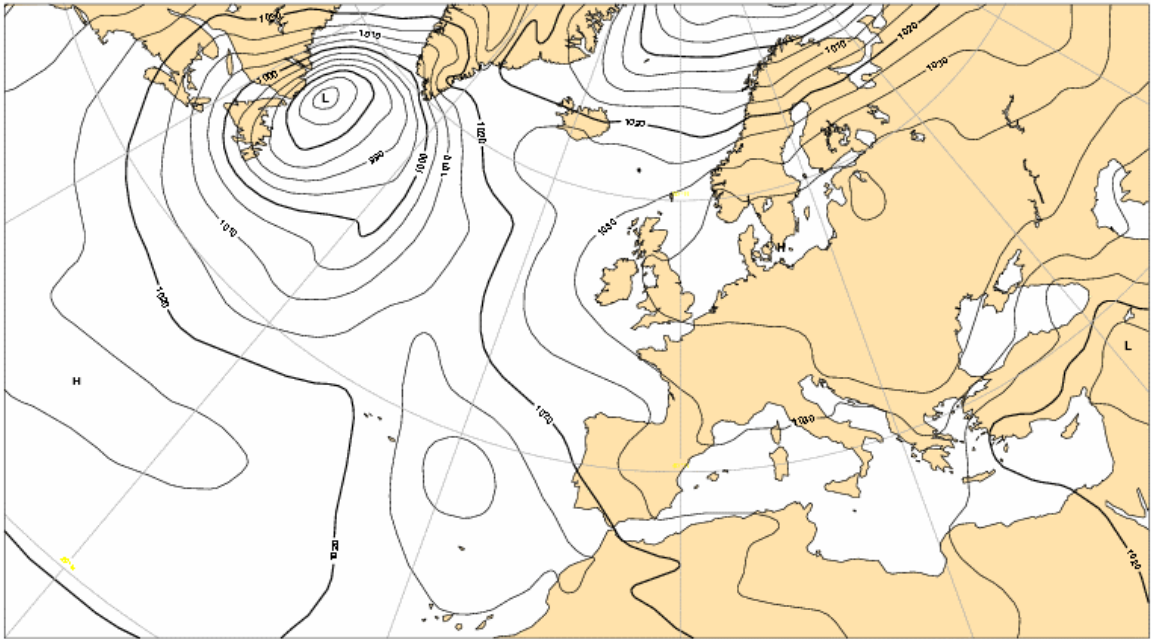


13. ábra. HYSPLIT modellel készült CO<sub>2</sub>-csóva szimuláció (2008. február 13. 12 UTC).

Háttér: Google Earth



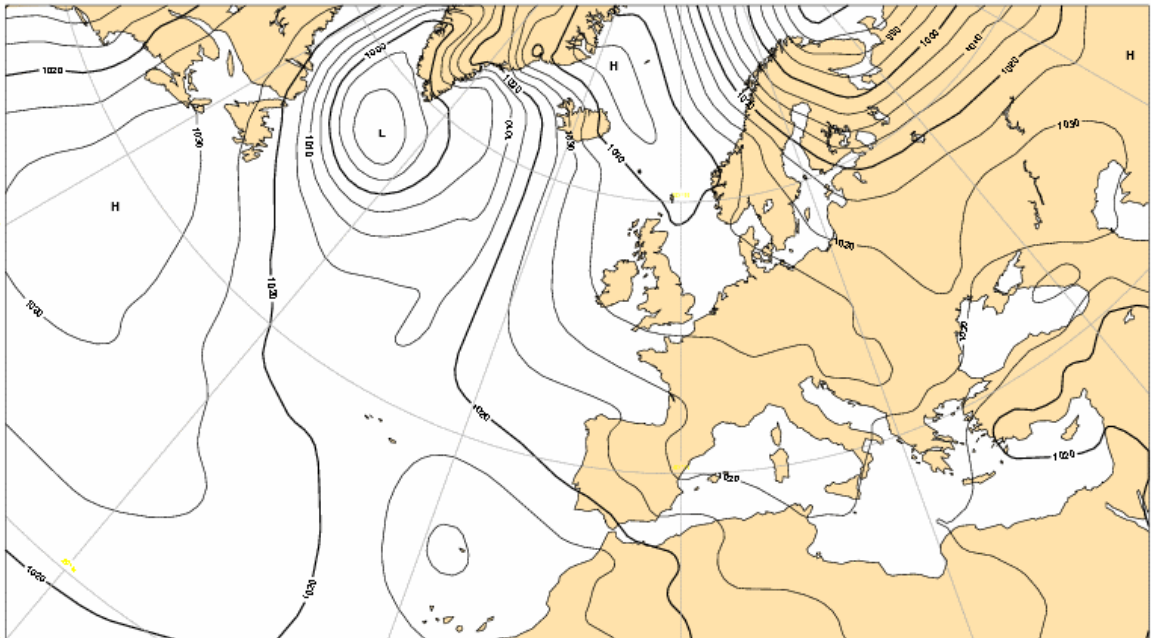
**ECMWF Analysis VT:Tuesday 12 February 2008 12UTC Surface: Mean sea level pressure**



*14. ábra. Légnyomástérkép (2008. február 12. 12 UTC)*

*Forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat*

**ECMWF Analysis VT:Wednesday 13 February 2008 12UTC Surface: Mean sea level pressure**



*15. ábra. Légnyomástérkép (2008. február 13. 12 UTC)*

*Forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat*

### 3.2 Meteorológiai célú terjedési modell használata az állategészségügyben

Ebben a fejezetben szeretném bemutatni kutatómunkánk másik eredményét. A HYSPLIT modellt sikeresen adaptáltuk háziállatok között előforduló fertőző betegségek nagy távolságra történő, levegővel való terjedésének vizsgálatára. Vizsgálataink során a ragadós száj- és körömfájást okozó vírust, mint szennyezőanyagot tekintettük.

A nagy ragályozó képességű fertőző betegségek terjedési útjai lehetnek az ember által kontrollálhatók, illetve nem kontrollálhatók. Kontrollálható útról akkor beszélünk, amikor a fertőző állat más, fogékony állattal érintkezik, illetve a fertőzést úgy nevezett ragályfogó terjeszti. Ragályfogó lehet egy ember, szállítójármű, takarmány vagy egyéb tárgy, amely alkalmas a kórokozó terjesztésére. Ezt mutatja be a 16. ábra.



16. ábra. Kórokozó terjedési utak. A szaggatott vonal jelöli a kontrollálható fertőző utak csoportját, a pontozott vonal pedig a nem kontrollálható fertőző utakat.

(Forrás: Solymosi és Barcza, 2008)

A kontrollálható fertőzési utak az állategészségügyi hatóság intézkedései által korlátozhatók. Azonban a fertőző ágensek más úton is terjedhetnek, amelyeket a hatóság nem képes kontrollálni. Ilyen utak lehetnek például a természetes vizek vagy a vadállatok, de ide

tartozik a szél is, amely nagy távolságra képes eljuttatni a kórokozót. Ha a levegő víruskoncentrációja elég magas és a vírusok fertőző képessége megfelelő, akkor a fogékony állatok megfertőződhetnek (Solymosi és Rubel, 2006).

Kutatásainkban a ragadós száj- és körömfájás vírus széllel való terjedésével foglalkozunk. Célunk, hogy reprodukálva egy 1981-ben megtörtént ragadós száj- és körömfájás esetet, olyan következtetéseket vonjunk le, amelyek a későbbiekben könnyebbé tehetik az esetleges fertőző területek azonosítását. Ehhez szükséges, hogy közelebbről is megvizsgáljuk azokat a területeket, ahol a levegő víruskoncentrációja olyan mértékű, amely a fogékony állatot megfertőzheti.

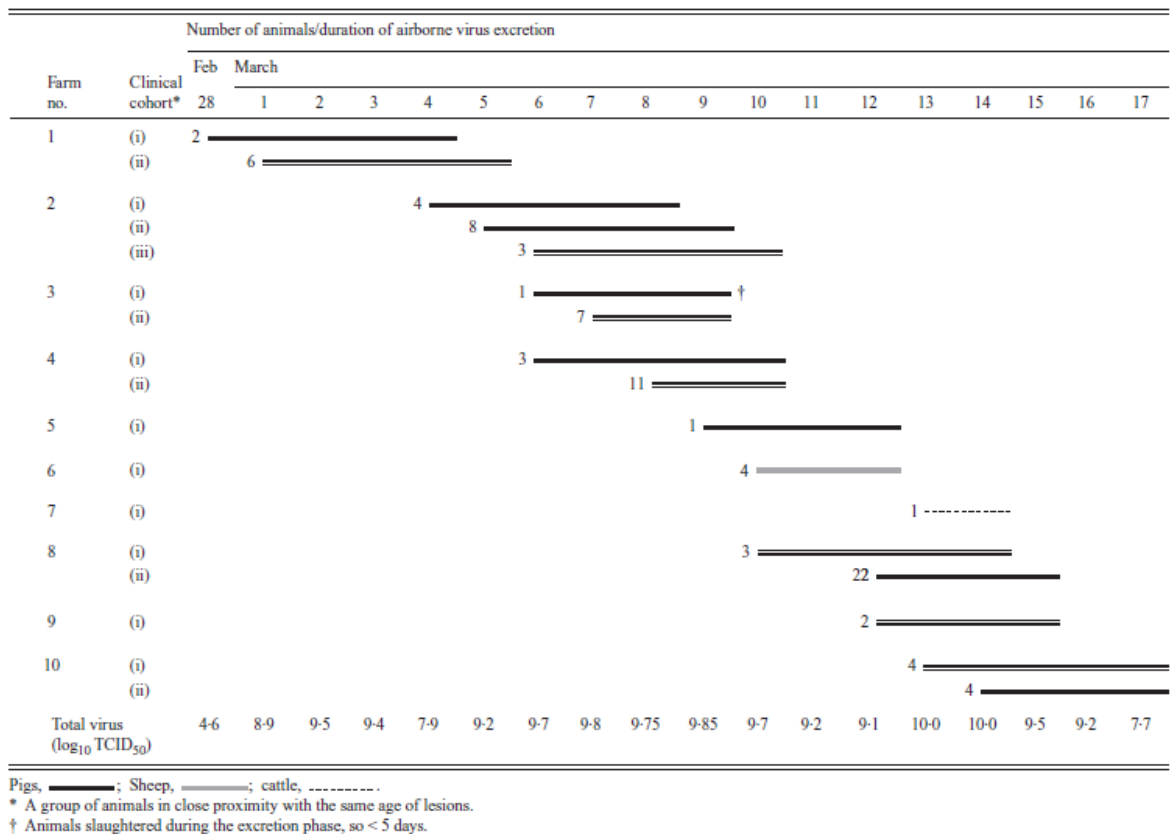
### **3.2.1 Esettanulmány**

A modell alkalmazhatóságát a vírusok széllel való terjedésének modellezésében úgy vizsgáltuk, hogy egy, a témakörben már jól dokumentált esetre végeztünk szimulációs vizsgálatokat.

1981-ben Jersey és Wight szigetén (Egyesült Királyság) ragadós száj- és körömfájás (a későbbiekben FMD) eseteket észleltek, amelyek fertőzési forrását egy korábbi tanulmány egy franciaországi kitörésben állapította meg (Donaldson et al., 1982). 1981. március 4-én Henansal községben (Bretagne, Franciaország) sertéseken állapították meg az FMD O típusát. Az epidemiológiai vizsgálat alapján kiderült, hogy a betegség klinikai tünetei már február 28-a óta jelen voltak. A betegség terjedését célzó intézkedések (vakcinázás, vizsgálatok) során fény derült arra is, hogy további három, sertéseket érintő kitörés fordult elő március 7-én és 8-án. A következő 3 hétben további 10 új esetet jelentettek. Így összesen 14 eset fordult elő ebben az időszakban (13 Cotes-du-Nord-ban, Bretagne-ban és egy pedig Le Mensil-ben, Manche-ban, Normandia területén).

Jersey szigetén egy nem tejlő szarvasmarha állományban (összesen 6 marha) március 18-án két állaton FMD gyanúját felvető tüneteket észleltek. Az ennek alapján végzett virológiai vizsgálatok FMD O vírusfertőzést mutattak ki március 19-én. Később Wight szigetén szintén megjelent az FMD O fertőzés egy helyen. Ott a gazda március 21-én jelentette a klinikai tüneteket, amit 22-én a laboratóriumi vizsgálatok megerősítettek. Az állomány 19 nem tejlő szarvasmarhájából összesen 16-ban állapították meg a betegséget. A klinikai tünetek alapján az epidemiológus csoport úgy vélte, hogy a tünetek legalább 17-18.

óta fennállhattak. A három különböző helyről (Bretagne, Jersey, Wight) származó minták molekulárbiológiai vizsgálata azt mutatta, hogy azok nagyon közel állnak egymáshoz és az O1 Lausanne vakcinatörzshöz. A vizsgálatok arra a következtetésre vezettek, hogy Bretagnében az esetekért egy nem megfelelően inaktivált vírusból készült vakcina tehető felelőssé, és ezek az esetek szolgálhattak forrásként az Egyesült Királyságban előfordult további esetekért is (King et al., 1981). Az elérhető információk alapján készítették egy becslést arra vonatkozóan, hogy az egyes napokon február 28 és március 17 között mekkora lehetett a víruskibocsátás (Sørensen et al., 2000). Ez látható a 17. ábrán. A TCID<sub>50</sub> azt a vírusszámot jelenti, amely a sejttenyészetek 50 százalékában kóros elváltozást eredményez.



17. ábra. Az egyes napokon hány helyen, mennyi állat volt víruskibocsátó, és a naponkénti kibocsátás mértéke (log<sub>10</sub> TCID<sub>50</sub>) (Sørensen et al., 2000)

Vizsgálataink egyik célja az volt, hogy kipróbáljuk a HYSPLIT modell alkalmazhatóságát az előbb vázolt eset kapcsán. Ebben a témában már jelent meg közlemény (Sørensen et al., 2000), amely más modell (Rimpuff) és meteorológiai adatok felhasználásával vizsgálta, hogy a járvány idejéből származó adatok alapján az Egyesült Királyságban

megjelent FMD származhatott-e a bretagne-i esetekből úgy, hogy a kórokozót a szél átfújta a La Manche csatornán. Sørensen et al. (2000) azt találták, hogy míg a Jersey szigeti esetek származhattak Franciaországból, addig a Wight szigeti esetek nem. Ez utóbbi esetben az általuk modellezett fertőző koncentrációjú csóvák ugyan elérték a szigetet, de azok víruskoncentrációja alatta maradt a fertőzőképes szintnek. Számításaik szerint ahhoz, hogy megfelelő koncentrációban juthassanak el a vírusok Franciaországból a Wight szigetre, körülbelül 1000 sertésnek kellett volna vírust exkretálni (üríteni) egy időben.

Sørensen et al. (2000) az előző eredményeiket az 1981. március 7-i és 8-i adatok alapján kapták. Úgy találták, hogy ezeken a napokon a meteorológiai körülmények stabilak voltak. Ezért ezekre a napokra kiszámolták a táblázat alapján, hogy hány állat, mekkora mennyiségű vírust ürített. A 24 óra alatt kibocsátott vírusok száma 9.8 és 9.75  $\log_{10}$  TCID<sub>50</sub> volt. Modellfuttatásuk 1981. március 7. 0 órától március 8. 0 óráig tartott. Az így létrejött fertőző koncentrációjú csóvák közül egy 24 órás átlagos csóvát számítottak.

### **3.2.2 Vizsgálatok a HYSPLIT modellel**

Vizsgálataink során a Sørensen et al. (2000) által használt beállítások alapján paramétereztük a HYSPLIT modellt. A futtatásokat az ERA-40 adatbázist használva végeztük és 24 órás átlagos koncentrációt számítottunk. A modell további paraméterbeállításait Garner et al. (2005) közleményét követve választottuk meg. Ennek megfelelően a modell futtatása során figyelembe vettük a kórokozó részecskék száraz és nedves ülepedését is.

Munkánk annyival volt több, mint a korábbi vizsgálatok, hogy nem csak a Sørensen et al. (2000) által bemutatott két napra számoltuk ki a fertőző koncentrációjú csóvákat, hanem minden olyan napra, amelyből származó kibocsátás a lappangási idő figyelembevételével a célterületeken betegséget tudna előidézni olyan megjelenési dátumokkal, amelyek az eset kapcsán ismeretesek. Mivel a betegség lappangási ideje 2-7 nap, ezért március 11-16-ig is generáltunk fertőző koncentrációjú csóvákat. Ezekre a napokra az átlagos óránkénti víruskibocsátást a 17. ábra adatai alapján számoltuk  $\log_{10}$  TCID<sub>50</sub>-ben. A kapott értékeket a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. A 17. ábra adatai alapján számolt átlagos óránkénti víruskibocsátás  $\log_{10}$  TCID<sub>50</sub>-ben

Vizsgált nap (március)	Átlagos óránkénti víruskibocsátás ( $\log_{10}$ TCID <sub>50</sub> )
7.	8,42
8.	8,37
11.	7,82
12.	7,72
13.	8,62
14.	8,62
15.	8,12
16.	7,82

Mivel a témakörben született közlemények általánosan a TCID<sub>50</sub>-et használják, mint a vírusok mennyiségét kifejező egységet, ezért mi is ezt tesszük. Habár lenne elméleti lehetőség arra, hogy ezt átkonvertáljuk vírus darabszámra, de ez vírusonként, vírustörzsenként eltérő együtthatókkal történhet, ami az alkalmazás általánosítását igen megnehezíti.

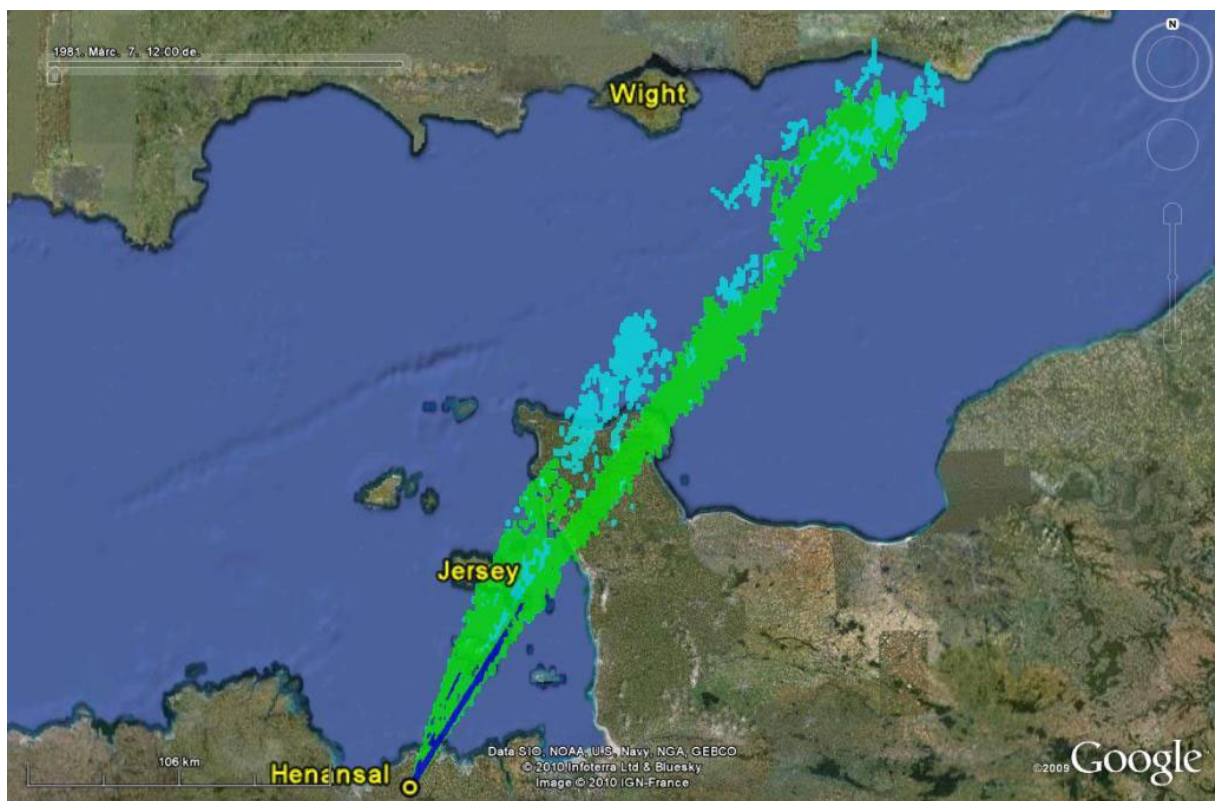
A 3.2.1 fejezetben ismertetett esetben a vizsgált vírust sertéseken észlelték Bretagneban, a kitörés helyén, később Jerseyben pedig szarvasmarhákban. Ezért a fertőző koncentrációt az egyes fajok esetében is megvizsgáltuk. A különböző fajokra vonatkozó fertőző adatokat az 5. táblázat foglalja össze. Láthatjuk, hogy a legmagasabb víruskoncentráció a sertések megbetegedéséhez szükséges, míg a szarvasmarhák megfertőződéséhez ennek töredéke is elegendő.

5. táblázat. Az FMD vírus minimális fertőző dózisa és a fertőző koncentráció a különböző fajok esetében (Sørensen et al., 2000)

Faj	Minimális fertőző dózis (TCID <sub>50</sub> )	Fertőző koncentráció (TCID <sub>50</sub> /m <sup>3</sup> )
szarvasmarha	10	0,06
sertés	400	7,70

### 3.2.3 Eredmények

A Garner et al. (2005) tanulmány paraméterezését használva a futtatások során kapott eredményeinket összevetettük a korábban kiadott közleményekkel (Sørensen et al., 2000). Azt tapasztaltuk, hogy a cikkben leírtak szerint a vírus valóban nem juthatott át a La Manche csatorna másik oldalára, viszont az érintett Jersey szigetre igen (18. ábra). Az egyes fajok megfertőződéséhez szükséges víruskoncentráció vizsgálata során azt is megállapítottuk, hogy olyan magas koncentráció nem juthat el a Jersey szigetig, amely sertéseket fertőzhet meg, de a szarvasmarhák megbetegedéséhez szükséges víruskoncentráció eljuthatott, megfelelő szélirány és meteorológiai körülmények esetén.



18. ábra. Az 1981. március 7-i fertőző koncentrációjú csóva (HYSPLIT modellel készült szimuláció, háttér: Google Earth)

Az 1981-es eset vizsgálatát csak a 2,5 fokos térbeli felbontású ERA-40 adatokkal tudtuk elvégezni. Azonban fontosnak tartottuk, hogy ennél jobb felbontású adatokra is elkészítsük a futtatásokat. Ezért az ERA Interim adatbázis felhasználásával modellfuttatásokat végeztünk az 1997-2006-os évek ugyanezen időszakaira abból a célból, hogy statisztikailag

vizsgáljuk azt, hogy az adott időszakban az előfordulási viszonyok milyen gyakorisággal teszik lehetővé a fentiekben vizsgált eset feltételezett újbóli bekövetkeztét.

A fertőző koncentrációjú csóvák alapján adódó fertőzési lehetőségeket a 6. és 7. táblázatok foglalják össze. A 6. táblázatban összefoglaltuk, hogy az általunk vizsgált napokon hány évben, illetve a 7. táblázatban azt tüntettük fel, hogy az évek adott szakaszában hány napon érte el, illetve nem érte el Jersey és Wight szigetét a vírus fertőző koncentrációban.

A statisztikai vizsgálat során kapott eredmények kiértékelése után azt tapasztaltuk, hogy az esetek felében a március 7-i időjárás megfelel a terjedésnek (6. táblázat). Tehát a vizsgált 10 év ezen napjain megvolt az elméleti lehetősége annak, hogy a fertőző koncentrációjú csóva a megfelelő víruskoncentrációban eljusson Henansalból Jersey szigetére. Az eredményekből az is látszik, hogy annak a valószínűsége, hogy az Egyesült Királyságbeli Wight szigetre is eljusson a csóva minimális.

6. táblázat. Statisztikai vizsgálatok 1.

Vizsgált nap (március)	Jersey		Wight	
	Évek száma			
	Nem érte el	Elérte	Nem érte el	Elérte
7.	5	5	9	1
8.	9	1	9	1
11.	10	0	10	0
12.	10	0	10	0
13.	10	0	10	0
14.	9	1	10	0
15.	7	3	10	0
16.	9	1	10	0



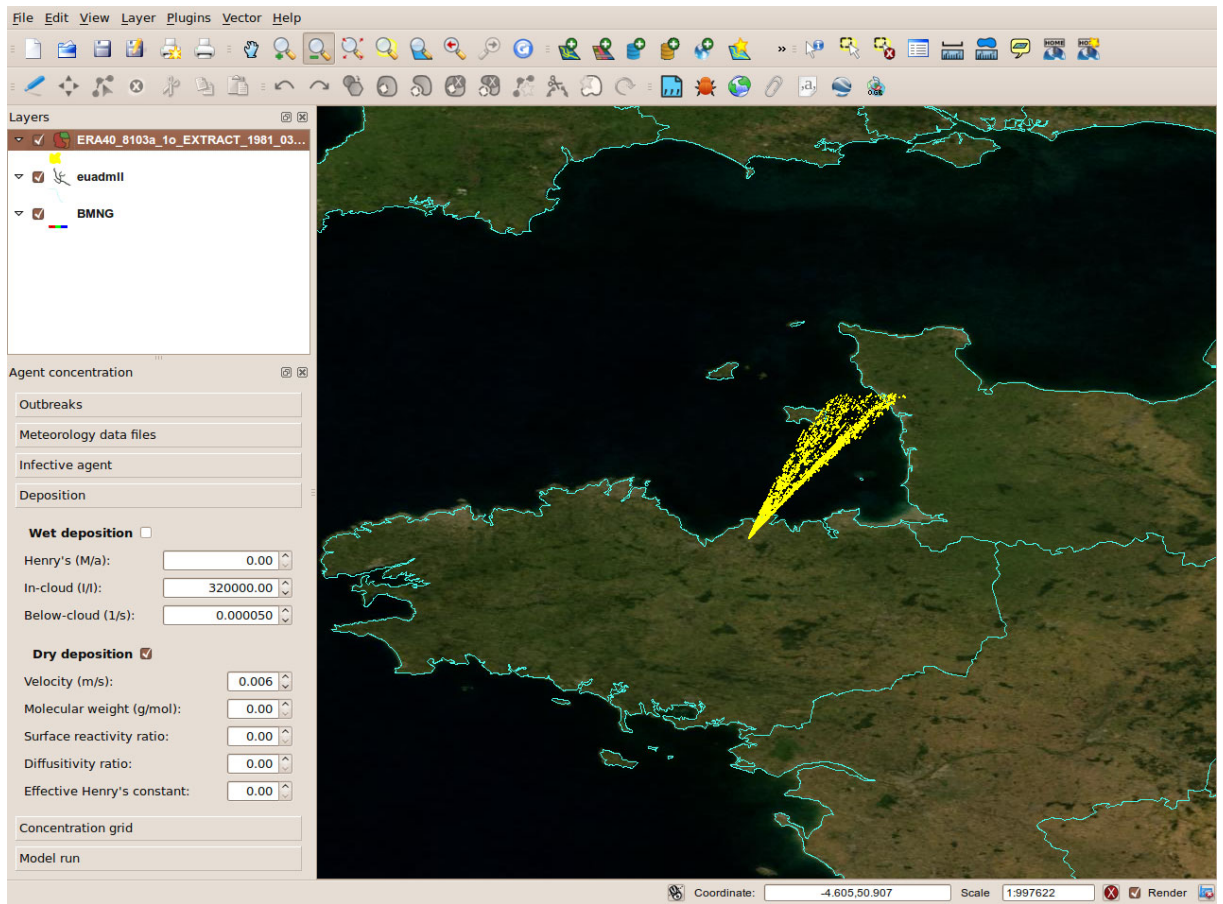
7. táblázat. Statisztikai vizsgálatok 2.

Vizsgált év	Jersey		Wight	
	Napok száma			
	Nem érte el	Elérte	Nem érte el	Elérte
1997	7	1	8	0
1998	8	0	8	0
1999	7	1	8	0
2000	8	0	8	0
2001	5	3	7	1
2002	7	1	8	0
2003	7	1	7	1
2004	7	1	8	0
2005	6	2	8	0
2006	7	1	8	0

### 3.2.4 Fejlesztés

A HYSPLIT modell nagyon sok pozitív eleme mellett meg kell említenünk, hogy nem túl felhasználóbarát. A fejlesztés célja az volt, hogy a kórokozók széllel való terjedésének modellezéséhez egy olyan GIS-be (Geographic Information System- Térinformatikai Rendszer) integrált grafikus eszközt hozunk létre, ami egyszerű és áttekinthető felülete segítségével segíti a felhasználót a modell paraméterezésében, futtatásában és az eredmények interaktív megjelenítésében. Egyelőre csak a modell általunk használt koncentráció részére végeztük el a fejlesztést, de érdemes a HYSPLIT modell trajektória részére is elkészíteni, mivel a vektorok (például szúnyogok) sodródásának modellezésében trajektóriákat használnak.

A fejlesztéseket C++ programozási nyelven végeztük a Qt Creator integrált fejlesztő környezetben. A fejlesztett modul, a Quantum GIS ingyenes, platformfüggetlen térinformatikai rendszerben, mint kiegészítés (plugin) használható.



19. ábra. A HYSPLIT QGIS-be való integrálásának képernyőképe

## Összefoglalás

Dolgozatomban különböző légszennyezőanyagok terjedésével foglalkoztam. Kutatásunk célja az volt, hogy adaptáljunk egy olyan korszerű modellt, amellyel a légszennyezőanyagok és szennyezőanyagok terjedése leírható. A modell adaptálásával és a szükséges meteorológiai háttér kialakításával egy olyan környezetet szeretnénk volna létrehozni, amely több tudományterületet átfogóan segítheti a kutatók és döntéshozók munkáját a légszennyezőanyagok veszélyes anyagok vonatkozásában. Ehhez az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet Légkör Kutatólaboratóriuma (NOAA ARL) által kifejlesztett HYSPLIT modellt használtuk fel.

A meteorológiai mezők előállításához az ECMWF reanalízis projektjének legkorszerűbb adatbázisát, az ERA Interim-et használtuk fel, amely felbontásában és minőségében is felülmúlja az ECMWF korábbi reanalízis adatbázisait. Kutatásunk során az ERA Interimtől eltérő meteorológiai mezőket is használtunk (ERA-40 adatbázis), és vizsgáltuk a szennyezőanyag terjedésének függését a meteorológiai adatoktól. Áttekintettük a számunkra fontos beállítási lehetőségeket, illetve meghatároztuk, hogy a kutatásunk szempontjából melyek az optimális paraméterek.

A modell segítségével feldolgoztuk Magyarország legjelentősebb, fosszilis tüzelőanyagot használó erőműveinek szén-dioxid emisszióját. Modelleltük és számszerűsítettük ezek lehetséges hatását a hazai magas torony alapú szén-dioxid koncentrációmérő állomásra, valamint összevetettük a debreceni izotóp alapú mérések eredményeivel is. Az eredmények rámutattak, hogy a vizsgált erőművek együttes hatása sem éri el az 1 ppm többletet az egyes állomásokon a vizsgált időszakban, viszont a háttérkoncentrációhoz képest nem elhanyagolható az erőművek hozzájárulása.

Munkánk másik eredménye, hogy adaptáltuk a modellt fertőző betegségek nagy távolságra történő, levegővel való terjedésének vizsgálatára. A HYSPLIT modell segítségével egy 1981-ben megtörtént járvány során feltételezett vírusszóródást modelleztünk. Modellfuttatásokat végeztünk az 1997-2006-os évek ugyanezen időszakaira abból a célból, hogy statisztikailag vizsgáljuk azt, hogy az adott időszakban az előfordulási viszonyok milyen gyakorisággal teszik lehetővé az általunk vizsgált eset esetleges újbóli bekövetkeztét.

A modell könnyebb alkalmazhatósága érdekében egy GIS-be integrált grafikus eszközt fejlesztettünk.

## Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Barcza Zoltán témavezetőmnek a dolgozatom elkészítésében nyújtott segítségért, türelméért és értékes tanácsaiért. Köszönöm Dr. Solymosi Norbert témavezetőmnek, aki a ragadós száj- és körömfájást okozó vírus terjedésének modellezésével kapcsolatos munkámban segített, hogy sok időt és energiát áldozott közös munkánkra.

Köszönettel tartozom Ihász Istvánnak, aki a szennyezőanyag-terjedés meteorológiai háttéréhez kapcsolódó térképekkel segítette munkámat, és rendelkezésünkre bocsátotta az ERA Interim adatokat GRIB formátumban, illetve Kelemen Fanninak, hogy elérhetővé tette a HYSPLIT által is felhasználhatóvá konvertált Interim adatokat.

Hálásan köszönöm Kis-Kovács Gábornak, az Országos Meteorológiai Szolgálat Üvegházgáz-nyilvántartási Osztály vezetőjének a rendelkezésünkre bocsátott emissziós adatokat, valamint Dr. Molnár Mihálynak, a Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézete Hertelendi Ede Környezetanalitikai Laboratórium vezetőhelyettesének a debreceni mérésekről adott tájékoztatását és az ott mért eredmények közzétételét.

Külön köszönöm Szabó Tamásnak, hogy személyes tapasztalataival és ötleteivel segítette dolgozatom elkészülését.

Köszönettel tartozom az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet Légköri Kutatólaboratóriumának, hogy kifejlesztette, és rendelkezésünkre bocsátotta a HYSPLIT modellt.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönetet mondok mindazoknak, akik lelkesítettek és támogattak a dolgozat megírása során, nélkülük nem sikerült volna megírnom ezt a dolgozatot.

## **Irodalomjegyzék**

Anderson, B. 2008. Evaluation Methods for Long Range Transport. 9th Modeling Conference Presentations, Research Triangle Park, NC, USA, 9-10 October 2008.

Donaldson, A. I., Gloster, J., Harvey, L. D .J., Deans, D. H. 1982. Use of prediction models to forecast and analyse airborne spread during the foot-and-mouth disease outbreaks in Brittany, Jersey and the Isle of Wight in 1981. *The Veterinary Record*, 110, 53–7.

Draxler, R. R. 1990. The calculation of low-level winds from the archived data of a regional primitive equation model. *Journal of Applied Meteorology*, 29, 240-248.

Draxler, R. R. 1992. Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectories (HYSPLIT) Version 3.0 – User’s guide and model description, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-195, 26 p.

Draxler, R. R., Hess, G. D. 1997. Description of the HYSPLIT\_4 modeling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, December, 24pp.

Draxler, R. R., Stunder B. J. B. 1988. Modeling the CAPTEX vertical tracer concentration profiles. *Journal of Applied Meteorology*, 27, 617-625.

Draxler, R. R., Taylor A. D. 1982. Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 21, 367-372.

Garner, M. G., Hess, G. D., Yang, X. 2005. An integrated modelling approach to assess the risk of wind-borne spread of foot-and-mouth disease virus from infected premises. *Environmental Modeling and Assessment*, 11, 195–207.

Haszpra, L., Barcza, Z., 2001. A magyarországi légkör/bioszféra szén-dioxid fluxus mérések eredményei. *Fizikai Szemle*, 2001 (2), 50-52.

Hess, G. D., Garner, M. G., Yang, X. 2007. A sensitivity analysis of an integrated modelling approach to assess the risk of wind-borne spread of foot-and-mouth disease virus from infected premises, *Environmental Modeling & Assessment*, 13, 209–220.

Hurley, P. 1994. PARTPUFF - A Lagrangian particle-puff approach for plume dispersion modeling applications. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 285-294.

IPCC. 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, USA.

King, A. M. Q., Underwood, B. O., McCahon, D., Newman, J. W. I., Brown, F. 1981. Biochemical identification of viruses causing the 1981 outbreaks of foot and mouth disease in the UK. *Nature*, 1981 (293), 479–80.

Kis-Kovács, G., Lovas, K., Nagy, E., Tarczay, K. 2009. Üvegházhatású gázok antropogén kibocsátása és elnyelése [kézirat]. Országos Meteorológiai Szolgálat.

Levin, I., Kromer, B., Schmidt, M., Sartorius, H. 2003. A novel approach for independent budgeting of fossil fuel CO<sub>2</sub> over Europe by <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> observations. *Geophysical Research Letters*, 30 (23), 2194, doi:10.1029/2003GL018477.

Lin, J. C., Gerbig, C., Wofsy, S. C., Andrews, A. E., Daube, B. C., Davis, K. J., Grainger, C. A. 2003. A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model. *Journal of Geophysical Research*, 108 (D16), 4493, doi: 10.1029/2002JD003161, 2003.

Ludwig, F. L., Gasiorek, L. S., Ruff, R. E., 1977. Simplification of a Gaussian Puff Model for Real-Time Microcomputer Use. *Atmospheric Environment*, Volume 11, 431-436.

Molnár, M., Haszpra, L., Svingor, É., Veres, M., Major, I., Svetlík, I. 2009. Atmospheric fossil fuel CO<sub>2</sub> measurement using a field unit in a Central European city during the winter of 2008 [kézirat].

Pudykiewicz, J. A., Koziol, A. S., 1998: An Application of the Theory of Kinematics of Mixing to the Study of Tropospheric Dispersion. *Atmospheric Environment*, Volume 32, pp.4227-4244.

Rubel, F., Fuchs, K. 2005. A decision-support system for real-time risk assessment of airborne spread of the foot-and-mouth disease virus. *Methods of Information in Medicine*. 2005, 44 (4), 590-5.

Rubel, F., Schachner, E., Strele, C., Solymosi, N. 2004. Estimation of Airborne Spread of Foot-and-Mouth Disease Virus - Abschätzung der aerogenen Verbreitung von Maul- und Klauenseuche Viren. 1st GEOLAND Forum, CSP Session, Berlin, 2004.

Solymosi, N., Rubel, F. 2006. Egy Gauss-modell implementáció a ragadós száj- és körömfájás vírusának széllel való terjedésének modellezéséhez [kézirat].

Sørensen, J. H., Mackay, D. K. J., Jensen, C. Ø., Donaldson, A. I. 2000. An integrated model to predict the atmospheric spread of foot and-mouth disease virus. *Epidemiology Infection*, 124, 577–590.

Stanhill, G., Cohen, S. (2001). Global Dimming: A Review of the Evidence for a Widespread and Significant Reduction in Global Radiation with Discussion of Its Probable Causes and Possible Agricultural Consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 255-278.

Szabó, T. 2004. A HYSPLIT\_4 trajektória-modell adaptálása és alkalmazása. Tudományos diákköri dolgozat, Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem. pp 35.

Szabó, T. 2007. A szén-dioxid koncentráció változékonyságának vizsgálata európai toronymérések adatai alapján. Diplomamunka. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem. pp 59.

Taylor, A. D. 1997. Conformal map transformations for meteorological modelers. *Computers and Geosciences*, 23, 63-75.

Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A. 2005. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science*, 308, 5723.

Wild, M. 2009. Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research*, 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470.