

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Meteorológiai Tanszék

**ENSEMBLE CLUSTEREZÉS ÉS TERJEDÉSI  
MODELL EREDMÉNYEINEK  
ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA**



Készítette:

**SÁBITZ JUDIT**

Meteorológus MSc

Témavezető:

**IHÁSZ ISTVÁN**

Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens:

**DR. BARCZA ZOLTÁN**

ELTE Meteorológiai Tanszék

**Budapest, 2012**

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Áttekintés .....</b>	<b>5</b>
1.1 A numerikus előrejelzés elmélete .....	5
1.2 Az ECMWF előrejelző rendszere .....	6
1.3 Ensemble (valószínűségi) előrejelzések .....	8
1.4 Az ensemble előrejelzések megjelenítése .....	9
1.5 Ensemble előrejelzések clusterezése .....	10
<b>2. Légköri transzport modellezés .....</b>	<b>19</b>
2.1 Légköri terjedési modellek .....	19
2.2 A HYSPLIT 4.9 modell .....	21
2.3 Meteorológiai adatmezők .....	23
<b>3. Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek .....</b>	<b>25</b>
3.1 Felhasznált adatok .....	25
3.2 Alkalmazott módszerek .....	26
<b>4. Esettanulmányok leírása .....</b>	<b>29</b>
4.1 A 2011-es fukusimai atomkatasztrófa .....	29
4.2 A 2010-es Eyjafjallajökull vulkánkitörés .....	31
4.3 A 2011-es Grímsvötn vulkánkitörés .....	33
<b>5. Eredmények .....</b>	<b>36</b>
5.1 Clusterezés .....	36
5.2 ECMWF ERA Interim alapján végzett HYSPLIT számítások .....	39
5.3 ECMWF ensemble előrejelzések alapján végzett HYSPLIT számítások .....	44
5.3.1 2010. március 20-i eset .....	45
5.3.2 2010. április 14-i eset .....	48
5.3.3 2011. május 21-i eset .....	50
5.4 Továbbfejlesztési lehetőségek .....	52
<b>Összefoglalás .....</b>	<b>54</b>
<b>Irodalomjegyzék .....</b>	<b>56</b>
<b>Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>61</b>

## Bevezetés

Az időjárás nagymértékben befolyásolja mindennapi életünket, éppen ezért jövőbeni alakulásának minél pontosabb ismerete már évezredek óta foglalkoztatja az emberiséget. Napjaink időjárás előrejelzéseihez elengedhetetlen a numerikus modellek használata, amelyek segítségével lehetőség nyílik a légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer közelítő megoldására. A mérésekből és a közelítő eljárásokból adódó bizonytalanságok miatt a numerikus modellek kiindulási állapotát nem tudjuk kellő pontossággal meghatározni. Erre a problémára jelenthet megoldást az ensemble (valószínűségi) előrejelzés, amelynek köszönhetően megbízhatóbb előrejelzések készülhetnek és lehetőség nyílik az előrejelzések bizonytalanságának prognosztizálására is.

Az előrejelzések pontosságának növelésére és a numerikus modellek folyamatos fejlesztése érdekében 1975-ben megalakult a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) (Woods, 2006), melynek 1994 óta Magyarország is társult tagja (Kaba, 1995). Csatlakozásunknak köszönhetően a hazai operatív középtávú (2-10 napos) előrejelzések az ECMWF előrejelzésein alapulnak (Ihász, 2003a, Ihász et al., 2010). A determinisztikus előrejelzés mellett nagy hagyománya van az ensemble előrejelzések használatának is. Az ECMWF az 5-7. napra előrejelzett 500 hPa-os geopotenciál mező alapján végez clusterezést egész Európa területére. A hazai meteorológiai igények kielégítésére az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) 2003 nyarától kezdve operatíván készülnek Kárpát-medence középpontú cluster előrejelzések (Ihász, 2003b). A hazai clusterezési algoritmus alapvetően hasonlít az ECMWF-ben alkalmazott eljárásokhoz. Az előrejelző központ 2010 elején vezette be új európai térséget lefedő clusterezési algoritmusát (Ferranti and Corti, 2011). Mivel a diplomamunkámban bemutatásra kerülő három esettanulmányunk kívül esik az OMSZ-beli clusterezési tartományon, így kézenfekvő volt az ECMWF európai clusterezési produktumait használni.

A légköri terjedési modellek esetében jellemzően determinisztikus előrejelzéseket használnak, egyes extrém helyzet vizsgálatához azonban célszerű ensemble előrejelzéseket alkalmazni. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál írt diplomamunkám keretén belül olyan vizsgálatokat végeztünk, amelyek során ensemble módban futtattunk diszperziós és trajektória modellt.

Célunk az ensemble előrejelzések használatának vizsgálata diszperziós és trajektória modellel, valamint a modell cluster reprezentatív tagokra való futtatása és az eredmények a cluster tagokon belüli ensemble előrejelzések számával való súlyozása. Ehhez első lépésként determinisztikus adatok felhasználásával végeztünk trajektória és diszperzió számításokat, hogy összehasonlíthassuk az így kapott és az ensemble közelítéssel előállított eredményeket. Vizsgálatainkhoz a HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trejectory) modellt használtuk fel (*Draxler and Hess, 1997*).

Az EPS (Ensemble Prediction System) alapú trajektória és diszperziószámítás egyik nagy előnye, hogy a meteorológiai helyzetből adódó aktuális bizonytalanságot tükrözi. Emellett, például koncentrációsámítás esetén bekövetkezési valószínűség rendelhető ahhoz, hogy a koncentráció egy bizonyos kritikus küszöbértéket elér vagy meghalad.

Dolgozatom elején röviden áttekintem a numerikus időjárás előrejelzés elméletét és gyakorlati jelentőségét, ismertetem a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központjának előrejelző rendszerét és a központ által előállított legfontosabb előrejelzési produktumokat. Ezt követően a légköri transzport modellek általános jellemzőit és a kiválasztott HYSPLIT modellt mutatom be részletesebben. Külön fejezetben ismertetem a felhasznált adatokat és módszereket, majd a modellel vizsgált három esettanulmányt és legfontosabb eredményeinket ismertetem.

# 1. Áttekintés

## 1.1 A numerikus előrejelzés elmélete

A meteorológia egy külön ága a számszerű időjárás-előrejelzés. A légkör viselkedését jó közelítéssel leíró összetett matematikai egyenletrendszer megoldására már a 20. század elején kísérleteket tettek. A napjainkban használt numerikus modellek fejlődésének legfontosabb állomásai közül az első Richardson kísérlete volt, aki 1922-ben elsőként vállalkozott számszerű előrejelzés készítésére egy általa alkotott dinamikai modellel (*Richardson, 1922*). Kísérlete nem járt sikerrel, modellje irreális légnyomásváltozást prognosztizált. Kudarca hosszú időre leállította a numerikus előrejelzés fejlődését. Az első sikeres numerikus előrejelzést egy barotróp örvényességi egyenleten alapuló modellel Neumann, Charney és Fjortoft készítették el 1950-ben (*Charney et al., 1950*). Ezt követően elterjedt a középső- és felső troposzféra nyomási mezejét jól leíró kvázigeosztrófikus szűrt modellek használata, majd a nyomási képződmények fejlődésére jó előrejelzést adó baroklin modellek alkalmazása. A számítástechnika gyors fejlődésének köszönhetően lehetővé vált a teljes hidro-termodinamikai egyenletrendszeren – a primitív egyenleteken – alapuló modellezés, amellyel már az alsó troposzféra nyomási mezejére, a hőmérsékletre, valamint a szélmezőre vonatkozóan is készülhetnek megbízható prognózisok. Az 1960-as években Lorenz kidolgozta a káoszelmélet alapját, későbbi munkájával pedig megalapozta az ensemble előrejelzések módszerét (*Lorenz, 1963a; 1963b*).

Napjaink időjárási és éghajlati előrejelzései nagyrészt numerikus prognosztikai modellek eredményein alapulnak. A numerikus modellek a légkör fizikai állapotát leíró hidro-termodinamikai egyenletrendszert oldják meg, amelyek parciális differenciálegyenletekből állnak, így megoldásukhoz kezdeti- és peremfeltételekre van szükség. A pontos előrejelzéshez alapvető fontosságú a kezdeti- és peremfeltételek minél pontosabb megadása (*Palmer et al., 2006*). Alapvető probléma azonban, hogy kevesebb pontbeli információ áll rendelkezésünkre, mint amennyi a modell rácspontjainak száma. Az adathiány, a hibás adatok, valamint a közelítésekből adódó bizonytalanságok miatt a numerikus modellek kezdeti mezőjét nem tudjuk pontosan meghatározni. A számszerű időjárás-előrejelzés alapja az időjárás pillanatnyi állapotának minél pontosabb leírása. Az előrejelzés folyamatának meghatározó lépése az adatasszimiláció, amely magában foglalja a kezdeti feltételek előállítását, a megfigyelési

adatok rácspontokra való interpolálását matematikai módszerekkel, valamint a hibás adatok kiszűrését is.

Ezután kerül sor a légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer numerikus (közelítő) megoldására, amely egy előre definiált térbeli rácson történik adott nagyságú időlépcsővel haladva a diszkretizált időben. A numerikus prognosztika fontos lépése az utófeldolgozás, az eredmények megjelenítése és speciális paraméterek származtatása. A globális modellek korlátozott tér- és időbeli felbontásuk miatt csak nagyobb térségek nagyléptékű időjárási folyamatait írják le kellő pontossággal, míg kisebb régiók időjárásának modellezésére nem megfelelőek. Ezért az ilyen kis térségek időjárásának előrejelzéséhez jobb térbeli felbontású modelleket használnak, amelyek korlátos tartományra adnak előrejelzést, peremfeltételeiket a globális modellek adják. Ezek a számítások viszont jelentős számításigénnyel rendelkeznek.

## **1.2 Az ECMWF előrejelző rendszere**

A numerikus előrejelzési modellekből származó eredményeket, például előrejelzéseket vagy szennyezőanyag terjedést leíró szimulációkat széles körben alkalmazzák a meteorológiai vizsgálatokban. Szükség van a modellek fejlesztésére, hogy megbízhatóbb és pontosabb eredményeket szolgáltatassanak a felhasználóknak. Ennek érdekében a szakemberek folyamatosan növelik a modellek felbontását, finomítják a légköri folyamatokat leíró parametrizációt, a mérőhálózat és az adatasszimilációs módszerek fejlesztésével pontosabb kezdeti feltételeket biztosítanak és egyre hatékonyabb utófeldolgozási módszereket dolgoznak ki.

A fenti feladatok megoldására, 18 ország összefogásaként alakult meg a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja (European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF) 1975-ben (Woods, 2006). A readingi központú szervezet az egyik legnagyobb olyan időjárás-előrejelző központ Európában, amely operatíván állít elő egész Földet lefedő előrejelzéseket. A szervezet célja nem csak a meteorológiai modellek továbbfejlesztése a legkorszerűbb matematikai és számítástechnikai módszerekkel, hanem egy olyan egységes, globális rendszer létrehozása, amellyel lehetőség nyílik jó minőségű, középtávú, azaz 2-10 napos időtartamra szóló globális előrejelzések operatív előállítására. Az előrejelző központ 1979 óta naponta készíti operatíván a közép- és hosszútávú előrejelzések

alapját képező determinisztikus, 1992 óta pedig valószínűségi, ún. ensemble előrejelzéseket is (Molteni et al., 1996).

A folyamatos számítástechnikai fejlődéseknek köszönhetően lehetővé vált az előrejelzések pontosságának növelése, amelyet legjobban az bizonyít, hogy az ECMWF jelenlegi 4 napos előrejelzéseinek beválása felülmúlja az 1970-es években készült 1 napos előrejelzéseket (Persson, 2011).

Az előrejelzéseket készítő determinisztikus modell kezdeti feltételeit napjaink legmodernebb technikájával, a négydimenziós variációs analízis (4D-VAR) eljárással állítják elő, amelyet elsőként az ECMWF-ben vezettek be az operatív gyakorlatba (Rabier et al., 1997). A modell 2006 óta naponta készít 10 napos, globális előrejelzést. Jelenleg vertikális szintjeinek száma 91 (várhatóan még az idén 137-re bővül), horizontális felbontása 16 km. Az ECMWF valószínűségi előrejelzéseit készítő ensemble modell vertikális szintjeinek száma 62, térbeli felbontása 32 km. 1995-re az ensemble tagok száma a kezdeti 33-ról a jelenlegi 51-re emelkedett. Az ensemble módszer alkalmazásával nem csak megbízhatóbb előrejelzések készítése vált lehetővé, hanem a prognózis bizonytalanságának előrejelzése is. 2002-től készülnek havi, 32 napos futtatások (Vitart, 2004), 2006 óta pedig a 10 napos determinisztikus előrejelzések mellett naponta két alkalommal (00 és 12 UTC-kor) az egész Földet lefedő 15 napra szóló középtávú valószínűségi előrejelzések is rendelkezésre állnak (Ihász, 2010). Az EPS előrejelző rendszer feladata, hogy a megfigyelések és modellek hibáiból származó bizonytalanságokra számszerű becslést adjon. A 2006-ban bevezetésre került változó felbontású EPS (VARIABLE Resolution Ensemble Prediction System, VAREPS) rendszernek köszönhetően javult a havi előrejelzések pontossága. 2008 óta a középtávú és havi előrejelző módszereket egyesítő rendszer működik, futtatása hétfőnként és csütörtökönként 00 UTC időpontban történik és 51 tagból (50 ensemble tagból és egy kontrolltagból) áll. Ezt követően kidolgozásra került egy új módszer az ensemble perturbációk előállítására. Az új ensemble adatasszimilációs rendszert 2010 nyarán vezették be az operatív használatban (Buizza et al., 2010; Isaksen et al., 2010).

A legtöbb európai ország előrejelzései az ECMWF produktumaira épülnek. Magyarország 1994 óta társult tagja az előrejelző központnak (Kaba, 1995), ennek következtében hazánk is hozzájut a globális szervezet előrejelzési produktumaihoz, amelyek 1995-től az Országos Meteorológiai Szolgálat előrejelzéseinek alapjait is képezik (Ihász, 2003a; Ihász et al., 2010). A csatlakozásnak köszönhetően jelentősen megnőtt a hazai középtávú előrejelzések beválása.

### 1.3 Ensemble (valószínűségi) előrejelzések

Napjainkban korszerű időjárás-előrejelzés nem készülhet numerikus prognosztikai modell használata nélkül. Az időjárás-előrejelzés alapját képező numerikus modellek nagyfokú érzékenységet mutatnak a kezdeti feltételekre. A kezdeti feltételek azonban minden esetben hibával terheltek, így hibás prognózishoz vezethetnek. Az előrejelzés és a kezdeti feltételek pontatlanságainak kezelésére új technikát dolgoztak ki (Ensemble Prediction System, EPS), amelynek célja a kis perturbációkkal szemben fellépő instabilitás korrigálása. A módszer során nem egyetlen előrejelzést készítenek a legjobbnak vélt kezdeti feltétellel, hanem a kezdeti feltételek perturbálásával több előrejelzés együttesét állítják elő. Ha a kezdeti mezők megváltoztatásával kapott futtatások eredménye kevéssé tér el egymástól, akkor az előrejelzés megbízhatósága nagy, ha pedig a futtatások közötti eltérés nagyobb, akkor az előrejelzés kevésbé megbízható.

Az EPS előrejelzési technika bevezetésével lehetővé vált a numerikus előrejelzési modell kezdeti feltételeinek bizonytalanságából és a légköri folyamatok közelítéséből adódó hibák kezelése. A módszer jól alkalmazható extrém időjárási helyzetek előrejelzése esetén is. Egy előrejelzés önmagában nem teljes, csak ha beválási valószínűségek rendelhetők hozzá. Ezért jó az ensemble módszer, mert megadja egy adott esemény bekövetkezésének valószínűségét. Az ensemble előrejelzések szinte minden várható meteorológiai eseményhez meghatározott valószínűséget rendelnek hozzá (*Persson, 2011*). A kapott eredmények szórásából következtethetünk az adott légköri állapot előrejelezhetőségére. Az EPS modell futtatásához – a nagyszámú perturbált előrejelzés készítése miatt – jóval nagyobb számítógépes kapacitásra van szükség, mint egy determinisztikus modell futtatásához, ezért az EPS modellek durvább rácsfelbontással rendelkeznek (*Buizza et al., 2006*). Az ECMWF a kontroll előrejelzés mellett 50 perturbált előrejelzést készít, így az EPS rendszer összesen 51 tagból áll.

Ezek az együttes előrejelzések készülhetnek kis számítást igénylő multi-modell ensemble módszerrel, multi-analízis ensemble eljárással, a megfigyelési adatok véletlenszerű perturbálásával, egyes fizikai paraméterek megváltoztatásával vagy az ECMWF által használt kezdeti perturbációk származtatásával is. Ez utóbbi módszer nagy számítási igényű, de ez adja a legjobb valószínűségi előrejelzést (*Götz, 2001*). A gyakorlatban az ensemble modellezés első két évtizedében döntően kétféle eljárással valósult meg, egyrészt az NCEP-ben (National Centers for Environmental Prediction) alkalmazott breeding módszerrel, másrészt az ECMWF



által is használt szinguláris vektorok módszerével. Az ECMWF-beli fejlesztőmunka eredményeként 2010 nyarán egy új szemléletmódot meghonosító ensemble adatasszimilációs rendszert vezettek be, amely révén az ensemble előrejelzés a megfigyelési információk perturbációjára és a szinguláris vektorok alkalmazására egyaránt épül (*Buizza et al.*, 2010, *Isaksen et al.*, 2010).

## 1.4 Az ensemble előrejelzések megjelenítése

Ha a nyers előrejelzési adatoktól eltérő meteorológiai paraméterekre vonatkozóan szeretnénk előrejelzést készíteni, szükség van bizonyos utófeldolgozási eljárásokra. Alkalmazhatunk statisztikai összefüggéseket, különféle diagnosztikai egyenleteket, valamint a kapott eredmények térbeli interpolációját is el kell végeznünk, ha a modell által használt koordináta-rendszertől eltérő rendszerben szeretnénk ábrázolni a modellek eredményeit. Ezekkel az eljárásokkal nem csak olyan meteorológiai változókat nyerhetünk ki, amelyeket a numerikus modellek közvetlenül nem szolgáltatnak, hanem kiszűrhetjük a hibákat is (*Csima*, 2003).

Az ensemble előrejelzések megjelenítése esetén egyidejűleg több előrejelzés adatait kell ábrázolni a lehető legátláthatóbb formában. Az egyes ensemble tagok külön-külön történő megjelenítése sokszor nem elég áttekinthető. Lehetőség van még az ensemble átlag megjelenítésére is, ekkor azonban könnyen előfordulhat, hogy az átlag jellegtelen mezőt ad, így pont a módszer előnyeit veszítjük el.

Az EPS előrejelzés grafikus megjelenítésének egyik egyszerű formája, ha bélyegdiagramokat készítünk. Ekkor az előrejelzés minden tagja fel van tüntetve, és jól láthatók az egyes tagok közötti nagyobb különbségek. Ez az ábrázolási mód egyetlen időpontra és egyetlen paraméterre vonatkozóan mutatja az egyes tagok előrejelzéseit, minden tagot külön grafikonon. Hátránya, hogy nem túl részletes. A leggyakoribb megjelenítési mód, ha fáklyadiagram segítségével ábrázolják az EPS előrejelzéseket. Ezek a diagramok ma már nélkülözhetetlen kiegészítői a középtávú előrejelzéseknek. A fáklyadiagram egy adott földrajzi helyre és az előrejelzés teljes időtartamára vonatkozóan mutatja meg egy kiválasztott elem, például a nyomás vagy a geopotenciálmagasság időbeli alakulását. Előnye, hogy egyetlen grafikonon ábrázolja valamennyi kezdeti feltétellel készült előrejelzést, külön kiemelve a kontroll előrejelzést. A fáklya szélessége jól jellemzi az előrejelzés bizonytalanságának

mértékét. További lehetséges megjelenítési formák például az ensemble meteogrammok, amelyek a modell előrejelzéseket egy adott földrajzi pontra vonatkozóan mutatják, a valószínűségi térképek, amelyek egy adott esemény bekövetkezésének valószínűségét adják meg, illetve a spagetti diagramok. Ez utóbbi ábrázolási mód egy kiválasztott elemre vonatkozóan adja meg a modell futtatások eredményét valamennyi ensemble tagra vonatkozóan. A fáklya diagrammal ellentétben nem egy adott helyre és az előrejelzés teljes időtartamára vonatkozóan jeleníti meg a bizonytalanság mértékét, hanem egy adott időpontban adja meg egy adott területre vonatkozóan az előrejelzés bizonytalanságát. A felsorolt megjelenítési formák külön-külön is elegendő információt tartalmaznak, azonban a légkör előrejelzett folyamatainak mélyebb megértéséhez ezek együttes tanulmányozására van szükség.

## 1.5 Ensemble előrejelzések clusterezése

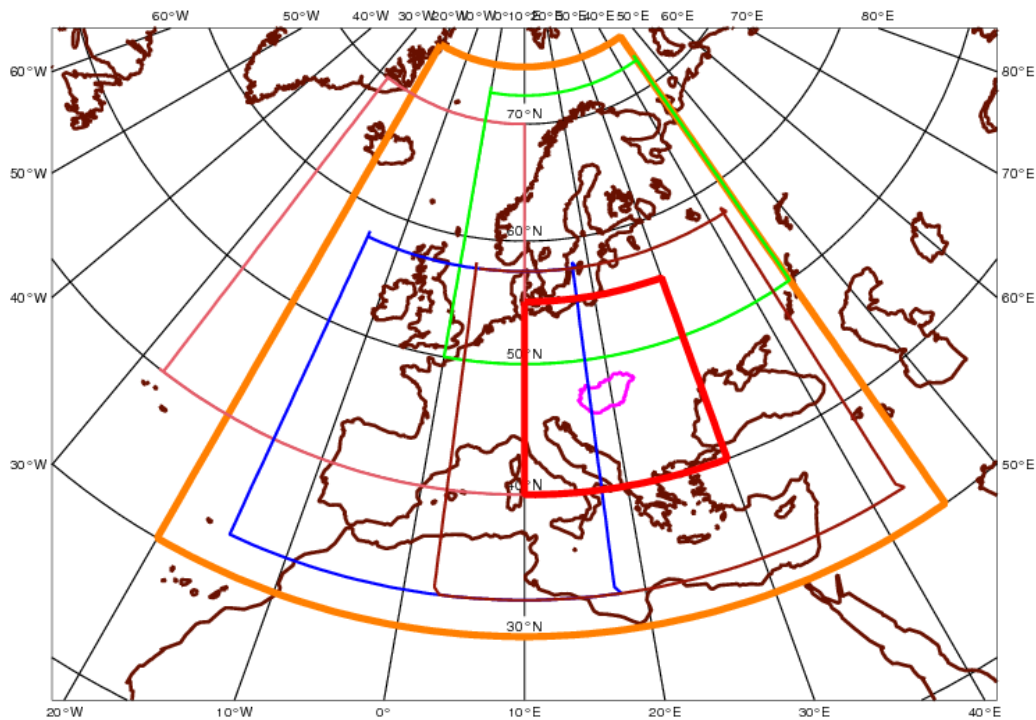
Az ECMWF egy modellfuttatás alkalmával 51 ensemble tagot állít elő, amely az előrejelzők számára még a korábbi fejezetekben tárgyalt megjelenítési módszerek segítségével is sokszor nehezen áttekinthető, ezért célszerű a könnyebb áttekinthetőség érdekében csoportokat alkotni, és a hasonló tulajdonsággal rendelkező tagokat együtt vizsgálni. Erre szolgáló eljárás a clusterezés (csoportosítás), amely egy olyan statisztikai módszer, ami a vizsgált elemeket csoportokba sorolja, és a további vizsgálatok során nem az egyes elemeket, hanem az ezekből alkotott csoportokat elemzi. A clusterezés tehát cél szerinti csoportosítást, tipizálást, és ily módon egyszerűsítést jelent.

A clusterezés lényege az egy csoportba tartozó elemek távolságának minimalizálása, míg a különböző csoportokba tartozó elemek közötti távolság maximalizálása. Az alapján, hogy két elem távolságát hogyan határozzák meg, a clusterezési eljárásoknak két típusa terjedt el a gyakorlatban. Dinamikus algoritmus esetében a csoportokat iterációval képezik a csoport elemeit egyenként vizsgálva. Ezen alapul például a k-közép módszer, amelynek lényege, hogy előre meghatározzuk a clusterek számát, és a halmaz elemeinek egyenkénti vizsgálatával minden elemet abba a csoportba soroljuk be, amelyikhez a legközelebb van. Az eljárás előnye, hogy nagy elemszám esetén is gyors és kis memóriaigényű, viszont az eredmény nem független a kiindulási feltevéstől. A hierarchikus clusterező algoritmus esetén az elemek egymástól vett távolsága alapján csoportosítanak. Ebben az esetben az eredmény független a

kezdeti kiválasztástól, viszont nagy elemszám esetén megnő a számítási idő és nagy memóriakapacitást igényel.

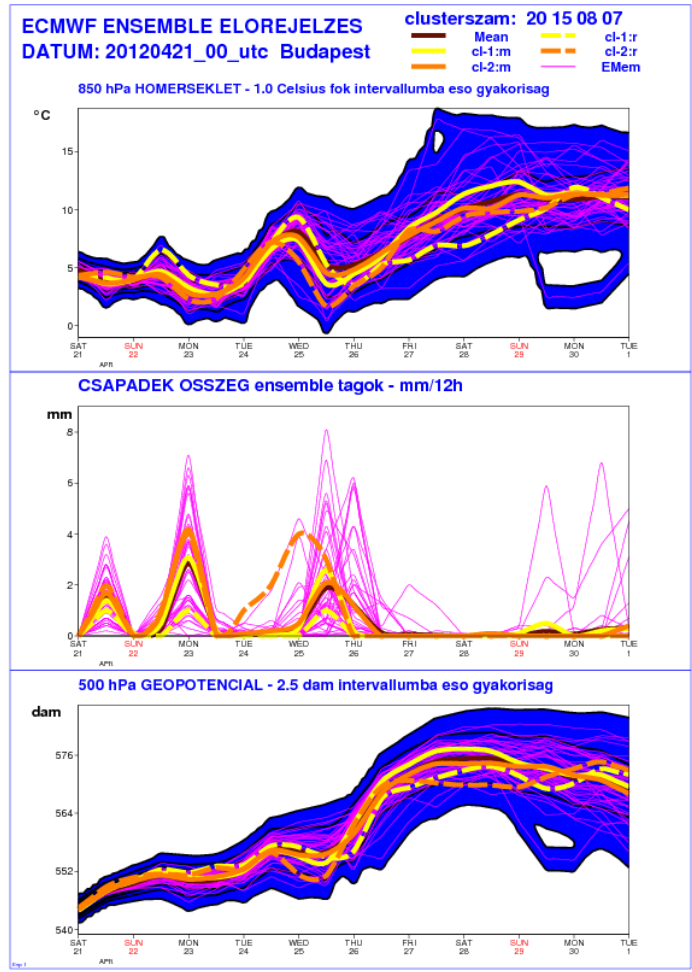
Egy cluster legegyszerűbben a clusterátlaggal jellemezhető, ám ez egyes felszíni paraméter (szél, csapadék, hőmérséklet) esetében sokszor túl sima mezőt ad (Szintai, 2006), ezért gyakran egy ún. reprezentatív tagot használnak, amely a legjobban jellemzi az adott clustert a kiválasztott paraméterek alapján. A clusterek száma lehet fix, vagy változó. Ez utóbbi esetben a clusterek száma az előrejelzés bizonytalanságától függően változik (kis változékonyságnál kevés cluster, nagy bizonytalanság esetén több). Az első cluster az a csoport, amely a legtöbb hasonló mezőt tartalmazza, a második cluster az, amelybe a második legtöbb szintén egymáshoz hasonló eset tartozik, és így tovább. A clusterek számát több tényező határozza meg. Egyrészt az EPS napi szórása, ami egy szezonális trendet követve napról napra változik és télen nagyobb értékű, mint nyáron. Másrészt a cluster küszöbértéke, ami a clusteren belüli szórás előre megadott értéke és ugyanazt a szezonális trendet követi, mint az EPS napi szórása. A clusterek száma esetenként változhat, így vannak olyan helyzetek, amikor az EPS tagok annyira hasonló előrejelzést adnak, hogy nem sorolhatók be több különböző clusterbe, ekkor egyetlen cluster tartalmazza az összes EPS tagot (unimodális eloszlás). Más esetekben azonban az EPS tagok jól elkülöníthető csoportokat alkothatnak (multimodális eloszlás). A clusterek számát tehát a multimodalitás foka is befolyásolja, vagyis hogy a hasonló előrejelzést adó EPS tagok hány alternatív csoport kialakítását teszik lehetővé. Az ensemble tagok nagy szórása nem feltétlenül jelent nagy clusterszámot, ahogy a kis szórás érték sem okoz szükségszerűen kevesebb csoportot (Persson, 2011). A nemzetközi szakirodalomban számos példa található clusterezésre.

Miután a tudomány és a számítástechnika fejlődésével lehetővé vált a determinisztikus előrejelzések, majd az ensemble előrejelzések készítése is, az 1990-es évek közepén az OMSZ ECMWF-hez való csatlakozásával megjelent az igény egy saját hazai clusterező eljárás kifejlesztésére. Az ECMWF-ben a clusterezést öt területre végzik el, egyrészt Európa teljes területére, másrészt négy kisebb európai régióra (1. ábra). Mivel a teljes európai régió és a Magyarországot lefedő kisebb tartományok túl nagyok, ezért merült fel az OMSZ-ban igény egy kisebb területre vonatkozó clusterezésre. OMSZ-beli fejlesztőmunka eredményeként 2003 óta Közép-Európát lefedő, Kárpát-medence középpontú területre operatíván történik a clusterezés (Ihász, 2003b).

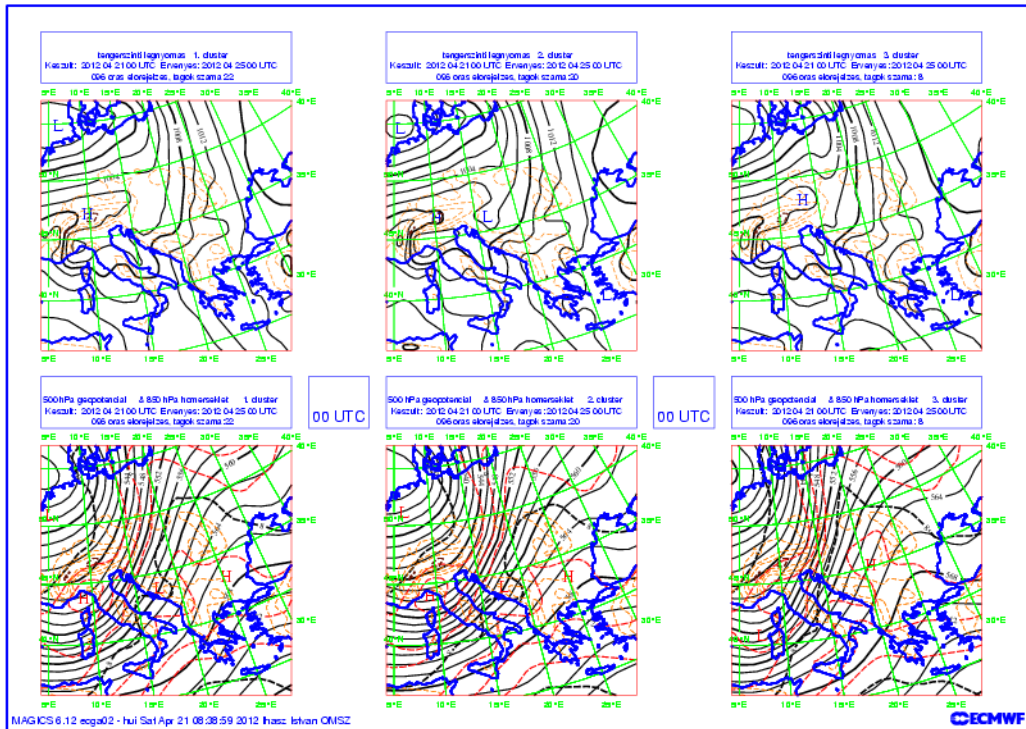


1. ábra. Az ECMWF és az OMSZ clusterezési területei. Az ECMWF területei: teljes Európa narancssárgával, Északnyugat-Európa rózsaszínnel, Északkelet-Európa zölddel, Délnyugat-Európa késsel, Délkelet-Európa barnával. Az OMSZ Közép-Európát lefedő területe piros színnel van jelölve.

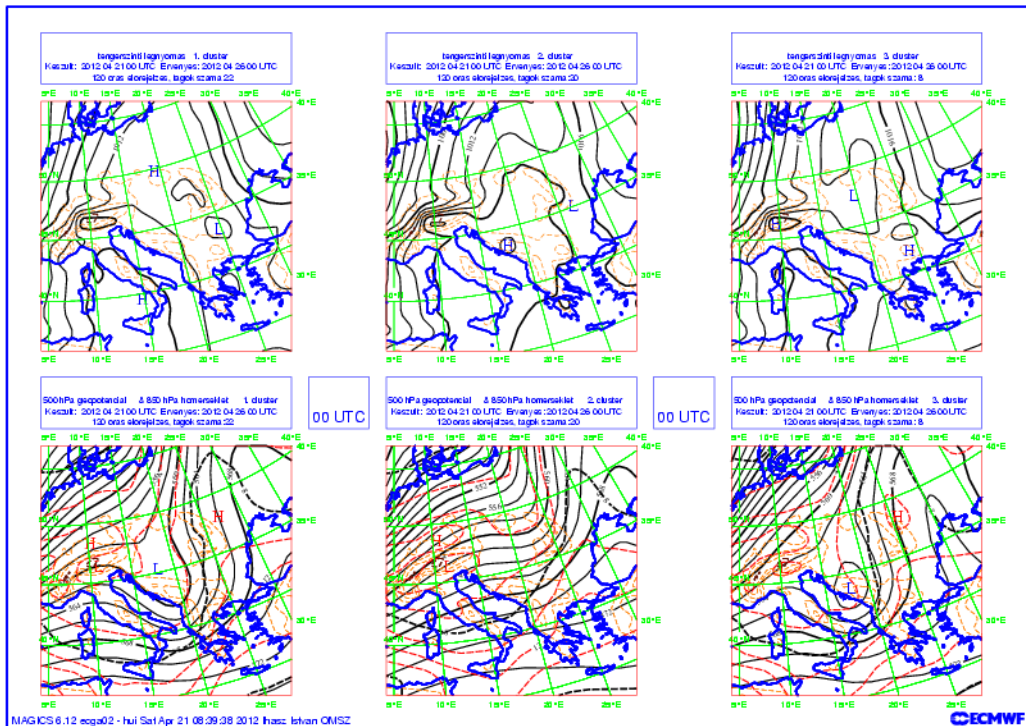
Az idei OMSZ-beli fejlesztéseinek köszönhetően újfajta megjelenítési módszer is kidolgozásra került, amelynek köszönhetően a fáklyadiagramokon az EPS átlag mellett a cluster reprezentatív tagok is megjelennek (2. ábra). A clusterelőrejelzések ábrázolására emellett alkalmazzák a 3. ábrasorozaton bemutatott megjelenítési módszert is, amelyen jól követhető a bemutatott paraméterek időbeli alakulása, valamint látható az egyes clusterek előrejelzéseinek különbsége.



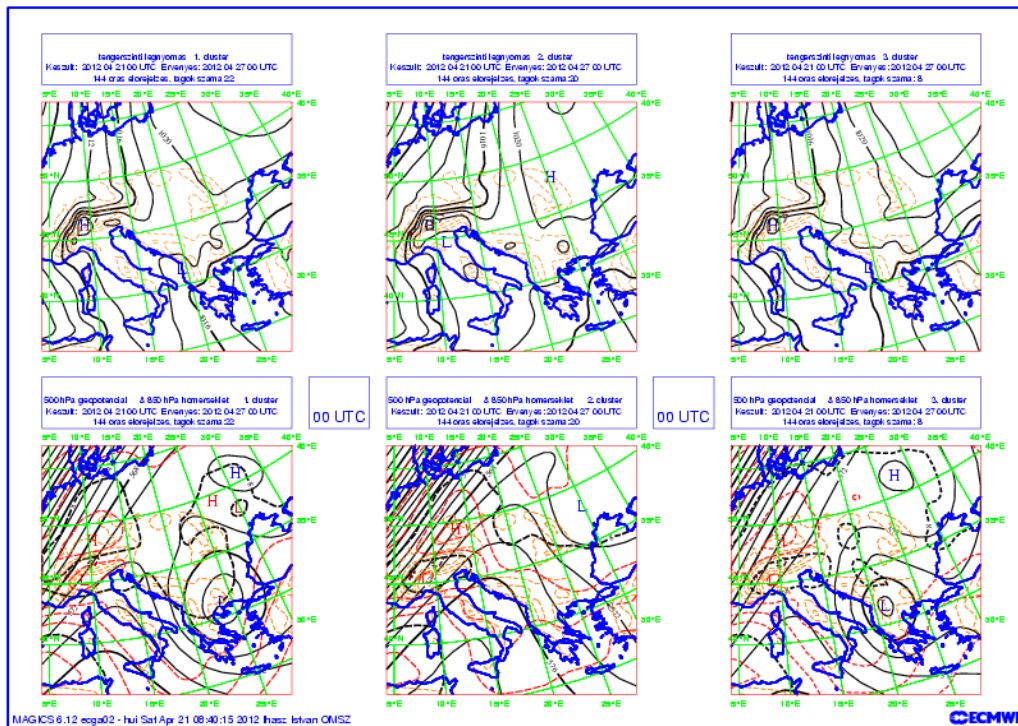
2. ábra. Budapestre vonatkozó 850 hPa-os hőmérséklet, 12 órás csapadékösszeg és 500 hPa-os geopotenciál előrejelzések fákhlyadiagramja



3/a. ábra. Tengerszinti nyomás és 500 hPa-os geopotenciál előrejelzés  
(2012.04.21.00 UTC +96 óra)



3/b. ábra. Tengerszinti nyomás és 500 hPa-os geopotenciál előrejelzés  
(2012.04.21.00 UTC +120 óra)



3/c. ábra. Tengerszinti nyomás és 500 hPa-os geopotenciál előrejelzés  
(2012.04.21.00 UTC +120 óra)

Ugyan az első évben mindig csak három cluster volt, 2004-től kezdődően már változó elemszámmal végezték a clusterézést. A középtávú EPS előrejelzések pontosságának javítása érdekében 2006 novemberétől bevezetésre került az ún. VarEPS rendszer, amely keretében a korábbi 10 nap helyett 15 napra szóló – ensemble átlagra alapozott – operatív előrejelzések készülnek (Buizza *et al.*, 2006). Annak ellenére, hogy a determinisztikus modell felbontása felülmúlja az ensemble tagok felbontását, az EPS átlag statisztikai értelemben jobb eredményt ad az ötödik napot követően, mint a determinisztikus modell. Mivel a 15 napos előrejelzés túl hosszúnak bizonyult és az időszak végére már nem kielégítő pontosságú, ezért a clusterézést nemcsak az ötödik napon, hanem a nyolcadik napon is elvégzik. Az elemzések és a beválás vizsgálata során alkalmazott módszer az 500 hPa-os geopotenciál szint előrejelzésének analízise. A clusterék száma megállapodás szerint minimum kettő.

Mivel az ensemble előrejelzések számításigénye sokkal nagyobb, mint a determinisztikus előrejelzéseké, ezért horizontális felbontásuk rosszabb, csupán 32 km, míg a determinisztikus modell felbontása 16 km. Ennek következtében a globális ensemble rendszerek jelenleg nem alkalmasak mezoskálájú jelenségek, és így extrém időjárási

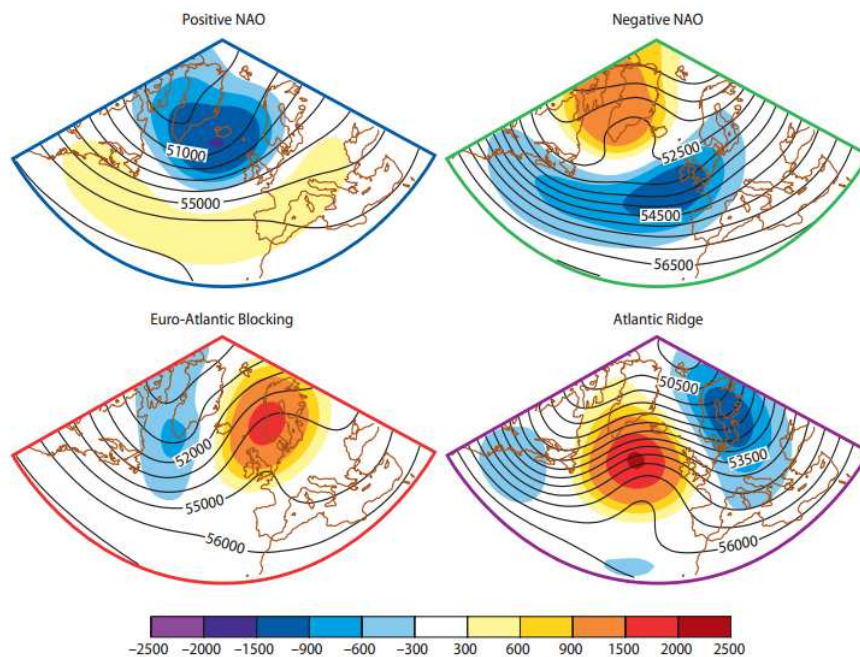
helyzetek vizsgálatára. Ez utóbbiak előrejelzésére rövidtávú, korlátos tartományú ensemble előrejelzések szükségesek, amelyek legegyszerűbb esetben a globális ensemble előrejelzések leskálázásával állíthatók elő. Ekkor a globális rendszer szolgáltatja a korlátos tartományú modell számára szükséges kezdeti- és peremfeltételeket. A leskálázás történhet a globális rendszer mindegyik tagjára, vagy csak néhány kiválasztott reprezentatív tagjára. 2002-ben új rendszert vezettek be, amelyet naponta futtatnak az EMCWF-nél (*Montani et al., 2003*). A német-olasz összefogás eredményeként létrejött COSMO-LEPS (COntortium for Small-scale MOdelling, Limited Area Ensemble Prediction System) korlátos tartományú ensemble rendszer lényege, hogy az ECMWF EPS-ből nyert globális ensemble tagjait 16 fix számú clusterbe sorolják, majd mindegyik csoportból kiválasztanak egy reprezentatív tagot, és ezt skálázzák le. Ez a reprezentatív tag szolgáltatja a kezdeti- és peremfeltételeket a korlátos tartományú modell számára.

Az OMSZ-beli középtávú időjárás-előrejelzés célú clusterezési eljárás mellett a módszer továbbfejlesztésével az ECMWF ensemble előrejelzésekre alapozott, az ALADIN/HU modellre épülő leskálázási módszer került kifejlesztésre (*Szintai and Ihász, 2006*).

Az ECMWF-ben a legújabb clusterezési eljárást alig két éve, 2010 elején vezették be és az új eredmények 2010 novembere óta érhetőek el az operatív használatban (*Ferranti and Corti, 2011*). Az ECMWF clusterezésének segítségével egy olyan eszközt kapunk, amely az EPS minden lényeges információját összefoglalja. A clusterezés átfogó képet ad a lehetséges szinoptikus áramlási képekről. Az ECMWF új EPS clusterezési rendszere két részből áll. Egyrészt az EPS-ből származó előrejelzési mezők napi clusterezéséből, amely alapvetően megegyezik a korábbi EPS clusterezéssel, de eltérő algoritmust használ, másrészt – hogy a napi clusterezést összekapcsolják a nagyskálájú folyamatokkal – az új módszer kibővült négy előre megadott klimatológiai (időjárás) állapotba való besorolással. Tehát ez az új clusterezési eljárás kiegészíti a korábbi változatot azzal, hogy további információt biztosít a nagyskálájú klimatológiai (időjárás) állapotok előrejelzéséhez. A módszer előnye, hogy lehetőséget ad a típusok közötti átmenetek előrejelzésére is, és lehetővé teszi egy áramlásfüggő verifikáció kifejlesztését az EPS-hez. Minden cluster egy az átlaghoz legközelebbi EPS taggal jellemezhető, és minden ilyen reprezentatív tagot a négy klimatológiai (időjárás) állapot egyikébe sorolnak. A négy előre definiált típus: Észak-Atlanti Oszcilláció pozitív fázis, Észak-Atlanti Oszcilláció negatív fázis, Euro-Atlanti blokkolás, Atlanti gerinc. Ezeket az állapotokat az ECMWF 29 évnnyi reanalízis adatainak (ERA-Interim,



ERA-40) felhasználásával választották ki. A 4. ábrán a hideg évszakra (októbertől áprilisig) számított klimatológiai (időjárási) állapotok láthatók.



4. ábra. A négy Euro-Atlanti klimatológiai állapot földrajzi mintázata (anomáliák és teljes mezők) a hideg évszakra vonatkozóan. A színek a geopotenciális anomáliákat, a kontúrok az 500 hPa-os geopotenciál szinteket jelölik. (Forrás: Ferranti and Corti, 2011)

Hasonlóan alakul a nyári évszak (május-szeptember) is, csak kisebb amplitúdókkal. Ahhoz, hogy figyelembe vegyük ezt az évszakos változást az EPS átlagok osztályozásában, a klimatológiai (időjárási) állapotok mintáit és amplitúdóit hónapról hónapra kiigazítják. Egy minta-felismerő algoritmus minden EPS átlagot hozzárendel egy klimatológiai (időjárási) állapothoz.

Az új eljárás szerint a clusterek számát hatban maximalizálták, így a csoportok száma korlátozottá vált, kettő és hat között alakul esetenként változva. Általában az EPS tartalmazza a hasonló előrejelzések jól elkülönített csoportját, de előfordul, hogy nincs egyértelmű csoportosulás az EPS tagok között, vagyis egyetlen cluster tartalmazza az összes ensemble tagot. A clusterező algoritmus 51 előrejelzést használ (50 perturbált és egy kontroll előrejelzés), és csoportosítja őket aszerint, hogy mennyire hasonlóan jelzik előre az 500 hPa-os geopotenciál alakulását az észak-atlanti és európai térségben.

Tehát ahhoz, hogy két EPS tag ugyanabba a clusterbe kerüljön, az kell, hogy hasonlóan írják le az 500 hPa-os geopotenciál mező fejlődését.

Az 1950-es évek elején Hess és Brezovszky az 500 hPa-os geopotenciál mező alapján clusteranalízis alkalmazásával 29 típust határozott meg. Magyarországon elsőként Péczely végzett makroszinoptikus helyzetek alapján tipizálást a légtömegek eredetének vizsgálatára. A tengerszinti légnyomás mező alapján a Kárpát-medence térségében 13 típust határozott meg. (Péczely, 1959; 1983). Később Ambrózy és munkatársai (1984) makro-cirkulációs rendszerek évszakos objektív tipizálását végezte el a napi 500 hPa-os abszolút topográfia adatok alapján az Atlanti-Európai térségre. A makrocirkulációs tipizálás mellett célszerű megemlíteni, hogy a levegő minőségének modellezése során stabilitási kategóriák szerint is gyakran történik tipizálás. Erre jó példa Pasquill és Turner szubjektív módszere (Pasquill, 1962; Turner, 1964).

## 2. Léggöri transzport modellezés

### 2.1 Léggöri terjedési modellek

A mai korszerű meteorológiai kutatásokban alapvető szerepet töltenek be a léggöri terjedési modellek. Ezekkel a modellekkel vizsgálhatjuk a nyomgázok és aeroszol részecskék léggöri útját, alkalmazhatjuk ipari kibocsátás és nukleáris balesetek következtében a léggörbe került szennyezőanyagok vizsgálatára (*Duska et al.*, 1998), hőlégballonok és más sodródó testek mozgásának modellezésére (*Draxler*, 1996), valamint a klímaváltozás által előidézett problémák elemzésére is. A szakirodalomban számos példa található arra, hogy egyes állategészségügyi problémák vizsgálatához is alkalmaznak léggöri diszperziós illetve trajektória modelleket (*Rubel and Fuchs*, 2005).

A léggöri transzportfolyamatok leírásának egyik legfontosabb eszköze a levegőelemek által követett útvonal, ún. trajektória meghatározása. A trajektóriák kiszámításához szükség van meteorológiai adatokra, valamint az adatokat felhasználó modellre. Egy légelem által követett pálya a valóságban egyértelműen meghatározott, azonban a modelleredményekből kapott szélmező véges felbontása és a valóságtól való eltérése miatt célszerű többféle közelítéssel számítani a légrézecske útját (*Labancz*, 2004).

A numerikus előrejelző modellek alapvetően egy adott kiindulási helyzetből időbeli integrálással számítják ki az előrejelzett meteorológiai mezőket. Az egyes légrézecskek által megtett pályáknak két típusa ismert. Forward trajektóriák esetén időben előre az előrejelzett mezők alapján számolják ki, hogy egy adott pontból induló levegőelem milyen útvonalat ír le mozgása során. Backward (időben visszafelé számított) trajektóriák esetén a már rendelkezésre álló időjárási mezők alapján számítják ki, hogy milyen útvonalat követve jutott el a légrézecske egy adott pontba, adott időpontban (*Labancz*, 2004). Magyarországon először az 1950-es években foglalkoztak a légrézecskek által leírt trajektóriák meghatározásával, először szubjektív grafikus módszerekkel (*Tóth*, 2000), majd az 1980-as években trajektória modell készítésével (*Iványi and Mersich*, 1984). Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál először a csernobili atomkatasztrófa után jelentkezett igény trajektória számító program kidolgozására. 1990 után már kétdimenziós izentróp és izobár trajektória számítások is folytak (*Ihász*, 1992).

A trajektóriák hasznos információt szolgáltatnak, számításuk meglehetősen gyors, így kiválóan alkalmazhatók például baleseti szituációkban és olyan helyzetekben, ahol gyors döntéshozásra van szükség. A tudomány fejlődésével lehetővé vált a diszperziós modellek elterjedése az operatív használatban. *Ferenczi* (2003) munkájának eredményeként kifejlesztésre került egy olyan programrendszer, amely valós időben működtethető és segítségével jól leírható a felszín közeli szennyezőanyag terjedése.

A légkörbe kerülő szennyezőanyagok terjedésének vizsgálatához alapvető fontosságú a számunkra legalkalmasabb diszperziós modell kiválasztása. Ezek a modellek az advekción- és diffúziós egyenletek megoldási módszerein alapulnak (*Pudykiewicz et al.*, 1998), ez alapján két csoportot különítünk el: az euleri és a lagrange-i típusú modelleket. Mindkettő a turbulens diffúzió differenciálegyenletét veszi alapul. 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.

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). A projekt célja, hogy validálja azokat a nagy skálájú transzport modelleket, amelyeket baleseti helyzetek szimulálására alkalmaznak. A teszteléshez külön adatbázist fejlesztettek ki. A kísérleti program keretén belül három nagyskálájú transzport modellt vizsgáltak meg: a CALPUFF 5.8, HYSPLIT 4.8 és a FLEXPART 6.2. modelleket. Az összehasonlított terjedési modellek a Lagrange típusú modellek csoportjába tartoznak, tesztelésüket jelölőanyag felhő diszperziójának szimulálásával végezték. A modellek statisztikai mérőszámok alapján számított hatékonyságának összehasonlítását az 1. táblázat foglalja össze.

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

1. táblázat. Az ETEX térbeli statisztikái

A modellek statisztikai összehasonlítását négy szempontból végezték el. Első mérőszámként bevezették a *térbeli pontosságot* (Figure of Merit in Space), amely a mért és a modellezett értékek viszonyát fejezi ki százalékban. Értelemszerűen a minél nagyobb százalék, vagyis pontosság az ideális. A *találati arány* (Probability of detection) a megfigyelt események és találatok arányát fejezi ki. Értéke nullától egyig változhat, ideális értéke az egy. Érdemes 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. Utolsó mérőszámként definiáltak egy ún. *kritikus sikerindexet* (Threat Score/ Critical Success Index), amely – hasonlóan a találati arányhoz – nullától egyig terjedő értékekkel rendelkezhet, melyek közül az egy az ideális. A táblázatban bemutatott statisztikai mérőszámok egyértelműen azt mutatják, hogy a legkedvezőbb tulajdonságokkal a HYSPLIT 4.8 modell rendelkezik. Későbbi vizsgálatainkat ezért ezzel a modellel végeztük el és lehetőségünk volt a modell legkorszerűbb, 4.9-es verziójával dolgozni.

## 2.2 A HYSPLIT 4.9 modell

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 modellkörnyezet, 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). A modell és a hozzá tartozó adatbázisok publikusan elérhetők a NOAA honlapjáról (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). A HYSPLIT archív (Global Data Assimilation System, ECMWF reanalízisek) és előrejelzett adatokkal is futtatható. Számítási módszerében ötvözi a Lagrange-i módszert - amely mozgó koordinátarendszerben írja le a légréteg útját - az euléri szemlélettel, amelyben egy rögzített háromdimenziós rács alkotja a koordinátarendszert. A modell az advekción és a diffúzió-számításokhoz a Lagrange-módszert alkalmazza, vagyis követi a légréteg transzportját, míg a szennyezőanyag koncentrációkat egy rögzített rácson számolja. A NOAA és az Ausztrál Meteorológiai Iroda közös együttműködésének köszönhetően a modell első verzióját advekción algoritmusmal, korszerűsített stabilitás és diszperziós egyenletekkel, grafikus felhasználói felülettel (Graphical User Interface, GUI), és egy olyan opcióval bővítették, amely képessé teszi a modellt vegyi átalakulások vizsgálatára is.

A modell első verzióját 1982-ben fejlesztette ki Draxler és Taylor (*Draxler and Taylor, 1982*). Az azóta eltelt mintegy negyed évszázad során a HYSPLIT fontos fejlődési állomásokon 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 and 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 and Hess, 1997*). Az advekción algoritmust időbeli interpolációval egészítették ki, ezen kívül egy háromdimenziós részecske-diszperzió opcióval bővült a koncentrációs számítás.

A HYSPLIT Lagrange-i modell alapja, hogy a részecske pályáját követve számítja ki a diszperziót (*Ferenczi, 2003*). Az advekción minden részecskére külön számítja. Ha egy trajektória eléri a modell magasságát, akkor ott véget ér a részecske pályája, ha viszont a földfelszín szintje alá menne, akkor a felszínen folytatódik az advekción.

A vizsgált anyagok terjedése vagy éppen ülepedése során meghatározó lehet, hogy a részecske a planetáris határrétegen (PBL) belül vagy kívül helyezkedik el. A HYSPLIT minden rácspont esetén kiszámolja ezt a magasságot, amely a modell esetében megegyezik

azzal a magassággal, ahol a potenciális hőmérséklet 2 K-nel meghaladja a talajszinten mért hőmérsékletet, de még nem éri el a 250 m-es szintet. A felszínközeli stabilitások hatásának csökkentésére a határréteg magasságát úgy határozzák meg, hogy a hőmérsékleti profilt felülről lefelé vizsgálják (*Draxler and Hess, 1997*).

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

A modell trajektória és diszperzió számításaira irányuló kutatások már folytak az ELTE Meteorológiai Tanszékén. A HYSPLIT trajektória futtatásaihoz szükséges részletes leírást és a modell használatát segítő programcsomagot Szabó Tamás készítette 2004-ben (*Szabó, 2004*). A diszperziós modell használatához készült útmutatót korábbi tudományos diákköri dolgozatomban mutattam be (*Sábitz, 2010*). Jelenlegi munkánk során trajektória és diszperzió számításokat is végeztünk, amelyeket a 4. és 5. fejezetekben részletesen ismertetek.

### 2.3 Meteorológiai adatmezők

A HYSPLIT a meteorológiai modellek interpolált kimenő adatait nem tudja közvetlenül felhasználni. A 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 and 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 rendelkezésre álló meteorológiai mezők közötti időintervallum minden definiált rácstra 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.



### 3. Felhasznált adatok és alkalmazott módszerek

#### 3.1 Felhasznált adatok

Napjaink előrejelző rendszerei korszerű eljárásokkal használják fel az elmúlt évtizedek megfigyelési adatait és hatékonyan állítanak elő reanalízis adatokat, aminek köszönhetően egyre jobb minőségű, globális adatbázisok készülnek a felhasználók számára (*Uppala et al.*, 2008). Az ECMWF először 1980-ban készített reanalíziseket az 1979-es év megfigyelési adataiból, majd az adatasszimilációs technikák gyors fejlődésének köszönhetően az 1990-es években elkészült az 1979 és 1993 közötti időszakot lefedő ERA-15 projekt, amely a későbbi ERA-40 adatbázis alapját képezte (*Uppala et al.*, 2004). A 2003-ban elkészült ERA-40 adatbázis az 1957-2002-ig tartó időszakot fedi le, az adatok előállításához a 3D-Var adatasszimilációs módszert használja. Az adatok 6 órás időbeli felbontású, és meglehetősen durva, 2,5 fokos térbeli felbontású rácshálózaton érhetők el bárki számára, míg az egyes ECMWF tagországok illetve társult országok számára 1 fokos rácsfelbontásban nyerhetők ki. Az ERA-40 a légkör állapotán túl a szárazföldek és óceánok felszínét is jellemzi (*Uppala et al.*, 2008). Később elkezdtek az ERA-Interim reanalízis projekt kidolgozását is (*Simmons et al.*, 2007), amely felbontásában és minőségében is felülmúlja az ECMWF korábbi reanalíziseit. Az ERA-Interim reanalízis adatbázis egységes adatasszimilációs technika (4D-Var) segítségével készült és mintegy 30 évre visszamenőleg tartalmaz a légkör állapotát leíró adatokat (*Dee et al.*, 2011). A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően ezek az adatok jelenleg 1979. január 1-től 2012. januárig állnak rendelkezésünkre (2012. április eleji állapot szerint) 6 órás időbeli és 0,75 fokos térbeli felbontásban, illetve az ECMWF honlapján 1,5 fokos felbontásban ([http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim\\_daily/](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/)). A reanalízis adatbázis havonta frissül, két hónap késleltetéssel. A napi és havi adatok mellett naponta kétszer 10 napos előrejelzések is elérhetők. Ez az archívum a korábbi verzióknál jóval kiterjedtebb, nyomási szintjeinek száma az ERA-40 23 szintjéhez képest 37-re bővült, a modell fizikai háttere jelentősen javult, és további felhő- és nedvességi paramétereket tartalmaz (*Dee et al.*, 2011).

A dolgozatban bemutatott vizsgálatokhoz szükséges meteorológiai mezők előállításához a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központja által előállított produktumokat használtuk fel. A vizsgálatainkhoz szükséges információkat – reanalízis

adatokat és az EMWF által futtatott numerikus modell adatait – az előrejelző központ MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) adatbázisa (Raoult, 2001) szolgáltatta. A rendszer több évtizedes megfigyelési és előrejelzési adatokat tárol BUFR és GRIB formátumban, és lehetőség van az archivált adatok webes felületen történő lekérésére is.

### 3.2 Alkalmazott módszerek

A GRIB formátumú file-ok feldolgozásához az ECMWF által kifejlesztett GRIB API (Application Programming Interface) szoftvercsomag 1.9.9-es verzióját használtuk, amely különböző programozási környezetben (például Fortran nyelv) vezérelhető.

A vizsgálatokhoz alkalmazott HYSPLIT modell rácson tárolt adatokat használ, archív (pl. reanalízis adatbázisok) és előrejelzett (pl. WRF előrejelzések) adatokkal is futtatható. Mivel a modell a meteorológiai modellek kimenő adatait (pl. GRIB file-okat) nem tudja közvetlenül felhasználni, ezért első lépésként azok formátumát kellett módosítanunk. A konvertálást a modell beépített rutinjaival hajtottuk végre.

A modellel konkrét időjárási helyzetekre készítettünk szimulációkat, és különböző anyagok légköri terjedését vizsgáltuk eltérő bemenő adatokkal. Az ilyen jellegű vizsgálatokat célszerű determinisztikus közelítéssel vizsgálni, ezért a modellt először determinisztikus adatokkal futtattuk, részben az ECMWF ERA Interim reanalízis adatok felhasználásával, másrészt az ECMWF MARS adatbázisából származó ensemble előrejelzések perturbálatlan, ún. kontroll előrejelzéseinek felhasználásával. A vizsgálatok az 50 tagú perturbált ensemble előrejelzés alapján is elvégezhetők, ebben az esetben azonban az összes EPS tagra egyenként kellene elvégezni a modellfuttatást, ami rendkívül időigényes. Ilyen nagyszámú szimulációt a diplomamunka keretein belül nem készíthettünk. Ehelyett a bemutatott két európai esetben a clusterátlaghoz legközelebbi ensemble tagra, az ún. reprezentatív tagra vonatkozóan készítettünk diszperzió és trajektória számításokat (lásd. 5.3 fejezet). Ezzel jelentős munkát takarítottunk meg, és mivel a reprezentatív tag az adott cluster minden lényeges információját tartalmazza, ezzel nem vétettünk nagy hibát.

Az adatok lekérését különböző módon végeztük, és elemeztük az egyes típusok között tapasztalt eltéréseket. Az EPS esetében összesen 15 nyomásszinti mező (10, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 850, 925, 1000 hPa) áll rendelkezésünkre, míg az ERA Interim esetében 37 főizobárszint található (1, 2, 3, 5, 7, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 125, 150,

175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000 hPa). Vizsgálataink során a légkör alsó, 500 hPa és 1000 hPa közötti tartományát tekintettük. Mivel ebben a tartományban az EPS nyomásszinti adatok esetében csak öt szint található, az ERA Interim esetén pedig 16, így ez utóbbival részletesebb képet kaphatunk. A nyomási szintek számának változtatásával az volt a célunk, hogy megnézzük, hogy ha az ERA Interim esetén is csak kevés szintet veszünk figyelembe, akkor milyen eredményeket kapunk.

Az első esettanulmány során radioaktív anyagok terjedését vizsgáltuk, amelyek a légkör alsóbb rétegeiben fejtik ki hatásukat, ezért először az öt standard főizobárszintre kértünk adatokat, majd ezeket további 11 szinttel egészítettük ki 500 hPa és 1000 hPa között. A további két bemutatott esetben vulkánkitörések során a légkörbe került anyagokra vonatkozó modellfuttatásokat készítettünk. Ezek elemzését az első esethez hasonlóan 5 és 16 nyomási szintre előállított adatokkal végeztük el, azonban a pontosabb vizsgálatokhoz a légkör magasabb tartományaiból is szükség volt adatokra, mivel a hamu mindkét esetben több kilométer magasságig feljutott. Ezért ezeket az eseteket 100 hPa és 1000 hPa között, összesen 27 szintre kért adatokkal is megvizsgáltuk, az eredményeket összevetettük a korábbi adattípusokkal. A számításokat az 5 és 16 szint esetén az adatok 0,5 és a publikusan elérhető 1,5 fokos rácsfelbontása mellett is elvégeztük. A 2. táblázatban a felhasznált adatok nyomási szintjeinek számát, a nyomási szinteket és a horizontális felbontást foglaltuk össze.

<b>Nyomási szintek száma</b>	<b>Nyomási szintek (hPa)</b>	<b>Rácsfelbontás (°)</b>
27	100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 725, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000	0,5
16	500, 550, 600, 650, 700, 750, 725, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000	0,5
16	500, 550, 600, 650, 700, 750, 725, 800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1000	1,5
5	500, 700, 850, 925, 1000 (standard főizobár szintek)	0,5
5	500, 700, 850, 925, 1000	1,5

*2. táblázat. A vizsgálatokhoz felhasznált adatok paramétereinek összefoglaló táblázata*

Az így előállított determinisztikus és ensemble adatok alapján diszperzió és forward trajektória számításokat végeztünk, eredményeinket pedig összehasonlítottuk, és elemeztük, hogy milyen többlet információt nyújt az ensemble futtatás a determinisztikushoz képest.

A dolgozatban bemutatott ábrákat részben a HYSPLIT modell saját megjelenítési módszerével és a Google Earth alkalmazásával, részben pedig az ECMWF által kifejlesztett Magics++ szoftverrel állítottuk elő.

## 4. Esettanulmányok leírása

Számos esetben, például váratlanul kialakult környezeti katasztrófák vagy ipari kibocsátás során bekövetkezett balesetek esetén gyors reagálásra van szükség. Fontos, hogy a szakemberek azonnal értékelhessék a kialakult helyzetet és figyelembe vegyék a várható következményeket, ezért valós időben futtatható modellekre van szükség, amelyek eredményei segíthetik a döntéshozók munkáját.

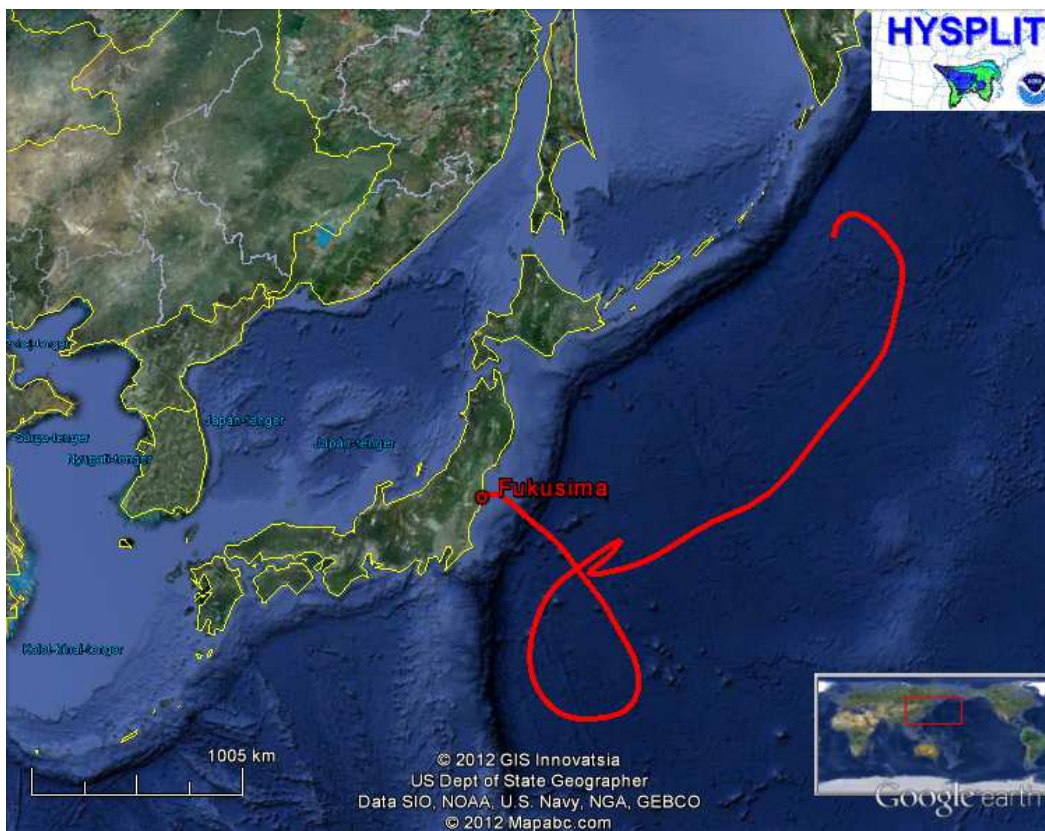
A HYSPLIT modell széleskörű alkalmazásának tesztelésre, és ensemble clusterezési vizsgálataink elvégzése céljából több valós eset utólagos elemzését is elvégeztük. A megvizsgált extrém esetek közül a dolgozatban három kerül bemutatásra, amelyeket a következőkben részletesen ismertetek.

### 4.1 A 2011-es fukusimai atomkatasztrófa

2011. március 11-én Richter-skála szerinti 9-es erősségű földrengés rázta meg Japánt. A rendkívül nagy magnitúdójú földrengést jelentős, 10 métert meghaladó hullámokkal érkező cunami (szökőár) követte. A Japánban addig még nem mért erősségű földrengés a fontos infrastruktúrák lerombolása mellett az ország keleti részén fekvő fukusimai atomerőmű (5. ábra) három telephelyét is komolyabban érintette (Aszódi, 2011). A katasztrófát súlyosbította, hogy nem csupán egy rengés történt, hanem napokon át tartó, erős rengésekből álló rengéssorozatról volt szó, amelyek olyan mértékű üzemzavart okoztak, hogy robbanás történt a fukusimai atomerőmű reaktoraiban, és onnan nagy mennyiségű sugárzó gáz áramlott ki. Sokan az 1986-os csernobili tragédiához hasonlították a katasztrófát, annak ellenére, hogy a két atomerőmű működési elve alapjaiban eltér egymástól. Jelentős a különbség a kibocsátás minősége, időbeli lefolyása valamint a szennyezett terület mérete között is. A Fukusimában bekövetkezett baleset során lassabban került a radioaktív szennyeződés a környezetbe, a kibocsátott káros anyagok mennyisége és az érintett terület is kisebb, mint Csernobil esetén volt.

A Norvégiai Légekörkutató Intézet munkatársai (Stohl *et al.*, 2011) szerint a reaktorok már a földrengés következtében, még a cunami megérkezése előtt megsérültek, vagyis a káros anyagok kisugárzása rögtön a rengés után megkezdődött. Bár a szennyezés mértékét nem lehet pontosan mérni, csak megbecsülni, Stohl *et al.* (2011) szerint feltehetően 35,8 PBq

radioaktív cézium-137 (pontosabban 23,3 PBq – 50,1 PBq) és 16,7 EBq (pontosabban 13,4 EBq – 20,0 EBq) radioaktív xenon-133 szabadult ki. A becquerel a radioaktív források aktivitásának mértékegysége, a másodpercenként történő bomlások számát jelöli. A nukleáris baleset során a légkörbe került radioaktív anyagok közül toxikus hatásukat tekintve a cézium 137-es izotópja a legveszélyesebb az emberi egészségre, mivel felezési ideje 30,17 év, tehát hosszú ideig megmarad a légkörben, sugárzása rákkeltő. Japán egyik élelmiszerhigiéniai törvénye szerint ötezer becquerel per kilogram (Bq/kg) cézium-137 a megengedhető határérték. A pusztító erejű földrengés és szökőár közel húszezer áldozatot követelt (Shibahara, 2011).



5. ábra. Fukushima elhelyezkedése és a xenon 133-as izotópjának trajektóriája 138 órával a kibocsátás után, 16 szintre lekért 0,5x0,5 fokos rácsfelbontású ERA Interim reanalízis adatok alapján

Mivel a szakirodalomban legtöbbször a xenon-133 és a cézium-137-es radioaktív izotópjainak terjedését vizsgálták, mi is ezeket választottuk ki a vizsgálatainkhoz. A baleset

modellezéséhez szükséges bemenő adatokat *Stohl et al.* (2011) szerint választottuk, vizsgálatainkat a HYSPLIT modellel végeztük. Első lépésként a 3. fejezetben ismertetett módon előállítottuk a megfelelő adatokat, majd ezeket átkonvertáltuk a modell számára kezelhető formátumúvá (ARL). Az így elkészült adatokkal forward trajektóriákat számítottunk és diszperziós modellfuttatásokat végeztünk a xenon-133 esetében a március 11. és 16. közötti 138 órás időszakra (5. ábra), a cézium-137 esetében pedig a március 11. és 19. közötti 210 órás időszakra. Ez utóbbi anyag vizsgálatát analízis és csapadékadatok is tartalmazó előrejelzett adatokkal is elvégeztük, hogy figyelembe vehessük a száraz és nedves ülepedést is. Mivel a radioaktív anyagoknak a légkör alsóbb rétegeiben van jelentősége, ezért az alsó 1 km-es rétegben, három vertikális szintet definiálva (50 m, 300 m, 1000 m) elemeztük a kiválasztott anyagok terjedését. A fukusimai eset elemzéséhez készített számításokat a 2. táblázatban bemutatott adatokkal készítettük el, majd összehasonlítottuk a különböző adatok felhasználásával kapott eredményeket.

## **4.2 A 2010-es Eyjafjallajökull vulkánkitörés**

2010. március 20-án közel két évszázadnyi szunnyadás után kitört az Eyjafjallajökull nevű vulkán Izland déli részén (6. ábra). Az Izlandi Meteorológiai Hivatal a 2006-2009-es időszakban a szeizmikus aktivitás növekedését vizsgálta a tűzhányó közelében, a 2009-ben regisztrált több ezer kisebb földrengés a későbbi kitörés előjele lehetett. Az első erupciót változó aktivitással újabb kitörések követték, amelyek közül az április 14-i volt a legnagyobb, amely körülbelül tízszer nagyobb robbanással járt, mint a márciusban a vulkán oldalán történt kitörés, és hatalmas mennyiségű vulkáni hamut lövellt a légkörbe (*Venzke and Sennert, 2010a; 2010b*) (7. ábra). A sziget egyik legdélebbi részén található tűzhányó kitöréssorozata következtében mintegy tíz kilométer magasságú vulkáni hamufelhő alakult ki a légkörben (*Flentje et al., 2010*), amely napokra megbénította Európa légi közlekedését. A márciusinál jóval erősebb erupció hamufelhője a transzatlanti járatokat is érintette, emiatt jelentős korlátozásokat vezettek be a légi forgalomban. Európában több helyen teljesen lezárták a légi forgalmat, máshol számos járatot töröltek. A lezárások több budapesti járatot is érintettek. A hamu egy része a körülbelül 12 kilométer magasan kezdődő sztratoszféra aljára is feljutott. A kitörés a jégtakaró megolvasztása miatt árvizeket és áradásokat is okozott.



6. ábra. Az Eyjafjallajökull vulkán elhelyezkedése (Forrás: Google Earth)



7. ábra. Az Eyjafjallajökull vulkán április 14-i kitörése  
(Forrás: <https://sites.google.com/site/iavceirscweb/eruptions/eyja>)



Ehhez hasonló veszélyes helyzet esetében fontos, hogy a szakembereket gyorsan tájékoztassák a kialakult helyzetről, hogy a szükséges vizsgálatokat azonnal megkezdhessék. Vizsgálatainkat abból a célból végeztük, hogy a tanulságok alapján a veszélyjelzők jövőbeli munkáját segítsük. A vulkánkitörés során a légkörbe jutott hamufelhő terjedésének vizsgálatát szintén a HYSPLIT modellel végeztük, forward trajektóriákat és disperzió számításokat végeztünk a 2010. március 20. és 24. illetve az április 14. és 18. közötti 120 órás időszakokra vonatkozóan. A kitöréssorozat következtében a légkörbe került anyagok pontos mennyiségét nem ismerjük, a szakirodalomban eltérő becsléseket találtunk (*Benedetti et al.*, 2011; *Dacre et al.*, 2011). Pontos kibocsátási adatok hiányában egységnyi anyagra végeztünk futtatásokat, a kapott eredmény azonban felszorozható tetszőleges értékkel a számszerű végeredmény elérése érdekében. A gyors döntéshozás érdekében – a számítási idő csökkentése céljából – eltekintettünk az egyes anyagok konkrét jellemzőitől, például azok ülepedésétől, vagy egyéni viselkedésétől a légkörben, hogy egy olyan általános képet kapjunk, amely lényegét tekintve bármilyen anyagra vonatkozhat. Mivel a vulkáni hamu nem savasító anyag, és akár a sztratoszféra magasságáig is feljuthat, ezért ebben az esetben nem elég a légkör alsó tartományait vizsgálni, hanem érdemes minél magasabb szinteket is megnézni. Ezért – a repülési szintek figyelembe vételével – öt magassági szinten (0-2 km, 2-5 km, 5-7 km, 7-9 km és 9-10 km) végeztünk modellfuttatásokat, külön elemeztük a le- és felszállás magasságát (0-2 km), a repülési magasságot (9-10 km), valamint megnéztünk köztes tartományokat is.

### **4.3 A 2011-es Grímsvötn vulkánkitörés**

2011. május 21-én 17:30 UTC-kor kitört az Izland keleti részén található Grímsvötn vulkán (8. ábra). A sziget egyik legaktívabb tűzhányója 7 évnyi szunnyadás után vált újra aktívvá. Működése során a 20 kilométeres magasságot is meghaladó hamufelhő oszlopot lövellt a légkörbe (*Petersen et al.*, 2012). A vulkán erupciója ugyan nagyobb intenzitású volt, mint a 2010-es Eyjafjallajökull tűzhányó kitörése, azonban a hamuszemcsék durvább mérete miatt a hamu a légkör alsóbb rétegeiben maradt, így nem okozott akkora káoszt a légi forgalomban, mint a 2010-es kitörés. A vulkán kráterében található forró magma és hidegebb víz keveredésével kis erejű robbanások keletkeztek, amelyeknek köszönhetően kevés hamu jutott a légkörbe, ami egyébként is főként vízgőzből és egyéb gázok keverékéből állt. Erre utalt a kitörési felhő világos színe (9. ábra).



8. ábra. A Grímsvötn vulkán elhelyezkedése (Forrás: Google Earth)

A 2010-es vulkánkitörés arra ösztönözte a légügyi hatóságokat és más szakembereket, hogy átdolgozzák a légi közlekedés veszélyes időjárási jelenségekre vonatkozó szabályait, és fejlesszék a hamu terjedését modellező rendszereket. Emellett kísérleteket végeztek a vulkáni hamu repülőgépekre és hajtóműveikre gyakorolt hatására vonatkozóan. A Grímsvötn kitörése után – hasonlóan a 2010-es vulkánkitöréshez – nem csak a lávafolyások és a légkörbe juttatott hamufelhő okozott gondot, hanem a megolvadt jégtakaró következtében kialakult árvizek és áradások is.

A vulkánkitörés modellezését a 2010-es esetben bemutatottak szerint végeztük el a 2011. május 21. és 30. közötti időszakra.



9. ábra. A Grímsvötn vulkán kitörési felhője 2011. május 21-én

(Forrás: <https://sites.google.com/site/iavceirscweb/eruptions/grimsvoetn-2011>)

## 5. Eredmények

Mint arról már szót ejtettünk, a hazai operatív előrejelzésben a determinisztikus előrejelzések mellett nagy szerepe van az EPS használatának, ezen belül is az OMSZ-ban futó Kárpát-medence középpontú cluster előrejelzéseknek. Célunk, hogy EPS adatokra alapozott légköri transzport modell vizsgálatokat végezzünk az ensemble előrejelzések használhatóságának vizsgálatára. Az EPS használat egyik lehetséges és nem túl nagy időigényű módja, hogy cluster reprezentatív tagokra készítünk modellfuttatásokat, és az eredményeket súlyozzuk a cluster tagokon belüli EPS tagok számával. Az ECMWF által 2010-ben bevezetett új clusterezési eljárást felhasználva három esettanulmány vizsgálatát végeztük el. Eredményeinket három részre tagolva mutatom be, először a clusterezésre vonatkozó vizsgálatokat, majd a determinisztikus adatokra alapozott HYSPLIT modellfuttatások legfontosabb eredményeit, végül pedig az EPS használatával előállított eredményeket ismertetem.

### 5.1 Clusterezés

Az ECMWF Európa teljes területére és ezen belül több kisebb alterületre végez clusterezést, amelyek azonban hazánknak kedvezőtlenül lettek kijelölve, ezért az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 2003 óta egy Kárpát-medence területét lefedő tartományra készítenek clusterezést az ECMWF módszeréhez hasonlóan. Mivel a bemutatott esettanulmányaink kívül esnek az OMSZ-beli clusterezési területen (lásd. 1. ábra), így kézenfekvő gondolat volt az ECMWF 2010 elején bevezetett legújabb clusterezési produktumait használni. Ezeket a vizsgálatokat csak az európai esetekre végeztük el.

Korábban nem volt jellemző, hogy terjedési modelleket ensemble előrejelzések felhasználásával futtassanak. Diplomamunkám keretein belül ezért ilyen jellegű vizsgálatokat is készítettünk, hogy tanulmányozzuk az ensemble előrejelzések alkalmazásának lehetséges előnyeit. Ehhez a cluster reprezentatív tagokra vonatkozó trajektória és diszperzió számítások eredményét súlyoztuk a cluster tagokon belüli ensemble előrejelzések számával.

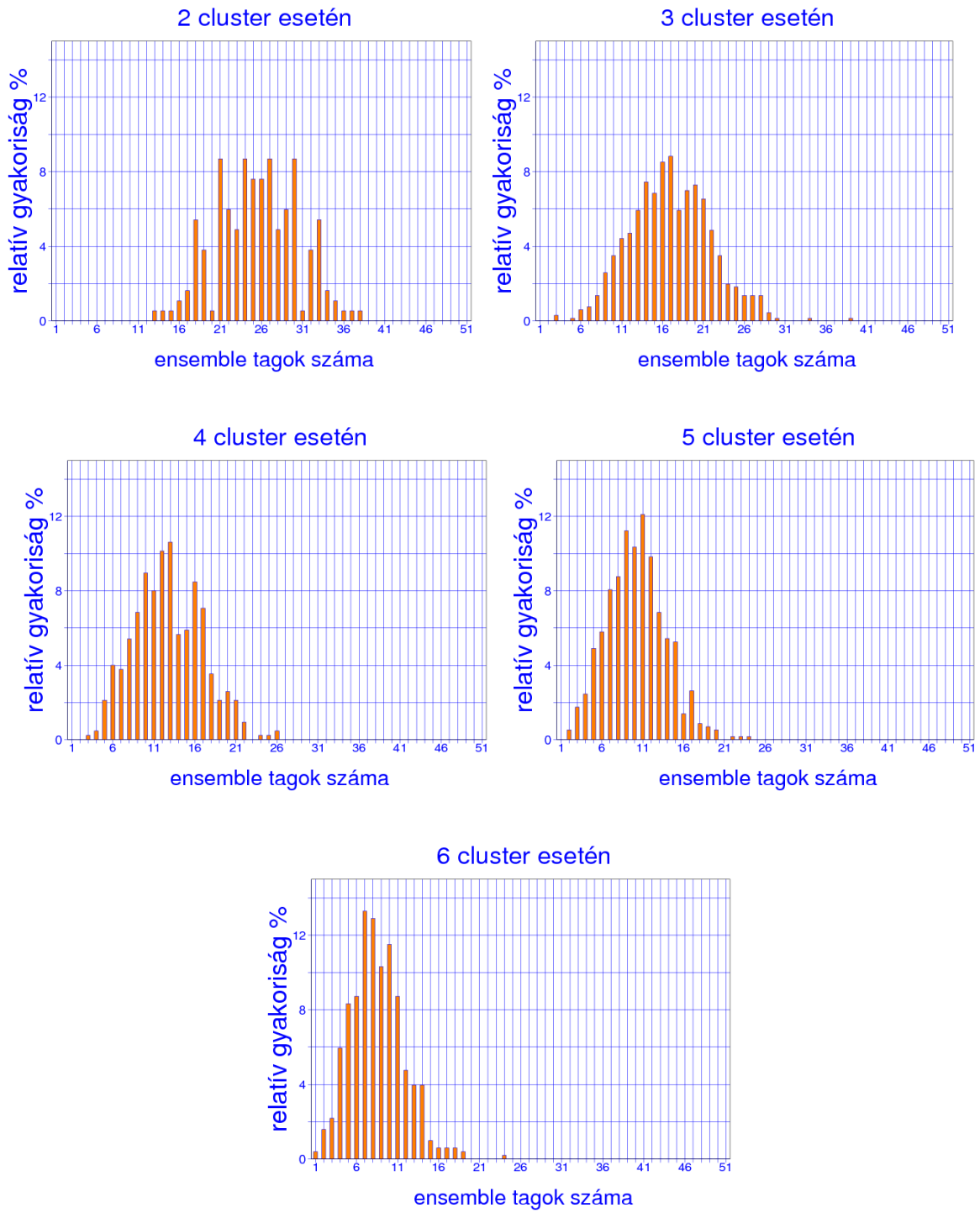
Az új clusterezési eljárás szabályozza a clusterek számát, minden esetben legalább kettő és legfeljebb hat csoport létrehozása engedélyezett. Ezért először megvizsgáltuk, hogy az

elmúlt két évben hogyan alakultak a clusterszámok. A 10. ábrán azt látjuk, hogy a vizsgált időszakban több mint 30 %-os relatív gyakorisággal fordult elő négy darab cluster, a második leggyakoribb clusterszám pedig a hat volt. A korábban bemutatott európai esettanulmányaink néhány kiválasztott napjára is megnéztük a clusterszámok alakulását, amelyekre az 5.3-as fejezetben térek ki.



10. ábra. A 2010-2011-es évek clusterszámainak gyakorisága

Ezt követően azt is megnéztük, hogy az ensemble tagok milyen gyakorisággal fordultak elő az egyes clusterszámok esetén. Azt láthatjuk, hogy minél nagyobb a clusterszám, annál inkább kevesebb ensemble tag jellemző (11. ábra).



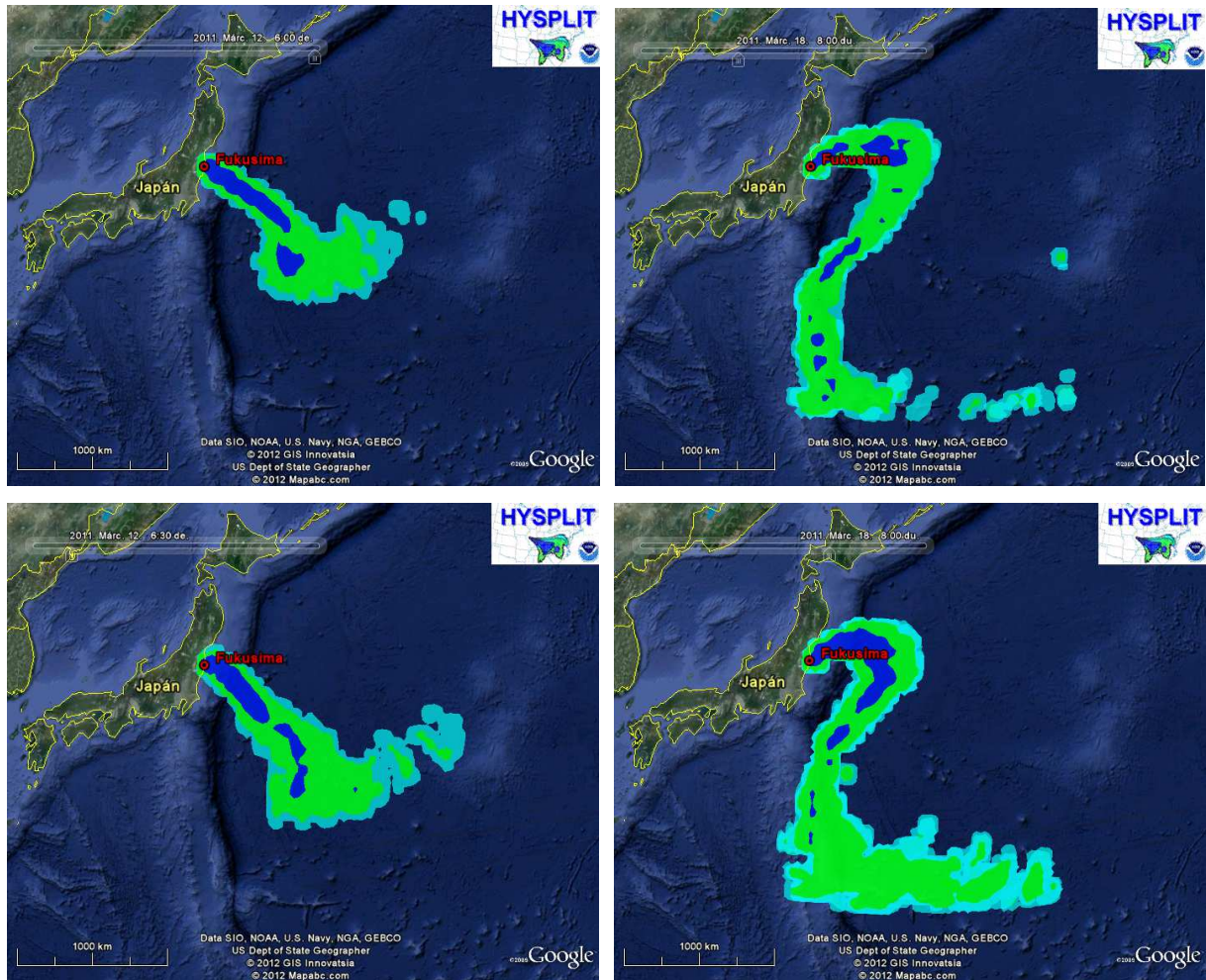
11. ábra. Adott clusterszám esetén az ensemble tagok számának relatív gyakorisága

## 5.2 ECMWF ERA Interim alapján végzett HYSPLIT számítások

A kiválasztott eseteket először determinisztikus közelítéssel vizsgáltuk. A reanalízis közelítés nagy előnye, hogy az adatokat egységes eljárással állítják elő, ezáltal teljesen homogének. A légköri terjedési modellek alkalmazása során jól bevált módszer, hogy reanalízis adatok alapján készítenek szimulációkat, és így vizsgálnak korábban már megtörtént vagy a jövőben várhatóan bekövetkező eseményeket. Az így előállított modellfuttatások eredményei jó összehasonlítási alapot jelenthetnek az ensemble vizsgálatokhoz. A következőkben az ERA Interim reanalízis adatok felhasználásával kapott eredményeket ismertetem. A 4. fejezetben bemutatott extrém esetek során különböző anyagok légkörben való terjedését vizsgáltuk, az egyes anyagokat saját tulajdonságaiknak, jellemzőiknek megfelelően elemeztük. Modellfuttatásainkat a 2. táblázatban összefoglalt adatok alapján végeztük. Az eredményeket esettanulmányonként haladva mutatom be, mindhárom esetben először a diszperzió számítások, majd a trajektória számítások eredményeit ismertetem.

Az első esetben a vizsgált radioaktív anyagok terjedését 5 és 16 szintre, illetve 0,5 és 1,5 fokos rácsfelbontásban előállított adatokkal vizsgáltuk a felszíntől 1 kilométeres magasságig. A cézium-137 esetén figyelembe vettük az anyag száraz és nedves ülepedését is. Ehhez szükség volt olyan adatok lekérésére, amelyek az analizált mezők mellett tartalmaznak a csapadéokra vonatkozó előrejelzéseket is.

A Fukusimában történt nukleáris baleset modellezését a HYSPLIT modell diszperziós és trajektória részével is elkészítettük. A diszperzió számítás céziumra vonatkozó eredményeit a 12. ábrán keresztül mutatom be. Hasonló eredményt kaptunk a xenon-133 esetében is. Az ábrán megjelenített modelleredményekhez a 16 szintre és 0,5 fokos felbontásban lekért adatokat használtuk fel. Jól látható, hogy ha figyelembe vesszük a száraz és a nedves ülepedést is, az idő elteltével jelentős különbséget tapasztalunk a vizsgált anyag terjedési felhőjében. Nem csak a szennyezőanyag által érintett területekben látható különbség, hanem az anyag koncentrációértékei is eltérést mutatnak (12. ábra). Ezek az eltérések nem elhanyagolhatók például egy valós időben zajló vizsgálat során, ahol gyors döntéshozásra van szükség. Ezért, ha erre lehetőség van, érdemes a vizsgált anyag minden ismert tulajdonságát figyelembe venni, különös tekintettel a kimosódásra, hogy a vizsgált helyzetben a lehető leghatékonyabban járassunk el.

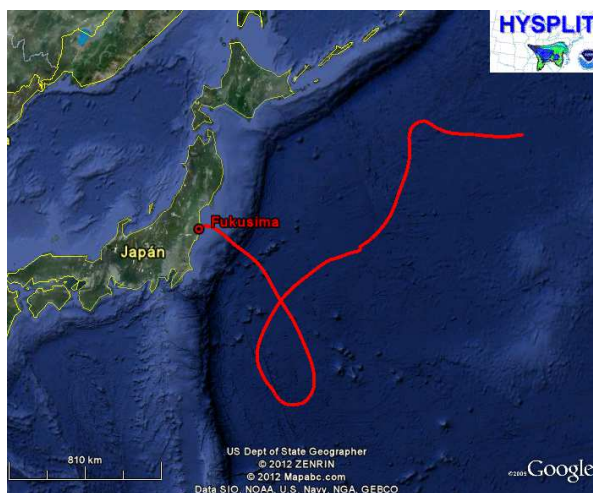


12. ábra. A cézium-137 terjedési felhője 24 és 182 órával a kibocsátás után. Felül ERA Interim adatok alapján, lent az ECMWF EPS kontroll előrejelzések alapján, utóbbi esetben figyelembe véve a száraz és nedves ülepedést is

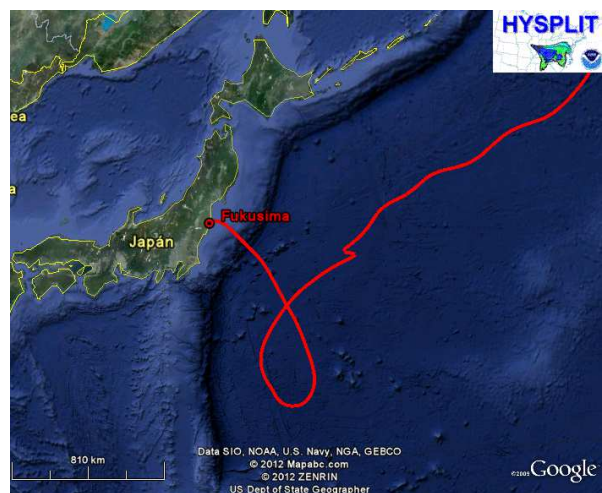
A trajektória számításokat mindkét anyag esetén a 2. táblázatban bemutatott adatok négy típusára végeztem el. A vizsgálatok összefoglalását a 13. ábrásorozat mutatja be, ahol a xenon 133-as izotópjának 120 órás trajektóriáit ábrázoltam. Összehasonlítva a négy adattípus eredményeit az idő elteltével jelentős eltéréseket tapasztaltunk. A vizsgált időszak első felében a részecskék közel azonos pályán haladnak, a kismértékű különbözőség az eltérő adatok használatának köszönhető. Majd körülbelül 60 óra elteltével nagy különbségek lépnek fel a trajektóriákban, amelyek oka, hogy a trajektóriák pontosságának felső határa körülbelül 72 óra (Kahl et al., 1989; Draxler, 1996). Ezért az egyes adattípusok összehasonlításánál legfeljebb 72 órás időszakot érdemes figyelembe venni. Ehhez hasonlóan alakultak a cézium-137 esetében is a trajektóriák, ahol szintén körülbelül a harmadik napon léptek fel jelentős



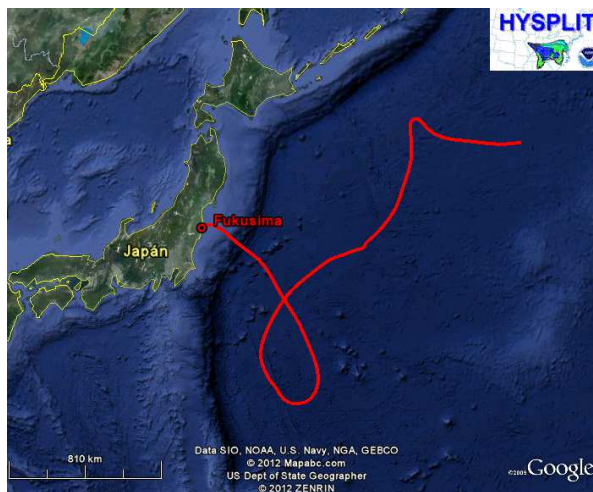
eltérések a részecskék pályáiban. A vizsgált xenon-133 részecskék által leírt útvonalaknak az egyes adattípusok miatt fellépő eltérése kisebb, mint a diszperzió számítással kapott különbségek, azaz a trajektóriák – legalábbis az első 3 napban – közel megegyező pályát írnak le. Ez várható volt, hiszen a trajektória modellfuttatás során jóval kevesebb információ megadására van lehetőség, így például nem számolhatunk a kimosódással. Az ilyen jellegű vizsgálatokkal azokra a kérdésekre adhatunk gyors választ, hogy a kibocsátás helyétől milyen területekre juthatott el, backward esetben pedig hogy honnan érkezhettek a vizsgálat helyszínére az adott anyag.



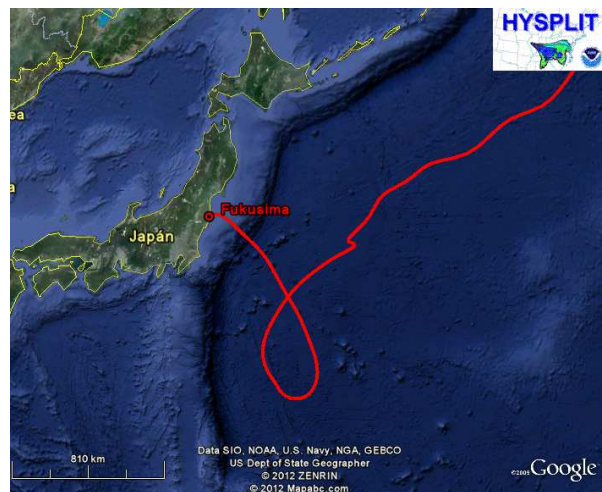
*16 szint, 0,5° felbontás*



*16 szint, 1,5°-os felbontás*



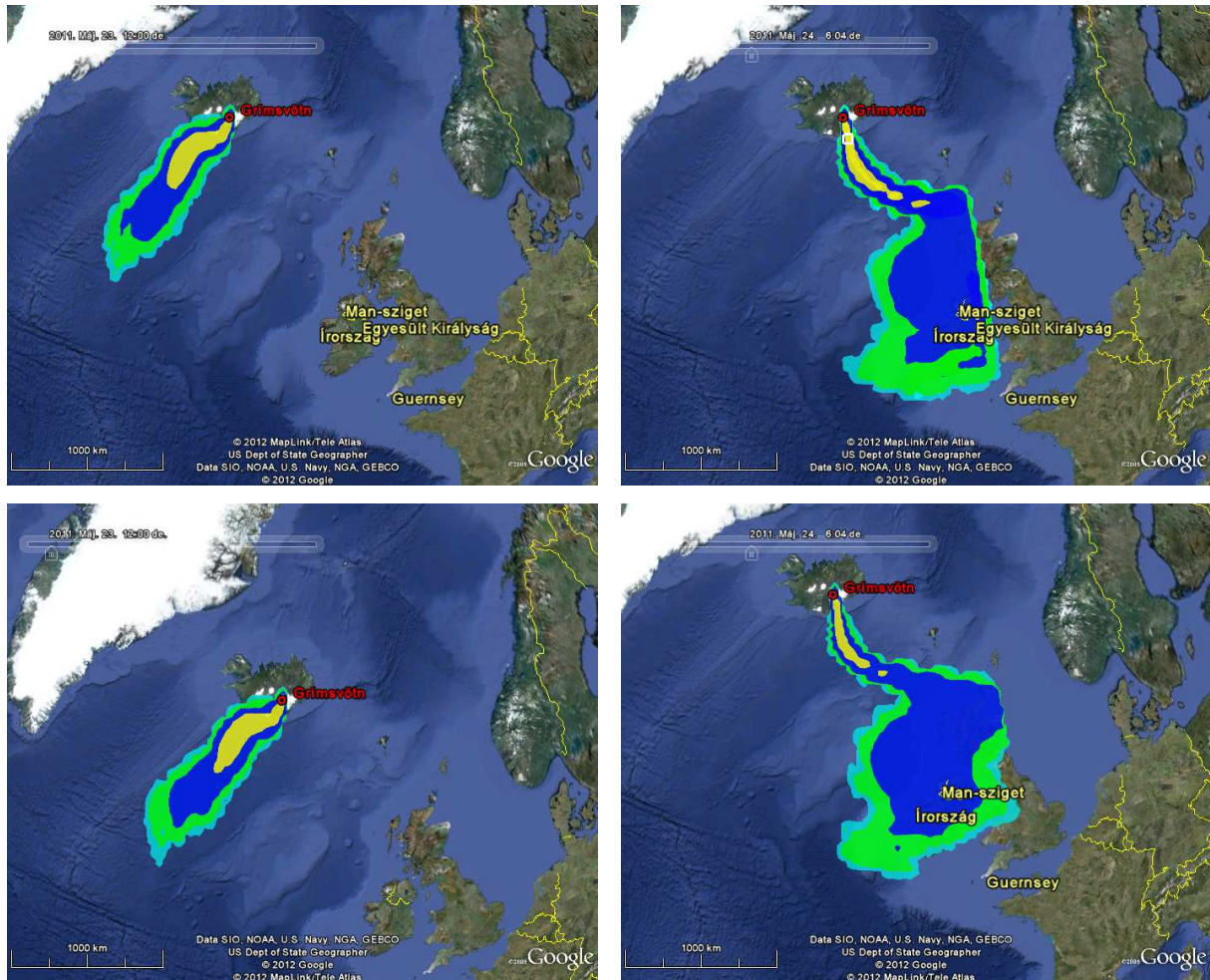
*5 szint, 0,5° felbontás*



*5 szint, 1,5°-os felbontás*

*13. ábra. A Xenon 133-as izotópjának trajektóriái 120 órával a kibocsátás után, eltérő ERA Interim adatok alapján*

A fukusimai esethez hasonlóan elemeztük a 4. fejezetben bemutatott két vulkánkitörés során a légkörbe került anyagok terjedését is. A 4. fejezetben már ismertetett 2010-es és 2011-es vulkánkitöréseket először szintén az ERA Interim adatbázisból származó determinisztikus adatokkal vizsgáltuk. A modellfuttatásokat ezekben az esetekben nem csak a korábban alkalmazott adattípusokkal végeztük el, hanem 27 nyomási szintre előállított adatokkal is elkészítettük. Mivel ezekben az esetben kevesebb információ állt rendelkezésünkre a légkörbe került anyagokra vonatkozóan, ezért eredményeink általánosabb jellegűek. A diszperzió számítás eredményeit a 2011. május 21-i kitörésen keresztül mutatom be, amely jól szemlélteti a többi erupció vizsgálati eredményeit is. A Grímsvötn vulkán 2011. májusi erupciója során a levegőbe jutott anyagok általános terjedési felhője a 14. ábrán látható. Azt láthatjuk, hogy a különböző adatok jelentősen befolyásolják az eredményt, annak ellenére, hogy itt nem tudtuk figyelembe venni az anyag ülepedését. Nyilvánvaló, hogy a nagyobb számú nyomási szintre lekért adatok eredményei a pontosabbak. Ha több szinten és finomabb felbontásban állnak elő az adatok, akkor jobb a szélmező reprezentációja is, így várhatóan jobb eredményt kaphatunk. A nagyobb számú nyomási szint figyelembe vétele nagyobb számítás időt igényel, ennek ellenére érdemes a jobb minőségű adatokkal végezni a számításokat, mivel ez nagymértékben javítja a végeredményt.



14. ábra. A Grímsvötn vulkán május 21-i kitörésével a légkörbe került anyagok diszperziója 48 és 66 órával a kibocsátás után ERA Interim reanalízisek alapján. A felső ábrák 16 szintre és 0,5 fokos rácsfelbontásban lekért adatok alapján, az alsók 27 szintre és 0,5 fokos felbontású adatok alapján készültek

A vulkánkitörésekre vonatkozó trajektória számításokat is elvégezve és figyelembe véve a trajektóriák pontosságára vonatkozó korábbi megállapítást azt mondhatjuk, hogy a fukusimai esethez hasonlóan ezekben az esetekben is kisebb eltérést tapasztaltunk az egyes adattípusok alapján készült trajektória számítások során, mint a diszperzió számítás esetében. A különbségek mértékében mutatózó változást itt is a kevesebb bemenő adattal magyarázzuk. Összehasonlítva a 16 és 27 szintre lekért adatokból származó eredményeket azt tapasztaltuk, hogy a vizsgált anyag által leírt pálya alig tér el, viszont a trajektóriák magasságában számottevő különbségek léptek fel. Ezek azonban nem szolgáltatnak plusz információt, ha azt tekintjük, hogy az anyag honnan érkezett, vagy éppen merre haladt tovább.

A determinisztikus megközelítéssel készült modellszimulációk megbízható és gyors eredményeket adnak, ezért gyakran alkalmazott módszer, és alkalmas arra, hogy más típusú adatból származó eredménnyel vessük össze.

### **5.3 ECMWF ensemble előrejelzések alapján végzett HYSPLIT számítások**

A determinisztikus adatok felhasználása után a vizsgálatokat ensemble (valószínűségi) adatok alapján is elvégeztük. Az 51 EPS tagra azonban nem egyenként állítottunk elő modellfuttatásokat, hanem a clusterátlaghoz közeli reprezentatív tagra vonatkozóan készítettünk diszperzió és trajektória számításokat. A vizsgálatok a clusterátlag alapján is elvégezhetők, azonban ez egyes felszíni állapotváltozók esetében túlzottan sima mezőt ad, ezért célszerű a cluster reprezentatív tagjait használni. Ehhez először szükség volt a cluster reprezentatív tagjaihoz tartozó GRIB file-ok előállítására. Mivel az ECMWF Európa területére végez clusterézést, az EPS számításokat csak az európai esetekre készítettük el, de a vizsgálatok könnyen adaptálhatók a fukusimai esetre vagy más, tetszőlegesen kiválasztott helyre.

Ahhoz, hogy a clusterézést és a HYSPLIT modellel végzett számításokat összekapcsoljuk, megvizsgáltuk, hogy adott napokon milyen volt az áramlási kép, és hogy hány darab cluster állt rendelkezésre azon a napon. Ezeket az adatokat a vizsgált három napra vonatkozóan a 3. táblázat foglalja össze. Az áramlási képeket az ECMWF fő clusterézési területére állítottuk elő az 500 hPa-os geopotenciál mező, és az adott nap 00 UTC-s előrejelzése alapján, 24 órás bontásban. Ezek közül a 72 órás, a 120 órás és a 168 órás eredmények kerülnek bemutatásra. Az ábrákat az ECMWF által kifejlesztett Magics++ grafikus szoftverrel készítettük, amelyet Fortran nyelven írt programban hívtunk meg. Mivel Izland a clustertartomány bal oldali peremén helyezkedik el, nem elhanyagolható, hogy milyen a szélirány. Nyugati szél esetén a terület alkalmas a vizsgálatokra, keleti szél esetén azonban ez a tartomány nem megfelelő. Az általunk kiválasztott napokon ilyen helyzet csak az első esetben állt fenn rövid ideig, azonban az elemzés rövid időtartama miatt ez nem befolyásolta a vizsgálatokat.

Az 500 hPa-os geopotenciál mező alakulása és a terjedési modell eredményei szoros összefüggésben állnak. Minden ensemble tag be van sorolva valamelyik clusterbe. Ezekre kiszámítottuk a trajektóriákat és diszperziókat, és ábráztuk, hogy azok mennyire szórnak.

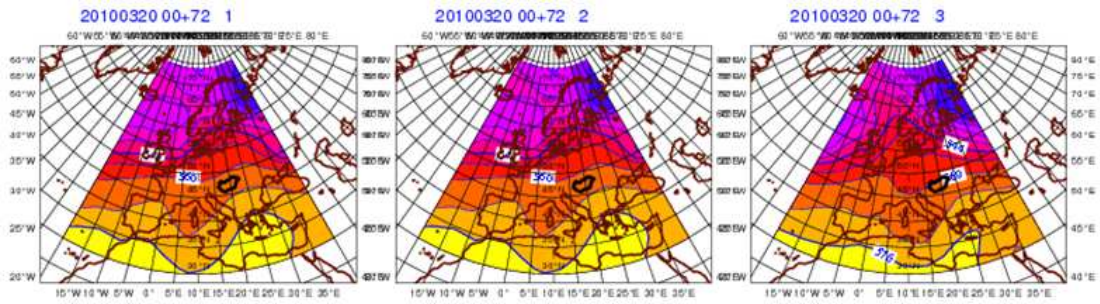
Az áramlási mező és a modell eredményeinek kapcsolatát legjobban a trajektória számításokkal tudjuk igazolni. Ezért a továbbiakban az áramlási mezők bemutatását az azonos időszakra készült trajektória eredmények ismertetése követi.

Vizsgált időpont	Clusterek száma	Clusteren belüli EPS szám
2010. 03. 20	6	14, 9, 9, 8, 7, 4
2010. 04. 14	2	26, 25
2011. 05. 21	3	26, 16, 15

*3. táblázat. Az EPS vizsgálatokhoz kiválasztott három nap, az adott napon a clusterek száma és a clusteren belüli ensemble tagok száma az egyes esetekben*

### **5.3.1 2010. március 20-i eset**

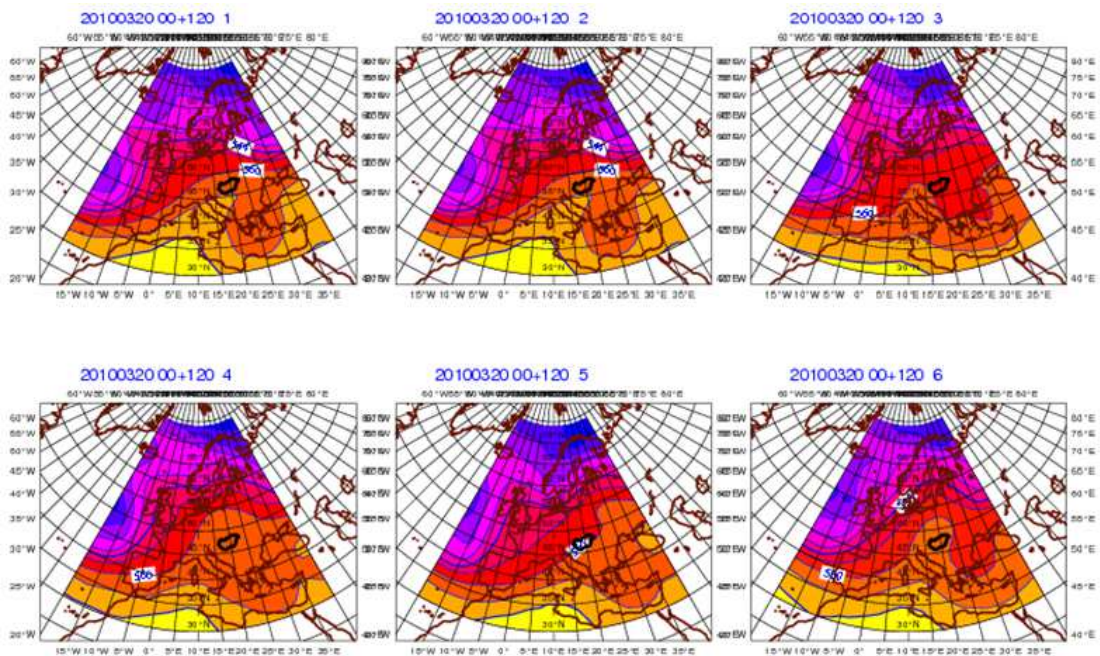
Az Eyjafjallajökull vulkán 2010. március 20-i kitörése napján állt rendelkezésünkre a legtöbb, a maximálisan lehetséges 6 darab cluster. Ezen a napon az 500 hPa-os geopotenciál mező áramlási képében csak kis különbségek mutatkoztak az egyes clustertagok között. A 15/a, b, c ábrásorozat mutatja a Magics++ szoftverrel előállított 2010. március. 20. 00 UTC-s előrejelzés alapján clusterezett áramlási képeket 72, 120 és 168 órával az előrejelzést követően.



MAGICS 6.12.1 blade12.methu - sabitz Tue Apr 24 08:40:33 2012

ECMWF

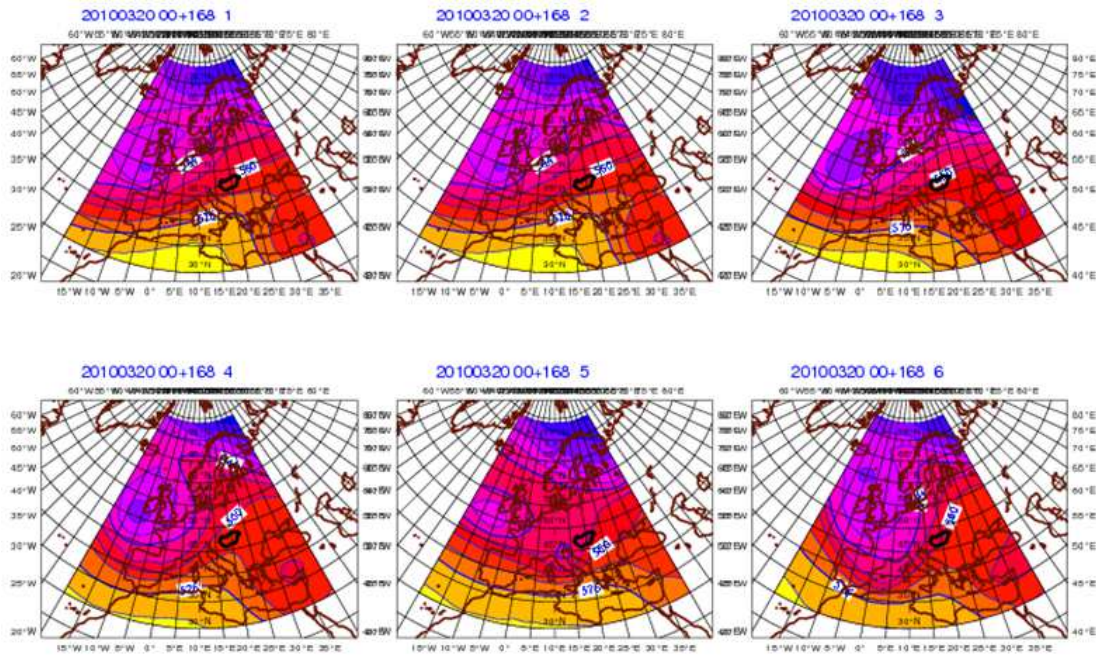
15/a ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2010. március 20. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 72 órával a kiindulási állapot után



MAGICS 6.12.1 blade12.methu - sabitz Tue Apr 24 08:40:33 2012

ECMWF

15/b ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2010. március 20. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 120 órával a kiindulási állapot után

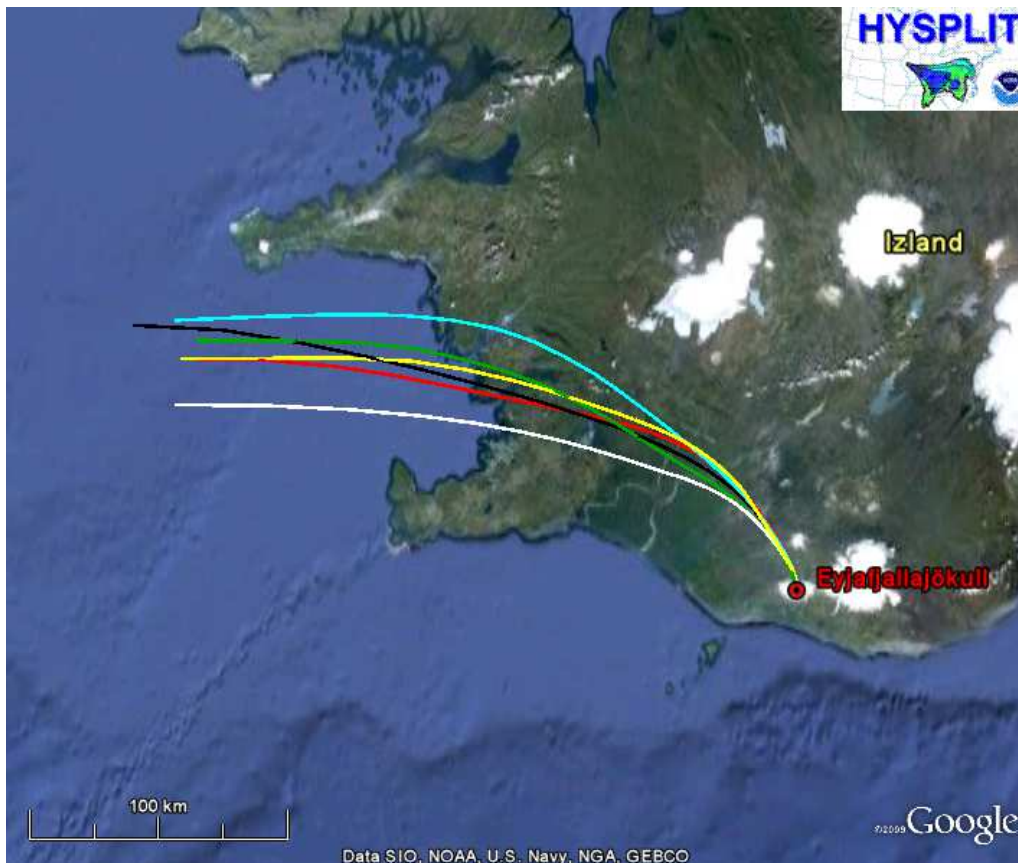


MAG ICS 6.12.1 blade12.methu - sabitz Tue Apr 24 08:40:33 2012

ECMWF

15/c ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2010. március 20. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 168 órával a kiindulási állapot után

Az idő elteltével egyre nagyobb különbségek lépnek fel a reprezentatív tagok között. Kezdetben az első csoporttól, vagyis a legtöbb a hasonló mezőt tartalmazó clustertől legjobban a harmadik és negyedik cluster reprezentatív tag áramlási képe tér el (15/a ábra), majd a későbbiekben a hatodik cluster reprezentatív tag is jelentős eltérést mutat (15/c ábra). Ezek alapján azt várjuk, hogy a terjedési modell eredmények is hasonlóan alakulnak, vagyis eleinte a harmadik és negyedik, később pedig a hatodik cluster reprezentatív tagra vonatkozó szimulációk térnek el legjobban az első cluster reprezentatív tagra vonatkozó eredménytől. Ez jól látható a 16. ábrán, ahol az első csoport trajektóriáját pirossal, a harmadikét zölddel, a negyedikét fehérrel, a hatodikét pedig késsel tüntettük fel.

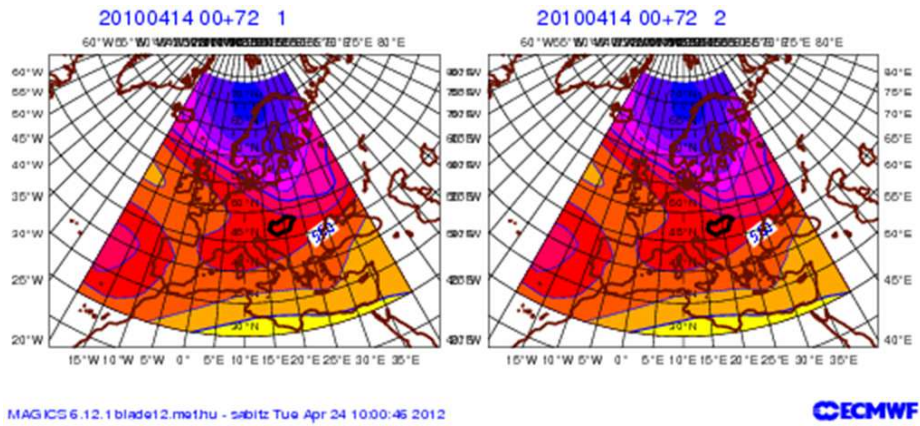


16. ábra. Cluster reprezentatív tagokra alapozott trajektória számítások a HYSPLIT modellel (2010. március 20-i eset). A színek a különböző clusterekből számított trajektóriákat jelölik. Az 1. cluster trajektóriája piros, a soronkövetkezőké pedig rendre sárga, zöld, fehér, fekete és kék színnel van jelölve.

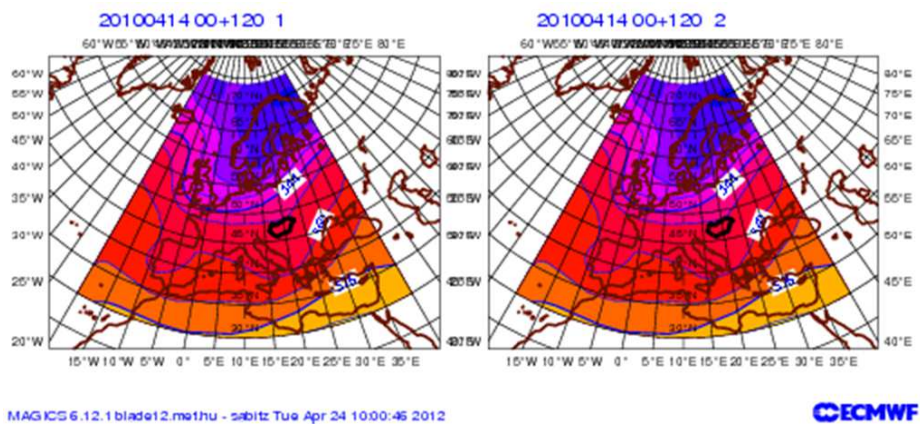
### 5.3.2 2010. április 14-i eset

Az Eyjafjallajökull vulkán egy hónappal későbbi, 2010. április 14-i kitörése napján csak 2 darab és közel azonos elemszámú, azaz közel ugyanolyan valószínűségű cluster állt rendelkezésünkre. Ezen a napon az 500 hPa-os geopotenciál mező áramlási képében alig észrevehető különbségek fedezhetők fel az egyes cluster reprezentatív tagok között. A Magics++ szoftverrel előállított 2010. április 14. 00 UTC-s előrejelzés alapján clusterezett áramlási képeket 72, 120 és 168 órával az előrejelzést követően a 17/a, b, c ábraszorozat szemlélteti.

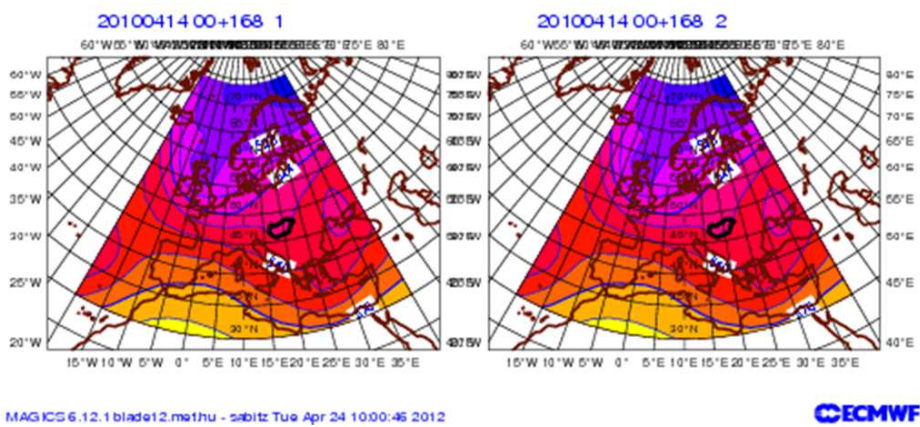




17/a ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2010. április 14. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 72 órával a kiindulási állapot után

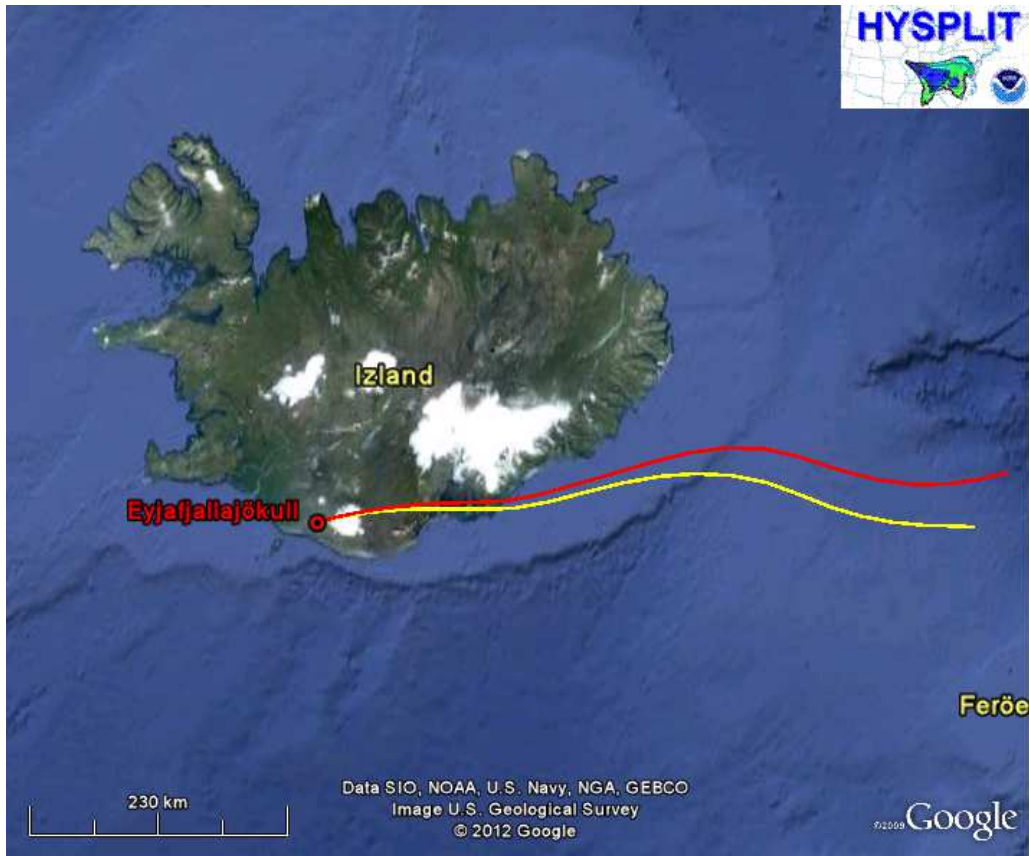


17/b ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2010. április 14. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 120 órával a kiindulási állapot után



17/c ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2010. április 14. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 168 órával a kiindulási állapot után

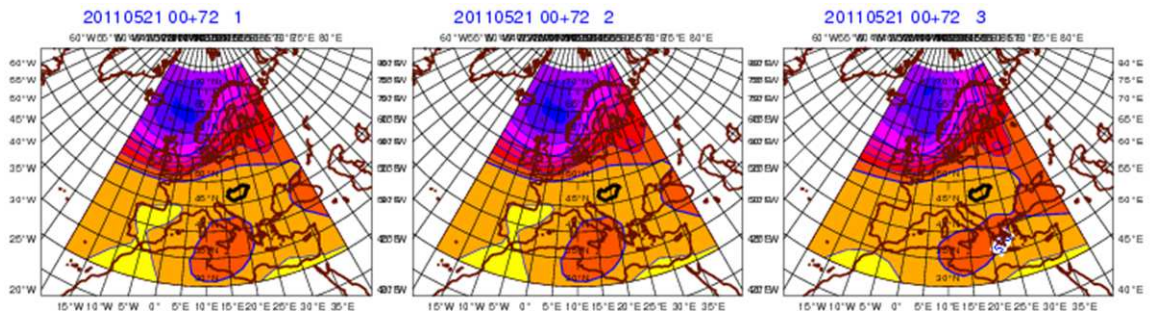
Az időszak kezdetén az áramlási képek alakulásának megfelelően a trajektóriák menetében sincs jelentős eltérés. Ez jól látható a 18. ábrán is, ahol kismértékű különbség csak az időszak második felétől mutatkozik, de a trajektóriák végig nagyon hasonló görbét írnak le.



18. ábra. Cluster reprezentatív tagokra alapozott trajektória számítások a HYSPLIT modellel (2010. április 14-i eset). A színek a különböző clusterekből számított trajektóriákat jelölik. Az első cluster trajektóriája piros, a másodiké sárga színnel van jelölve.

### 5.3.3 2011. május 21-i eset

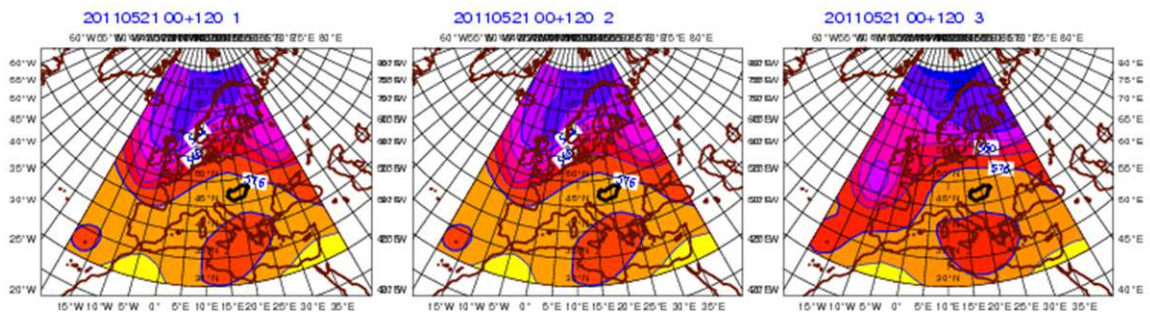
Harmadik esetként a Grímsvötn vulkán 2011. május 21-i kitörése napján rendelkezésre álló 3 darab cluster által leírt geopotenciál mező alakulását elemezzük. Ezen a napon láthatók a legnagyobb eltérések az 500 hPa-os geopotenciál mező áramlási képében az egyes cluster reprezentatív tagok között, különösen a harmadik cluster eltérő áramlási képe szembeűnő. A 2011. május 21. 00 UTC-s előrejelzés alapján clusterezett áramlási képeket 72, 120 és 168 órával az előrejelzést követően a 19/a, b, c ábraszorozat mutatja be.



MAGICS6.12.1blade12.ma1hu - sabitz Tue Apr 24 10:00:46 2012

CECMWF

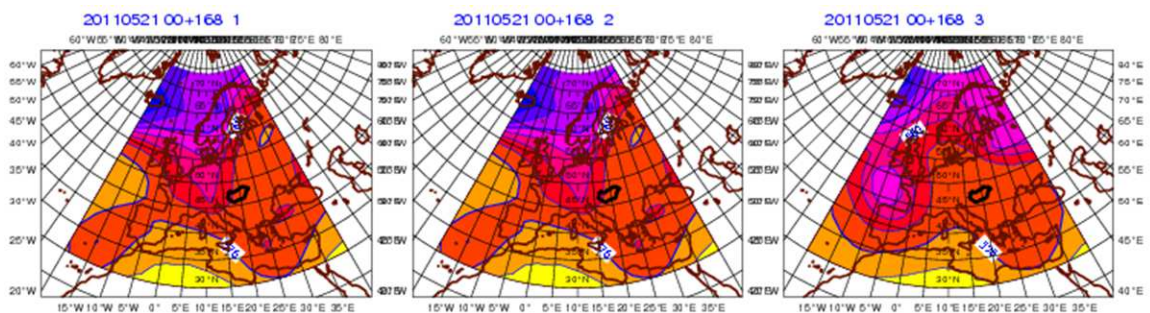
19/a ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2011. május 21. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 72 órával a kiindulási állapot után



MAGICS6.12.1blade12.ma1hu - sabitz Tue Apr 24 10:00:46 2012

CECMWF

19/b ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2011. május 21. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 120 órával a kiindulási állapot után



MAGICS6.12.1blade12.ma1hu - sabitz Tue Apr 24 10:00:46 2012

CECMWF

19/c ábra. 500 hPa-os geopotenciál mező előrejelzések a 2011. május 21. 00 UTC-s előrejelzésből clusterezve, 168 órával a kiindulási állapot után

Az egyes cluster reprezentatív tagok által leírt áramlási képekben mutatkozó nagy eltérések jól láthatók a trajektória számításokban is (20. ábra).



20. ábra. Cluster reprezentatív tagokra alapozott trajektória számítások a HYSPLIT modellel (2011. május 21-i eset). A színek a különböző clusterekből számított trajektóriákat jelölik. Az első cluster trajektóriája piros, a másodiké sárga, a harmadiké pedig zöld színnel van jelölve.

## 5.4 Továbbfejlesztési lehetőségek

Diplomamunkám keretein belül olyan kutatómunkába kapcsolódhattam be, amelynek számos későbbi továbbfejlesztési lehetősége lehet. Egy egyszerű lehetőség, ha az általunk vizsgált extrém események elemzését egy vagy több másik meteorológiai modellel is elvégezzük. Így összevethetjük a modellek eredményeit, elemezhetjük a különbségek okait, valamint a meglévő esettanulmányok mellett továbbiakkal is tesztelhetjük, hogy az egyes esetek vizsgálatára melyik modell a legalkalmasabb. Ez a multimodell ensemble

összehasonlítás akár a hazai operatív gyakorlatban alkalmazott FLEXTRA modellel is elvégezhető. A FLEXTRA modell előnye, hogy Linuxon is futtatható, így segítségével egyszerűen és gyorsan előállítható nagyszámú modellfuttatás, például az 51 EPS tag mindegyikére való szimuláció.

A HYSPLIT modell is továbbfejleszhető olyan módon, hogy Linux alatt is futtatható legyen, erre irányuló kutatómunkákba korábban már bekapcsolódhattam.

Hasonló jellegű vizsgálatok modellszinti adatok alapján is elkészíthetők. Az EPS esetében 62, az ERA Interim esetén pedig 60 modellszinti mező áll rendelkezésre. Ezeknél a vizsgálatoknál azonban problémát jelenthet, hogy az EPS esetében az adatok elérése csak valós időben lehetséges, ezért ARCHIV esetekre nem alkalmazható az eljárás.

Mi az ECMWF által használt és felajánlott clusterezést használtuk, ensemble vizsgálatainkat ezért csak az európai esetekre végezhetjük el. A vizsgálat azonban könnyen adaptálható nem európai esetekre is például egy másik clusterezési módszer megalkotásával vagy akár a korábban Szintai Balázs által kifejlesztett eljárás alkalmazásával is (Szintai, 2006). A clusterezés ilyen fajta mobillá alakításával tetszőleges területre végezhetünk vizsgálatokat.

## Összefoglalás

Napjaink időjárás előrejelzéseikhez nélkülözhetetlen a numerikus prognosztikai modellek használata. A légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer közelítő megoldásán alapuló számszerű előrejelzések készítése során számos hibaforrással találkozhatunk. A mérésekből származó pontatlanságok, az adathiány, valamint a közelítésekből adódó bizonytalanságok miatt a numerikus modellek kiindulási állapotát nem tudjuk pontosan meghatározni. Ezeknek a problémáknak a megoldására fejlesztették ki az ensemble előrejelzés módszerét, amelynek köszönhetően a megbízhatóbb előrejelzések készítése mellett az előrejelzések bizonytalanságának prognosztizálására is lehetőség nyílik.

A pontatlan és nem reprezentatív bemenő adatok a légköri terjedés modellezésben is nagy bizonytalanságot okoznak. A modelleredmények magukban foglalják a meteorológiai előrejelzések pontatlanságát és a modell által alkalmazott parametrizációs eljárásokból származó hibákat. Ezért a terjedési modellek folyamatos tesztelésére és ellenőrzésére van szükség, amely legegyszerűbben eltérő meteorológiai adatok alkalmazásával és az ebből származó eredmények összehasonlításával, valamint korábban történt és jól dokumentált esettanulmányokon keresztül történhet.

Diplomamunkám során olyan diszperzió és trajektória számításokat végeztünk, amelyekhez ensemble előrejelzéseket is felhasználtunk. Vizsgálatainkat a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központjának (ECMWF) ERA Interim reanalíziseire, valamint az ensemble előrejelzéseire alapozottan végeztük. Ehhez az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Intézet Légköri Kutatólaboratóriuma (NOAA ARL) által kifejlesztett HYSPLIT modellt használtuk fel.

Az ECMWF ERA Interim reanalízis adatai alapján eltérő térbeli és függőleges felbontás mellett készítettünk szimulációkat három konkrét esetre vonatkozóan. Megállapítottuk, hogy az eredmények nagymértékben függenek a bemenő adatok minőségétől, és hogy a pontosabb eredmények eléréséhez nagyobb számítási idő szükséges. Megvizsgáltuk az ensemble előrejelzések alkalmazásának hatását, majd összevetettük eredményeinket a determinisztikus előrejelzések felhasználásával kapott eredményekkel.

A bemutatott extrém események közül az európai esetekre az ECMWF-ben 2010 óta operatíván alkalmazott ensemble clusterelési eljárás eredményeit vizsgáltuk. Ennek keretein belül az ensemble átlaghoz közeli cluster reprezentatív tagokra végeztünk modellfuttatásokat

a HYSPLIT modellel, eredményeinket az egyes cluster tagokon belüli ensemble előrejelzések számával súlyoztuk. Ily módon a determinisztikus közelítésnél megbízhatóbb eredményeket kaptunk.

A diplomamunkámban bemutatott vizsgálatoknak számos továbbfejlesztési lehetősége lehet. Kézenfekvő megoldás, ha több meteorológiai modell alkalmazásával is igazoljuk a dolgozat főbb megállapításait, vagy akár egy másik clusterezési algoritmus használatával is végezhetünk hasonló vizsgálatokat tetszőleges területre.

## Irodalomjegyzék

- Ambrózy, P., Bartholy, J., Gulyás, O., 1984: A system of seasonal macrocirculation pattern for the Atlantic-European region. *Időjárás*, **88**, 121-133
- Anderson, B., 2008: Evaluation Methods for Long Range Transport. 9th Modeling Conference Presentations. Research Triangle Park, NC, USA, 9-10 October 2008
- Aszódi, A., 2011: Sajtóközlemény a japán földrengés atomerőművekre gyakorolt hatásáról. [www.reak.bme.hu/aszodi](http://www.reak.bme.hu/aszodi)
- Benedetti, A., Kaiser, J. W., Morcrette, J. J., Eresmaa, R., Lu, S., 2011: Simulations of volcanic plumes with the ECMWF/MACC aerosol system. European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF), Research Department, Reading, UK, Call Number: QC.882.46/B4/2011
- Buizza, R., Bidlot, J-R. Wedi, N., Fuentes, M., Hamrud, M., Holt, G., Palmer, T., Vitart F., 2006: The ECMWF Variable Resolution Ensemble Prediction System (VAREPS). *ECMWF Newsletter*, **108**, 14-20
- Buizza, R., Leutbecher, M. Isaksen, L., Haseler, J., 2010: Combined use of EDA- and SVbased perturbations in the EPS. *ECMWF Newsletter*, **123**, 22-28
- Charney, J. G., Fjørtoft, R., Neumann, J., 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, **2**, 237–254
- Csima G., 2003: A numerikus előrejelzés során alkalmazott utófeldolgozási és verifikációs eljárások. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, Budapest*, 89-97
- Dacre H. F., Grant, A. L. M., Hogan, R. J., Belcher, S. E., Thomson, D. J., Devenish, B. J., Marenco, F., Haywood, J. M., Ansmann, A., Mattis, I., Hort, C., Clarisse, L., 2011: Evaluating the structure and magnitude of the ash plume during the initial phase of the 2010 Eyjafjallajökull eruption using lidar observations and NAME simulations. *Journal of Geophysical Research*, **116**, D00U03
- Dee D., P, Källén, E., Simmons, A. J., Haimberger, L., 2011: Comments on ‘Reanalyses suitable for characterizing long-term trends’. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **92**, 65–70
- Duska, G., Ferenczi, Z., Ihász, I., 1998: A május végén az Ibériai-félszigeten történt nukleáris szennyeződés hatásának tanulmányozása. *Esettanulmány*, Országos Meteorológiai Szolgálat



- 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, pp 26
- Draxler, R.R., 1996: Boundary Layer Isentropic and Kinematic Trajectories during the August 1993 NARE Intensive. *Journal of Geophysical Research*, **101**, 29, 255-29, 268
- Draxler, R. R., Hess, G. D., 1997: Description of the HYSPLIT\_4 modeling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, December, pp 24
- 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
- Ferenczi, Z., 2003: Puff modell meteorológiai preprocesszorának előállítás. *Doktori disszertáció*, Budapest, pp 83
- Ferranti, L., Corti, S., 2011: New clustering products. *ECMWF Newsletter*, **127**, 7-12
- Flentje, H., Claude, H., Elste, T., Gilge, S., Köhler, U., Plass-Dülmer, C., Steinbrecht, W., Thomas, W., Werner, A., Fricke, W., 2010: The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 – detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar ceilometer profiles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **10**, 10085-10092, 2010
- Götz G., 2001: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, 411-413
- Ihász, I., 1992: Isobaric and isentropic objective analysis of meteorological fields for regional and continental scale trajectories. *Időjárás*, **96**, 81-92
- Ihász I., 2003a: Operatív középtávú időjárás előrejelző modellezés az ECMWF-ben. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*, 119-128
- Ihász, I., 2003b: Experiments of clustering for central European area especially in extreme weather situations. Proceedings of Ninth ECMWF Workshop on Meteorological Systems, Reading UK, 10-14 November 2003, 112-116
- Ihász I., 2010: Az ensemble középtávú előrejelzések alkalmazási lehetőségei. ELTE Meteorológiai TDK Nyári Iskola, Szigliget, 2010. augusztus 28. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*. **23**, 121-125

- Ihász, I., Üveges, Z., Mile, M., Németh, Cs., 2010: Ensemble calibration of ECMWF's medium range forecasts. *Időjárás*, **114**, 275-286
- Isaksen, L., Haseler, J., Buizza, R., Leutbecher, M., 2010: The new ensemble of Data Assimilations. *ECMWF Newsletter*, **123**, 17-21
- Iványi, Zs., Mersich, I., 1984: A climatological analysis of two and four day backward trajectories. *Időjárás*, **88**, 145-153
- Kaba M., 1995: Csatlakozásunk a Középtávú Időjárási Előrejelzések Európai Központjához. *Léggör*, 1995/4. 34
- Kahl, J. D., Harris, J. M., Herbert, G. A., 1989: Intercomparison of three long-range trajectory models applied to Arctic haze. *Tellus*, **41B**, 524-536
- Labancz, K., 2004: Izentróp és 3D trajektóriák számolása a FLEXTRA modell adaptálásával. Országos Meteorológiai Szolgálat, OAH/NBI-ABA-29/04
- Lorenz, E. N., 1963: Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 130-141
- Lorenz, E. N., 1963: The mechanics of vacillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 448-465
- Molteni, F. R., Buizza, T. N., Palmer, T. N., Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **122**, 37-119
- Montani, A., Capaldo, M., Cesari, D., Marsigli, D., Modigliani, U., Nerozzi, F., Paccagnella, T., Patrino, P., Tibaldi, S., 2003: Operational limited-area ensemble forecasts based on the 'Lokal Modell'. *ECMWF Newsletter*, **98**, 2-7
- Palmer, T., Buizza, R., Hagedorn, R., Lawrence, A., Leutbecher, M., Smith, L., 2006: Ensemble prediction: A pedagogical perspective. *ECMWF Newsletter*, **106**, 10-17
- Pasquill, F., 1962: Atmospheric diffusion. Van Nostrand, London. pp 209
- Péczely Gy., 1959: Budapest légszennyezettsége különböző időjárási helyzetekben. *Időjárás*, **63**, 19-27
- Péczely Gy., 1983: Magyarország makroszinoptikus helyzeteinek katalógusa, (1881-1983). *Az Országos Meteorológiai Szolgálat kisebb kiadványai*, **53**. kötet, pp 116
- Persson, A., 2011: User guide to ECMWF forecast products. ECMWF Reading, UK
- Petersen, G. N., Bjornsson, H., Arason, P., Löwis, S., 2012: Two weather radar time series of the altitude of the volcanic plume during the May 2011 eruption of Grímsvötn, Iceland. PDI-1789, Earth System Science Data

- Pudykiewicz, J.A., Koziol, A.S., 1998: An Application of the Theory of Kinematics of Mixing to the Study of Tropospheric Dispersion. Atmospheric Environment. 32, 4227-4244*
- Rabier, F., Mahfouf, J. F., Fisher, M., Jarvinen, H., Simmons, A., Anderson, E., Bouttier, F., Courtier, P., Hamrud, M., Haseler, J., Hollingsworth, A., Isaksen, L., Klinker, E., Saarinen, S. Temperton, C., Thépaut, J. N., Undén, P., Vasiljevic, D., 1997: The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. ECMWF Technical Memorandum, 240*
- Raoult, B., 2001: MARS on the Web: a virtual tour. ECMWF Newsletter, 90, 9-17*
- Richardson, L. F., 1922: Weather prediction by numerical process. Cambridge University Press (reprinted by Dover Publications, New York, 1965, with a new introduction by Sydney Chapman)*
- 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, 590-5*
- Sábitz, J., 2010: Léggöri szennyezőanyagok diszperziójának vizsgálata a HYSPLIT modell segítségével. Tudományos Diákköri Dolgozat. Budapest, ELTE Meteorológiai Tanszék, pp 35*
- Shibahara, S., 2011: The 2011 Tohoku Earthquake and Devastating Tsunami. The Tohoku Journal of Experimental Medicine, 223, 305-307*
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., 2007: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter, 110, 25-35*
- Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., Yasunari, T.J., 2011: Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 11, 2011, 28319-28394*
- Szabó, T., 2004: A HYSPLIT\_4 trajektória-modell adaptálása és alkalmazása. Tudományos diákköri dolgozat, Budapest, ELTE Meteorológiai Tanszék. pp 35*
- Szintai, B., 2006: Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel. Diplomamunka. Budapest, ELTE Meteorológiai Tanszék, pp 56*
- Szintai, B. and Ihász, I., 2007: The dynamical downscaling of ECMWF EPS products with the ALADIN mesoscale limited area model: preliminary evaluation. Időjárás, 110, 229-252*

- Taylor, A.D., 1997: Conformal map transformations for meteorological modelers. *Computers and Geosciences*, **23**, 63-75
- Tóth, H., 2000: Trajektóriamodellek alkalmazása a nagyskálájú szennyezőanyag-szállítás leírásában. *Diplomamunka*, Budapest, ELTE Meteorológiai Tanszék, pp 33
- Turner, D. B., 1964: A Diffusion Model for an Urban Area. *Journal of Applied Meteorology*, **3**, 83-91
- Uppala, S., Kallberg, P., Hernandez, A., Saarinen, S., Fiorino, M., Li, X., Onogi, K., Sokka, N., Andrae, U., Bechtold, V. Da Costa, 2004: ERA-40: ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957–2002. *ECMWF Newsletter*, **101**, 2-21
- Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., Balmaseda, M., Simmons, A., 2008: Third WCRP International Conference on Reanalysis. *ECMWF Newsletter*, 115
- Venzke, E., Sennert, S. K., Wunderman R. and Carter C., 2010a: Reports from the Smithsonian's Global Volcanism Network, March 2010, *Bulletin of Volcanology*, **72**, 889-891
- Venzke, E., Sennert, S. K., Wunderman R. and Carter C., 2010b.: Reports from the Smithsonian's Global Volcanism Network, April 2010, *Bulletin of Volcanology*, **72**, 1137-1138
- Vitart, F., 2004: Monthly forecasting at ECMWF. *Monthly Weather Review*, **132**, 2761- 2779
- Woods, A., 2006: Medium-Range Weather Prediction, The European Approach. ECMWF, *Springer* pp 270

## **Köszönetnyilvánítás**

Szeretnék köszönetet mondani Ihász István témavezetőmnek a dolgozatom elkészítésében nyújtott segítségéért, türelméért és értékes tanácsaiért. Köszönöm, hogy lelkesen segített a témában szerzett ismereteim elmélyítésében. Köszönöm dr. Barcza Zoltán belső konzulensemnek, hogy éveken át ösztönözte és segítette kutatómunkámat. Nagyon örülök, hogy együtt dolgozhattunk.

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.