

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Meteorológiai Tanszék

**Az AROME nem-hidrosztatikus korlátos  
tartományú modell alkalmazása a mezoskálájú,  
szélsőséges jelenségek előrejelzésénél**



Diplomamunka

Készítette: Pieczka Ildikó

Meteorológus szak

Témavezető:

Kullmann László

Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens:

Práger Tamás, egyetemi docens

Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Budapest, 2007

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés</b>	<b>6</b>
<b>1. Numerikus előrejelzés</b>	<b>7</b>
1.1. A hidro-termodinamikai egyenletrendszer . . . . .	7
1.2. A numerikus előrejelzés legfontosabb lépései . . . . .	8
1.2.1. Kezdeti és peremfeltételek előállítása . . . . .	8
1.2.2. Előrejelzés, ill. időbeli integrálás . . . . .	10
1.2.3. Utófeldolgozás . . . . .	12
<b>2. A kutatások során alkalmazott korlátos tartományú modellek</b>	<b>14</b>
2.1. Az ALADIN és az AROME modell . . . . .	14
2.1.1. Kezdeti és peremfeltételek előállítása . . . . .	17
2.1.2. Horizontális spektrális reprezentáció . . . . .	18
2.1.3. Vertikális diszkretizáció . . . . .	19
2.1.4. Időbeli diszkretizáció . . . . .	20
2.1.5. Parametrizációk . . . . .	21
2.1.6. Az ALADIN és az AROME futtatása a gyakorlatban . . . . .	24
<b>3. Kísérletek</b>	<b>25</b>
3.1. Az előrejelzési tartomány mérete . . . . .	26
3.2. A csatolási frekvencia . . . . .	27
3.3. A csatolási zóna mérete . . . . .	28
3.4. A meghajtó modellek szerepe . . . . .	30
3.5. A hidrometeorok inicializációja . . . . .	30
3.6. Esettanulmányok . . . . .	31
3.6.1. 2006. augusztus 20. . . . .	31
3.6.2. 2005. augusztus 21-23. . . . .	34
3.6.3. 2006. június 29. . . . .	38
<b>4. Összefoglalás</b>	<b>43</b>

Függelék	45
A. 2006. augusztus 20.	45
B. 2005. augusztus 21-23.	48
C. 2006. június 29.	52
Irodalomjegyzék	56
Köszönetnyilvánítás	58

# Ábrák jegyzéke

2.1.	Az ALADIN/HU modell tartománya és domborzata . . . . .	15
2.2.	Az ALADIN és a Méso-NH modell egyesítésének sematikus ábrája . .	16
2.3.	A korlátos tartományú, spektrális modellekben alkalmazott zónák. A magyarázatot lásd a szövegben. . . . .	18
2.4.	Az ALADIN és az ALADIN-NH vertikális felbontása . . . . .	20
2.5.	Az AROME által figyelembevett mikrofizikai folyamatok szemléltetése	23
3.1.	Az AROME modell integrálási tartománya és domborzata . . . . .	27
3.2.	Az AROME modell eredeti és megnövelt integrálási tartománya és domborzata . . . . .	28
3.3.	A korlátos tartományú, spektrális modellekben alkalmazott zónák (NBZON jelölésével). A magyarázatot lásd a szövegben. . . . .	29
3.4.	A szinoptikus állomásokon mért hőmérséklet és szél, illetve a radar reflektivitási értékek 2006. augusztus 20-án 18 UTC-kor . . . . .	32
3.5.	2006. június 30. 06 UTC-ig lehullott 24 órás csapadékösszeg . . . . .	39
A.1.	Modellek előrejelzésének összehasonlítása (1 órás csapadék, 2006. aug. 20. 19 UTC) . . . . .	45
A.2.	Modellek előrejelzésének összehasonlítása Budapest térségében (1 órás csapadék, 2006. aug. 20. 19 UTC) . . . . .	46
A.3.	Az SSI- és a K-index értéke az ALADIN ill. az AROME modell előrejelzésében (2006. aug. 20. 19 UTC) . . . . .	46
A.4.	A modellek által előrejelzett hőmérsékleti mezők (2 m-es hőmérséklet, 850 hPa hőmérséklete, 2006. aug. 20. 19 UTC) . . . . .	47
A.5.	A 0 és 12 UTC-s analízisből készült ALADIN és AROME előrejelzések összehasonlítása (1 órás csapadék, 2006. aug. 20. 19 UTC) . . . . .	47
B.1.	Az integrálási tartomány méretének hatása az előrejelzésre (6 órás csapadékösszeg, 2005. aug. 22. 0 UTC) . . . . .	48
B.2.	A csatolási frekvencia hatása az előrejelzésre (6 órás csapadékösszeg, 2005. aug. 22. 0 UTC) . . . . .	49

B.3. A csatolási zóna méretének hatása az előrejelzésre (6 órás csapadék-összeg, 2005. aug. 21. 18 UTC) . . . . .	49
B.4. A csatolási zóna méretének hatása az előrejelzésre (2 m-es hőmérséklet, 2005. aug. 22. 0 UTC) . . . . .	50
B.5. Objektív verifikáció eredménye . . . . .	50
B.6. Objektív verifikáció eredménye . . . . .	51
B.7. Objektív verifikáció eredménye . . . . .	51
C.1. Modellek előrejelzésének összehasonlítása (1 órás csapadék, 2006. jún. 29. 10 UTC) . . . . .	52
C.2. Az operatív ALADIN modell előrejelzése (1 órás csapadék, 2006. jún. 29. 10 UTC) . . . . .	53
C.3. 8 km-es felbontással futtatott modellek által előrejelzett hőmérsékleti mezők (2 m-es hőmérséklet, 850 hPa hőmérséklete, 2006. jún. 29. 10 UTC) . . . . .	53
C.4. 8 km-es felbontással futtatott modellek által előrejelzett nedvességmezők (850 hPa, 700 hPa, 2006. jún. 29. 10 UTC) . . . . .	54
C.5. Integrálási tartomány méretének hatása (1 órás csapadék, 2006. jún. 29. 10 UTC) . . . . .	54
C.6. Hidrometeorok inicializációjának hatása (6 órás csapadékösszeg, 2006. jún. 29. 18 UTC) . . . . .	55
C.7. Hidrometeorok inicializációjának hatása (6 órás csapadékösszeg, 2006. jún. 30. 0 UTC) . . . . .	55

# Bevezetés

Igaz ugyan, hogy a légkördinamikai modellezés tudománya viszonylag rövid múlttal rendelkezik, de ma már a meteorológia egyik legfontosabb területe, számos megoldásra váró feladattal (numerikus időjárás-előrejelzés, éghajlatmodellezés, légszennyezés terjedésének modellezése, stb). Ez késztetett arra, hogy szakdolgozatomat ebből a témakörből készítssem.

A numerikus előrejelző modellek fontos szerepet játszanak a meteorológiai gyakorlatban, ugyanis az állami és gazdasági élet minden szférája - közte a média - számára fontos meteorológiai előrejelzések ma már ezen modellek eredményeinek kiértékelésén alapulnak. A numerikus előrejelzéssel foglalkozó kutatók feladata a modelleredmények folyamatos pontosítása, azok megbízhatóságának növelése. Ez a következőképpen tehető meg: a numerikus modellek kezdeti feltételeinek minél pontosabb előállításával, a modellek térbeli felbontásának finomításával, illetve a kis skálájú folyamatok minél pontosabb paraméterezésével. [Kalnay, 2003]

Napjainkra a számítástechnika és a légkördinamikai modellezés fejlődésével a számszerű időjárás-előrejelző modellek felbontása elérte azt a határt, amelynél a légkör többé már nem tekinthető hidrosztatikusnak. Ez a tény vezetett - több más nem-hidrosztatikus modell mellett - az AROME (Application of Research to Operations at Mesoscale) modell kifejlesztéséhez. A munka a Francia Meteorológiai Szolgálat, a Météo-France javaslatára kezdődött meg 2001-ben. A nemzetközi összefogás eredménye egy olyan modell lett, amely 2,5 km-es horizontális felbontása és fejlett fizikai parametrizációs csomagja révén segítségünkre lehet abban, hogy egyre pontosabb és részletesebb számítógépes előrejelzéseket készíthessünk.

Munkámban az AROME modell alkalmazását vizsgálom különös tekintettel a mezoskálájú szélsőséges időjárási jelenségek előrejelzésére. A téma aktualitását mutatja, hogy a modell operatív alkalmazása (az OMSZ-nál) 2009-re várható.

A dolgozat 1. fejezetében a numerikus előrejelzés elméleti alapjait, 2. fejezetében a munkám során felhasznált modellek főbb jellemzőit ismertetem. A 3. fejezetben esettanulmányainkat és az általunk futtatott kísérleteket mutatom be. A dolgozat 4. fejezete tartalmazza az elvégzett munka összefoglalását.

# 1. fejezet

## Numerikus előrejelzés

Napjainkban a korszerű időjárás-előrejelzés nehezen képzelhető el a számszerű, vagy más néven numerikus időjárás-előrejelzési modellek használata nélkül. Ezek olyan matematikai algoritmusok és számítógépi programjaik, melyek az alapvető fizikai törvényszerűségek (megmaradási törvények) alapján írják le a légkörben lejátszódó áramlástan és hőtan folyamatokat. A légköri folyamatokat kormányzó hidrodinamikai egyenletrendszer nem lineáris, így a hozzá tartozó kezdeti értékekkel és határfeltételekkel olyan kezdeti-peremérték problémát (ún. vegyes feladatot) alkot, melynek nem ismeretes analitikus megoldása. Ezért a numerikus modellezés egyik fő feladata olyan numerikus módszerek alkalmazása, amelyek segítségével megadható az eredeti prognosztikai feladat konzisztens és stabil közelítő megoldása. [Radnóti, 2003]

### 1.1. A hidro-termodinamikai egyenletrendszer

Az időjárás előrejelzésére készített modellek az alkalmazott numerikus sémák, fizikai parametrizációk és egyéb közelítések, valamint az integrálási tartomány területe és elhelyezkedése tekintetében ugyan jelentősen különböznek egymástól, alapjuk azonban megegyezik. Ez az alap pedig nem más, mint a hidro-termodinamikai egyenletrendszer, mely legáltalánosabban az alábbi alakban írható fel:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F} + \vec{S} \quad (1.1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \rho \cdot \nabla \vec{v} \quad (1.2)$$

$$\frac{dQ}{dt} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt} \quad (1.3)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{\rho}M \quad (1.4)$$

$$p = \rho RT \quad (1.5)$$

ahol (1.1) Newton II. törvénye (mely az impulzusmegmaradást fejezi ki), (1.2) a (tömegmegmaradást kifejező) kontinuitási egyenlet, (1.3) a termodinamika I. főtétele és (1.4) a nedvesség kontinuitási egyenlete. A rendszert az (1.5) állapotegyenlet zárja le.

Az egyenletekben  $p$  a légnyomás,  $\rho$  a levegő sűrűsége,  $\vec{v}$  az áramlás sebessége,  $-\frac{1}{\rho}\nabla p$  a nyomási gradiens erő,  $\vec{g}$  a gravitációs erő,  $2\vec{\Omega} \times \vec{v}$  a Coriolis-erő,  $\vec{F}$  jelöli a nehézségi erőn kívüli összes külső erőt,  $\vec{S}$  pedig a belső súrlódási erőket.  $Q$  a térfogati hőáram,  $c_p$  a levegő állandó nyomáson mért fajhője,  $T$  a levegő hőmérséklete,  $\alpha$  a levegő fajlagos térfogata,  $q$  a specifikus nedvesség,  $M$  pedig az időegység alatt fázisváltáson átmenő vízgőz tömege.

Ezen egyenletek - megfelelő egyszerűsítések utáni - megoldásával kapjuk meg a prognosztikai változók jövőbeni becsült értékét, melyből aztán elkészíthetjük a prognózist.

## 1.2. A numerikus előrejelzés legfontosabb lépései

A numerikus előrejelzés folyamatának fő lépései a következők:

- kezdeti- és peremfeltételek előállítása
- előrejelzés
- utófeldolgozás

A következőkben ezeket a lépéseket tekintem át.

### 1.2.1. Kezdeti és peremfeltételek előállítása

A légköri folyamatokat leíró rendszer determinisztikus, azaz megfelelő kezdeti- és határfeltételek megadása esetén az egyenletrendszer megoldásával meghatározhatjuk a rendszer jövőbeni állapotát. A légkör kezdeti állapotát leíró kezdeti feltételeket úgy célszerű megadni a modell számára, hogy azok a lehető legpontosabbak (a valósághoz a lehető legközelebb állók) és egyben az egyenletekkel konzisztensek (a változók közötti összefüggéseket kielégítőek) legyenek. Ez azért fontos, mert a kezdeti mező pontossága döntő mértékben befolyásolja az előrejelzés minőségét a légköri folyamatokat leíró egyenletek nemlineáris volta miatt. A konzisztencia hiánya szintén az előrejelzés hibájához vezethet.



Az előrejelzést úgy készítik, hogy az integrálási tartományt lefedik egy háromdimenziós térbeli ráccsal, és a meteorológiai paramétereket e rács rácspontjaiban jelzik előre (számítják ki). A kezdeti feltételekre tehát ezekben a rácspontokban van szükség. A légköri megfigyelések azonban nem állnak rendelkezésre ilyen tér- és időbeli szabályossággal, ezért interpolációt kell végezni és más információkat, elsősorban a modell korábbi futtatásainak eredményeit is figyelembe kell venni (model first guess) a konzisztencia biztosítása érdekében. Azt a folyamatot, amelynek során a fentiek figyelembevételével előállítják a kezdeti feltétel mezőket, a numerikus előrejelzésben *adatasszimilációnak* nevezik. Ahhoz, hogy jó minőségű objektív analízist (kezdeti feltétel mezőket) lehessen készíteni, fontos, hogy a rendelkezésre álló információk mellett azok megbízhatósága is ismert legyen, ezáltal a pontosabb információkat nagyobb súllyal lehessen figyelembe venni a kezdeti mezők előállításánál, mint a kevésbé pontosakat. [Horányi et al., 1998]

A megfigyelési adatokból, illetve az adott időpontra vonatkozó egyéb információkból előállított mezők általában még nem alkalmasak arra, hogy azokat a modell közvetlenül felhasználja kezdeti feltételként. Ennek fő oka, hogy a megfigyeléseket mérési hibák terhelik, a modellrácsra történő interpoláció pedig további hibát eredményez. Ezek többé-kevésbé függetlenek egymástól, így előfordulhat, hogy a kezdeti feltételként előálló meteorológiai változók (például a szél- és a nyomásmező) nincsenek egymással a modell fizikai tartalma által megkövetelt egyensúlyban. Amennyiben erről az egyensúlyról nem gondoskodunk, a modell hamis hullámokat gerjeszthet, melyek ugyan a modell elméletileg lehetséges megoldásai, a valós légkörben azonban sohasem fordulnak elő. Azokat a módszereket, amelyeket ezen nemkívánatos jelenségek kiszűrésére hoztak létre, nevezik inicializációs módszereknek. Az inicializációt az adatasszimiláció részeként tekinthetjük, hiszen az inicializáció eredményeképpen áll elő az kezdeti állapot, amelyből az előrejelzés kiindul. [Horányi et al., 1998]

### **Oldalsó peremfeltételek kezelése**

Az előrejelzési egyenletrendszer a modell integrálása során minden egyes időlépcsőben, minden rácspontra meg kell oldani, amely jelentős mennyiségű számolással jár. Ha nem az egész Földre, hanem csak egy kisebb földrajzi térségre vonatkozóan készítik el az előrejelzéseket, akkor az ezzel nyert számítási kapacitás az előrejelzések pontosítására fordítható. Ekkor beszélünk korlátos tartományú modellekről, melyeknél az alsó és felső határfeltételek mellett - a megnövekedett pontosságért cserébe - szükség van oldalsó határfeltételek megadására is. A tartomány oldalsó pereme nem fizikai határa a tartománynak, hanem egy önkényesen kijelölt felület, ahol a peremfeltételekkel a levegő természetes ki- és beáramlását a lehetőség szerint

legpontosabban kell közelíteni.

A peremfeltételeket többnyire a globális modellek, vagy egy - a korlátos tartományt magában foglaló - másik korlátos tartományú modell előrejelzései szolgáltatják. Ha azonban a perem minden pontjában minden változó értékét megadják az előrejelzés teljes időtartamára, a feladat matematikailag túlhatározottá válik. Ebből adódóan a peremekről visszaverődnek a hullámok, ezzel hamis jeleket hozva létre a tartomány belsejében. Mivel az előrejelzéshez használt egyenletrendszerek igen bonyolultak, mind a mai napig nem megoldott a korrekt kitűzésű matematikai feladatot biztosító peremfeltételek megadása, így a gyakorlatban a túlhatározottság problémáját zajszűrővel oldják meg. Erre több módszer ismeretes, mint például diffúz csillapítás bevezetése a határon, „radiációs feltétel” alkalmazása, tendencia-módosítás, vagy az operatív modellekben legelterjedtebb Davies-féle relaxációs módszer. [Davies, 1976], [Radnóti, 2003]

### 1.2.2. Előrejelzés, ill. időbeli integrálás

A kezdeti feltételek előállítása után kerül sor a modell integrálására, vagyis az előrejelzési egyenletek megoldására. A numerikus előrejelzési modellek és ezen belül a hidro-termodinamikai egyenletrendszer megoldására kidolgozott módszerek (ezeket nevezik szaknyelven modell-dinamikának) alapvető sajátossága, hogy számos közelítést tartalmaznak. Ilyen lehet például, hogy a Földet gömbként közelítik, bizonyos hatások esetében a légkör vertikális kiterjedését elhanyagolják horizontális méretéhez képest, vagy kvázi-hidrosztatikus közelítést alkalmaznak. A természetben (a légkörben és az azt környező földi közegekben) lezajló összes fizikai folyamatot lehetetlen lenne tökéletesen pontosan figyelembe venni, így bizonyos folyamatokat a modell megalkotásakor elhanyagolnak, másokat pedig parametrizálnak (a parametrizációk együttesét nevezik a modell „fizikájának”).

### Térbeli diszkretizáció

A térbeli diszkretizáció során a folytonos meteorológiai változókat diszkretizálni kell mind horizontális, mind vertikális irányban. A numerikus előrejelző modellek között megkülönböztetünk rácsponti és spektrális modelleket. A rácsponti modellekben a változókat csak a rácspontokban kezelik, és a kormányzó egyenleteket véges különbséges módszer segítségével oldják meg. Erre kínálnak alternatív megoldást a spektrális modellek, amikor a változók mezőit vízszintes irányban valamilyen véges (pl. Fourier-sorból levágott, trunkált) függvényrendszer elemeinek segítségével függvény-sor formájában adják meg, így értéküket az egész tartományon definiálják, nem

csak diszkrét pontokban. A spektrális módszer széles körben elterjedt elsősorban globális problémák megoldására, de léteznek hatékony korlátos tartományú változatok is, mint például az ALADIN modell. A spektrális módszereknek számos előnye van a rácsponti módszerekkel szemben, melyek közül a legfontosabbak:

- jól elkülönülnek egymástól a horizontális és vertikális dimenziók, ezáltal egyszerűsíthető a megmaradó tulajdonságok (invariánsok) megőrződésének biztosítása,
- a horizontális irányú deriváltak igen egyszerűen, analitikusan számíthatók,
- a nemlineáris tagok számításánál elkerülhető a nemlineáris instabilitás,
- gazdaságosabb az adattárolás (mivel a spektrális együtthatók száma általában kisebb, mint a rácspontok száma),
- a globális modelleknél nem lép fel az ún. pólus probléma,

ugyanakkor sajnos hátrányaik is vannak, mint például az, hogy

- a szükséges műveletek száma a felbontás növekedésével gyorsabban növekszik, mint rácsponti esetben, vagy
- egyes műveletek elvégzése bonyolulttá válhat, vagy számításigényük megnő (pl. két függvény szorzata).

A vertikális koordináta (esetleg koordináták) kiválasztásakor alapvető fontosságú, hogy az adott modell fizikájához leginkább illő koordinátarendszert válasszunk, mivel ezzel az egyenletek jelentős egyszerűsödését érhetjük el. A numerikus előrejelzés gyakorlatában használt vertikális koordinátarendszerek például a felszínkövető, a nyomási (újabbkeletű szakszóval tömeg-), az izentrop,- a szigma-, illetve a hibrid-koordinátarendszer.

### **Időbeli diszkretizáció**

Az időbeli diszkretizáció azt jelenti, hogy az egyenleteket nem egy lépésben oldják meg az egész integrálási időtartamra, hanem időlépcsőnként haladnak mindaddig, amíg el nem érkeznek az előrejelzési idő-intervallum végéig. Ezt különböző numerikus módszerek segítségével lehet megtenni, kiválasztva azt, amely pontosság és számításigény tekintetében a legmegfelelőbb.

## Parametrizációk

Az (1.1) - (1.5) egyenletekben megjelenő dinamikai tagokat explicit módon lehet származtatni. Ezzel szemben azokat a folyamatokat, amelyek a ráctávolságnál kisebb skálájúak, vagy bonyolultságuk miatt másként nem lehetne figyelembe venni, parametrizációk révén építik be a modellbe. (Ilyen folyamatok például a sugárzás, a konvekció, a felhőfizika, a planetáris határréteg jelenségei, a turbulencia, stb.) A parametrizációs sémák fluxusokat eredményeznek, melyek a prognosztikai egyenletekben a megfelelő fizikai folyamat hozzájárulását írják le az adott mennyiség tendenciájához. Tekintsük például a horizontális momentum egyenletet (a  $\sigma$ -koordinátarendszerben):

$$\frac{d\vec{v}_h}{dt} = -f\vec{k} \times \vec{v}_h - \nabla_h \phi - RT\nabla_h \ln p + (\text{horizontális diffúzió}) - \left. \frac{\partial \vec{v}_h}{\partial t} \right|_{\phi} \quad (1.6)$$

ahol  $\vec{v}_h$  a  $\sigma$  koordináta-rendszerbeli horizontális szélesség,  $f$  a Coriolis-paraméter,  $\vec{k}$  a vertikális egységvektor,  $p$  a légnyomás,  $T$  a hőmérséklet,  $R$  a nedves levegő specifikus gázállandója,  $\phi$  a geopotenciál és  $\nabla_h$  a rögzített  $\sigma$ -felületre vonatkozó horizontális nabla-operátor. [Bubnová et al., 1995] Az egyenletben szereplő  $\left. \frac{\partial \vec{v}_h}{\partial t} \right|_{\phi}$  tag a fizikai folyamatoknak a momentum tendenciájához való hozzájárulását jelöli, azaz:

$$\left. \frac{\partial \vec{v}_h}{\partial t} \right|_{\phi} = -g \frac{\partial}{\partial p} \left\{ J_{\vec{v}}^{turb} + J_{\vec{v}}^{gwd} + J_{\vec{v}}^{conv} \right\} \quad (1.7)$$

Az itt szereplő  $J_{\vec{v}}$  mennyiségek az egyes fizikai folyamatok (konvekció, gravitációs hullám ellenállás, turbulencia) számolásából adódó fluxusokat jelölik.

A parametrizációs sémákkal leírt folyamatok között léteznek olyanok is, amelyeket diagnosztikai úton számolnak, tehát nem az időbeli változására írnak fel egyenletet, hanem a megfelelő mennyiséget paraméterek függvényeként írják le. Tipikus példa erre a felhőzet, vagy a csapadék számolása. A modell az integrálás során először kiszámolja a dinamikából adódó megfelelő tendenciát, majd minden időlépésben meghívja a fizikát is, ahol a megfelelő fluxusok kerülnek kiszámolásra, és az összegzett fluxussal az (1.6) és (1.7) egyenletek alapján lépteti (módosítja) az adott prognosztikus mennyiséget.

### 1.2.3. Utófeldolgozás

A modell integrálásának eredményeként előállnak a prognosztikai változók jövőbeli becsült értékei. A rendelkezésre álló eredmények az utófeldolgozás következtében válnak a szinoptikus előrejelző szakemberek és a felhasználók számára értelmezhetővé és használhatóvá. Ennek során a spektrális modellek esetén először

előállítják az állapototározók rácsponttérbeli mezőit, majd a modell rácshálózatáról (amely a gömbfüggvényeket használó globális modelleknél nem is egyenletes) jól ismert, szabályos rácstra (például valamely térképvetületre) interpolálják az eredményeket. További fizikai és statisztikai összefüggések alapján előállítják azokat a meteorológiai paramétereket, amelyeket a modell közvetlenül nem számít, de az előrejelzés szempontjából fontosak, mint például a napi maximum és minimum hőmérséklet stb. Így lehetőség van pl. előrejelzett „műholdas felhőkép” származtatására is, amely látványosan szemlélteti a jövőbeli időjárási folyamatokat. [Horányi et al., 1998], [Vissz, 2003] Az utófeldolgozáshoz tartozik az előrejelzések számítógéppel történő térképes megjelenítése is. (Ezek a régebben a szinoptikus szakemberek által rajzolt időjárási térképek automatikusan előállított változatai.) Az előrejelzést készítő szakember előtt így már kész, térképeken követhető formában jelenik meg az időjárás alakításában döntő szerepet játszó meteorológiai paraméterek jövőbeni földrajzi eloszlása, valamint annak időbeli változása. Ha a meteorológus kiegészíti ezeket légkörfizikai, klimatológiai ismereteivel, tapasztalataival, már megfogalmazhatja az adott térségre vonatkozó szöveges prognózist: a „várható időjárást”.

## 2. fejezet

# A kutatások során alkalmazott korlátos tartományú modellek

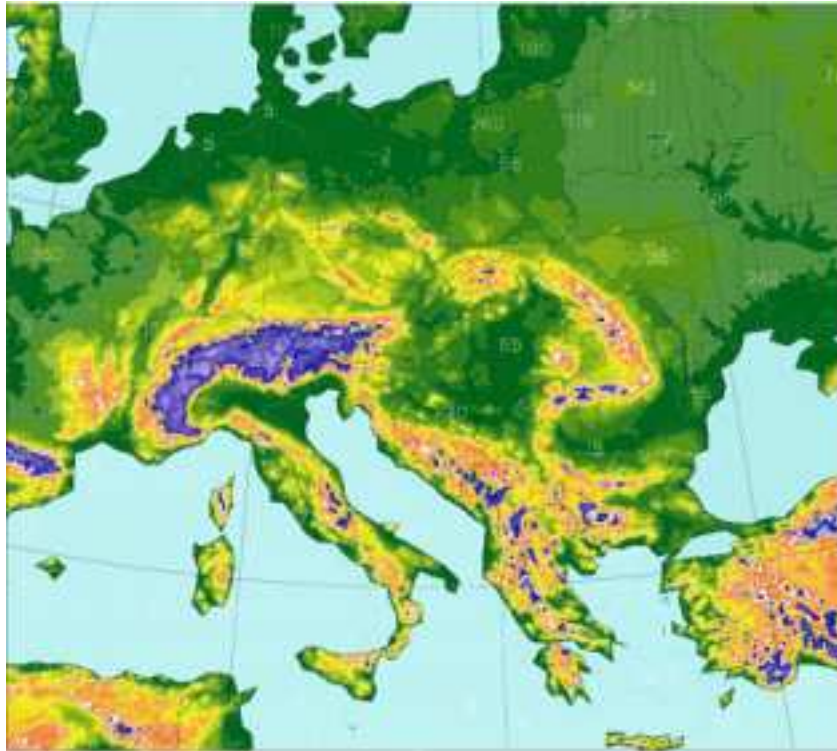
Ebben a fejezetben néhány, szakdolgozati témámhoz közvetlenül kapcsolódó numerikus előrejelző modellt ismerhetünk meg részletesebben: a hazai operatív gyakorlatban (az Országos Meteorológiai Szolgálatnál) alkalmazott ALADIN modellt és a dolgozat alapjául szolgáló AROME-ot.

### 2.1. Az ALADIN és az AROME modell

Az ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) modell fejlesztése 1990-ben indult meg a Météo France kezdeményezésére, nemzetközi együttműködés keretében. Az ekkor kitűzött cél egy olyan korlátos tartományú modell megalkotása volt, amely az ARPEGE modell kezdeti feltételeiből nagy felbontású előrejelzés létrehozására képes. [Horányi et al., 1996] Kezdetben az ALADIN modellt csupán egy (kezdeti és peremfeltétel) interpolációs és egy integrálási konfiguráció alkotta, de már a fejlesztés korai szakaszában külön konfigurációkat dolgoztak ki az elő- és utófeldolgozásra is. Később, ahogy egyre nagyobb hangsúly került a mezoskálán való hatékonyságra, a saját, lokális méréseket is tartalmazó kezdeti mező érdekében több országban létrehozták a modell optimális interpolációs, valamint 3-dimenziós variációs adatasszimilációs kezdeti feltételeket használó konfigurációját is. [Kullmann, 2003]

Az OMSZ-ban használt operatív változat egy Európa méretű tartományon fut, amely horizontálisan 8 km felbontású, és vertikálisan 49 szintet vesz figyelembe. Ez a tartomány a 2.1. ábrán látható.

A számítástechnikai kapacitás növekedésével a modellek rácsfelbontása is finomodott. Ez egy határt elérve már elkerülhetetlenné tette a nem-hidrosztatikus modellek



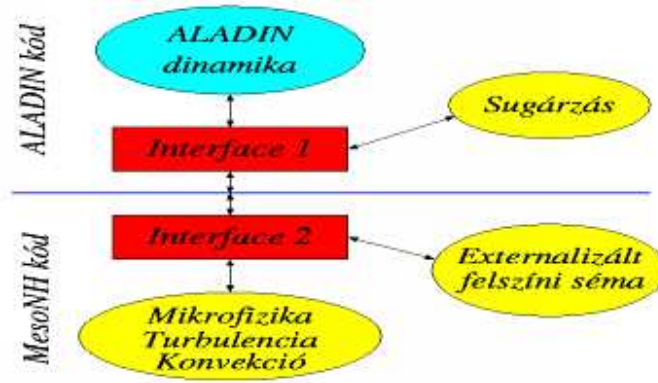
2.1. ábra. Az ALADIN/HU modell tartománya és domborzata

kifejlesztését, amelyekben lehetőség nyílt a fizikai parametrizációk részletesebb leírására is.

Az AROME (Application of Research to Operations at MEscale) modell tervezése 2001-ben kezdődött a Météo France-nál. Az eredmény egy olyan mezoskálájú modell lett, amely 2,5 km-es horizontális felbontás és ugyancsak 49 vertikális szint mellett nem-hidrosztatikus dinamikát használ, azaz nem hanyagolja el a függőleges irányú gyorsulásokat. A horizontális felbontás értéke kompromisszum eredménye, ugyanis ismereteink szerint ez az a skála, ahol a konvekciót már expliciten kezelhetjük, és a modell számításigénye még elfogadható marad.

Az AROME korlátos tartományú modell az ALADIN modell nem-hidrosztatikus változatának dinamikáját és háromdimenziós variációs adatasszimilációs sémáját, illetve a Méso-NH francia kutatói modell fizikai parametrizációit tartalmazza. A két modell kombinálásánál az elsődleges szempont az volt, hogy a lehető legkevesebb változást kelljen tenni a már meglévő forráskódokban, így elsősorban úgynevezett interface rutinok kidolgozása volt a cél, amellyel a két modell egyesíthető (ez látható a 2.2. ábrán).

Az ALADIN modell korlátos tartományú spektrális kvázi-hidrosztatikus modell. Az integrálás során a primitív egyenleteket oldják meg, ezáltal a nem-hidrosztatikus folyamatok közvetlen (a modell-dinamikában történő) figyelembevételére a modell



2.2. ábra. Az ALADIN és a Meso-NH modell egyesítésének sematikus ábrája

nem alkalmas. Ha olyan modellt szeretnénk készíteni, mely a légköri mozgások szélesebb skálájának leírására képes, az euléri termo-hidrodinamikai egyenletrendszer olyan alakjára van szükségünk, mely nem hanyagolja el a nem-hidrosztatikus hatásokat, és a nagyskálájú mozgások területén is a megfelelő közelítéseket alkalmazza.

A gyakorlatban erre a célra az ALADIN-NH és az AROME konstruálásakor az euléri egyenletrendszer teljesen elasztikus alakban való felírását - azaz lényegében a teljes, a viszkozitás elhanyagolásán kívül más közelítést nem tartalmazó alakját - választották. Ezekben az egyenletek nem élnek a kvázi-hidrosztatikai közelítéssel, mely azt tételezi fel, hogy a vertikális irányú gyorsulások sokkal kisebbek, mint a gravitációs gyorsulás. Az egyenletrendszer nem használja fel az anelasztikus közelítést sem, mely nem más, mint a valóságos, térben és időben változó sűrűségeloszlásnak a csak a magasságtól függő, átlagos sűrűségprofillal való helyettesítése a kontinuitási egyenletben.

A fenti okok miatt az AROME modell bármilyen skálán érvényes, [Bénard, 2004] minden, a légkörben előforduló mozgásforma (hullám-alapmódus) modellezhető vele.

Az AROME modellben használt prognosztikai egyenletek a következők:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{RT}{p} \nabla p + \frac{1}{m} \frac{\partial p}{\partial \eta} \nabla \Phi = \mathbf{V} \quad (2.1)$$

$$\frac{d\mathbf{d}}{dt} + g^2 \frac{p}{mRT} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{1}{m} \frac{\partial \pi P}{\partial \eta} \right) - g \frac{p}{mRT} \frac{\partial V}{\partial \eta} \nabla w - \mathbf{d}(X - \mathbf{d}) - \dot{X} = -g \frac{p}{mRT} \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \eta} \quad (2.2)$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{RT}{c_v} D_3 = \frac{\mathbf{Q}}{c_v} \quad (2.3)$$

$$\frac{d\hat{q}}{dt} + \frac{c_p}{c_v} D_3 + \frac{\dot{\pi}}{\pi} = \frac{\mathbf{Q}}{c_v T} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \pi_s}{\partial t} + \int_0^1 \nabla(m\vec{v}) d\eta = 0 \quad (2.5)$$



ahol  $\eta$  a hibrid vertikális koordináta,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{W}$  és  $\mathbf{Q}$  az erők fizikai komponensei,  $\mathbf{d} = -g \frac{\rho}{m} \frac{\partial w}{\partial \eta}$ ,  $\mathbf{d} = \mathbf{d} + \frac{p}{mRT} \nabla \Phi \left( \frac{\partial V}{\partial \eta} \right)$ ,  $X = \mathbf{d} - \mathbf{d} = \frac{p}{mRT} \nabla \Phi \left( \frac{\partial V}{\partial \eta} \right)$ ,  $P = \frac{p-\pi}{\pi}$  és  $\hat{q} = \ln(p/\pi)$ .

### 2.1.1. Kezdeti és peremfeltételek előállítása

Az ALADIN modell kezdeti feltételeit 3-dimenziós variációs adatasszimilációval állítjuk elő. E technika során egy veszteségfüggvényt definiálunk, amely a rendelkezésre álló információk, valamint a valóság közötti eltérést méri azok pontosságának függvényében, és a modell kiindulási állapotát ezen eltérés minimumaként határozzuk meg. A határfeltételeket az ARPEGE globális modell szolgáltatja 3 órás csatolási frekvenciával. [Böloni, 2003], [Horányi, 2006]

Az AROME modellnél a kezdeti mező előállításához nem használunk adatasszimilációs módszereket, hanem az ún. *dinamikai adaptációt* alkalmazzuk. Ekkor a meteorológiai változókat a bemeneti modell rácsáról az adott modell rácsára történő egyszerű interpolációval kapjuk meg. Kísérleteink során a modellt az ALADIN-hoz, illetve a 8 km-es felbontással futtatott AROME-hoz csatoltuk 1, 3 és 6 órás csatolási frekvenciával.

Az ALADIN és az AROME modellekben inicializációs eljárásként a digitális szűrő inicializációt (DFI) alkalmazzuk, mely a modell kezdeti feltételére a

$$y(0) = \sum_{k=-N}^N a_k x_{N-k} \quad (2.6)$$

szűrő alkalmazását jelenti, ahol  $y$  a kiindulási, 0 sorszámú időlépcsőhöz ( $t = 0$ ) tartozó szűrt állapot, az  $x_k$  -k pedig a  $-N$  és  $N$  sorszámú időlépcsők ( $-N\Delta t, N\Delta t$ ) közötti szűretlen állapotok. Ennek során az állapotvektor minden egyes komponensére alkalmazni kell (2.6)-t. [Radnóti, 2003]

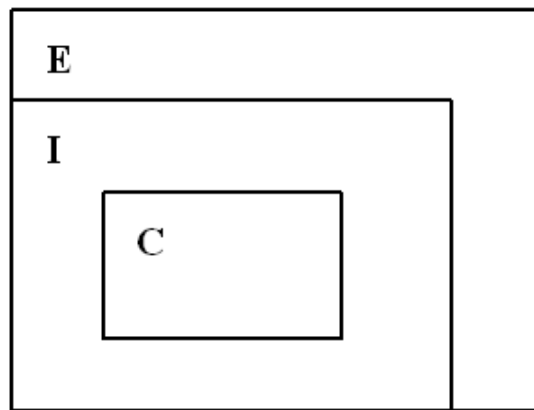
### Oldalsó peremfeltételek kezelése

Az oldalsó peremfeltételek kezelésére az ALADIN és az AROME modell egyaránt a Davies-féle relaxációs módszert alkalmazza. [Davies, 1976], [Radnóti, 2003]

Ez a módszer meg sem kíséri a feladatot korrekt kitűzésűvé tenni. Minden határpontban megadja a peremfeltételeket, majd a relaxációs (I) zóna segítségével szűri a tartomány pereméről visszaverődő hamis hullámokat úgy, hogy a tartományon kívülről beérkező jeleket változatlanul hagyja. A relaxációs zóna bevezetése azt jelenti, hogy a peremfeltételeket a tartományt határoló vonal mentén, egy viszonylag keskeny sávban kell figyelembe venni egy relaxációs csatolási formula alapján:

$$\Psi = \alpha \Psi_{LS} + (1 - \alpha) \Psi_{INT} \quad (2.7)$$

ahol az  $LS$  index a nagyskálájú kényszert, az  $INT$  index pedig a korlátos tartományú modell által szolgáltatott változó értéket jelöli. Az  $\alpha$  relaxációs együttható értéke a központi (C) zónában 0, a peremen 1, a két érték között folyamatos átmenettel. Ez azt jelenti, hogy a központi zónában kizárólag a korlátos tartományú modell által számított értékeket, a relaxációs zónán kívül pedig csak a nagyskálájú kényszereket vesszük figyelembe az előrejelzés során. A relaxációs függvény alakját úgy érdemes megválasztani, hogy az minimalizálja a peremről történő hullámvisszaverődést. Spektrális modellekben a relaxációs zónán kívül definiálnunk kell egy ún. kiterjesztési (E) zónát is, melyen az előrejelzésnek nem tulajdonítunk meteorológiai jelentést. Ez a tartomány arra szolgál, hogy a mezőinket periodikussá tegyük. A korlátos tartományú, spektrális modellekben alkalmazott zónák elhelyezése a 2.3. ábrán látható. [Horányi et al., 1996], [Radnóti, 2003]



2.3. ábra. A korlátos tartományú, spektrális modellekben alkalmazott zónák. A magyarázatot lásd a szövegben.

### 2.1.2. Horizontális spektrális reprezentáció

Az ALADIN és az AROME spektrális modellek. Bennük a spektrális módszereknek az 1. fejezetben ismertetett tulajdonságai miatt a spektrál technika alkalmazása a differenciál-operátorok kiszámítására és az azokkal végzett lineáris műveletekre korlátozódik, minden egyéb számítást (pl. fizikai parametrizációk, nemlineáris dinamika) továbbra is a rácsponti térben végeznek el. Ez az ún. transzformációs módszer alkalmazásával történik, melynek alapján a modellek végrehajtása alapvetően négy fő lépésből áll:

1. Számítások a spektrális térben. Horizontális irányú parciális deriváltak számítása, valamint a velük végzett lineáris műveletek.
2. Inverz transzformáció a spektrális térből a rácsponti térbe.

3. Nemlineáris tagok kiszámítása a rácsponti térben; parametrizációk.
4. Direkt transzformáció, azaz a rácsponti mező spektrál reprezentációjának előállítás.

A fentiek miatt minden időlépcsőben két (egy direkt és egy inverz) kétdimenziós Fourier-transzformációt kell végrehajtanunk, amelyet a gyors Fourier transzformációs eljárás (FFT) segítségével valósítunk meg. [Kullmann, 2003]

### 2.1.3. Vertikális diszkretizáció

Az ALADIN modell vertikálisan hibrid koordinátákat használ ( $\eta$ ), amely az alsó modellszinteken felszínkövető, míg a felső rétegben a nyomási koordinátába megy át [Simmons and Burridge, 1981]:

$$p(x, y, \eta, t) = A(\eta) + B(\eta)p_s(x, y, t) \quad (2.8)$$

ahol  $p_s(x, y, t)$  a felszíni nyomás, és az együtthatókra a következő feltételek teljesülnek:

$$A(1) = 0, B(1) = 1, B(0) = 0, \partial\eta/\partial p > 0.$$

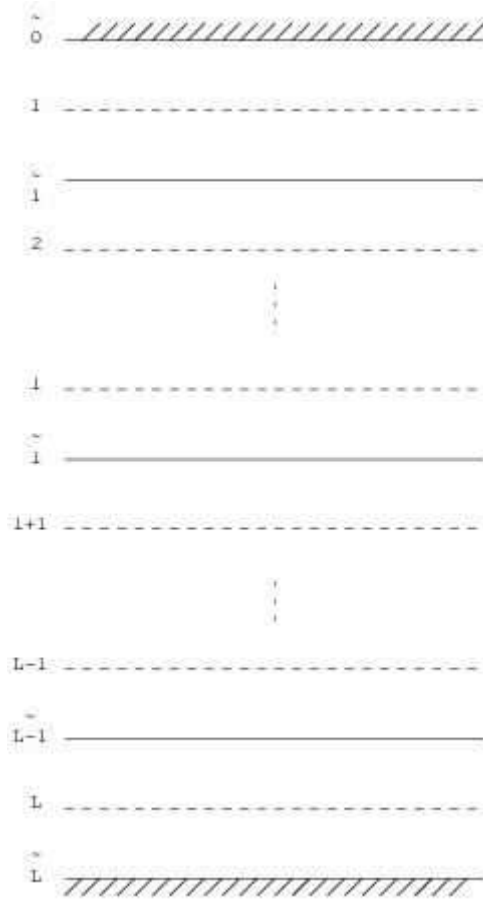
Mivel az ALADIN modell hibrid nyomási koordinátákat használ, ezért elhatározták, hogy nem-hidrosztatikus verzióját - valamint az AROME modellt - a hidrosztatikus nyomási koordinátarendszer felhasználásával fejlesztik ki. Ebben a koordinátarendszerben a függőleges koordinátát a  $\pi$  hidrosztatikus nyomás jelenti [Laprise, 1992], amelyet a következő formában írhatunk fel:

$$\pi(x, y, z, t) = g \int_z^\infty \rho(x, y, z', t) dz' \quad (2.9)$$

Ennek felhasználásával a felszínkövető hidrosztatikus nyomási koordináta-rendszer az alábbi módon definiálható:

$$\pi(x, y, \eta, t) = A(\eta) + B(\eta)\pi_s(x, y, t) \quad (2.10)$$

Az ALADIN (és az ALADIN-NH) modell vertikális szerkezete véges különbséges. A vertikális tartomány felépítését a 2.4. ábra mutatja. A tartomány  $L$  rétegre van osztva, a legfelső réteg az 1, a legalsó az  $L$  indexet viseli. Az általános indexet  $l$ -lel jelölik. A rétegek határolófelületekkel vannak elválasztva egymástól, jelöljük ezeket  $\tilde{l}$ -mal. Ennek megfelelően a legfelső ilyen határfelület  $\tilde{0}$ , a legalsó  $\tilde{L}$ . A 3-dimenziós prognosztikai változók értékei a rétegek középvonalaiban, a vertikális fluxusok és a vertikális sebesség pedig a határolófelületeken vannak definiálva. [Bénard, 2004],



2.4. ábra. Az ALADIN és az ALADIN-NH vertikális felbontása

[Bubnová et al., 1995]

Az AROME modell vertikális diszkretizációja ettől csak a rétegek sorrendjében tér el tét el, ott a legalsó viseli az 1, a legfelső az  $L$  indexet.

#### 2.1.4. Időbeli diszkretizáció

Az általunk használt modellek a szemi-implicit szemi-Lagrange időbeli diszkretizációs sémát alkalmazzák az előrejelzési egyenletek integrálása során.

A szemi-implicit séma a gyorsan terjedő hullámok implicit kezelése által lehetővé teszi nagyobb időlépcső használatát, mint amit egyébként a Courant-Friedrichs-Levy kritérium megengedne. Vezessük le a szemi-implicit sémát az explicit leap-frog séma euleri alakjának felhasználásával:

$$\frac{e^+ - e^-}{2\Delta t} = M(e), \quad (2.11)$$

ahol  $e$  egy adott változó a  $t$  időpontban,  $e^+$  a  $t+dt$ -ben,  $e^-$  a  $t-dt$ -ben.  $M$  a differenciálegyenlet jobb oldalán álló kifejezésre utal. Az  $M$  operátor különböző folyamatokat ír le, úgymint energiamegmaradás, advekción, hullámterjedés stb. Néhány folyamat

lineáris, vagy jól közelíthető egy lineáris  $L$  operátor segítségével. Az  $M$  operátort felbonthatjuk lineáris ( $L$ ) és nemlineáris ( $N$ ) tagok összegére:

$$M(e) = L(e) + N(e), \quad (2.12)$$

A linearizálás segítségével a prognosztikai egyenletek átírhatók úgy, hogy a lineáris tagot implicit, a nemlineáris tagot explicit módon kezeljük:

$$\frac{e^+ - e^-}{2\Delta t} = N(e) + L\left(\frac{e^+ + e^-}{2}\right) = M(e) + L\left(\frac{e^+ + e^- - 2e}{2}\right), \quad (2.13)$$

melynek átrendezésével kapjuk a végeredményt:

$$\underbrace{(I - \Delta t L)}_1 e^+ = \underbrace{e^- + 2\Delta t M(e)}_2 + \Delta t \underbrace{L(e^- - 2e)}_3 \quad (2.14)$$

Látható, hogy az időlépcső növelésének ára az egyenlet bal oldalán álló mátrix inverzének kiszámítása. Az egyenlet bal oldalán álló mátrix-inverzió (1) a szemi-implicit séma implicit része, (2) egyenértékű az explicit leapfrog séma jobb oldalával, a (3) tag pedig a szemi-implicit séma explicit része. A séma stabilizálja a nemlineáris modell lineáris részét, azonban nem garantálja a stabilitást a nemlineáris maradéktagra, mint amilyen például az advekción. [Radnóti, 2003] Ennek kiküszöbölésére dolgozták ki a szemi-Lagrange módszert, mely az individuális folyadékkelemek mozgásának nyomon követésén alapul. Mivel a kezdetben szabályos rácson elhelyezkedő folyadékreszecskek az idő múlásával szabálytalan ponthalmazba rendeződnek, így minden időlépcsőben szükségessé válik egy térbeli interpolációs lépés. Ennek viszont az a következménye, hogy nem pontosan ugyanazon részecskéket követjük nyomon az integrálás során. Innen származik a szemi-Lagrange módszer elnevezése. A séma feltétel nélkül stabil, és így mentesít a CFL kritérium szigorú betartása alól az advekción vonatkozásában is, ezáltal a szemi-implicit és a szemi-Lagrange módszerek kombinálásával különösen hatékony módszert kapunk. [Horányi et al., 1996]

### 2.1.5. Parametrizációk

Mivel a dinamikai prognosztikus egyenletek nem írják le a légkörben lezajló összes folyamatot, szükségünk van parametrizációs sémák használatára. Az ALADIN modell a következő fizikai parametrizációs sémákat tartalmazza [Horányi et al., 2006]:

- sugárzás: Viszonylag gyors és egyszerű séma, az üvegházgázok hatását egy darab egységes integrált hullámhossz tartományon kezelik.
- felszín: Kétrétegű ISBA séma használata. [Noilhan and Planton, 1989] Hó számításba vétele egyrétegű hó-sémán keresztül. [Douville et al., 1995]

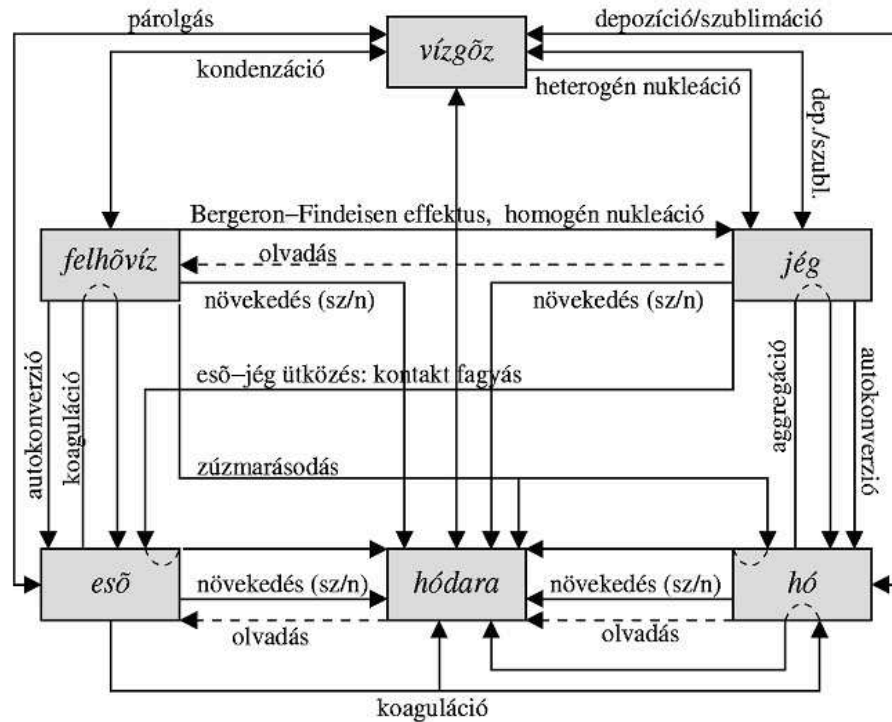
- turbulencia: 1D-s (vertikális) diffúzió számolása, mely keveredési hossz számításokon alapul. [Louis et al., 1982] Ezen belül a sekély konvekciót is kezeli. [Geleyn, 1987]
- konvekció: Bougeault-típusú mély konvekciós séma [Bougeault, 1985] Kuo-féle lezárással. A konvekció szempontjából aktív rácsdoboz 3 részre oszlik: feláramlási, leáramlási és környezet által kitöltött területre. Figyelembe veszi a környezetből a konvektív cellába történő besodródást, illetve az onnan történő kisodródást.
- nagyskálájú csapadék: Telítettségen alapuló diagnosztikai módszer. Nincs prognosztikus folyadékvíz-tartalom. Túltelítettség esetén kondenzáció van, a kondenzálódott víz egy időlépésben elhagyja a légkört, tehát vagy elpárolog, vagy kihullik csapadékként. A csapadékelem hőmérséklete megegyezik környezetének hőmérsékletével. A csapadék halmazállapotának meghatározása egy hőmérsékletfüggő formula segítségével történik. [Kessler, 1969]
- felhőzet parametrizáció: Diagnosztikai módszer, mely figyelembe veszi a planetáris határréteg turbulens nedvességáramát és a hőmérsékleti inverzió erősségét. A felhőzet mennyiségét a réteg specifikus és telítési specifikus nedvessége határozza meg. [Xu and Randall, 1996]
- gravitációs hullám ellenállás: A Boer sémán alapul. [Boer et al., 1984]

A sugárzás parametrizációjára az AROME modell jelenleg az ECMWF féle (Morcrette) sugárzási sémát használja. [Morcrette, 1989]

A felszíni folyamatok parametrizációjakor 4 féle felszín típust vesz figyelembe (tenger, tó, természet, város). A természetes talajon belül 255-féle felszín típust különböztet meg. Természetes talaj felett 3 rétegű (felszínközeli zóna, gyökérszóna és mélytalaj) ISBA sémát alkalmaz, mely hasonló az ALADIN modellhez, de pontosabb (pl. 3 rétegű hó séma). [Noilhan and Planton, 1989] A séma a felszín és a légkör közötti hő-, momentum- és nedvességáramokat számítja ki prognosztikai egyenletek segítségével. Város felett TEB (Town Energy Budget) sémát használ. [Masson, 2000] A modellezett városi felszín tetőkből, házfalakból és útfelszínekből áll.

A turbulencia számításához 1D-s (vertikális) tagot vesz figyelembe. Prognosztikus egyenletet használ a turbulens kinetikus energiára. [Cuxart et al., 2000]

Az AROME az ALADIN modellel ellentétben a mély konvekciót nem parametrizálja, mivel ezen a skálán (2,5 km-es horizontális rácsfelbontás) a csapadékot adó



2.5. ábra. Az AROME által figyelembevett mikrofizikai folyamatok szemléltetése

konvektív folyamatokat a dinamika és a mikrofizika együttesen leírja. Ezzel szemben a sekély konvekcióra egy tömeg-fluxus számoláson alapuló parametrizációs sémát használ.

A felhőfizikai parametrizációk tekintetében fontos különbség a modellek között, hogy míg az ALADIN modell egy egyszerű diagnosztikai sémát alkalmaz mind a felhőzet, mind a csapadék parametrizálására, addig az AROME-ba beépített Méso-NH parametrizációi [Pinty and Jabouille, 1998] sokkal részletesebben írják le a felhőfizikai folyamatokat. Prognosztikus sémát alkalmaz 6 prognosztikai változó bevezetésével (vízgőz, felhővíz, felhőjég, eső, hó, graupel). A prognosztikus egyenleteket ezen változók keverési arányára írja fel. Felteszik, hogy a kondenzált hidrometeorok méreteloszlása egy folytonos eloszlásfüggvénnyel (az általános gamma eloszlásfüggvénnyel) adható meg. Megkülönböztetik a meleg felhőkben, illetve kevert fázisú felhőkben lejátszódó mikrofizikai folyamatokat. A felhőfizikai folyamatok alábbi kategóriáit veszik figyelembe (lásd 2.5. ábra): autokonverzió, párolgás, olvadás, kollektív folyamatok, nukleáció, ülepedés. Ezen kategóriák közül különösen fontos a kollektív, mellyel számos kölcsönhatás - így az eső koagulációja, az aggregáció vagy a zúzmarásodás - leírható. A modell külön kezeli a felhővíz párolgását és a jég szublimációját, melyhez egy implicit „telítéshez hangolás” eljárást alkalmaz. [Langlois, 1973]

A modell jelen állapotában még nem képes a szellőkés számítására, mely a szélsőséges időjárási események előrejelzésének szempontjából fontos lenne, de már

dolgoznak a kifejlesztésén.

### 2.1.6. Az ALADIN és az AROME futtatása a gyakorlatban

Mivel modelljeink korlátos tartományúak, ezért futtatásukhoz szükségesek az ún. klímafájlok, valamint kezdeti- és határfeltételek. A klímafájlokat globális és lokális adatállományokból történő interpolációval állítjuk elő, melynek végeredményeként 12 fájlt kapunk, minden hónapra egyet. Ezek a korlátos tartomány felszíni jellemzőit tartalmazzák: állandókat (pl. domborzat) és éghajlati havi átlaggal rendelkező mennyiségeket (pl. vegetáció, albedó). Elkészítésük olyankor szükséges, amikor a modellfuttatáshoz új tartományra térünk át, vagy növeljük a rácsfelbontást, utána ezt a folyamatot az operatív alkalmazásokban már nem kell újra elvégezni. [Kullmann, 2003]

A kezdeti- és határfeltételeket a 3-dimenziós variációs adatasszimilációnak illetve a dinamikai adaptációnak megfelelő módon állítjuk elő modelleink számára.

Az ALADIN modellel ellentétben az AROME integrálásához az externizált felszíni séma miatt két kezdeti feltételt tartalmazó fájl szükséges. (Az, hogy a felszíni séma externizált, azt jelenti, hogy teljesen elkülönül a légköri modelltől, csupán légköri kényszerek szükségesek a futtatásához.) A magaslégköri mezőket tartalmazó kezdeti fájl az ALADIN-ból interpolált fájl lesz, melyet kiegészítünk a nem-hidrosztatikus dinamika és a mikrofizika számára szükséges mezőkkel, valamint a turbulens kinetikus energia inicializációjával. A felszíni fájl előállítására jelenleg még elég körülményes. A régebbi ciklusoknál csak a Météo France gépén lehetett előállítani, a legújabb, az OMSZ-ban jelenleg működő AROME ciklussal ez már lokálisan is megtehető.

Amint a kezdeti- és peremfeltételek, valamint a klímafájlok rendelkezésre állnak, megtörténik az inicializáció. Ezt követi a modell integrálása, azaz az előrejelzési egyenletek megoldása és a parametrizált mennyiségek kiszámítása. Ezután, hogy az eredményeket értékelhessük, a modell utófeldolgozására és a fájlok megfelelő formátumba konvertálására van szükségünk. Az AROME előrejelzés megjelenítése kicsit bonyolultabb, mint az ALADIN modellel, mivel a futás eredménye különböző formátumú a magaslégköri és a felszíni mezőkre. Ezek, miután ugyanazon formátumba konvertáljuk és egyesítjük őket, a HAWK-ban (az OMSZ-nál használt megjelenítő rendszerben) ábrázolhatók, ezáltal összehasonlíthatók a megfigyelésekkel illetve más modellekkel készített előrejelzésekkel. Ezen lépéseket végrehajtva kapjuk meg a modell előrejelzését, amelyből aztán a szinoptikusok közreműködésével készül el az időjárás-előrejelzés.



## 3. fejezet

### Kísérletek

Szakdolgozatom keretében azt vizsgáljuk, hogy az AROME modell segítségével, mely nem-hidrosztatikus dinamikával és fejlett mikrofizikai parametrizációval rendelkezik, mennyire pontos előrejelzéseket készíthetünk - különös tekintettel a sok csapadékkal járó, szélsőséges időjárási helyzetekre. A modellel szemben az az elvárásunk, hogy a légköri folyamatok jövőbeli alakulását pontosabban, részletesebb térbeli felbontással írja le, mint a jelenleg az OMSZ-ban operatíván működő ALADIN modell.

Fontos megjegyezni, hogy az AROME modell futtatásának számításigénye jelentősen meghaladja az operatív gyakorlatban használt ALADIN modellét. Emiatt csupán egy kis integrálási tartományt tudunk definiálni, amely éppen lefedi Magyarországot, mint ahogy azt a 3.1. ábrán láthatjuk. A tartomány kis méretének hátránya, hogy a határfeltételek erősen befolyásolhatják az előrejelzést.

A modell horizontális rácsfelbontása 2,5 km. Ez nem egy szigorúan lerögzített érték, csupán azért alkalmazzuk ezt, mert e felbontás környékén húzódik az a határ, amelytől célszerű nem-hidrosztatikus modelleket futtatni, hiszen itt a konvekciót már expliciten leírhatjuk; és amely modellek integrálására jelenleg működő számítógépeink mellett lehetőségünk van (sokkal finomabb felbontású modellt annak számításigénye miatt nem tudnánk alkalmazni). Érdeemes lenne megvizsgálni a modell rácsfelbontásának hatását az előrejelzésre, amely a jövőbeni kutatások egyik témaköre lehet.

Kísérleteink során többek között arra kerestük a választ, hogy a határfeltételektől való függést milyen módon befolyásolja *az előrejelzési tartomány mérete, a csatolási frekvencia, a csatolási zóna mérete, az AROME-ot meghajtó modell*, és hogyan függ a modell a *hidrometeorok inicializálásától*.

Esettanulmányok készítése céljából kiválasztottunk néhány időjárási helyzetet, melyekre aztán előrejelzéseket készítettünk az előbb felsorolt paramétereket változ-

tatva. Ezután eredményeinket kiértékelés céljából összevetettük egymással, az operatív modellfuttatásból származó adatokkal és a rendelkezésünkre álló megfigyelésekkel is, szubjektív és objektív verifikációt végezve. Ez azért fontos, mert szeretnénk meghatározni, milyen beállítások illetve további fejlesztések szükségesek ahhoz, hogy a későbbiekben pontos, megbízható rövidtávú időjárás-előrejelzéseket készíthessünk.

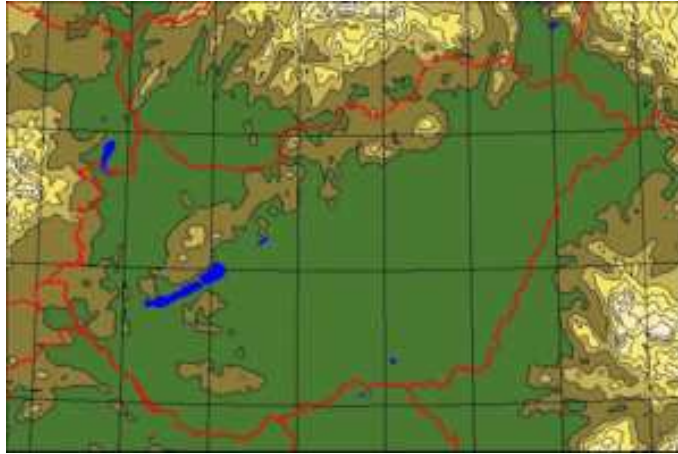
Szubjektív verifikációt végezve bizonyos esetekben nehéz eldönteni, mely beállításokkal volt legsikeresebb a modell előrejelzése. A nehézséget tovább fokozza, hogy a rendelkezésünkre álló objektív verifikációs módszerekkel sem végezhető el teljesen pontosan az összehasonlítás a csapadék tekintetében. Az objektív verifikációs eljárás segítségével összehasonlíthatjuk modellünk eredményeit a megfigyelt értékekkel, úgy, hogy a megfigyelési pontokban megnézzük a köztük lévő eltérést. Mivel azonban a csapadék térben nagyon változékony meteorológiai elem, továbbá modellünk nem tökéletesen pontos a térbeli elhelyezkedés tekintetében, előfordulhat, hogy noha szubjektíven elfogadhatónak látszik az előrejelzés - az objektív verifikáció eredménye igen rossz. Hiszen, ha a megfigyelt és a számított értékek az adott pontokban nem egyeznek egymással, az objektív analízis azt az eredményt adja, hogy modellünk pontossága elfogadhatatlan. Míg, ha szubjektív verifikációt alkalmazunk, azt mondhatjuk, hogy a csapadékos területek kiterjedése, térbeli elhelyezkedése, valamint a lehullott csapadék mennyisége megközelítően helyes, ennél fogva a modell elfogadhatóan alkalmazható az eset előrejelzésére. Ezen okok miatt akkor, amikor objektív verifikációt készítettünk, sok esetben nem a csapadéokra, hanem más mennyiségekre vonatkozóan tettük azt (melyek térben kevésbé változékonyak).

Megemlíteném, hogy bár a modellfuttatások során törekedtünk azonos körülmények kialakítására, ez nem mindig sikerült. Ugyanis többek között alkalmazkodnunk kellett a rendelkezésre álló számítástechnikai kapacitáshoz, amely azzal a következménnyel járt, hogy nem sikerült mindig pontosan ugyanannyi processzoron lefuttatni a modelleket - ez azonban, mint egy összehasonlítás során nyilvánvalóvá vált, nem jelent problémát; a modell nem érzékeny a futtatáshoz használt processzorok számára. Ezenkívül kutatásom közben az AROME modell újabb ciklusa vált elérhetővé, valamint megérkezett az OMSZ újabb szuperszámítógépe is, de mint azt időközben megvizsgáltuk, ezen változások nem befolyásolták eredményeinket.

Az esettanulmányokról készített ábrák a függelékben találhatóak.

### **3.1. Az előrejelzési tartomány mérete**

Kísérleteink kezdetén definiáltunk egy tartományt az AROME integrálás számára, amely megfelelőnek tűnt az integrálás elvégzésére számítástechnikai lehetősé-



3.1. ábra. Az AROME modell integrálási tartománya és domborzata

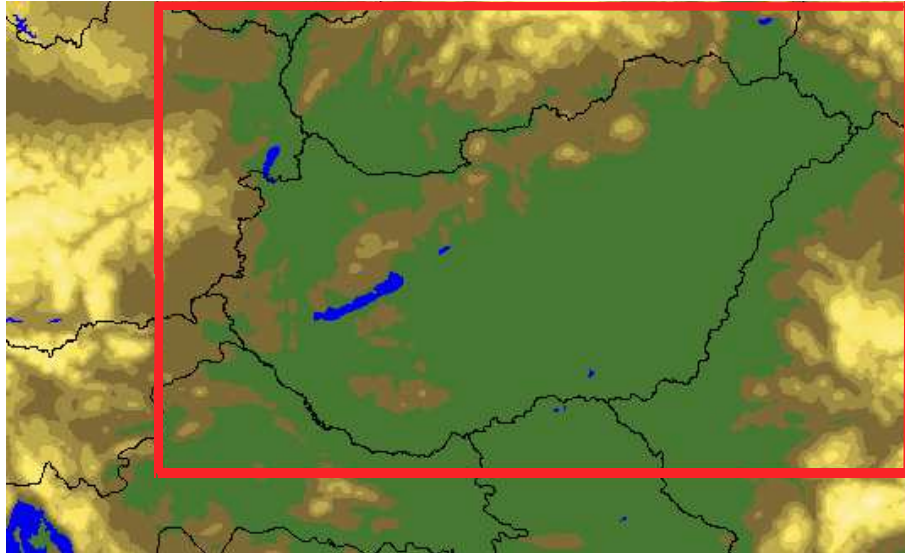
geink ismeretében. A tartomány kelet-nyugati kiterjedése 250, észak-déli kiterjedése 160 rácspont, rácsfelbontása 2,5 km. Mint azt már a kezdetekkor észleltük, mivel a tartomány kiterjedése nem túl nagy ( $625 \times 400$  km), a határfeltételek befolyása az előrejelzésre jelentős. Úgy gondoltuk, jobb eredményeket kapnánk Magyarországra nézve, ha egy olyan rácson dolgozhatnánk, amely az eredetinel valamivel nagyobb, az ország határai nem jelentenék egyben a tartomány határait is.

Mivel a feladat számításigénye jelentős, ezért területét nem növeltük meg minden irányba egyformán, hanem csupán nyugati és déli irányba terjesztettük ki. Ez azon alapult, hogy egy adott esettanulmány során a vizsgált időjárási helyzetet kialakító rendszer ebből az irányból érkezett az ország területére. Az új tartomány kelet-nyugati irányban 300, míg észak-déli irányban 192 rácspontot foglal magába, rácsfelbontása megegyezik az eredetivel (mérete  $750 \times 480$  km). A 3.2. ábrán láthatjuk az eredeti (a pirossal keretezett rész) és az új, megnövelt tartományt, valamint azok domborzatát.

A tartomány ily módon történő megnövelése azzal jár, hogy míg egy 12 órás előrejelzés elkészítése átlagosan 140 perc (16 processzoron) a kis tartományon, addig ugyanennek az előrejelzésnek az időtartama a nagyobb területre esetenként meghaladja a 180 percet is. (Meg kell említenünk, hogy az OMSZ új szuperszámítógépén, az SGI ALTIX-en egy 12 órás előrejelzés elkészítése a kis tartományra már csak átlagosan 80 perc.)

## 3.2. A csatolási frekvencia

Kutatásunk további szakaszában arra az elhatározásra jutottunk, hogy megpróbáljuk az előrejelzéseinket egy kevésbé költséges eljárással javítani, mint amilyen



3.2. ábra. Az AROME modell eredeti és megnövelt integrálási tartománya és domborzata

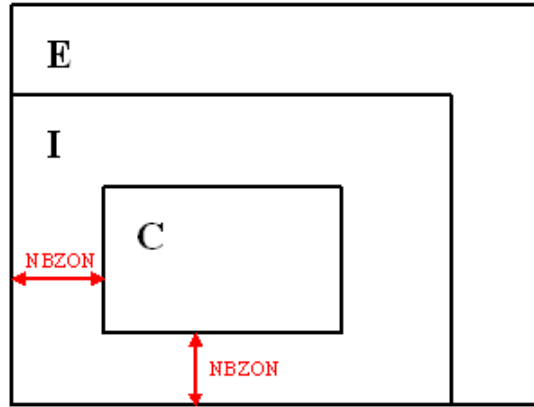
például a csatolási frekvencia változtatása.

Mivel a prognosztikai egyenletrendszert korlátos tartomány fölött akarjuk megoldani, ezért szükségünk van oldalsó határfeltételekre. A peremfeltételek biztosítják, hogy a tartományon kívül lejátszódó folyamatok hatással legyenek a korlátos tartományon belüli jelenségekre. Előfordulhat ugyanis, hogy egy gyors mozgású vagy hirtelen kialakuló folyamat a csatoláskor még a tartománytól távol helyezkedik el, a következő csatolás időpontjában pedig már teljesen a tartományon belül található. Mivel a meghajtó modellből az információkat csak diszkrét időpontokban kapjuk meg, ezek között pedig időbeli interpolációt végzünk, ezért ekkor elkövethetjük azt a hibát, hogy az adott folyamatot egyáltalán nem vesszük figyelembe. Kísérleteink során 1, 3 illetve 6 órás csatolási frekvenciával dolgoztunk.

Mivel a jövőben feltehetően olyan modellt alkalmazunk majd az AROME meghajtására, amelyet lokálisan, az OMSZ-ban futtatunk, így van értelme annak, hogy megvizsgáljuk, melyik csatolási frekvencia lenne a legmegfelelőbb számunkra (míg például az ALADIN modell esetén az igényeinket lehetőségeink erősen korlátozzák, hiszen az ARPEGE modellből csak 3 óránként kapjuk meg az adatokat).

### 3.3. A csatolási zóna mérete

Az AROME modell az oldalsó peremfeltételek kezeléséhez a Davies-féle relaxációs sémát alkalmazza. Kezdetben az a tartomány, amelyen a meghajtó modell és az AROME mezőit simítottuk, 8 rácspont volt. Ez azonban nem tűnt túl meggyőzőnek



3.3. ábra. A korlátos tartományú, spektrális modellekben alkalmazott zónák (NBZON jelölésével). A magyarázatot lásd a szövegben.

számunkra, hiszen az ALADIN ugyanezt az értéket használta, noha az ALADIN-ban ez 64 km-nek, az AROME-ban pedig 20 km-nek felel meg. A csatolási zóna kiterjedésének meghatározásánál a modell domborzatát is figyelembe kell vennünk. Sík terület fölött nem okoz akkora problémát, ha kis távolságon fésüljük össze a mezőket, azonban az Alpokalja éppen az általunk definiált tartomány nyugati határán helyezkedik el. Kétségek merültek fel bennünk arra vonatkozóan, valóban az előre definiált érték lenne a legmegfelelőbb számunkra?

Úgy gondoltuk, célszerű lenne a mi lokális viszonyainkra megvizsgálni, milyen hatást érhetünk el más méretű relaxációs tartomány alkalmazásával.

A szakirodalomban nem találtunk arra történő utalást, hogyan számíthatnánk ki az optimális értéket, ezért kísérleti úton próbáltuk meghatározni: azt vizsgáltuk, hogy hogyan változik az előrejelzés különböző csatolási zóna méretek esetén. Természetesen figyelembe kell venni, hogy a csatolási tartomány méretét nem választhatjuk bármekkorára. Az integrálási tartomány kis kiterjedése miatt, ha nagy értéket választunk, akkor a határfeltételek hatása az előrejelzésre méginkább megnő, ezt pedig szeretnénk elkerülni. Ha viszont túl kicsinek választjuk a csatolási zónát, akkor még kisebb területen simítjuk össze a mezőket, ami a tartomány határán még nagyobb gradiensek megjelenését okozhatja.

A csatolási zóna méretére a későbbiekben az egyszerűség kedvéért NBZON néven fogok hivatkozni - ez a változó adja meg ugyanis a modellben azt, hány rácspont áll rendelkezésünkre a relaxációhoz (lásd 3.3. ábra). A későbbiekben azon kísérletek eredményeit mutatom be, amikor ezt az értéket 4, 8, 16 illetve 20-ra változtattuk.

### 3.4. A meghajtó modellek szerepe

Ahhoz, hogy megfelelő minőségű előrejelzést készíthessünk, nemcsak egy jó modellre van szükségünk, hanem arra is, hogy ennek a modellnek minél pontosabb kezdeti- és peremfeltételeket adhassunk. Jelen dolgozatban nem kívánok a modellben alkalmazható különböző adatasszimilációs eljárásokkal foglalkozni - bár érdemes lenne elvégezni az ezzel kapcsolatos kutatásokat is -, hanem a meghajtó modellek szerepével egy kisskálájú modellel végzett előrejelzés készítésénél.

Korlátos tartományú modellünk számára szükségünk van egy meghajtó modellre. Elméletileg ez lehet egy globális, vagy egy olyan korlátos tartományú modell, amely magában foglalja az integrálási tartományt. A gyakorlatban azonban mindig másik korlátos tartományú modellt használtunk, mivel az AROME csatolása az ARPEGE globális modellhez egy lépésben nem „szerencsés” (túl nagy az ugrás a modellek felbontása között). Kísérleteim során a határfeltételeket általában az operatív ALADIN futtatásból vettük, amelynek rácsfelbontása 8 km. Végeztünk azonban olyan kísérletet is, amelynél a meghajtó modell egy 8 km-es felbontású, hidrosztatikus AROME modell volt. Ezt azon esettanulmányoknál alkalmaztuk, amikor az ALADIN előrejelzés nem volt igazán sikeres, ezáltal határfeltételként nem túl jó minőségű adatok álltak rendelkezésünkre. Az AROME előrejelzésének javulását vártuk attól, hogy a meghajtó modellt változtatva javítani próbáltunk a határfeltételeken.

### 3.5. A hidrometeorok inicializációja

Mivel az általunk futtatott modellekben a felhőfizikai parametrizációk különböznek egymástól, csatoláskor a hidrometeorok inicializációjából származhat néhány problémánk. Nevezetesen, az ALADIN modellben az egyetlen prognosztikai változó a vízgőz, míg az AROME 6 prognosztikus hidrometeor változót tartalmaz. Az ALADIN kimenete ezekről a változókról nem ad információt. Ez azzal jár, hogy az AROME modellben a kezdeti kondenzált vízfázis nulla, valamint csatoláskor a hidrometeorok értéke nulla.

Többek között arra kerestük a választ, hogy mikor vétünk kisebb hibát a modell integrálásakor: ha a hidrometeorokat csatoljuk, azaz minden egyes csatolási időpontban értéküket a tartomány határán nullára állítjuk (hiszen a vízgőz kivételével nincsenek benne a meghajtó modell, az ALADIN kimenetében, így inicializációjukkor 0-t adunk értékül nekik), vagy ha nem csatoljuk őket, és így hagyjuk, hogy a prognosztikai egyenletek számítása során a lejátszódó mikrofizikai folyamatok alakítsák ki értéküket. Azt is meg szeretnénk tudni, mennyi idő szükséges ahhoz, hogy

a kezdeti nulla értékekből kialakulhasson egy, a valóságnak megfelelő hidrometeor-mező. Kísérleteztünk továbbá azzal is, mi történik, ha csupán a vízgőzt csatoljuk, a többi hidrometeorot nem.

Itt tehát a kezdeti- és határfeltételek hidrometeorok szempontjából megfelelő módon történő előállításával, valamint a meghajtó modellekkel kapcsolatban végeztünk kísérleteket.

## 3.6. Esettanulmányok

Ebben a fejezetben az esettanulmányok céljára kiválasztott időjárási helyzeteket, valamint az ezekkel kapcsolatban lefuttatott előrejelzéseket, azok összehasonlítását szeretném bemutatni.

### 3.6.1. 2006. augusztus 20.

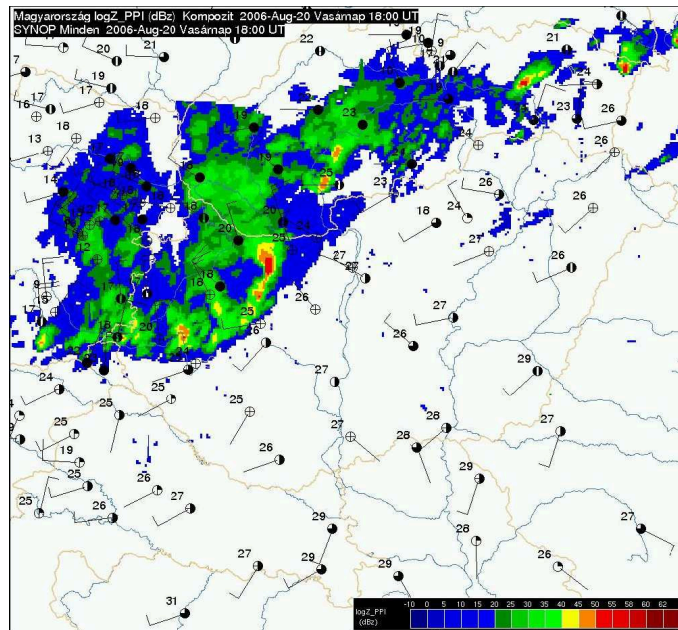
Európa időjárását már több napja egy nagy kiterjedésű fejlett ciklon határozta meg, amelynek északnyugati és délkeleti területei között jelentős hőmérsékletkülönbség alakult ki. A ciklon hideg és meleg szektorát éles hidegfront választotta el, amely augusztus 20-án 18 UTC-re már elérte a Dunántúlt, szélfordulást, viharos szelet és hőmérsékletcsökkenést okozva. A Dunántúlra betörő hidegfront erős konvergenciát okozott. Az itt található levegő ugyancsak labilis állapotú volt, illetve a magassággal történő szélnyírás különösen kedvező feltételeket biztosított a heves zivatarok kialakulásához. A front mentén osztrák területen kialakuló és gyorsan növekvő zivatarok már 16 UTC-kor beléptek az országba, és gyorsan haladtak nyugatról keleti irányba. A front mögött jelentős lehűlés következett be, amely részben a csapadék hűtő hatásának, részben pedig magának a hidegbeáramlásnak volt köszönhető. Az ország északnyugati és délkeleti területei között a hőmérsékletkülönbség meghaladta a 10 °C-ot (3.4. ábra). [Horváth, 2006b]

A hidegfront mentén néhány rendkívül erős zivatargóc is kialakult, melyek közül kettő emelkedett ki: az északi cella Budapest, a déli a Balaton felé közeledett. A Szombathelytől kissé északra belépő zivatargócban vélhetően már 17 UTC-kor szupercella is kialakulhatott, amely hol felerősödve, hol kissé gyengébb reflektivitással követhető volt a radarképeken, illetve a 18:00 UTC-s mérés alapján látható volt, hogy érinti Budapestet. A zivatargóc északi cellája 19:00 UTC-kor érte el a fővárost. A másik, déli rendszer a Balaton keleti részét érintve legyengült. [Horváth, 2006b]

A Budapesten áthaladó vihar még több órán keresztül fennmaradt, a hidegfronttal együtt haladt tovább keleti irányba. A mért legerősebb szellőkések alapján arra következtethetünk, hogy a rendszer Budapesten, illetve attól kissé délkeletre érte el

legfejlettebb állapotát. [Horváth, 2006b]

A hidegfront betörését a numerikus modellek már jóval előre jelezték, a 30 órás előrejelzések a front pontos helyét is megadták.



3.4. ábra. A szinoptikus állomásokon mért hőmérséklet és szél, illetve a radar reflektivitási értékek 2006. augusztus 20-án 18 UTC-kor

Erre az esetre a 0 UTC-s analízisből lefuttattuk az AROME modellt az alapértelmezett beállításokkal, valamint az operatív ALADIN előrejelzésen kívül elkészítettük annak 2,5 km-es rácsfelbontású változatát is. Ezzel az volt a célunk, hogy megvizsgáljuk, mi lehet az ALADIN és az AROME között jól látható különbségek fő oka. Mennyit tesz hozzá az AROME eredményeihez az, hogy nem-hidrosztatikus dinamikát és részletesebb mikrofizikai parametrizációkat alkalmaz, és mennyit a rácsfelbontás javulása? Hiszen, ha csak azért lenne jobb az ALADIN-nál, mert sűrűbb rácsot használ, akkor a számításgényesebb modell használata megkérdőjeleződne. Mint azonban azt a következő ábrákon látni fogjuk, a modell nem-hidrosztatikussága és a mikrofizikai parametrizációk részletesebb volta sokat segít az előrejelzés pontosabbá tételében.

Az A.1. ábrán az ALADIN 8 illetve 2,5 km-es rácsfelbontással készült, valamint az AROME előrejelzését láthatjuk, összevetve őket a 19 UTC-re vonatkozó radarképpel. Elmondhatjuk, hogy ebben az időszakban az operatív ALADIN igen jól előrejelzte a csapadékot, de az AROME modell eredménye még ennél is jobb lett. A 2,5 km-en futtatott ALADIN ugyanazt a dinamikát és fizikát használta, mint a 8 km-es verzió, amely nem bizonyult jó választásnak, mivel ezen a skálán már nem lehet elhanyagolni a nem-hidrosztatikus hatásokat (azonban a modellt nem-



hidrosztatikus beállításokkal sajnos nem sikerült lefuttatnunk). A 19 UTC-s képen észrevehető az AROME részletesebb felbontásának és mikrofizikájának hatása, mely az ALADIN-nál jobb eredményt adott. Igaz ugyan, hogy a Balatont érintő cellát érdekes, hullámzó csapadéksávként jelzi előre, melynek alakja láttán akár számítási hibára is gyanakodhatnánk, de azt a zivatargócot, mely a fővárost érintette, előre jelezte, míg az ALADIN szerint az Budapesttől északra haladt el.

Tekintsük az A.2. ábrát, mely az előrejelzések és a radarkép összehasonlítását tartalmazza Budapest térségére 2006. augusztus 20-án 19 UTC-re. Az ekkor Budapesten áthaladó vihar jól kivehető a radarképen. A modellek rácsfelbontása megegyezik, ezért itt is egyértelműen látszik, hogy a nem-hidrosztatikus dinamika használata és a jól megválasztott parametrizációk által mennyivel sikeresebben előrejelezhetőek a szélsőséges időjárási jelenségek az AROME modellel. Ez ugyanis a főváros területére előre jelezte a csapadékot, bár a legnagyobb intenzitású területet a valóságoshoz képest néhány kilométerrel északabbra adta. Azonban ez már nagyon jó eredménynek számít, mivel tudjuk, hogy modellünk sosem lehet tökéletesen pontos, hiszen annak megalkotása során több folyamatot elhanyagoltunk, egyszerűsítettünk.

Ezután, abban bízva, hogy ezáltal további javulást érhetünk el, előrejelzést készítettünk egy későbbi, 12 UTC-s analízist felhasználva, és megvizsgáltuk azon paraméterek előrejelzését, amelyek fontosak lehetnek az adott időjárási esemény pontos leírásában.

Megvizsgálva az esetet azt tapasztaltuk, hogy ebben az időpontban a csapadék konvektív folyamatokból hullott (ez alól kivételt csak egy kis terület képez, az országhatártól északra). Mivel az AROME modell a konvekciót már expliciten leírja, így valószínűleg ez lehet az oka annak, hogy - az egyébként sikeres - ALADIN előrejelzésen képes javítani.

Az A.3. ábrán két, a légkör hidrosztatikai instabilitását jellemző paraméter, az SSI index illetve a K index előrejelzéseit vizsgáltuk meg. Ezek definíciója a következő:  $SSI = T_{500} - T_{p_{500}}$ , ahol  $T_{p_{500}}$  azon részecske hőmérséklete, amelyet 850 hPa-tól a kondenzációs szintig száraz adiabatikusan, majd onnan 500 hPa-ig nedves adiabatikusan emelünk. A K-index:  $K = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$ . Zivatar valószínűsíthető akkor, ha az SSI index értéke kisebb  $0\text{ °C}$ -nál illetve a K index értéke meghaladja a  $29\text{ °C}$ -ot. Mint ahogy az a képekről leolvasható, mindkét modell nagy labilitást jelzett előre, a zivatarok kialakulásának jelentős esélyével.

Az erős zivatarok kialakulásában a labilitás mellett jelentős szerepet játszik a vertikális szélnyírás is, azaz a szélnek a magassággal történő, irány és sebesség szerinti megváltozása. A vizsgált helyzet esetén ez a tényező is igen fontos szerepet játszott, mivel míg a felszín közelében meglehetősen gyenge volt az áramlás sebessége, addig

a magasban igen határozott, erős délnyugati áramlás volt jellemző, sőt a 300 hPa-os szinten épp felettünk húzódott a jet. A valóságban tehát igen erős irány és sebesség szerinti szélnyírás alakult ki, ami a fennálló labilitási viszonyok mellett kedvezett az orkánerejű szelet okozó szupercellák kialakulásának is. Az általunk vizsgált modellek az időjárási helyzet ezen jellemzőjét is igen jól előrejelezték.

Mivel az időszak folyamán egy markáns hidegfront haladt át az ország területén, érdekes lehet megvizsgálni, képesek voltak-e a modellek előrejelezni a gyors hőmérséklet-csökkenést. Az A.4. ábrán az ALADIN és az AROME 2 m-re ill. 850 hPa-ra vonatkozó hőmérséklet-előrejelzését láthatjuk 19 UTC-re, a front átvonulása utánra. Az eredmények között jelentős különbséget nem figyelhetünk meg, azok a valóságot egyaránt jól közelítik. Az eltérések elsősorban a rácsfelbontások különbözőségéből adódnak. Az ország keleti területein 1-2 °C-os felülbecslést vehetünk észre, amely abból adódik, hogy a modellek szerint a hidegfront lassabban mozgott, mint azt ténylegesen megfigyelték. A 850 hPa-os szinten kialakult erős (közel 10 °C-os), északnyugat-délkelet irányú hőmérsékleti gradiens jól tükrözi a hidegfront erősségét.

Végezetül, az A.5. ábrán láthatjuk a 0 és 12 UTC-s analízisből futtatott ALADIN és AROME modellek által előrejelzett 1 órás csapadékösszegeket. Mivel a 12 UTC-s analízis pontosabb, így azt határfeltételként felhasználva jobb előrejelzéseket kaptunk mindkét modell esetén: nagyobb csapadékösszegek alakultak ki a zivataros területeken, a modellek az előbb említett, a Balaton keleti részét érintő zivatargócot már pontosabban, a valóságnak megfelelően írják le. Ez azért is fontos, mert az AROME modellt elsősorban rövidtávú előrejelzések készítésére szeretnénk felhasználni, ebben az esetben pedig láthatjuk, hogy amikor megfelelő minőségű kezdeti- és peremfeltételek állnak rendelkezésre, akkor a modell az időjárási folyamatok pontos leírására képes rövidtávon.

Láthatjuk tehát, hogy a rácsfelbontás finomodása elősegíti a modellek pontosságának növekedését. Önmagában azonban ez nem elég, hiszen egy adott határt átlépve már figyelembe kell vennünk a légkör nem-hidrosztatikusságát is. Ha mindezek mellett még a mikrofizikai parametrizációkat is megfelelően választjuk meg, olyan eszközt kapunk, mellyel a lokális skálájú meteorológiai folyamatok hatékonyan előrejelezhetők.

### **3.6.2. 2005. augusztus 21-23.**

2005. augusztus 21, 22 és 23-án özönvízszerű csapadék hullott Magyarországra, melynek túlnyomó része konvektív folyamatokból, záporokból illetve zivatarokból származott. Ennek megfelelően a csapadék tér- és időbeli eloszlása rendkívül szeszélyes volt. Míg például Keszthelyen néhány óra alatt 100 mm-t meghaladó mennyiségű

eső hullott, addig tőle 40 km-re keletre csak néhány mm esett. A zivatarok egyik percről a másikra alakultak ki, szalagokba illetve vonalakba rendeződtek, a belőlük egy-egy területen lehullott csapadék mennyisége 30-80 mm között változott. A vizsgált periódus szinoptikus meteorológiai háttérében egy mediterrán ciklon állt. [Horváth, 2005]

Augusztus 21-én a Dunántúlon már megjelentek az első heves, nagy csapadékot adó zivatarok, amelyeket 22-én további heves zivatarok követtek. A ciklon harmadik napján, augusztus 23-án a magassági légörvény teljes egészében Magyarország fölé helyeződött, amely főként az ország középső majd déli részén okozott heves zivatarokat, hirtelen kialakuló helyi árvizeket (Budapest majd Szeged környékén). A nap végére az alacsony szinteken megindult hidegadvékción erősen csökkentette a zivatarhajlamot az egész országban és később már csak szórványosan alakultak ki zivatarok. A ciklon átvonulása során lehullott csapadék mennyisége az ország legnagyobb részén igen jelentős volt. [Horváth, 2005]

Erre az időszakra az előrejelzések széleskörű vizsgálatát végeztük el. Vizsgáltuk a tartomány méretének, a csatolási frekvenciának, NBZON-nak, a hidrometeorok csatolásának hatását. A következőkben ezen kísérleteket szeretném szemléltetni. A dolgozat terjedelme nem teszi lehetővé, hogy az összes futtatási eredményünket részletesen bemutassam, ezért a továbbiakban csak a jellemzőnek, érdekesnek tartott eredményeket vázoló, kiragadva az előrejelzésből egy-egy időpontot.

A B.1. ábra az előrejelzési tartomány méretének hatását szemlélteti, összevetve a modelleket a radarképpel és a szinoptikus mérésekkel. A képen a 2005. augusztus 22-én 0 UTC-re vonatkozó 6 órás csapadékösszegeket láthatjuk. A tartomány méretének növelése ebben az esetben azzal járt, hogy a csapadékos területek nagysága és a lehullott csapadék mennyisége is jelentősen megnőtt. A nagy tartományon lefuttatott modell megfelelően jelezte előre a Dunántúlon és a Budapest térségében kialakult zivatarokat, bár a mennyiségét több helyen felülbecsülte. Mivel a ciklon konvergenciavonalai délnyugat felől érkeztek hazánk területe fölé, így az a tény, hogy a tartományt ebben az irányban megnöveltük, az előrejelzés javulásával járt.

A B.2. ábra az ALADIN modellt illetve a különböző csatolási frekvenciával készített AROME előrejelzéseket mutatja 2005. augusztus 22-én 0 UTC-kor. A képek egy 12 órás előrejelzést mutatnak, ezért annak hatása, hogy milyen sűrűn adunk meg határfeltételeket a modellünk számára, már elég erőteljesen megmutatkozik. Megfigyelhetjük, hogy míg az ALADIN modell teljesen „elkeni” a csapadékmezőt (az ország területének kb. kétharmadára 5 mm alatti csapadékot ad, holott tudjuk, hogy a csapadék ebben az időszakban zivatarokból származott, melyek lokálisan nagy mennyiségű csapadékkal jártak), addig az AROME finomabb felbontásának

köszönhetően jóval részletesebb képet kapunk. Több helyen is megfigyelhetők az eltérések a különbözőképpen futtatott modellek között, mint amilyenek az ábrán pirossal bekarikázott területek. Vegyük például a Dunántúl déli részét, melyen az ALADIN és az 1 órás csatolással készült AROME esetén megjelent csapadék, a másik két futtatás (3 ill. 6 órás csatolási frekvenciával futtatott AROME) azonban ezt nem tudta megfogni. Ez valószínűleg annak köszönhető, hogy a magasabb légrétegek nedvességi mezejében az 1 órás csatolással készített AROME modell esetén 22 UTC-kor egy nagy nedvességtartalmú góc jelent meg a tartomány déli peremén, mely északi irányba mozgott. 0 UTC-kor a góc már nem látható, a légkörből kihullva ez okozhatta a csapadékot a modell számításai szerint. Mivel ez a nedvesebb góc 22 UTC-kor lépte át az előrejelzési tartomány határát, ezért sem a 3, sem a 6 órás csatolással készített modell nem vette figyelembe hatását (hiszen az az előző csatolás időpontjában - 18 illetve 21 UTC-kor - a tartománytól távol helyezkedett el, vagy még ki sem alakult), itt tehát az időbeli interpoláció hibát okozott. Az ALADIN modellben a csapadék ezen a területen amiatt alakulhatott ki, hogy nagyobb az előrejelzési tartománya, ezáltal a csatoláskor (21 UTC-kor) a nedvesség már a tartomány belsejében volt. Az ábrán látható még egy tartomány, amelyen a modellek előrejelzései nagymértékben eltérnek egymástól, ez pedig a Balatontól nyugatra lévő terület, mely a tartomány határához viszonylag közel helyezkedik el. Itt mindegyik modell megadja a csapadék kialakulásának valószínűségét, azonban egymástól eléggé eltérő értékekkel - ez szintén a peremfeltételek előrejelzést befolyásoló hatása miatt alakulhatott így. Mindegyik AROME modell felülbecsli a mennyiséget, ha a SYNOP adatokhoz viszonyítjuk őket. Ennek ellenére ezek az eredmények a valóságot jól közelíthetik, mivel ebben az időszakban a konvektív folyamatokból, zivatarokból hulló csapadék volt jellemző, amely nem feltétlenül a felszíni mérőállomáson esett. Ezt támasztja alá a B.1. ábra bal felső részén látható radarkép is. Elmondható, hogy az AROME valóban felülbecsli a csapadékot, de nem olyan nagy mértékben, mint ahogy akkor gondolnánk, ha csak a SYNOP adatokat vennénk figyelembe. Ezen kísérlet alapján azt mondhatjuk, célszerűbb minél sűrűbb csatolással futtatni a modellt, hiszen amennyiben megfelelőek a peremfeltételek, így jobban figyelembe tudjuk venni a gyorsan mozgó, a tartomány belsejébe érkező folyamatokat, és nem vétünk hibát az időbeli interpolációval.

A B.3. ábra a csatolási zóna méretének megválasztásával foglalkozik kis tartomány esetén. Az ábrán feltüntettem néhány, szinoptikus megfigyelésekből származó csapadékösszeget is, mely segítséget nyújt az előrejelzések elemzésénél. Ebben a kísérletben a már említett NBZON értékre 4, 8 (ez volt az alapértelmezett érték), 16, illetve 20-at adtunk meg a modellnek, vagyis a csatolási zóna méretét 20 km-ről 10,

40 illetve 50 km-re változtattuk. Mint azt elméleti megfontolásokból vártuk, ez a kísérlet a legészrevehetőbb változással a tartomány szélén járt. Azonban azáltal, hogy a relaxációs zóna méretét megváltoztattuk, lehetséges, hogy a modell az egyik futtatáskor kiszűrt bizonyos hamis hullámokat, más NBZON értékre pedig már nem. Az ebből fakadó változások miatt a tartomány közepére kiszámolt értékek nem egyeznek meg teljesen pontosan egymással, mint ahogy azt a Balaton-felvidék körül is megfigyelhetjük. Az előrejelzések jellege nagyon hasonló, szubjektív verifikációval a teljes előrejelzési időtartamra nem lehet megállapítani, melyik a legmegfelelőbb. A B.3. ábrán látható időpontra vonatkozóan a 20-as NBZON értékkel készült előrejelzés mondható a legsikeresebbnek (mint azt később az objektív verifikáció segítségével a hőmérsékletre és a szélre is látni fogjuk), mivel a négy modellben a csapadékos területek kiterjedése szinte teljesen megegyezik, és ebben a modellben alakult ki a legnagyobb csapadékmennyiség a Balaton-felvidék térségére (bár az még így is a megfigyelések alatt marad).

Megvizsgáltuk a csatolási zóna méretének függvényében a modellek 2 m-es hőmérsékletre vonatkozó előrejelzését is, ezt mutatja a B.4. ábra. Itt - az 1 órás csapadékösszegekre vonatkozó előrejelzéssel szemben - nem a tartomány szélén, hanem annak belsejében a legnagyobb az eltérés a különbözőképpen készített modellek között. Ebben az időpontban az ország területén nem voltak jelentős hőmérsékletkülönbségek (a legalacsonyabb mért hőmérséklet 14, a legmagasabb 19 °C volt), ezt a modellek jól visszaadják. Az előrejelzések minősége között nincs nagy eltérés, erre az időpontra a modellek átlagos négyzetes hibájának területi átlagai közti különbség 0,1 °C alatti. Az objektív verifikáció alapján a legsikeresebb előrejelzés (0 UTC-re) a 8-as NBZON-nal készített.

Erre az időszakra az objektív verifikációt a 2 m-es hőmérsékletre és a 10 m-en mért szélesebbesre vonatkozóan végeztük el, ennek eredményét a B.5. és a B.6. ábrán láthatjuk. Az ábrákról az adott változók területi átlagára vonatkozó átlagos négyzetes hiba olvasható le az előrejelzési idő függvényében. Ezen képek igazolták, hogy ebben az esetben nem dönthetjük el egyértelműen, melyik NBZON-nal készült előrejelzés a legmegfelelőbb. A 2 m-es hőmérséklet esetén például az első 6 órában a 20-as értékkel készültnek a legkisebb a hibája, míg 7 órás előrejelzési idő után a 8-as NBZON-nal futtatott modellé. A 10 m-en mért szélesebbes esetén még ennél is változékonyabb, bonyolultabb a helyzet.

Más időjárási helyzet tanulmányozása során azonban kaptunk olyan eredményeket, amelyek azt jelzik, hogy NBZON értékének megváltoztatása pozitívan befolyásolhatja az előrejelzést, ezt láthatjuk a B.7. ábrán. Itt a 2007. április 13-22. közötti időszakra lefuttatott előrejelzések objektív verifikációjának eredményét láthatjuk.

Ezt az időszakot dolgozatomban külön nem elemeztem, most csak azt szeretném érzékeltetni, hogy hosszabb időszakot tekintve találtunk olyan esetet, amikor egyértelmű összefüggést kaptunk az előrejelzés minősége és a csatolási zóna mérete között (mégpedig úgy, hogy növelnünk kell a zóna méretét, mert így az alapértelmezett értékkel készítettnél jobb eredményt kapunk).

Elmondhatjuk tehát, hogy a modell különböző beállításai a határfeltételektől való függés következtében jelentősen befolyásolhatják az eredményeket. Néhány paraméter - mint például a tartomány mérete - esetén egyértelmű a kapcsolat, más változók tekintetében - mint amilyen a csatolási zóna mérete - további vizsgálatok szükségesek.

### **3.6.3. 2006. június 29.**

2006. június 29-én nyugat-északnyugat felől hatalmas vihar söpört végig az országon. A délelőtti órákban a Dunántúlon, majd délutántól az ország többi részén is orkán erejű szél, felhőszakadás, sokféle pusztító jégeső kísérte a zivatarvonal átvonulását. Alig hagyta el az országot a vihar, délnyugatról újabb hatalmas zivatarfelhők keletkeztek és az esti órákban egy második zivatarrendszer tört rá a Dunántúlra. A zivatarsorozatnak azonban még ezzel sem volt vége: másnap hajnalban újabb rendszer alakult ki és bár az előző kettőnél jóval gyengébb volt, így is sokféle kísérték felhőszakadások és viharos szelek az átvonulását. [Horváth, 2006a]

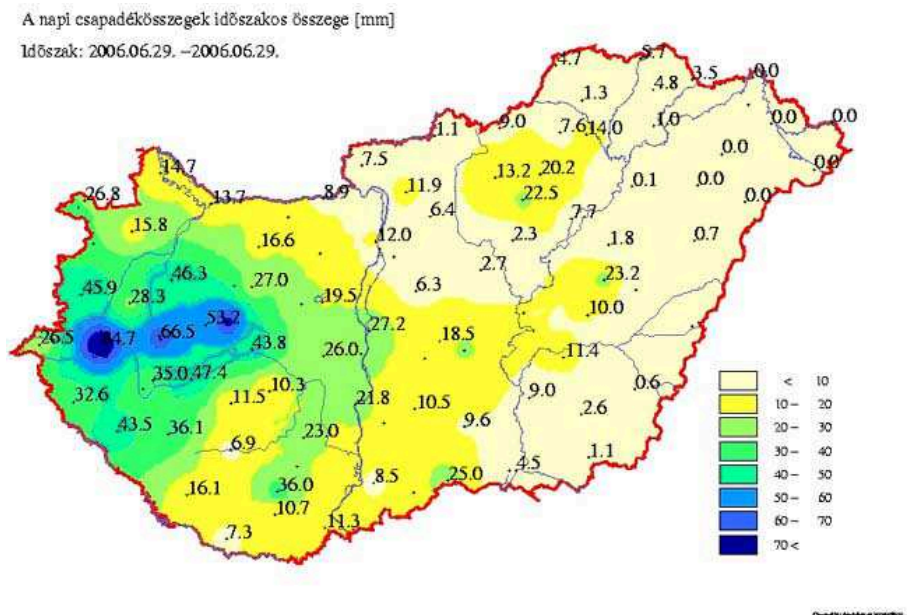
2006. június 29-én a kora reggeli órákban a radarméréseken már megjelentek az északnyugatról jövő zivatarlánc cellái. A zivatarrendszer előző nap alakult ki a közeledő hidegfront mentén és az időjárási térképek alapján úgy tűnt, hogy maga a front közeledik az országhatárhoz. A zivatarok azonban jóval gyorsabban mozogtak mint a front, így rövidesen láthatóvá vált, hogy egy erős instabilitási vonalról van szó. A rendszer 06 UTC-kor érte el a nyugati országhatárt. Az első hullám a Balatontól északra vonult el és kissé legyengült, azonban a második hullám annál jobban felerősödve csapott le a Balatonra. A Balaton keleti medencéjében különösen erős cellák jöttek létre. A rendszer a Kiskunságon is nagyon erős volt, majd a Tisza vonalát átlépve kezdett gyengülni. [Horváth, 2006a]

A délnyugati zivatarlánc késő délutánra már megközelítette az országhatárt és nagy sebességgel vonult délnyugatról északkeleti irányba. A Balatontól keletre a zivatarcellák reflektivitása valamelyest csökkent, azonban így is többfelé okoztak jelentős mennyiségű csapadékot. Az északkeleti országgrészhez közeledve még egyszer éles vonalas szerkezet alakult ki, majd valamivel gyengébb intenzitással elhagyta az országot. [Horváth, 2006a]

A rendkívül aktív zivataros periódus lezárásaként a lassan mozgó hidegfront is

elérte az országot. A front mentén az előzőknél jóval gyengébb, de még így is jelentős csapadékot adó zivatarok alakultak ki, amelyek mögött végül stabilizálódott a levegő. A 2006. június 29-i zivatarok mérlege a helyenként hatalmas mennyiségű csapadék (3.5. ábra) és a velük járó lokális árvizek, az országsszerte pusztító orkánerejű szél és egy-egy körzetet letaroló jégeső. [Horváth, 2006a]

Színoptikai szempontból érdemes megfigyelni, hogy a zivatarok valamilyen módon a közelben levő hidegfronthoz kötődtek, legtöbbször a mentén alakultak ki. Azonban a zivatarláncok, zivatargócok mozgását a nagytérségű folyamatok nem befolyásolták jelentősebben. A numerikus modellek nehezen tudták kezelni az ilyen, alapvetően lokális skálájú folyamatokat, így az erre az időpontra vonatkozó ALADIN előrejelzés sem volt sikeres. Azért választottuk ezt az időpontot esettanulmányként, mert szerettük volna megtudni, az AROME képes lett volna-e ezen folyamatok előrejelzésére. Ebben az esetben is megvizsgáltuk a már említett paraméterek hatását



3.5. ábra. 2006. június 30. 06 UTC-ig lehullott 24 órás csapadékösszeg

az előrejelzésre, de abból kifolyólag, hogy a határfeltételeink az ALADIN-ból származtak - mely nem tudta kezelni ezeket a folyamatokat -, az AROME modell sem volt képes pontos előrejelzésre (bár az eredmények az ALADIN-hoz képest valamivel jobbak lettek, a hőmérsékletmező tekintetében például egyértelmű javulást tapasztaltunk). Ezért itt a határfeltételek - különösen a hidrometeorológiai - minél pontosabb előállítására helyeztük a hangsúlyt, ezzel kapcsolatban folytattunk kísérleteket.

Mint azt a C.1. ábrán láthatjuk (annak bal alsó részén), az ALADIN 3D-VAR-hoz csatolt modell egyáltalán nem tudta előrejelezni a zivatarokat. Ez nem meglepő,

erre az időpontra ugyanis az ALADIN nem tudta előrejelezni ezen lokális skálájú folyamatokat (lásd a C.2. ábrán), amin az ebből készített határfeltételekkel futtatott AROME sem tudott javítani. Ezért megpróbáltunk más határfeltételeket használni, így erre az időszakra elkészítettük az AROME modell 8 km-es rácsfelbontású, hidrosztatikus dinamikával lefuttatott előrejelzését. Ebben az operatív ALADIN modellhez képest az eltérést a parametrizációk különbözősége jelenti, az integráláshoz használt felbontás és a dinamika megegyezik.

Ha megvizsgáljuk a 8 km-es felbontással futtatott ALADIN-t és AROME-ot, megfigyelhetjük, hogy mennyire eltérnek egymástól (például a C.3. ábrán ezt a hőmérsékleti mezőkön láthatjuk). Az előrejelzések közül egyértelműen az AROME a jobb, ezt a szinoptikus adatok figyelembevételével könnyű belátnunk. Nagy különbségeket vehetünk észre a valóság és az előrejelzések között, ha a 2 m-es hőmérsékletmezőt tekintjük. Ennek értékét néhány állomásra vonatkozóan a 3.1. táblázatban tüntettük fel. Az ALADIN modell az ország egész területén felülbecsülte a hőmérsékletet, ez a nyugati országrészben akár a 8-10 °C-ot is elérhette. Az AROME modell előrejelzése sokkal sikeresebb, a hőmérsékleti mező a valóságot megközelítően helyesen írja le. Helyenként ugyan előfordul felülbecslés, de az a 3 °C-ot sehol sem haladja meg. A 850 hPa-os szint hőmérsékletében is jól láthatóak a különbségek a két modell között, elsősorban a Dunától nyugatra fekvő területek esetén. A relatív nedvesség mezői is nagy eltérést mutatnak (C.4. ábra) mind a 850, mind a 700 hPa-os szint esetén. Mivel a légkörben lezajló folyamatok egymással összefüggnek, a jelenség magyarázata a csapadék-előrejelzések különbözősége lehet. Az ALADIN modellel szemben az AROME képes volt a zivatarok előrejelzésére, ezáltal azokon a területeken, ahol az AROME csapadékot prognosztizált, a csapadék hűtő hatása befolyásolta a hőmérsékleti mező számítását, mely így pontosabb lett.

	SYNOP	ALADIN	AROME
Nagykanizsa	17,6 °C	25,6 °C	18,8 °C
Pápa	17,1 °C	26 °C	19,9 °C
Szentgotthárd/Farkasfa	15,4 °C	23,9 °C	18,6 °C

3.1. táblázat. Hőmérséklet-értékek összehasonlítása néhány állomás esetén

A két modell rácsfelbontása és dinamikája megegyezik, ezért ezen eltérésekért egyértelműen a fizikai parametrizációs csomagok különbözősége felelős. Azt tapasztaltuk tehát, hogy az AROME-ba beépített parametrizációk által az ALADIN-nál pontosabb előrejelzést készíthetünk.

Annak ismeretében, hogy a határfeltételként felhasznált modellek mezői mennyire különböznek egymástól, nem meglepő, hogy az ALADIN-ból és az AROME8-ból



futtatott 2,5 km felbontású AROME előrejelzések ilyen nagy mértékben eltérnek egymástól (C.1. ábra). További javulást érhetünk el az előrejelzésben, ha növeljük a 2,5 km felbontású AROME modell tartományának méretét (C.5. ábra).

Ugyan a meghajtó modell cseréje sokat javított az előrejelzésen, de az még így sem lett tökéletes. A következő két ábrán a hidrometeorok meghatározásának különböző lehetőségeit mutatom be. Itt mindegyik előrejelzés 2,5 km-es AROME futásból származik, ugyanarra az időpontra vonatkozik (a C.6. ábra 2006. június 29-én 18 UTC-re, a C.7. ábra pedig 2006. június 30-án 0 UTC-re), a meghajtó modell a 8 km-es felbontáson futtatott AROME. Az eltérés közöttük ezen 8 km-es AROME kezdeti feltételeiben (ott is a hidrometeorok inicializációjában) van. Az ábrák bal felső részén egy 0 UTC-ből kiinduló futást látunk, az összes többi előrejelzés 12 UTC-ből kiinduló futás eredményét mutatja. A bal felső képen a 8 km-es AROME futtatás kezdeti mezői az ARPEGE modell 0 UTC-s analíziséből, a bal alsó képen annak 12 UTC-s analíziséből származnak (így a hidrometeorok értéke a specifikus nedvesség kivételével 0). A jobb felső sarokban lévő előrejelzésben a meghajtó modell kezdeti mezőiben az összes hidrometeor az AROME8 0 UTC-kor indított, 12 órás előrejelzésének eredménye. A jobb alsó részen lévő előrejelzésben az AROME8-ban a kezdeti mezőket a következőképpen állítottuk elő: a specifikus nedvességet az ARPEGE 12 UTC-s analíziséből, a többi hidrometeorot pedig az AROME8 (0 UTC-kor indított) 12 órás előrejelzéséből vettük.

A C.6. ábra alapján azt figyeltük meg, hogy az előrejelzések közül az lett a legrosszabb, amelyben a kezdeti hidrometeorokat az ARPEGE analízis szolgáltatta (itt ugyanis a specifikus nedvesség kivételével a hidrometeorok értéke nulla volt), és ez nem jelezte előre a záporokat, zivatarokat. Ez a bal alsó ábrára igaz, ahol a 6 órás időtartam még nem volt elegendő ahhoz, hogy kialakulhassanak a modellben a megfelelő nedvességi karakterisztikák. A bal felső részt vizsgálva - mely egy 18 órás előrejelzés eredményét mutatja be - láthatjuk, hogy itt már kialakult csapadék, térben azonban sokkal jobban kiterjedt, mint az a valóságban történt. A másik két futtatás közül, ha figyelembe vesszük az erre az időszakra vonatkozó szinoptikus megfigyeléseket, a jobb felső tűnik jobbnak (amikor az összes hidrometeor értéke egy előző előrejelzés eredményéből származott). A 6 órával későbbi helyzetet vizsgálva valamelyest változik a kép: a jobb felső részen látható modell, bár néhány záport, zivatart jól jelzett előre (ld. az ország északkeleti, illetve déli részén látható bekarikázott területeken), az ország nyugati területein lévő nagy csapadékot nem tudta megfogni. Ez a csapadék megjelenik azonban az ábra alsó részén látható modellek futtatásának eredményében, melyekben a specifikus nedvesség az ARPEGE analízisből származott. Azonban, a jobb alsó sarokban lévő modell ezen kívül egy korábbi

előrejelzés eredményéből származó, a valósághoz közelebb álló hidrometeor-mezőt kapott kiindulási értéként, mely az előrejelzés javulását vonta maga után, ebben az időszakban ugyanis a légkörben előfordult a többi hidrometeor is (jelentős arányban), nemcsak a vízgőz.

A C.6. és C.7. ábrákat együttesen vizsgálva elmondhatjuk, hogy jobb előrejelzést kaptunk akkor, amikor a hidrometeor-mezőket úgy állítottuk elő, hogy értékül nem nullát adtunk nekik, hanem egy előző időpontból induló előrejelzésből származtattuk őket. Ugyan ezzel elméletileg inkonzisztenciát okozhatunk, azonban ha belegondolunk, nem vétünk nagyobb hibát így, mint ha azt mondjuk, hogy kezdetben minden hidrometeor értéke legyen nulla (vagyis amit akkor teszünk, amikor az AROME-hoz meghajtó modellként az ARPEGE-t vagy az ALADIN-t használjuk, melyben csak a specifikus nedvesség értéke szerepel). Ez azért fontos, mert ugyan egy idő után a mikrofizikai folyamatok kialakítják a modellben a hidrometeor-mezőt, de mi a modellt rövidtávú előrejelzésre szeretnénk felhasználni, ha pedig kezdeti értéknek nullát adunk meg, akkor épp az előrejelzési időtartam elején még nem lesz jó az előrejelzésünk. Kísérleteink során láttuk, hogy minél kisebb az integrálási tartomány, annál kevésbé tud érvényesülni a modell saját fizikája, annál jobban befolyásolják a végeredményt a határfeltételek, melyek egy idő után teljesen átveszik az irányítást. Ezért a modell hosszú időre történő futtatása nem célszerű, számunkra elsősorban az a fontos, hogy megfelelő rövidtávú előrejelzéseket készíthessünk.

Másrészről, úgy tűnik, mind közül az az előrejelzés a legsikeresebb, amelynek ezek mellett a specifikus nedvességet nem előrejelzésből, hanem valamilyen analízisből adtuk meg. (A csapadék túlbecslése nem feltétlen abból származik, hogy rossz a nedvesség mező. Itt inkább arról van szó, hogy egy analízis közelebb áll a valósághoz, mint az előrejelzés, ezért is lenne fontos az adatasszimiláció az AROME-ban.)

Az előrejelzéseket összevetve tehát azt tapasztaltuk, hogy az időszak egészét nézve az lett a legsikeresebb, melynek kezdeti feltételként a specifikus nedvességet az ARPEGE analíziséből, a többi hidrometeor pedig egy előző előrejelzésből határoztuk meg, ezt az ábrák jobb alsó felén találjuk. Ez az eredmény elméleti megfontolások alapján igazolható, azonban állításunkat célszerű lenne nem egy esettanulmányra alapozni, hanem hosszabb időszak vizsgálatával alátámasztani, mely a jövőbeni tervek között szerepel.

## 4. fejezet

# Összefoglalás

Mint azt esettanulmányaink vizsgálata során láthattuk, érdemes az AROME modellel foglalkozni (fejleszteni, operatíván alkalmazni) a mezoskálájú jelenségek előrejelzése céljából, mivel mind a felbontás javulása, mind a modell nem-hidrosztatikus-sága és részletes parametrizációi hozzájárulnak a részletesebb és pontosabb előrejelzések készítéséhez. Modellünk azonban az integrálási tartomány kis mérete miatt érzékenyen reagál a peremfeltételekre, emiatt szükséges megvizsgálni, mely beállítással végezzük el legoptimálisabban az előrejelzést.

A kísérletek során arra a következtetésre jutottunk, hogy célszerű lenne a modell integrálási tartományát megnövelni, mivel ez az esetek többségében az előrejelzés minőségének javulását vonta maga után, de ezt a bővítést a feladat jelentős számításgépi igénye miatt mérlegelni kell.

A csatolási frekvencia tekintetében a következőket állapítottuk meg: néhány esetben a csatolási frekvencia csökkentésével (3 ill. 6 órára) javulást értünk el, ez azonban valószínűleg a meghajtó modell hibája miatt alakult így. (Amikor a peremfeltételek egy nem túl sikeres ALADIN futásból származtak, akkor a sűrűbb csatolással csak rontottunk az AROME előrejelzésen.) Amennyiben azonban feltételezzük, hogy megfelelőek a kezdeti- és peremfeltételeink, úgy célszerű a modellt minél sűrűbben csatolni, hogy a tartományon kívülről érkező folyamatokat minél pontosabban vehessük figyelembe. Következtetésképp tehát levonhatjuk, hogy célszerű az AROME modell minél sűrűbb - például 1 órás - csatolással történő futtatása, ezzel egyidőben pedig a határfeltételek minél pontosabb megadására is ügyelni kell.

Arra a kérdésre, hogy érdemes-e a csatolási zóna méretének megváltoztatása, kísérleteink során nem kaptunk egyértelmű választ. Ugyan minden esetben láttuk, hogy NBZON értékének változása befolyásolja az eredményt, azonban azt nem mindig sikerült eldönteni, hogy mely értékre lesz jobb az eredmény. Egyes esetekben azt kaptuk eredményül, hogy a megnövelt értékkel futtatott előrejelzés jobb lett, máskor

pedig azt, hogy nem változtatott - sőt, esetleg rontott - az eredményen. Elképzelhető az is, hogy azért nem jutottunk egyértelmű eredményre az esettanulmányok elvégzése során, mert például a Davies-féle relaxációs séma, amely a kvázi-hidrosztatikus numerikus modellekben széleskörűen alkalmazott, a mezoskálájú NH modellek esetén már nem képes kiszűrni a hamis hullámokat. Így érdemes lenne elgondolkodni azon, hogy használhatnánk-e esetleg más sémát az oldalsó peremfeltételek kezelésére az AROME modellben.

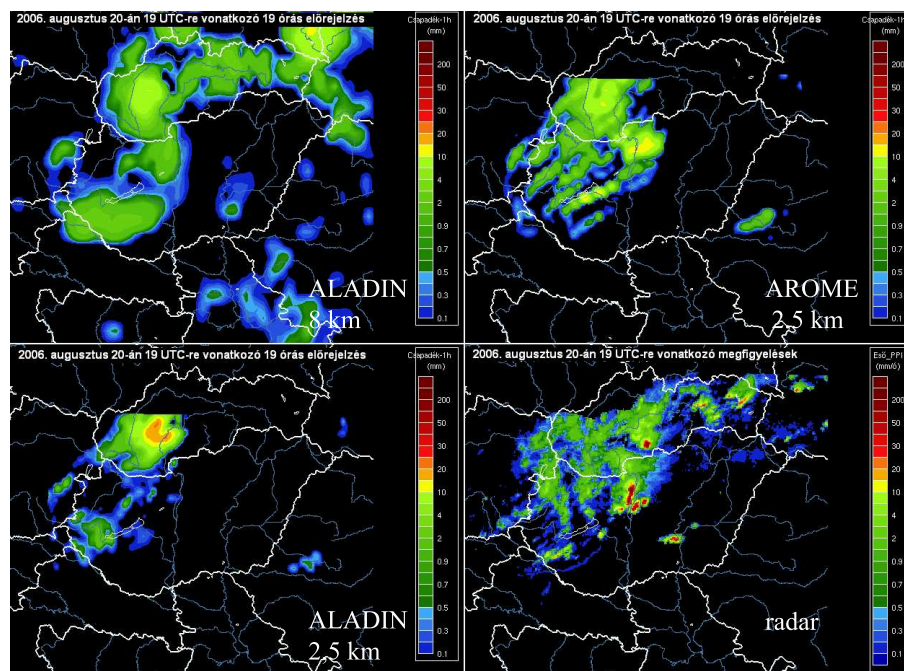
A hidrometeorok kezelése az AROME modellben - amikor az ALADIN a meghajtó modell - nem a legszerencsésebb. A meghajtó modell megfelelő megválasztása, illetve a határfeltételek csatolása során a hidrometeorok pontosabb figyelembevétele az előrejelzés javulásával járna együtt. Azt állapítottuk meg, hogy az előrejelzés szempontjából szerencsésebb, ha olyan hidrometeor-mezőt adunk a modellnek kezdeti feltételként, ami a valóságoshoz a lehető legközelebb áll. Ezt vizsgálataink szerint úgy tudjuk megtenni, hogy a specifikus nedvességet egy objektív analízisből, a többi hidrometeor pedig korábbi modell előrejelzés eredményéből vesszük, mivel így lesz a modell a legjobban használható a rövidtávú előrejelzésben. Ehhez azonban a meghajtó modell cseréjére lenne szükség, hiszen az ALADIN modell kimenete nem tartalmazza az AROME által igényelt hidrometeorokat.

A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a modell hajlamos a csapadék felülbecslésre. Ez valószínűleg azért alakult így, mivel a mikrofizikai sémában valamelyik tag túl erős. (Azt, hogy a hibát a nem-hidrosztatikus dinamika okozná, elvetettük, ugyanis a 8 km-es felbontású AROME modellt hidrosztatikus dinamikával futtattuk le, és a csapadék felülbecslését ott is tapasztaltuk.) Ahhoz, hogy megállapíthassuk, pontosan mi okozza a problémát, a modell mikrofizikai sémáinak beható tanulmányozására lenne szükség.

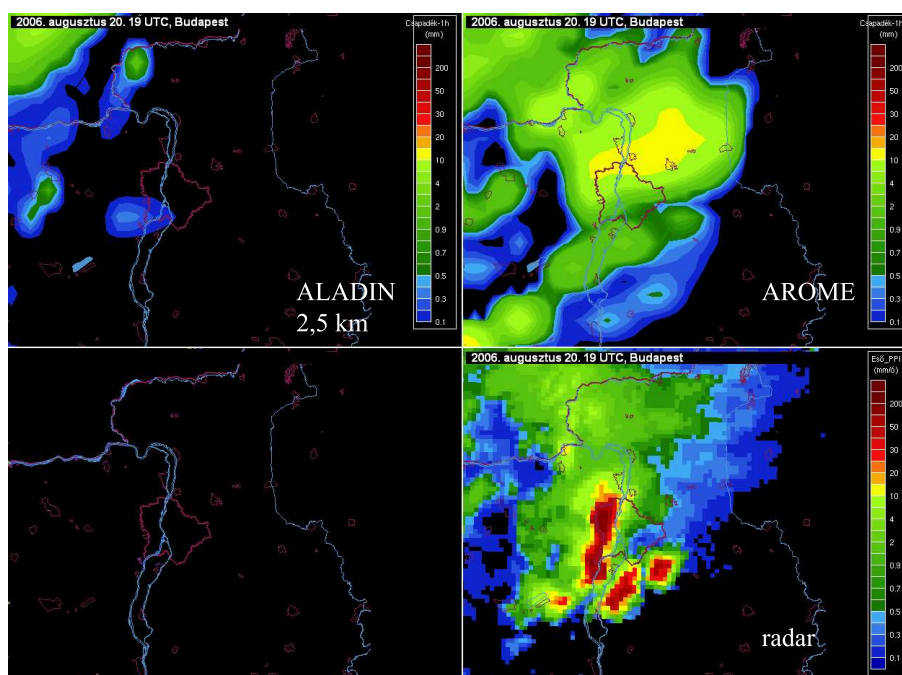
Eddig a modellt többnyire esettanulmányokon keresztül vizsgáltuk, a továbbiakban azonban célszerű lenne az AROME futtatása egy hosszabb időszakra, hogy még pontosabb következtetéseket vonhassunk le alkalmazásával kapcsolatban.

# A. Függelék

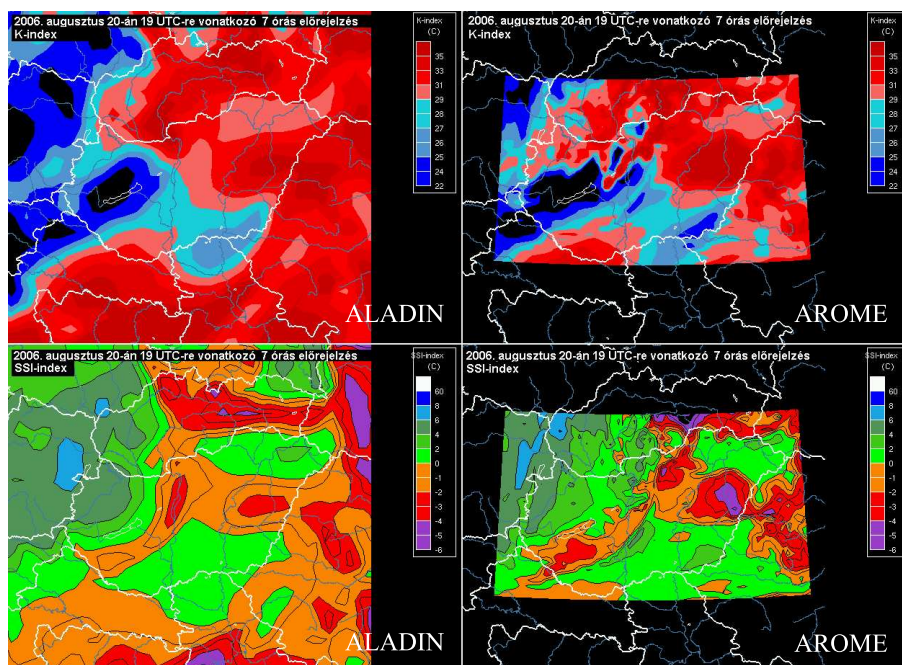
2006. augusztus 20.



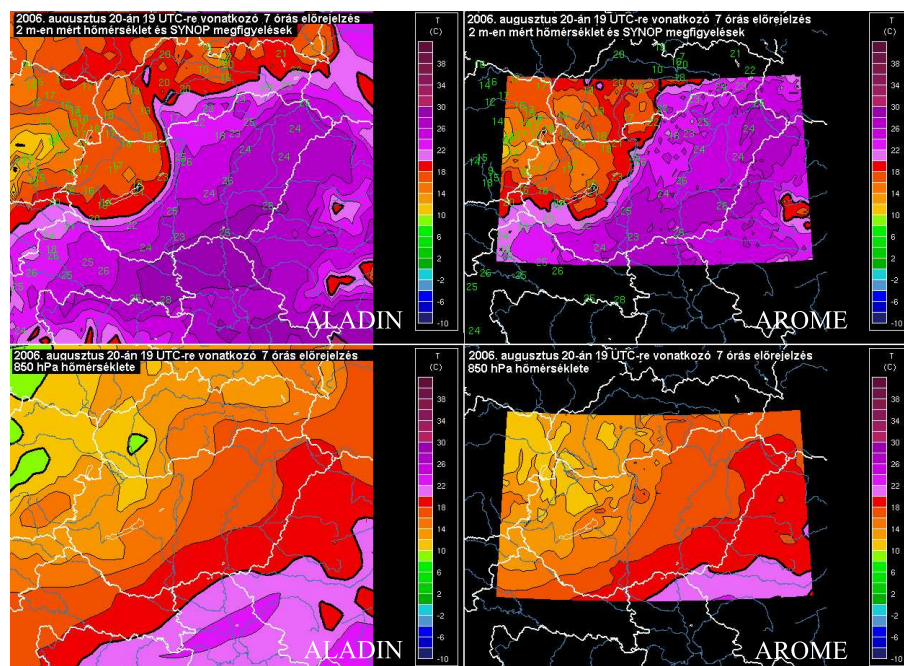
A.1. ábra. Modellek előrejelzésének összehasonlítása (1 órás csapadék, 2006. aug. 20. 19 UTC)



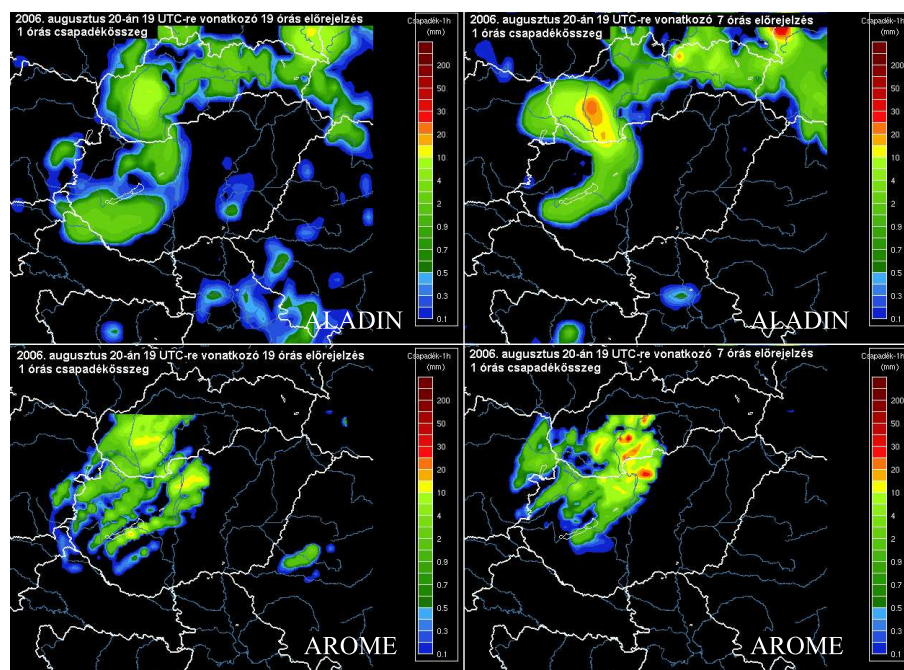
A.2. ábra. Modellek előrejelzésének összehasonlítása Budapest térségében (1 órás csapadék, 2006. aug. 20. 19 UTC)



A.3. ábra. Az SSI- és a K-index értéke az ALADIN ill. az AROME modell előrejelzésében (2006. aug. 20. 19 UTC)



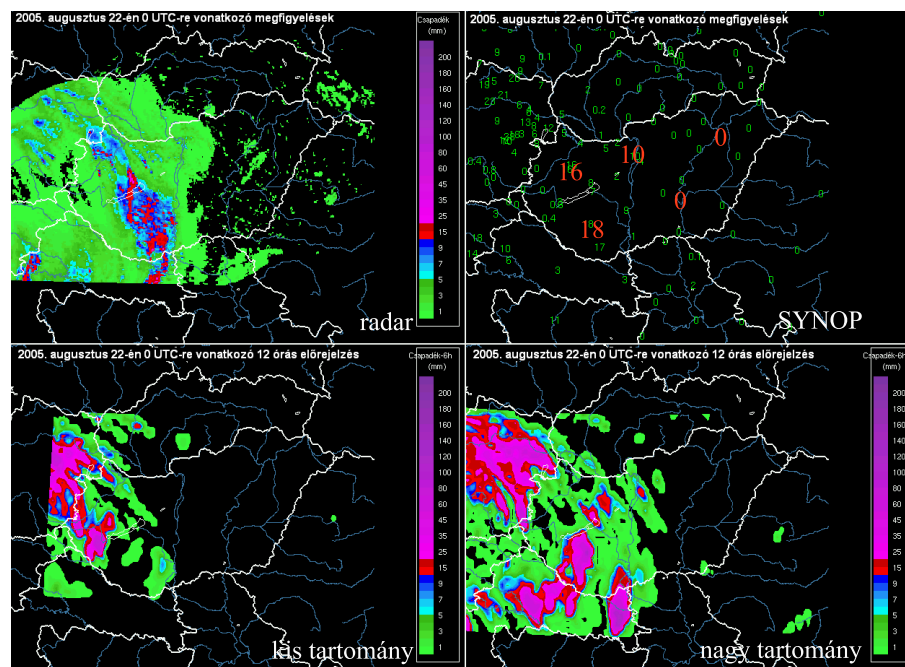
A.4. ábra. A modellek által előrejelzett hőmérsékleti mezők (2 m-es hőmérséklet, 850 hPa hőmérséklete, 2006. aug. 20. 19 UTC)



A.5. ábra. A 0 és 12 UTC-s analízisből készült ALADIN és AROME előrejelzések összehasonlítása (1 óras csapadék, 2006. aug. 20. 19 UTC)

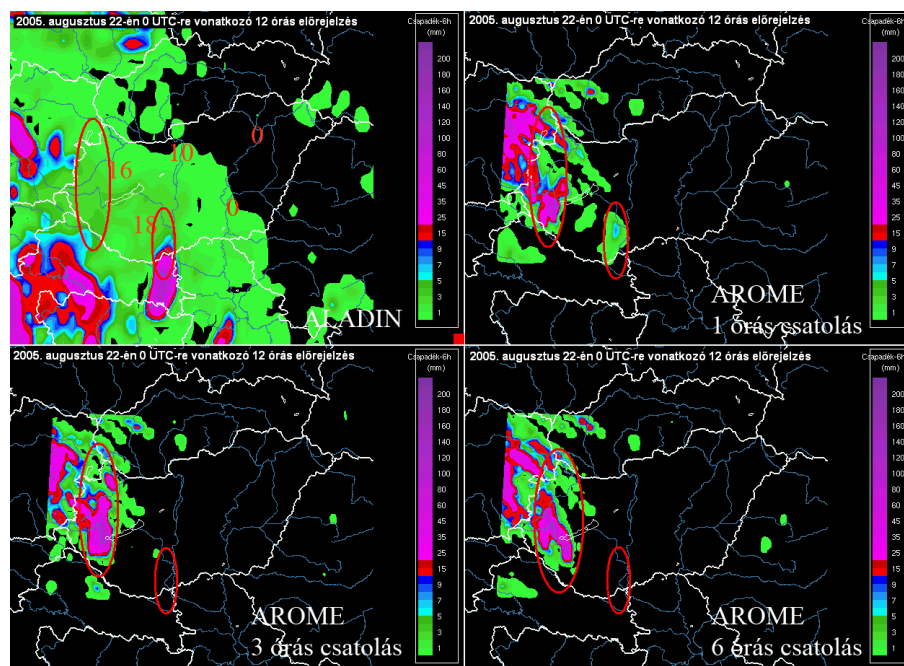
## B. Függelék

2005. augusztus 21-23.

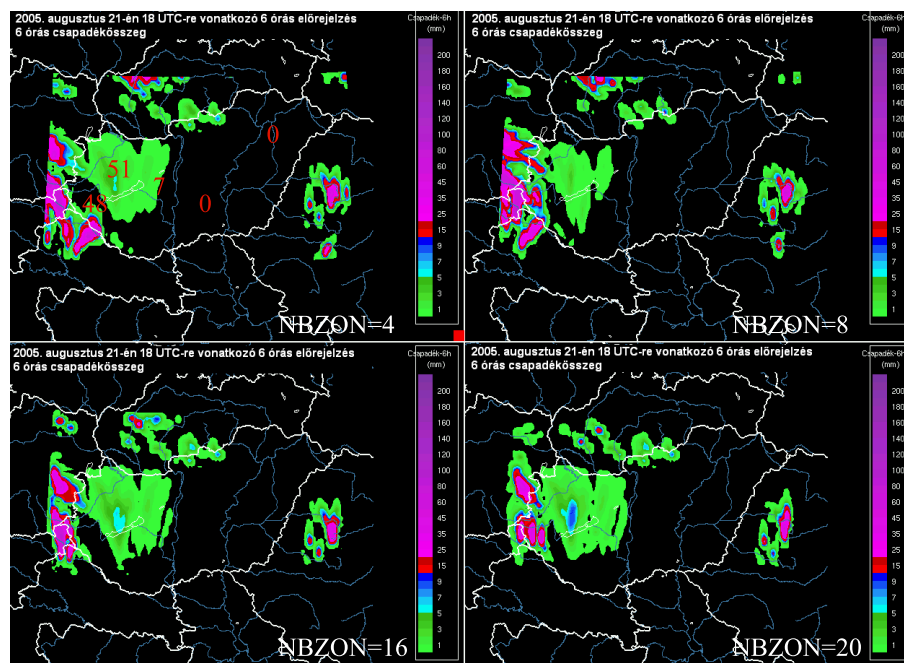


B.1. ábra. Az integrálási tartomány méretének hatása az előrejelzésre (6 órás csapadékösszeg, 2005. aug. 22. 0 UTC)

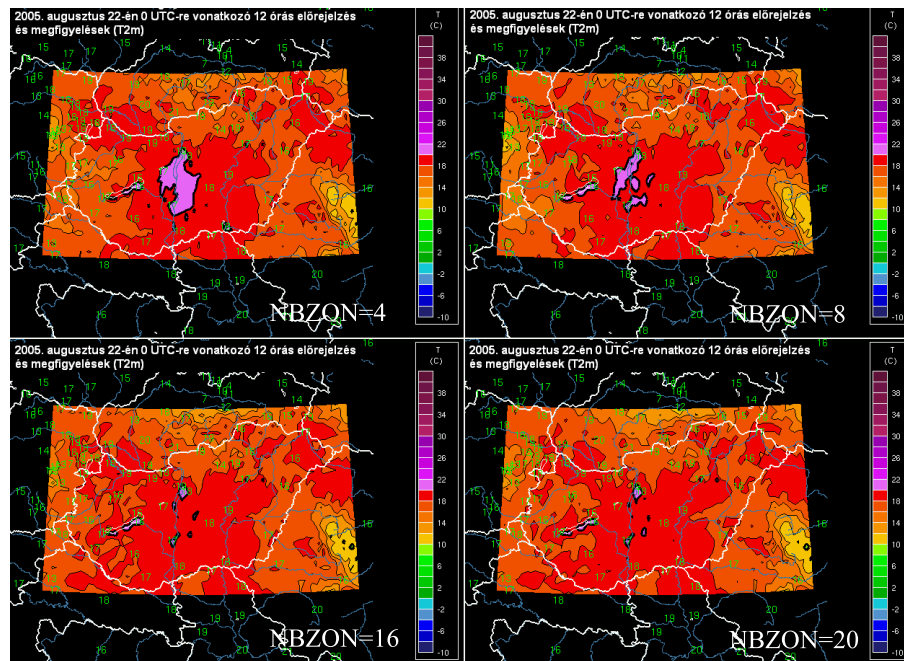




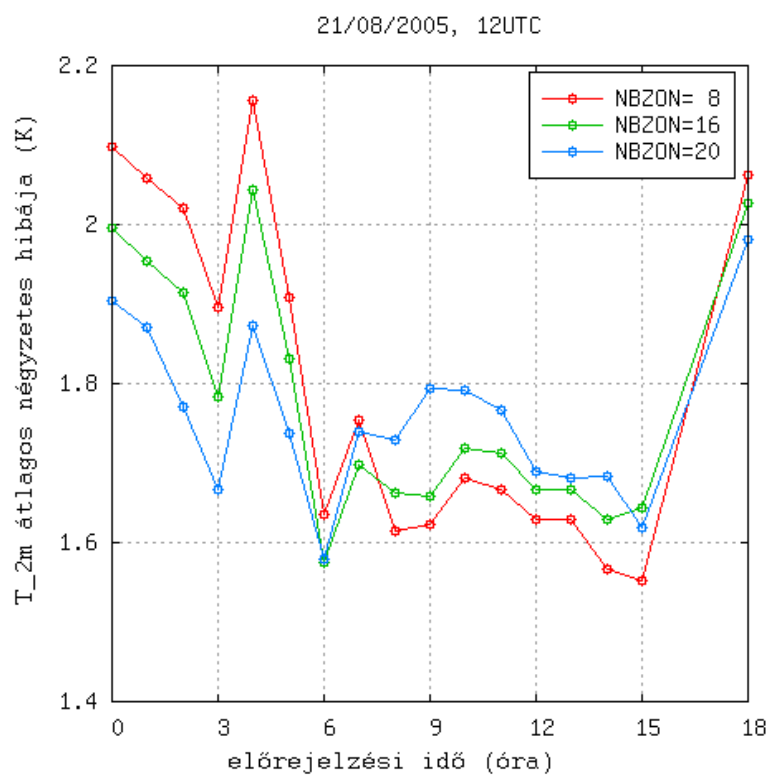
B.2. ábra. A csatolási frekvencia hatása az előrejelzésre (6 órás csapadékösszeg, 2005. aug. 22. 0 UTC)



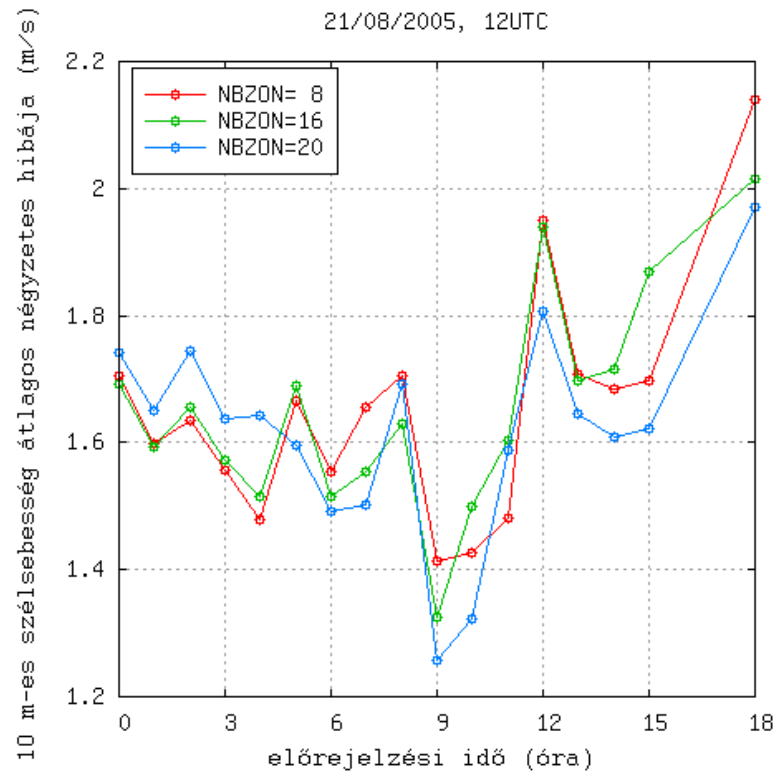
B.3. ábra. A csatolási zóna méretének hatása az előrejelzésre (6 órás csapadékösszeg, 2005. aug. 21. 18 UTC)



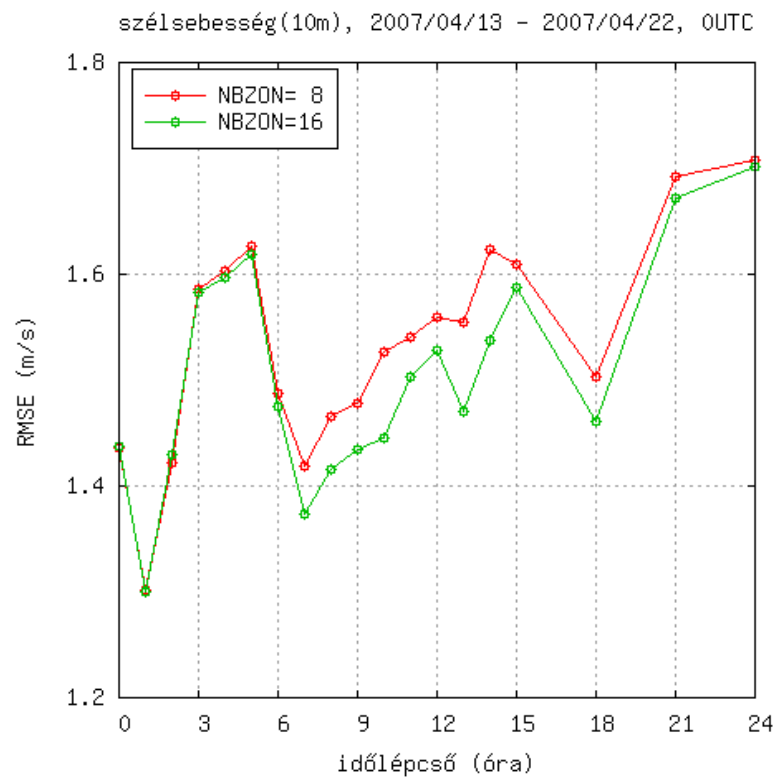
B.4. ábra. A csatolási zóna méretének hatása az előrejelzésre (2 m-es hőmérséklet, 2005. aug. 22. 0 UTC)



B.5. ábra. Objektív verifikáció eredménye



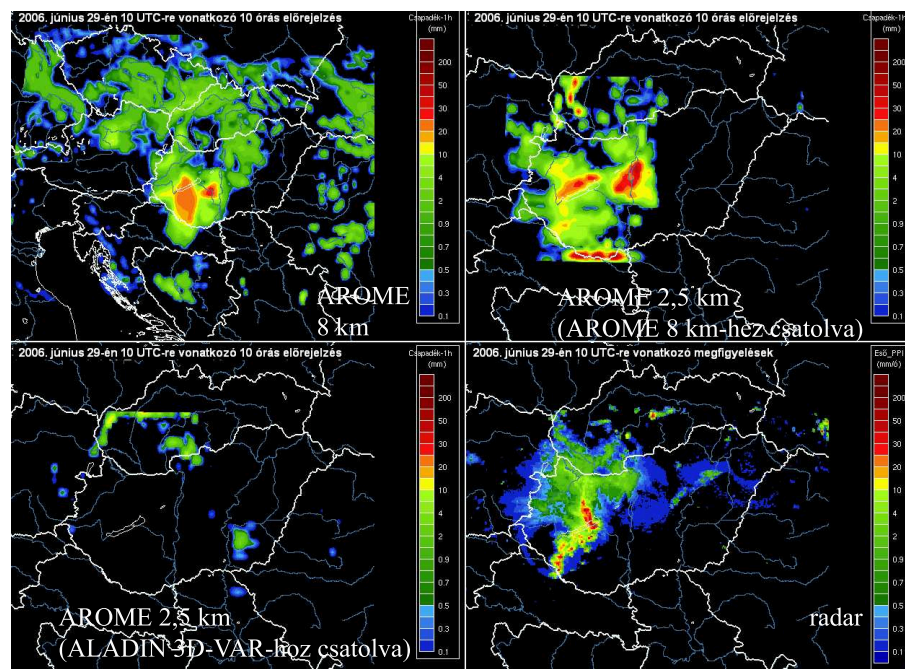
B.6. ábra. Objektív verifikáció eredménye



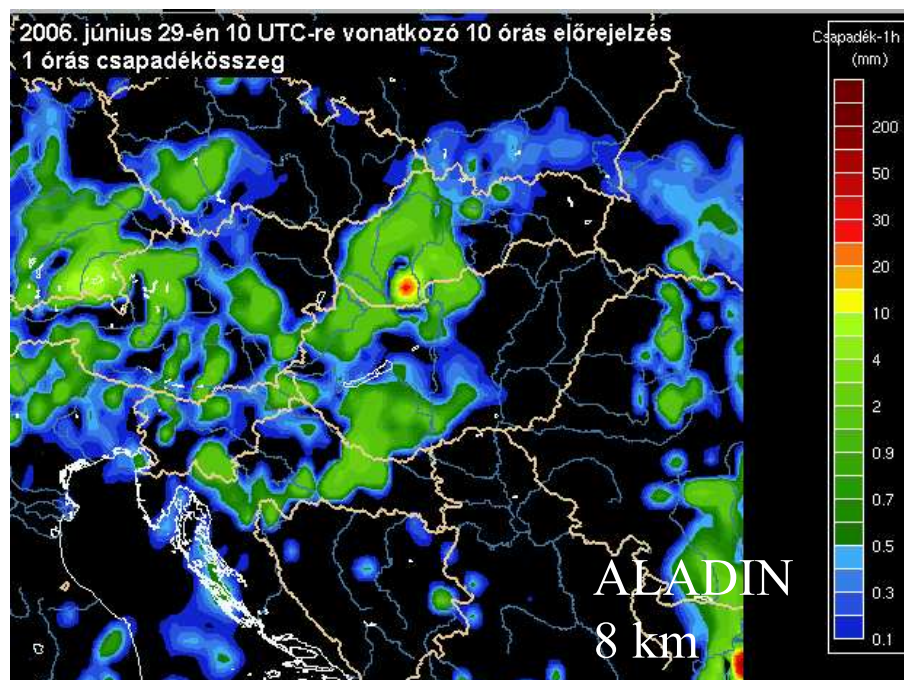
B.7. ábra. Objektív verifikáció eredménye

# C. Függelék

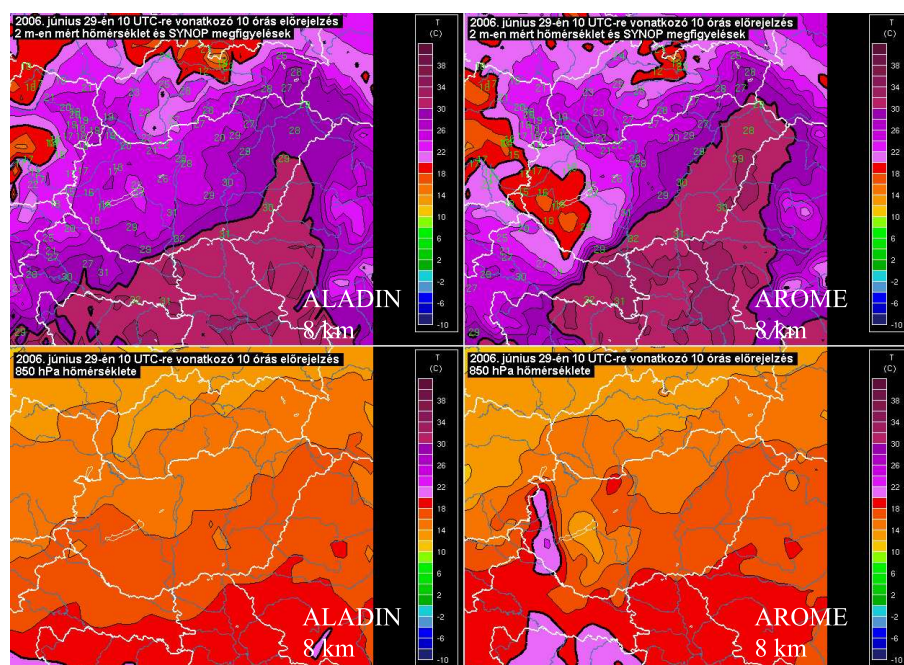
2006. június 29.



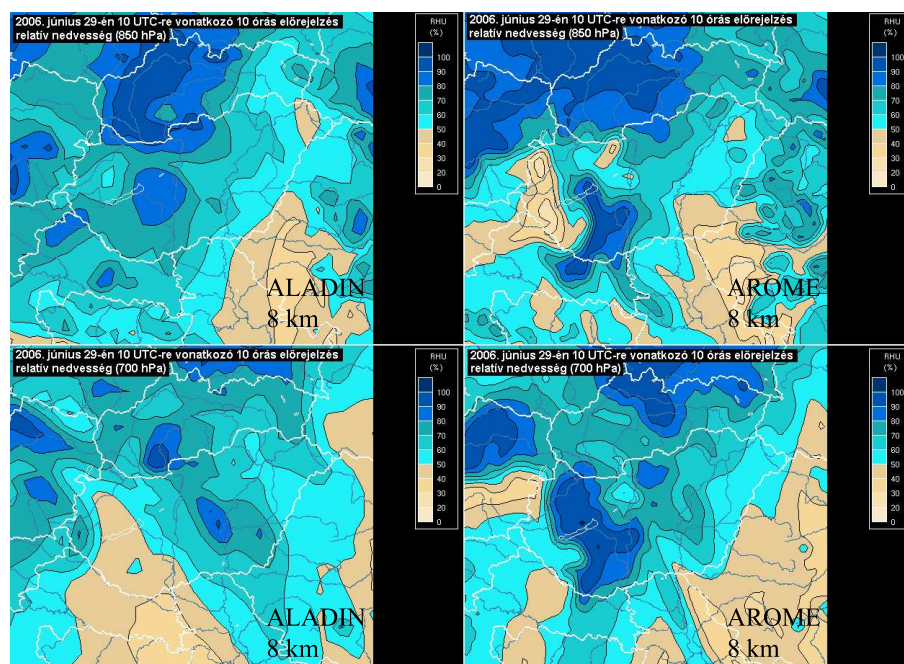
C.1. ábra. Modellek előrejelzésének összehasonlítása (1 órás csapadék, 2006. jún. 29. 10 UTC)



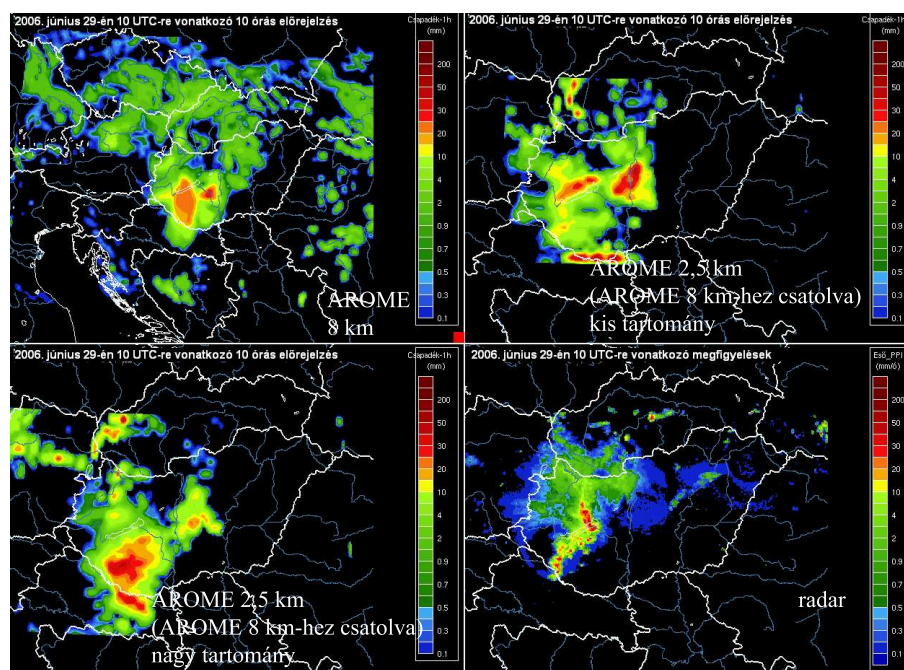
C.2. ábra. Az operatív ALADIN modell előrejelzése (1 órás csapadék, 2006. jún. 29. 10 UTC)



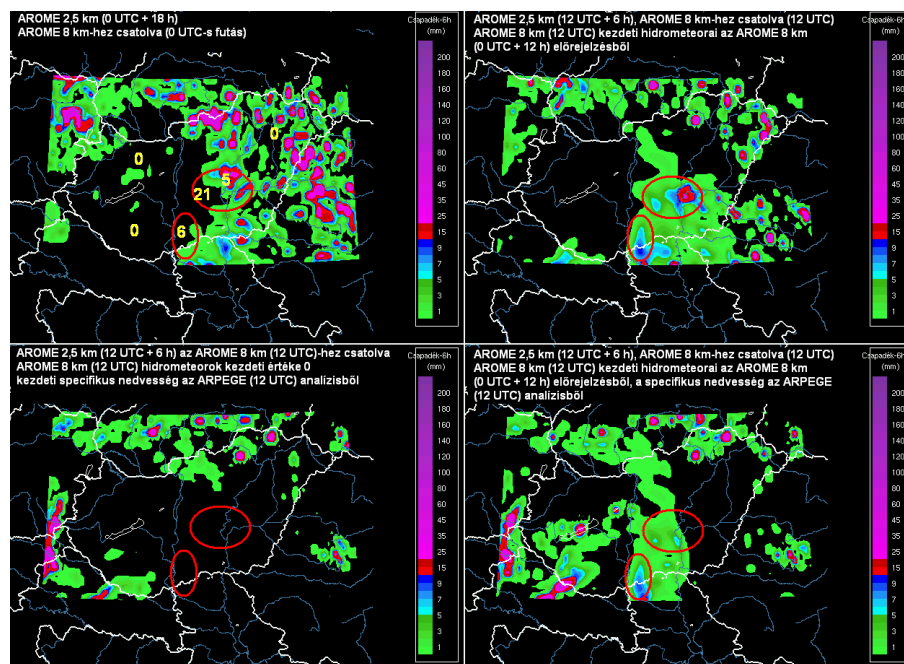
C.3. ábra. 8 km-es felbontással futtatott modellek által előrejelzett hőmérsékleti mezők (2 m-es hőmérséklet, 850 hPa hőmérséklete, 2006. jún. 29. 10 UTC)



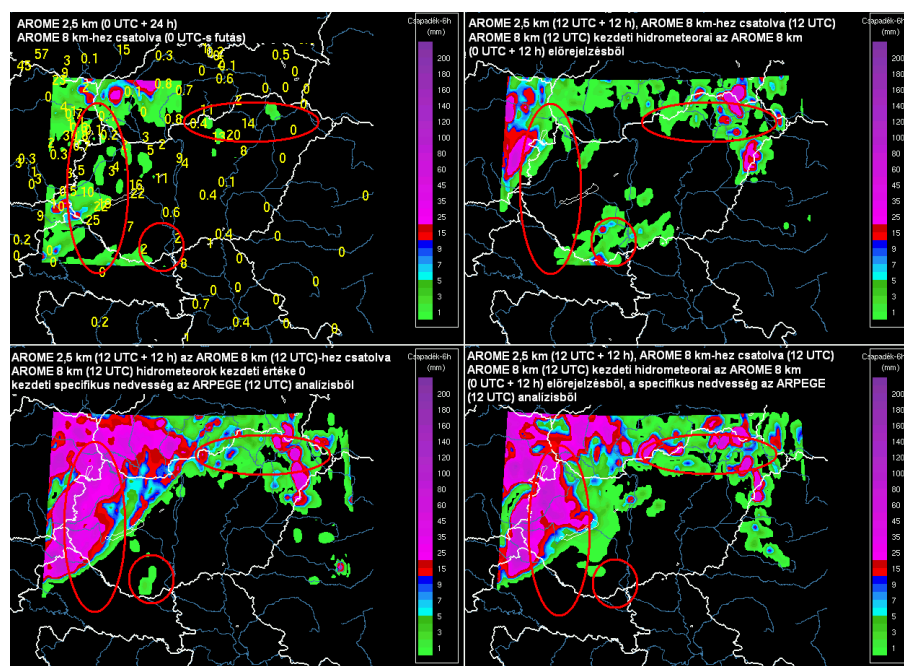
C.4. ábra. 8 km-es felbontással futtatott modellek által előrejelzett nedvességmezők (850 hPa, 700 hPa, 2006. jún. 29. 10 UTC)



C.5. ábra. Integrálási tartomány méretének hatása (1 órás csapadék, 2006. jún. 29. 10 UTC)



C.6. ábra. Hidrometeorok inicializációjának hatása (6 órás csapadékösszeg, 2006. jún. 29. 18 UTC)



C.7. ábra. Hidrometeorok inicializációjának hatása (6 órás csapadékösszeg, 2006. jún. 30. 0 UTC)

# Irodalomjegyzék

- [Bénard, 2004] *Bénard, P.*, 2004: Scientific Documentation for ALADIN-NH Dynamical Kernel, version 2.1,  
[http://www.cnrm.meteo.fr/gmapdoc/article.php3?id\\_article=21](http://www.cnrm.meteo.fr/gmapdoc/article.php3?id_article=21)
- [Boer et al., 1984] *Boer, G.J., McFarlane, N.A., Laprise, R., Henderson, J.D. and Blanchet, J.-P.*, 1984: The Canadian Climate Centre spectral atmospheric general circulation model. *Atmos. Ocean*, *22*, 397-429.
- [Bougeault, 1985] *Bougeault, Ph.*, 1985: A simple parametrization of large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.* *113*, 2108-2121.
- [Bölöni, 2003] *Bölöni, G.*, 2003: Meteorológiai adatasszimiláció. *29. Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest, beszámolókötet, 41-56.
- [Bubnová et al., 1995] *Bubnová, R., Hello, G., Bénard, P. and Geleyn, J.-F.*, 1995: Integration of the Fully Elastic Equations Cast in the Hydrostatic Pressure Terrain-Following Coordinate in the Framework of the ARPEGE/Aladin NWP System. *Mon. Wea. Rev.* *123*, 515-535.
- [Cuxart et al., 2000] *Cuxart, J., Bougeault, Ph., and Redelsperger, J.L.*, 2000: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, *126*, 1-30.
- [Davies, 1976] *Davies, H. C.*, 1976: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* *102*, 405-418.
- [Douville et al., 1995] *Douville, H., Royer, J.-F. and Mahfouf, J.-F.*, 1995: A new snow parameterization for the Météo-France climate model. Part II: validation in a 3D GCM experiment. *Climate Dynamics*, *12*, 37-52.
- [Geleyn, 1987] *Geleyn, J.-F.*, 1987: Use of a modified Richardson number for parametrizing the effect of shallow convection. *J. Meteor. Soc. Japan, Special NWP symposium issue*, 141- 149.



- [Horányi, 2006] *Horányi, A.*, 2006: Az adatasszimiláció, mint a numerikus prognosztika egyik legfontosabb részterülete. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 20, 89-94.
- [Horányi et al., 1996] *Horányi, A., Ihász, I. and Radnóti, G.*, 1996: ARPEGE/ALADIN: A numerical weather prediction model for Central-Europe with the participation of the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 100(4), 277-301.
- [Horányi et al., 1998] *Horányi, A., Ihász, I. és Radnóti, G.*, 1998: Az időjárás szám-szerű előrejelzése. *Természet Világa*, 129, 1. különszám, 39-42.
- [Horányi et al., 2006] *Horányi, A., Kertész, S., Kullmann, L. and Radnóti, G.*, 2006: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 110(3-4), 203-227.
- [Horváth, 2005] *Horváth, Á.*, 2005: A 2005. augusztus 21-23 közötti, rendkívüli csapadékos periódus meteorológiai elemzése.  
[http://www.met.hu/omsz.php?almenu\\_id=weather&pid=weather\\_delicates](http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=weather&pid=weather_delicates)
- [Horváth, 2006a] *Horváth, Á.*, 2006: Pusztító zivatarláncok 2006. június 29-én. *Légkör*, 51(4), 16-19.  
<http://www.met.hu/pages/zivatar20060629.php>
- [Horváth, 2006b] *Horváth, Á.*, 2006: A 2006. augusztus 20-i budapesti vihar időjárási háttere  
[http://www.met.hu/doc/2006aug20\\_bp-i\\_vihar.pdf](http://www.met.hu/doc/2006aug20_bp-i_vihar.pdf)
- [Kalnay, 2003] *Kalnay, E.*, 2003: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability, *Cambridge University Press*, 341 pp.
- [Kessler, 1969] *Kessler, E.*, 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteorological Monographs*, Vol 10, No. 32, pp 20. American Meteorological Society, Boston.
- [Kullmann, 2003] *Kullmann, L.*, 2003: Az ALADIN mezoskálájú numerikus modell-rendszer, 29. *Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest, beszámolókötet, 104-118.
- [Langlois, 1973] *Langlois, W. E.*, 1973: A rapidly convergent procedure for computing large-scale condensation in a dynamical weather model, *Tellus* 25, 86-87.
- [Laprise, 1992] *Laprise, R.*, 1992: The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 197-207.

- [Louis et al., 1982] *Louis, J.-F., Tiedtke, M., Geleyn, J.-F.*, 1982: A short history of the PBL parameterization at ECMWF. *Proceedings from the ECMWF Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, 25-27 November, Reading, United Kingdom, ECMWF*, 59-80.
- [Masson, 2000] *Masson, V.*, 2000: A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteor.*, *94*, 357-397.
- [Morcrette, 1989] *Morcrette, J. J.*, 1989: Description of the radiation scheme in the ECMWF model. *ECMWF Technical Memorandum*, 165.
- [Noilhan and Planton, 1989] *Noilhan, J.*, and *Planton, S.*, 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, *117*, 536-549.
- [Pinty and Jabouille, 1998] *Pinty, J.P.* and *Jabouille, P.*, 1998: A mixed-phase cloud parameterization for use in a mesoscale non-hydrostatic model: Simulations of a squall line and of orographic precipitation. *Preprints of Conf. on Cloud Physics, Everett, Washington, (USA). Amer. Meteor. Soc.*, 217-220.
- [Radnóti, 2003] *Radnóti, G.*, 2003: A numerikus előrejelzés alapjai, numerikus módszerek. *29. Meteorológiai Tudományos Napok*, Budapest, beszámolókötet, 25-40.
- [Simmons and Burridge, 1981] *Simmons, A. J.* and *Burridge, D. M.*, 1981: An energy and angular-momentum conserving vertical finite difference scheme and hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, *109*, 758-766.
- [Xu and Randall, 1996] *Xu, K.-M.* and *Randall, D.A.*, 1996: A Semi-empirical Cloudiness Parametrization for use in Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, *53*, 3084-3102
- [Vissy, 2003] *Vissy, K.*, 2003: Az időjárás előrejelzése: jóslás vagy tudomány? *Mindentudás Egyeteme*  
<http://www.mindentudas.hu/vissy/20030505vissy34.html>

# Köszönetnyilvánítás

Köszönetem szeretném kifejezni mindazoknak, akik valamilyen formában hozzájárultak dolgozatom elkészítéséhez. Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Kullmann Lászlónak munkám folyamatos figyelemmel kíséréséért és segítségéért, a Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztály munkatársainak hasznos tanácsaiért, tanszéki konzulensemnek, Práger Tamásnak értékes észrevételeiért, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálatnak az adatok és a technikai háttér biztosításáért.