

TDK DOLGOZAT

Hordozható numerikus időjárás-előrejelző modellek összehasonlító vizsgálata

ANDRÉ KAROLINA ÉS SALAVEC PÉTER

*Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi kar
Fizika BSc., meteorológia szakirány
III. évfolyam*



Témavezetők:

GYÖNGYÖSI ANDRÁS ZÉNÓ

ELTE Meteorológiai Tanszék

TASNÁDI PÉTER

ELTE Meteorológiai Tanszék

WEIDINGER TAMÁS

ELTE Meteorológiai Tanszék

2012. január 15.

Tartalomjegyzék

1. Absztrakt	3
2. Bevezetés	4
3. Célkitűzések	4
4. Az ALADIN/CHAPEAU és a WRF szakmai részletei	5
5. A modellek technikai részletei	6
5.1. Fájlformátumok	7
5.2. Vertikális szintek	7
5.3. Horizontális rács	7
5.4. Változók	8
5.5. Az elvégzett módosítások	8
5.5.1. Közös fájlformátum	8
5.5.2. Vertikális interpoláció	10
5.5.3. Horizontális interpoláció	10
5.5.4. Egységes változók	11
5.5.5. A közös rendszer felépítése	11
6. Eredmények	12
6.1. A közös rendszer	12
6.2. Az inicializáció vizsgálata – André Karolina	13
6.2.1. Digitális szűrő inicializáció	14
6.2.2. A futások jellemzői	15
6.2.3. A zaj paraméterek	15
6.3. Esettanulmányok – Salavec Péter	18
6.3.1. Tornádós helyzet Magyarországon 2010. 08. 16-án	19
6.3.2. Pusztító zivatarok 2010. 06. 18-án	20
6.3.3. Helyi zivatarok hazánk középső sávjában 2010. 07. 01-én	26
6.3.4. Helyi konvekcióval keletkező heves zivatarok 2010.07.03-án	30
6.3.5. Éjszakai zivatarlánc a Dél-Dunántúlon 2010.08.05-én	30
7. Összefoglalás, további tervek	37
Köszönetnyilvánítás	39
Hivatkozások	40

1. Absztrakt

A földi légkör folyamatainak tanulmányozása során nélkülözhetetlen eszközök a meteorológiai modellek. Ahhoz, hogy az általuk szolgáltatott eredményeket megfelelően lehessen kezelni, fontos megismerni működésüket, felderíteni a sajátosságaikat, hiányosságaikat. Ehhez szükség van a modellek oktatásba való bevonására, amit az olyan – kis számításigényű – modellek tesznek lehetővé, amelyek a könnyen hozzáférhető rendszereken is futtathatóak.

Ezek közé tartozik a TDK munka során alkalmazott két modell is.

Az ALADIN egy európai együttműködés, melynek célja a korlátos tartományú modellezés fejlesztése. Ennek keretében jöttek létre a különböző ALADIN modellváltozatok, mint például az Országos Meteorológiai Szolgálat által operatíván használt, ALADIN/HU. A munkánk során használt egyik modell ennek egyetemi változata: az ALADIN/CHAPEAU. E modell adaptációjába és az ELTE számítógépes környezetében történő futtatásába kapcsolódtunk be, egy OMSz-ELTE együttműködés keretében. A másik numerikus modell a WRF, egy egyesült államokbeli fejlesztés, ami 2008 óta napi rendszerességgel fut a Meteorológiai Tanszéken. Előnye a CHAPEAU-hoz képest, a kimenő adatok könnyű kezelhetősége, továbbá a felhasználóbarát utófeldolgozó rendszer.

A TDK munka célja a két modellből származó előrejelzések egységesítése: azonos rácshálózaton történő futtatás, egységes adatfeldolgozó és megjelenítő rendszer kialakítása.

A CHAPEAU spektrális, míg a WRF rácsponti modell. Különböző fájlformátumokat használnak, és a modellrácsuk is eltérő. A fájlok konvertálása, a modelleredmények horizontális interpolációja, valamint az alkalmazott vertikális szintek egységesítése után összevethető eredményeket kapunk.

Az elkészült rendszer (modellbeállítások, utófeldolgozó modul) használhatóságát a dinamikai inicializáció tesztelésével vizsgáltuk. Bemutatjuk továbbá a szoftver alkalmazását több, az OMSz által jól dokumentált, nagy-csapadékos időjárási helyzet összehasonlító vizsgálatával.

2. Bevezetés

Az időjárás-előrejelzés és a légkörben lejátszódó folyamatok dinamikai leírásának nélkülözhetetlen eszközei a numerikus meteorológiai modellek. A kapott eredmények (pl. előrejelzések) értelmezéséhez ismernünk kell a modellek működését, fizikáját.

Erre a tudásra egyetemeken zajló oktatás – kurzus, esetleg Tudományos Diákköri munka – keretében tehetnek szert a meteorológus hallgatók.

Az oktatás folyamatát olyan nyílt forráskódú, közösségi fejlesztésű modellek segítik – mint az ALADIN/CHAPEAU és a WRF – melyek kis erőforrás-igényűek, így könnyen hozzáférhető számítógépeken is lehetséges futtatásuk („hordozhatók”). A nyílt forráskód lehetővé teszi – bizonyos keretek között – bárkinek, hogy felfedezze és kijavítsa a modellben lévő hiányosságokat, így téve a modellt közösségi fejlesztéssé. Némely modell futtatásához szükséges bemenő adatok – kezdeti- és peremfeltételek – szintén bármely felhasználó rendelkezésére állnak, szabadon hozzáférhetőek. Vannak olyan modellek is, melyek bemenő adatait csak egy zártabb közösség használhatja, ezek közé tartozik a CHAPEAU.

A közösségi modellek fontos szerepet játszanak az egyetemi oktatásban. A WRF (*Weather Research and Forecasting Model*, [1]) az Egyesült Államokban fejlesztett modell, amit világszerte több mint nyolcvanezer használunk különböző egyetemeken illetve kutatóintézetekben. Az ELTE-n 2008 óta naponta kétszer futtatjuk előrejelzési- és oktatási-kutatási célból.

Az ALADIN (*Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International*, [2]) egy európai együttműködés, mely 1990-ben jött létre, francia kezdeményezésre, jelenleg 16 európai illetve észak-afrikai ország tagja. Az együttműködés célja a korlátos tartományú modellezés fejlesztése. Ennek keretében jöttek létre a különböző ALADIN modellváltozatok, mint például az ALADIN/HU, melyet az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) operatív előrejelzésekhez használ. A HIRLAM (*High Resolution Local Area Modelling*) – mely szintén európai együttműködés – célja megegyezik az ALADIN-ével. E két konzorcium közös munkájának eredménye a CHAPEAU (*Common Harmonie and Aladin Package for Educational and other Academic Use*). Ez a modell csak konfigurációjában tér el a hazai operatívól – például az adatasszimiláció és egyéb nagy számítás-igényű modulok inaktívak, így egyszerűbb számítógépeken is futtatható. Különbsége a WRF-hez képest a kimenő adatok nehézkes kezelhetősége és a kevésbé felhasználóbarát utófeldolgozó rendszer.

E nemzetközi fejlesztésbe kapcsolódtunk be az OMSZ-on keresztül.

3. Célkitűzések

Munkánk célja, az ALADIN/CHAPEAU és a WRF modellből származó előrejelzések egységesítése: azonos rácshálózaton történő futtatásuk valamint egy egységes adatfeldolgozó és megjelenítő rendszer kialakítása. Ezzel együtt a CHAPEAU utófeldolgozó rendszere is felhasználóbaráttá válik.

A dolgozat első részében bemutatjuk a két modell fontosabb szakmai részleteit, majd kitérünk a technikai részleteikre és az általunk elvégzett módosításokra.

Az elkészült rendszer (modellbeállítások, utófeldolgozó modul) használhatóságát a dinamikai inicializáció tesztelésével vizsgáltuk. Bemutatjuk továbbá a szoftver alkalmazását több, az OMSz által jól dokumentált, nagy-csapadékos időjárási helyzet összehasonlító vizsgálatával.

4. Az ALADIN/CHAPEAU és a WRF szakmai részletei

A következőkben összefoglaljuk a két modell legfontosabb szakmai tulajdonságait.

A numerikus meteorológiai modellek az ún. hidro-termodinamikai egyenletrendszer bizonyos közelítésekkel, adott koordinátarendszerben felírt változatának megoldására lettek kifejlesztve. Ezen prognosztikai és diagnosztikai¹ egyenletek parciális differenciálegyenlet-rendszert alkotnak. A prognosztikai egyenletek megoldásához megfelelő kezdeti- és peremfeltételek mellett időbeli integrálással lehet eljutni. Ez időbeli és térbeli diszkretizáció alkalmazásával érhető el.

A térbeli deriváltak közelítése alapján a modelleket két csoportba sorolhatjuk, vannak spektrális² illetve rácsponti³ modellek. Az 1. táblázatban látható, hogy a munkánk során használt modellek ilyen szempontból különböznek.

1. táblázat. A modellek főbb jellemzői

	CHAPEAU	WRF
térbeli deriváltak közelítése	spektrális	rácsponti
időbeli diszkretizáció	szemi-Lagrange	euler-i
közelítés	hidrosztatikus	nem hidrosztatikus
térképvetület	Lambert conform	

Az időbeli diszkretizációra használt numerikus sémájuk is eltérő. A WRF által használt euler-i séma esetében teljesülnie kell a CFL stabilitási kritériumnak [3, 75. oldal], ami megszabja az alkalmazható legnagyobb időlépés nagyságát. Ezt a térbeli felbontás és az egyenletrendszer által leírt leggyorsabban terjedő mozgásforma sebességének aránya határozza meg. A CHAPEAU által használt szemi-Lagrange séma kevésbé szigorú stabilitási kritériumot követel: a trajektóriák egy időlépcső alatt nem metszhetik egymást. Így nagyobb időlépcső alkalmazása lehetséges [3, 86. oldal].

Mindkét modellnek van hidrosztatikus és nem hidrosztatikus változata. Munkánk során a CHAPEAU-t hidrosztatikus módon futtattuk. Ebben a közelítésben a hidro-termodinamikai egyenletrendszerben szereplő három mozgásegyenlet közül csak a horizontális sebességekre

¹Diagnosztikai egyenlet: az adott egyenletben lévő időderiváltat elhanyagolva kapjuk.

²Spektrális modellekben a változókat analitikusan deriválható függvényekkel közelítik.

³Rácsponti modellekben a deriváltakat a szomszédos rácsponthoz tartozó értékek segítségével adják meg.

vonatkozó két egyenletet integrálja a modell. A vertikális sebességet diagnosztikai egyenlet alapján számolja [3, 47. oldal, 2.4 fejezet]. A WRF-et nem hidrosztatikusan futtattuk, ami azt jelenti, hogy a modell mind a három mozgásegyenletet prognosztikusan oldja meg.

Az 1. táblázatban az is látható, hogy mindkét modell rácsa Lambert conform térképvetülettel készül.

5. A modellek technikai részletei

A továbbiakban ismertetjük a modellek technikai részleteit, valamint az ezekben elvégzett módosításokat, melyekre az egységes utófeldolgozó rendszer elkészítése során szükség volt.

2. táblázat. A modelladatok főbb jellemzői

	CHAPEAU	WRF
bemenő adatok forrása	OMSz (intézmény)	FNL (adatbázis)
	IFS (modell)	GFS (modell)
bemenő adatok formátuma	FA	GRIB
kimenő adatok formátuma	FA	GRIB
megjelenítő szoftver	R (Rfa)	GrADS
vertikális szintek	modellszintek	
	nyomási	
	felszín- feletti magassági	tengerszint-
horizontális felbontás (m)	7000	7500
időlépcső (s)	300 (szemi-Lagrange)	40 (euler-i)

Ahogy a 2. táblázat mutatja, a két modell bemenő adatainak forrása eltérő, illetve kimenő adatainak fájlformátuma különbözik.

Munkánk során a bemenő adatokat – kezdeti- és peremfeltételeket – a WRF-hez az FNL (*Final Analysis*) adatbázis szolgáltatta, míg a CHAPEAU-hoz az OMSz bocsátotta rendelkezésünkre. Az FNL a GFS⁴ globális modellel készített adatbázis. Ezek a modellfutások késleltetve készülnek, így több mérési adatot tartalmaznak, mint egy operatív futás során kapott előrejelzés. A CHAPEAU bemenő adatai az ECMWF⁵ globális modelljéből, az IFS-ből (*Integrated Forecast System*) származnak. Azonban nagyobb tartományon futtatott ALADIN modell is lehet a bemenő adatok forrása. A WRF-el szintén nem csak FNL adatokkal lehet előrejelzéseket készíteni, hanem nagyobb tartományon futtatott WRF is szolgáltat bemenő adatokat.

Ahhoz, hogy össze lehessen hasonlítani a modellek kimenő adatait, szükséges az egységes fájlformátum, illetve a közös – horizontális és vertikális – rács használata.

⁴Global Forecast System – ”globális előrejelző rendszer”

⁵European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: Európai Középtávú Előrejelző Központ

5.1. Fájlformátumok

A FA (*Fichier ARPEGE*) egy speciális ARPEGE/ALADIN bináris fájlformátum. Egy fájlban egy időlépcső adatai szerepelnek, valamint egy fájlban belül a paraméterek (pl. hőmérséklet) vertikális szintenként külön változóban vannak eltárolva. Ezek miatt a FA fájlok kezelése körülményes. Megjelenítésükre az R szoftver alkalmas, korlátozott lehetőségeket adva: vertikális metszetek, meteogramok előállításuk nem lehetséges.

A WRF NetCDF (*Network Common Data Form*) formátumú fájlokat állít elő, melyek a változók tárolásának tekintetében nagyban hasonlítanak a FA fájlokhoz. Viszont a WRF utófeldolgozása eredményeként GRIB (*Gridded Binary*) fájlok keletkeznek. A GRIB egy tömörített, WMO⁶ standard formátum. Széles körű elterjedtsége miatt számos szoftver alkalmas megjelenítésükre, számtalan lehetőséget kínálva.

A WRF-el szerzett tapasztalat és a könnyebb kezelhetőség miatt a GRIB-et választottuk közös fájlformátumnak.

5.2. Vertikális szintek

Ahhoz, hogy a két modell adatait össze lehessen vetni, azonos vertikális szintek használata szükséges. Mindkét modell esetében háromféle vertikális koordináta-rendszer használatára van lehetőség (2. táblázat).

A modellszintek alapvetően eltérnek a két modellnél, a magassági szintek szintén eltérőek, viszont a nyomási szintek mindkét modellnél egyformák. Ezek alapján a nyomási szintek használatát választottuk.

5.3. Horizontális rács

Az azonos fájlformátum és az egyforma vertikális szintek használata még nem teszi lehetővé a két modell adatainak összehasonlítását. Fontos, hogy horizontálisan is ugyanazokon a helyeken, rádspontokban legyenek az adatok. Mivel a két modell alapvetően különbözik (1. táblázat), a horizontális rácsuk is eltér.

Az ALADIN/CHAPEAU bemenő adatokat az OMSz munkatársai bocsátják rendelkezésünkre, kötött rácsfelbontással, tehát a CHAPEAU rácsa adott. Ezért szükséges a WRF kimenő adatok utófeldolgozása során interpolálni azokat erre a horizontális rácsra.

⁶WMO: World Meteorological Organization, Meteorológiai Világszervezet

5.4. Változók

Az OMSz-től a CHAPEAU-val érkező paraméterfájl (namelist⁷) a 3. táblázatban felsorolt háromdimenziós változókat tartalmazta. Ezek közül nem mindegyik került kiírásra a modellfutás végén létrejövő FA fájlba. Emellett a kiírt változók közül nem mindegyik konvertálódott GRIB fájlba, ami veszteséget eredményezett a kimenő adatok oldalán.

3. táblázat. A munka kezdetekor kiírásra került 3D-s változók. S – modellszint, P – nyomási szint, H – felszín feletti magassági szintek. FA – csak FA fájlban megjelenő változó, G – FA-ból GRIB fájlba sikeresen konvertálódott változó (A WRF esetén nem volt szükség konvertálásra). Kötőjellel (–) a sikertelen kiírás van jelölve.

változó	CHAPEAU			WRF
	S	P	H	P
hőmérséklet	G	G	FA	G
szél (zonális, x irányú)	FA	G	FA	G
szél (meridionális, y irányú)	FA	G	FA	G
specifikus nedvesség	G	FA	FA	G
divergencia	–	FA	–	G
örvényesség	–	FA	–	G

A 3. táblázatban szereplő háromdimenziós paramétereken kívül az alábbi kétdimenziós, felszíni változók is szerepeltek a namelistben: hőmérséklet, felszíni légnyomás, tengerszintre átszámított légnyomás, konvektív csapadék, nagyskálájú csapadék, konvektív hó, nagyskálájú hó. Ezek mindegyike sikeresen konvertálódott.

További változókat lehet megadni El Khatib dokumentációja alapján [4].

5.5. Az elvégzett módosítások

5.5.1. Közös fájlformátum

A két modell adatainak összevethetősége érdekében elsőként a fájlformátum egységesítésére került sor.

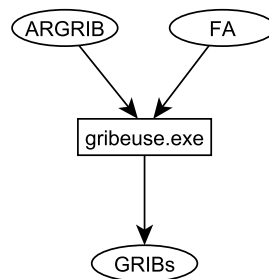
Ahogy korábban (5.1. rész) utaltunk rá, közös formátumnak a GRIB-et választottuk. A FA fájl GRIB-bé konvertálását a *gribeuse*, Fortran nyelven írt program végzi el, melyet az ALADIN fejlesztői készítettek és az OMSz bocsátotta rendelkezésünkre. Ahhoz, hogy ezt használni lehessen, módosítani kellett a CHAPEAU namelistjét, mégpedig a következő két változó átírásával:

⁷Namelist: paraméterfájl, mely tartalmazza a modellfutás beállításait, mint például a kiírandó változókat, a vertikális szinteket, az inicializációs, parametrizációs és egyéb beállításokat. Szükség esetén a modell futtatása előtt szerkesztendő.

- NCADFORM=0 (1-ről)
- CFPFMT='LELAM' ('MODEL'-ről)

A gribeuse lefordítása után létrejön egy exe, melynek futását egy fájl (ARGRIB) vezérli, ami az alábbi paramétereket tartalmazza:

1. FA fájl elérési útja, neve: ezt kell konvertálni.
2. tmp könyvtár: ebbe hozza létre a GRIB fájlkat.
3. mono: A FA fájlban lévő minden változóból egy-egy GRIB fájl lesz. Tehát egy GRIB fájlba egy változó kerül. A másik opció a multi, amikor egy GRIB fájlba írja ki az összes változót.
4. kdom=0: ennek értéke mindig nulla legyen.



1. ábra. A gribeuse működése

Ahhoz, hogy a FA fájlkból egy minden időréteget és vertikális szintet tartalmazó GRIB fájlt kapjunk, a gribeuse többszöri, ismételt futására és az ARGRIB sokszori szerkesztésére van szükség. E feladat automatizálására írtunk egy scriptet (FA2Grib.sh).

A gribeuse eredeti állapotában nem minden változót konvertált át GRIB fájlba (3. táblázat). E probléma megoldásához módosítani kellett a szoftver forráskódjának egy részét, az **icodet2.f** programrészletet. Ebben szerepelnek a változók (pl. felszíni hőmérséklet), illetve azok jellemzői (pl. a paraméter kódja, a vertikális szint típusa). Amelyik változó nincs meg ebben a fájlban, azt nem képes kezelni a szoftver. Lehetőség van a változók listájának bővítésére.

Az icodet2.f szerkesztése után minden esetben újra kell fordítani a gribeuse-t, hogy a módosítások életbe lépjenek.

5.5.2. Vertikális interpoláció

Az egységes vertikális koordinátarendszer – esetünkben a nyomási (5.2 rész) – fontos feltétele a modelladatok összevethetőségének.

Munkánk kezdetén a CHAPEAU vertikális modellszintjeinek száma 46, a nyomási szinteké 6 volt. Ezért célszerűnek látszott a modellszinteken lévő adatokat nyomási rendszerbe interpolálni.

A fájlok konvertálása után GRIB fájlok vertikális interpolációja vált szükségessé. Erre a feladatra többek között a GEMPAK [5] szoftver részét képező **GDVINT**, illetve a norvég fejlesztésű **fimex** [I] alkalmazsak. Ezekkel végeztünk kísérleti futtatásokat, de célszerűbbnek tűnt a CHAPEAU namelist-jében a modell futása előtt beállítani a megfelelő vertikális szinteket. Ennek hátránya, hogy futás után nem lehet azokat változtatni, ellenben ezzel a módszerrel nem kell többször vertikálisan interpolálni⁸, így elkerülve a további numerikus hibákat.

A WRF utófeldolgozása során (UPP, 5.5.3. rész) lehetőség van a vertikális szintek megváltoztatására, de azok definiálása körülményes. Ezért a közös rendszerben a CHAPEAU namelist-jében a WRF-el megegyező nyomási szint értékeket állítunk be, így biztosítva az azonos vertikális koordinátarendszert.

5.5.3. Horizontális interpoláció

Ahogy a 5.3 részben említettük, a WRF adatait interpolálni kell a CHAPEAU rácsára.

A GRIB fájlokban lévő adatok horizontális interpolációjára szintén számos szoftvert fejlesztettek ki. Egyik ilyen program a **bilingrb** [II], mely nem alkalmas a feladatra, mivel csak lat-lon gridet képes kezelni. A WRF és a CHAPEAU viszont Lambert conform térképvetülettel dolgozik (1. táblázat).

Az NCEP által fejlesztett modellek – köztük a WRF – utófeldolgozására készített legújabb szoftver az UPP (*Unified Post Processor*). Ennek egyik eleme, a **copygb** el tudja végezni a Lambert conform vetületű rácsok horizontális interpolációját. Az UPP-ről bővebben a WRF felhasználói kézikönyvben olvashatunk: WRF-ARW User's Guide [6].

A copygb használata

A következő paranccsal a copygb egy tetszőleges rácsra interpolálja a bemenő GRIB fájlban lévő adatokat:

```
copygb.exe -xg"racs" bemeno.grb kimeno.grb
```

A rácsot az alábbi formában lehet megadni:

```
255 0 NY NX LAT0 LON0 128 LAT1 LON1 DY DX 64
```

Ahol:

NX – a földrajzi szélességhez tartozó rácsszám

⁸A modell elvégzi a modellszintekről a nyomásra való interpolációt.

NY – a földrajzi hosszúsághoz tartozó rácsszám

LAT0, *LON0* – a modelltartomány bal alsó (délnyugati) koordinátái, ezredfokban megadva

LAT1, *LON1* – a modelltartomány jobb felső (északkeleti) koordinátái, ezredfokban megadva

DX – a földrajzi szélességhez tartozó rácsfelbontás, ezredfokban megadva

DY – a földrajzi hosszúsághoz tartozó rácsfelbontás, ezredfokban megadva

Mindegyik paraméter egész szám. Megjegyzés: itt az X irány a földrajzi szélességet, míg a CHAPEAU-s kontrol fájlokban (lásd 5.5.4 rész) a földrajzi hosszúságot jelöli. A felbontást és a rácsszámot felcserélve – tehát először a földrajzi hosszúsághoz, majd a földrajzi szélességhez tartozót – kell megadni.

A rácsparaméterek kerekítése miatt az új rács nem lesz pontosan ugyanaz, mint az eredeti CHAPEAU rács, ezért mindkét modell kimenő adatainak újbóli interpolációja szükséges.

5.5.4. Egységes változók

Az összehasonlítás megkönnyítése érdekében fontos, hogy a két modellben a változók nevei, számábrázolási pontosságuk valamint mértékegységük azonos legyen.

A GRIB fájlok megjelenítésére munkánk során használt program, a *Grid Analysis and Display System (GrADS)*, egy meteorológiai és geológiai adatok megjelenítésére kifejlesztett szoftver. Ez *kontrol-* (ctl) és *index-* (idx) fájlok segítségével kezeli a GRIB fájlokat. A kontrol fájlt – mely tartalmazza a modellfutás adatait (pl. dátum, tartomány, rácsadatok), valamint a változók neveit és a paraméterkódokat – a ***grib2ctl*** állítja elő. Mivel mindkét modellkimenet-hez a copygb futása után jön létre a kontrol fájl, a benne szereplő változónevek egységesek. E program hiányossága, hogy csak a 0 és 127 közötti WMO szabvány paraméterkódú változókat kezeli jól. E fölött modellenként eltérnek a paraméterkódok jelentései, ezért a grib2ctl hibásan kezeli őket.

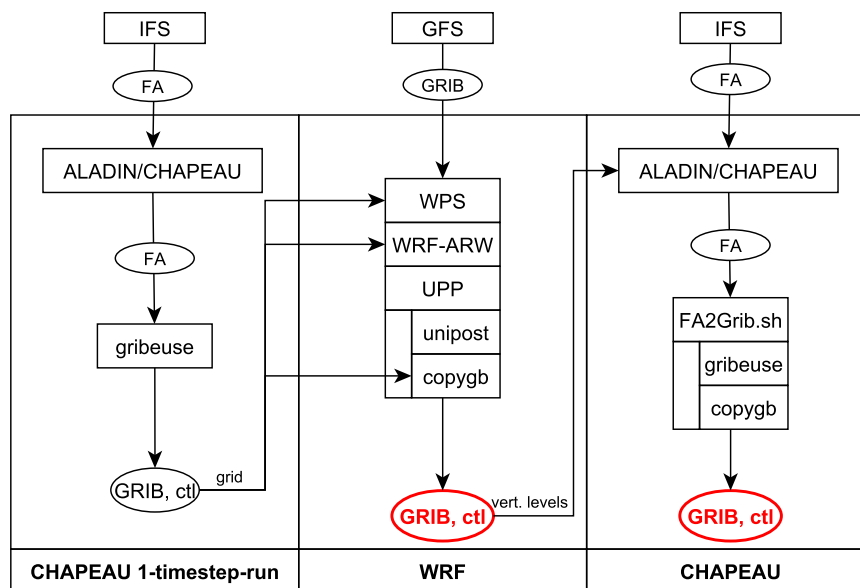
A mértékegységek még egységesítésre szorulnak, mert például a relatív nedvesség a WRF-ben %-ban, a CHAPEAU-ban pedig 0 és 1 közötti értékben jelenik meg. Emellett a számábrázolási pontosság sem egyforma a két modell esetében: a CHAPEAU jelen formájában minden változót 5 tizedesre ír ki, míg a WRF-nél változónként eltér ez az érték.

A közös rendszer jelenleg 47 WRF és 39 CHAPEAU változóval dolgozik, de szükség esetén lehetőség van ezek bővítésére. ([4], [6])

5.5.5. A közös rendszer felépítése

A CHAPEAU és a WRF összehangolt futását egy általunk írt script (run.sh) vezérli, mely a 2. ábrán bemutatott lépéseket hajtja végre.

Az első lépés a tartomány- illetve rácsinformációk beszerzése, melyhez a CHAPEAU-t elegendő egy időlépcsőre, inicializáció nélkül, csak felszíni változókat kiírva futtatni. Ezekkel a feltételekkel a futásidő minimális, hozzávetőleg egy perc.



2. ábra. A közös rendszer felépítése

A kinyert információk alapján történik a WRF futása, UPP-vel utófeldolgozva. Tehát a végeredménye már a közös rácson lesz. A CHAPEAU-hoz a vertikális szinteket a WRF-es kontrol fájlból szerzi be a script.

Harmadik lépésben a CHAPEAU-t futtatja ugyanarra az időre, a WRF-el megegyező vertikális nyomási szintekre. A FA2Grib.sh a korábban ismertetett módon elvégzi a gribeuse többszöri futtatásával a FA fájlok GRIB-bé konvertálását. Végül az így keletkezett fájlokat a copygb a közös rácsra interpolálja.

A futások eredményeként létrejött fájlok egy közös mappában kerülnek eltárolásra.

A WRF felbontása 7.5 km, integrálási időlépcsője 40 s. A CHAPEAU felbontása 7 km, időlépcsője 300 s (2. táblázat). Így a WRF biztosan lefedi ez utóbbi tartományát. Ha a WRF felbontása is 7 km, akkor az interpoláció után nem fedi le azt.

Ezekkel a beállításokkal a modellek egyenként hozzávetőleg 2.5 óra alatt futottak le – tehát az egész futás 5 órát vett igénybe –, elő- és utófeldolgozással együtt. Utófeldolgozás alatt itt a FA-ból GRIB-be konvertálás, a horizontális interpoláció és a WRF esetén az UPP futása értendő.

6. Eredmények

6.1. A közös rendszer

Az ALADIN/CHAPEAU és a 3.3.1-es verziójú WRF-ARW modell egy közös rendszerbe lett foglalva. A tartományt és a horizontális rácsot a CHAPEAU szabja meg, míg a vertikális szinteket a WRF. Egy egyszerű parancs kiadásával megvalósítható a két modell futása, ugyanarra

az időpontra, időtartamra, tartományra. A végeredmények ugyanazon a térbeli rácson tartalmazzák az adatokat, megegyeznek a változónevek is, valamint a megjelenítés is egységesen lehetséges.

A következőkben bemutatjuk a rendszer használhatóságát az inicializáció tesztelésével. További alkalmazásként bemutatjuk több, az OMSz által jól dokumentált, nagy-csapadékos időjárási helyzet összehasonlító vizsgálatát.

6.2. Az inicializáció vizsgálata – André Karolina

Az elkészült rendszer működését az inicializáció vizsgálatával teszteltük. Ahhoz, hogy ennek eredményei érthetőek legyenek, néhány szót kell ejtenünk az inicializációról.

A számszerű időjárás-előrejelző modellekben a prognosztikai egyenletek nem csak a nagy hullámhosszú Rossby hullámokat, hanem a nagyfrekvenciás gravitációs hullámokat is leírják. Integrálás közben ez utóbbi hullámok járuléka elfedhetik a meteorológiai szempontból fontos jelenségeket. Az ilyen gravitációs hullámok megjelenésének egyik oka a kezdeti szél- és nyomásmező kiegyensúlyozatlansága [3, 186. oldal]. Ez az adatasszimilációból (ami röviden azt jelenti, hogy a modellek kezdeti mezőit légköri megfigyelések figyelembevételével előállítjuk) és abból is adódhat, hogy a légkör maga sincs egyensúlyban.

Adatasszimiláció esetén a mérések olyan jelenségeket, hullámokat is tartalmazhatnak, melyeket a modell – egyszerűsítései, felbontása miatt – nem tud leírni, így azok zajként jelennek meg. Például egy Δx horizontális felbontású rácson egy $2\Delta x$ -nél kisebb hullámhosszú hullám, vagy egy hidrosztatikus modellben minden olyan jelenség, ami nem hidrosztatikus és nincs parametrizálva.

Ha a kezdeti mező nincs egyensúlyban, de a modell stabil numerikus sémát használ, az integrálás során a modell által nem leírt hullámok amplitúdója csökken (szelektív csillapítás, [3, 195. oldal]). Tehát a keresett egyensúly egy idő után beáll.

Abban az esetben, amikor az előrejelzés első óráit vizsgáljuk, az inicializáció segítségével teremthető meg a kezdeti mezők egyensúlya. Erre nem csak adatasszimiláció esetén van szükség.

Munkánk során – habár a modellek alkalmasak rá – nem történt adatasszimiláció, a kezdeti mezőket globális modellek szolgáltatták. Ezek a mezők az eredeti rácson egyensúlyban vannak – mivel korábbi modellfutások eredményei –, viszont az új rácson már kiegyensúlyozatlanság lép fel bennük. Ugyanis 16 km-es felbontású rácsról nagyobb felbontásúra (2. táblázat) interpolálva új információ nem keletkezik. Az eredeti térskála alatti hullámok matematikai művelet – interpoláció – eredményei: a fizikai törvényszerűségeknek nem feltétlenül felelnek meg. Ennek következtében nem hordoznak további meteorológiai jelet, csak zajt. Ezért is indokolt munkánk során az inicializáció alkalmazása, vizsgálata.

Az inicializáció lehet statikus vagy dinamikus. Statikus esetben a nagyfrekvenciás rezgések kezdeti amplitúdójára és annak tendenciájára szabunk ki feltételt (pl. legyen nulla, [7]). Dinamikai inicializációnál a nagyfrekvenciás rezgések időbeli integrálások során szűnnek meg.

Ennek oka lehet a szelektív csillapítás (pl. spin-up inicializáció⁹, [3, 189. oldal]) vagy egy digitális szűrő használata (digitális szűrő inicializáció).

6.2.1. Digitális szűrő inicializáció

Tehát a dinamikai inicializáció egyik típusa a digitális szűrő inicializáció (Digital Filter Initialization, DFI), melynek során a meteorológiai mezőkből időbeli Fourier sorokat állítunk elő, majd ezekből levágjuk a nagyfrekvenciás hullámokat. [3, 195. oldal]

Az adott meteorológiai mező ($u(t)$) időbeli integrálását T_{-M} és T_{+M} között végezve minden időlépésre kapunk egy értéket (u_n), melyek súlyozott átlaga adja a kívánt kezdeti értéket:

$$u^*(0) = \sum_{n=-M}^{+M} h_n u_n$$

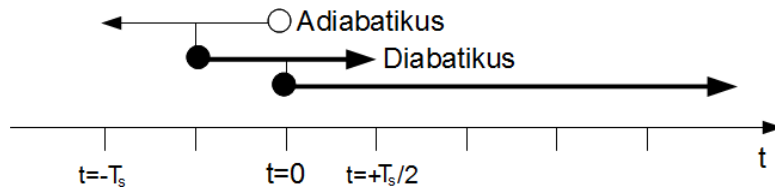
A súlyokat (h_n) oly módon választjuk meg, hogy a nagyfrekvenciás módusok amplitúdója minimális legyen. Különböző szűrőknél különböző súlyokat alkalmazunk.

Adott Δt időlépcső és ω frekvencia esetében az ún. digitális frekvencia [7]:

$$\Theta = \omega \Delta t = \frac{2\pi \Delta t}{\tau}$$

Ahol τ az adott frekvenciához tartozó periódusidő. A nagyfrekvenciás rezgések digitális frekvenciája Θ_s és π közé esik. A Θ_s -hez tartozó periódusidőt (τ_s) levágási periódusidőnek nevezzük.

A szűrés megvalósítása többféleképpen lehetséges. Lynch 1997-ben [8] a 3. ábrán szemléltetett módszert javasolta:



3. ábra. Kétszeres DFI séma

Ennek során két integrálással jutunk a szűrt állapothoz, mindkétyszer használva a szűrőt. Először $t = 0$ és $t = -T_s$ között egy időben visszafelé történő száraz adiabatikus integrálással egy $t = -T_s/2$ időpontra vonatkozó szűrt mezőhöz jutunk. Ebből kiindulva $t = +T_s/2$ -ig integrálva – diabaticusan, a modell teljes fizikáját használva – adódik a végleges szűrt mező a $t = 0$ időpontra, amiből az előrejelzést indíthatjuk.

⁹A modell futtatását korábbi időponttól kezdve végezzük. Így a szelektív csillapítás miatt a megfigyelni kívánt időpontban már kiegyensúlyozott, zajmentes mezőket kapunk.

Munkánk során mindkét modell inicializálásánál ezt a sémát alkalmaztuk: a WRF-nél „Twice DFI”, a CHAPEAU-nál „Backward+Forward DFI” néven hivatkoznak rá (4. táblázat).

Az inicializációról bővebb leírás található Csigó István diplomamunkájában [7], Kalnay könyvében [3] valamint Lynch és Huang cikkeiben ([8], [9], [10]).

6.2.2. A futások jellemzői

Munkánk során öt modellfuttatást vizsgáltunk, melyek a következők:

1. 24 órás inicializálatlan CHAPEAU
2. 24 órás inicializálatlan WRF
3. 24 órás inicializált CHAPEAU
4. 24 órás inicializált WRF
5. 36 órás inicializálatlan WRF (Spin-up inicializáció)

Mindegyiket 2010. július 1. 00 UTC-től indítottuk, kivéve az 5-öst, melyet az előző nap delétől.

A modellek inicializációs beállításait a 4. táblázat tartalmazza.

4. táblázat. Inicializációs beállítások. Δt – időlépcső, T_s – időablak, τ_s – levágási periódusidő

	CHAPEAU	WRF
séma	Backward+Forward DFI	Twice DFI
szűrő	Dolph-Csebisev	Dolph
Δt [s]	300 (szemi-Lagrange)	40 (euler-i)
T_s [perc]	130	30
τ_s [s]	10800	3600

6.2.3. A zaj paraméterek

A modellekben megjelenő zajokat különböző zaj paraméterekkel mutathatjuk ki. Az inicializált és az inicializálatlan futások adataiból számolt paraméterek összevetésével pedig az inicializáció hatékonysága szemléltethető.

Lynch és Huang [9, 589. oldal] a következő paramétert használták:

$$N_1 = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| \frac{\partial p_s}{\partial t} \right|_{ij} \quad (1)$$

Ahol I, J a rácsszám x illetve y irányban, i, j az adott rácscella indexe, p_s pedig a felszíni légnyomás.

Tehát a felszíni légnyomás tendencia ($hPa/3h$) abszolútértékét kiátlagolták az egész tartományra. Ezt a mennyiséget a modellfutás első hat órájára kiszámolták és ábrázolták. Ehhez hasonlóan jártunk el mi is, azzal a különbséggel, hogy a tengerszinti légnyomástendenciát használtuk. Ugyanis a két modellben a felszín tengerszint feletti magassága eltér – főként a magasabb hegyek környékén, ezért a felszíni légnyomás nem ugyanarra a szintre vonatkozik.

Ezzel a paraméterrel azért jellemezhetjük a zajt, mert ha jelen vannak gravitációs hullámok, a fentihez hasonló módon kiátlagolt légnyomás időbeli menete zajos lesz. Ez azt jelenti, hogy gyorsan változik a légnyomás, nagy a légnyomás-tendencia, tehát N_1 értéke is nagy. Viszont a légnyomás-tendencia nem csak a zaj, hanem például egy hidegfront áthaladása miatt is vehet fel nagy értéket. Ilyen helyzetben N_1 nem a legmegfelelőbb a zaj jellemzésére.

Lynch egy későbbi cikkében [8, 659. oldal] egy általánosabb zaj paramétert alkalmazott:

$$N_2 = \frac{1}{IJK} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left| \sum_{k=1}^K \nabla \mathbf{v} \right|_{ijk} \quad (2)$$

Ahol I, J, i, j jelentése hasonló, mint N_1 esetében, K a vertikális szintek száma, k az aktuális vertikális szint indexe, $\mathbf{v}$ pedig a horizontális sebesség-vektor.

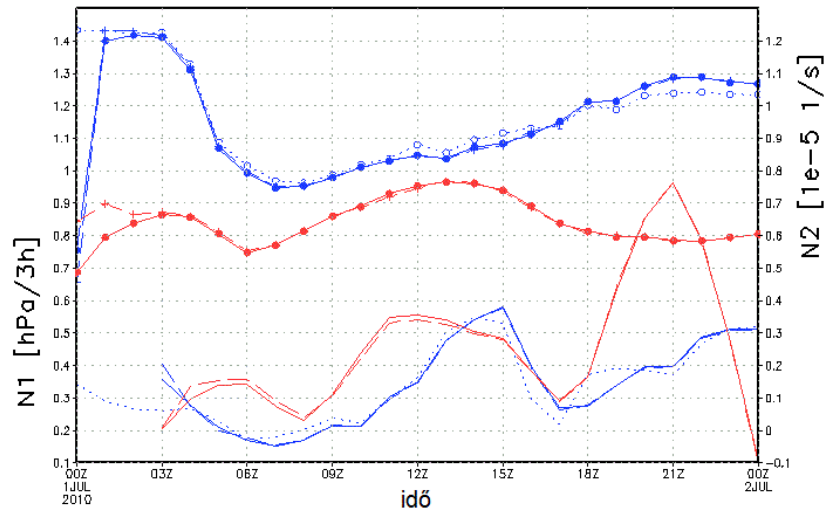
N_2 a horizontális divergencia átlaga (s^{-1}). A gravitációs mozgás jellemzője, hogy a horizontális divergencia relatív nagy értéket vesz fel ([7], [3, 186. oldal]). Tehát ennek a paraméternek nagysága gravitációs hullámok jelenlétére utalhat. Mivel ez a mennyiség az egész modelltérre vonatkozik, jobban jellemzi a zajt, mint a korábban ismertetett paraméter.

A paramétereket a modellfutások végén keletkezett adatokból¹⁰ egy GrADS script segítségével számítottuk ki.

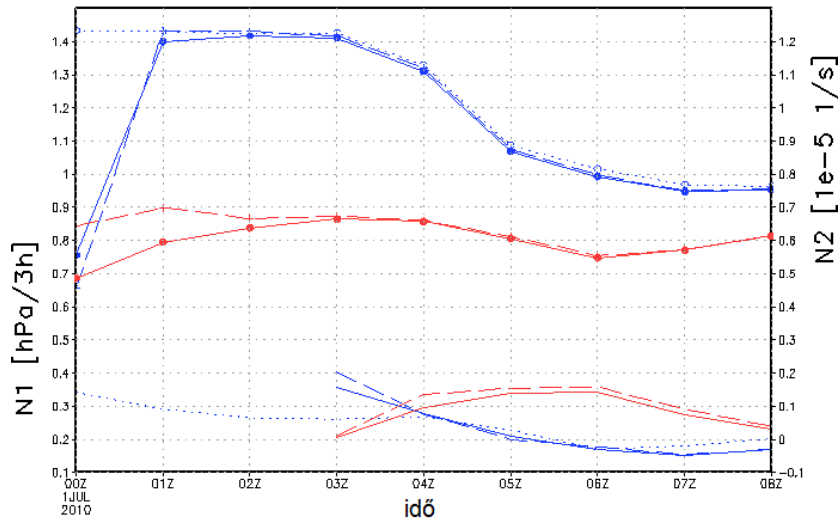
A kétféle paramétert egy grafikonon ábrázolva a 4. ábrán látható eredményt kaptuk. Az N_1 -t csak a harmadik órától számoltuk ki.

Az inicializáció hatása leginkább az első néhány órában jelentős, ezért az 5. ábrán részletesebben bemutatjuk az első nyolc órát.

¹⁰Csak óránként kaptunk adatokat.



4. ábra. A paraméterek menete. Folytonos vonal: inicializált, Nem folytonos: nem inicializált, Pontozott vonal: 36 órás WRF, Kék: WRF, Piros: CHAPEAU, Csak vonal: N_1 , Vonal+jelölők: N_2



5. ábra. A paraméterek menete az első nyolc órában. Folytonos vonal: inicializált, Nem folytonos: nem inicializált, Pontozott vonal: 36 órás WRF, Kék: WRF, Piros: CHAPEAU, Csak vonal: N_1 , Vonal+jelölők: N_2

Mindkét paraméter esetében megfigyelhető, hogy kezdetben az inicializálatlan futások (nem folytonos vonalak) zaja nagyobb. Az egyik szembevető jelenség a divergenciás görbék kezdeti megugrása a WRF esetében, ami annak a következménye, hogy az analízismezőben nincs jelen túl nagy divergencia.

Mindkét modellnél jól látszik, hogy a kétféle futás görbéi az idő teltével egymásba simulnak, tehát az inicializációnak csak az első órákban volt jelentősége.

Mivel a kezdeti zaj szintjénél magasabb értékek is előfordulnak a későbbi órákban, azt

mondhatjuk, hogy hosszútávon ezek a paraméterek nem csak a zajra érzékenyek, hanem az időjárási események is hatással vannak rájuk. A vizsgált napon főleg az ország középső részén konvekció következtében helyi jellegű zivatarok alakultak ki, helyenként viharos szellőkészekkel, ami így (4. ábra) befolyásolta a paraméterek alakulását.

A fél nappal korábban indított WRF futás július 1-e éjfélkor már egyensúlyban volt. Abban az időpontban ennek a 36 órás futásnak N_2 görbéje viszont inkább az inicializálatlan 24 óráshoz illeszkedik jobban (5. ábra). Ez azt jelenti, hogy a digitális szűrő inicializáció elrontotta az előrejelzést: nem csak zajt szűrt ki, hanem meteorológiai jelet is.

A tengerszinti légnyomástendencia menete 03 UTC és 06 UTC között ellentétesen változik a két modell esetében, ami arra utalhat, hogy eltérnek egymástól az előrejelzett mezők. Hasonló eltérés figyelhető meg N_2 menetében is, 14 UTC-től kezdődően (4. ábra). 21 UTC-kor a CHAPEAU átlagos nyomástendenciája megnőtt, míg a WRF-nél nem látható akkora maximum. Emellett a CHAPEAU átlagos horizontális divergenciája a megfigyelt időszak egészében kisebb a WRF-énél.

6.3. Esettanulmányok – Salavec Péter

A rendszer alkalmazása során néhány konkrét esettanulmány kerül bemutatásra. Ezen esetek az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársai által javasolt időjárási helyzetek közül kerültek kiválasztásra, mégpedig a 2010. év nyarán történt, heves konvekcióval járó néhány eseményt mutatunk be.

A feldolgozás során teszteltük, hogy a rendszer alkalmas-e a két modell (a CHAPEAU és a WRF) összehasonlító vizsgálatának elvégzésére. Attól függően, hogy a modelleket milyen szempontok alapján szeretnénk összehasonlítani, a modellkimenetek megjelenítésére több módszert alkalmazhatunk. Az inicializáció esetében a zajparaméterek időbeli diagramját állítottuk elő, hogy lássuk, hogyan konvergálnak egymáshoz.

A következőkben nedvességi karakterisztikák (kihullható víz, 0-3 km átlagos relatív páratartalom) értékeinek térbeli alakulását ábrázoltuk. Általánosságban igaz, hogy ez a két nedvességi karakterisztika ott vesz fel magas értékeket, ahol csapadék hullik. Ezen kívül a kihullható víz mennyiségéből a konvektív csapadék intenzitására is lehet következtetni. Egy-egy zivatarlánc esetében a csapadérendszer helyén a környezetéhez képest jóval magasabb értékek jelennek meg, így ha térképen jelenítjük meg a két paramétert, kirajzolódik, hogy hol várható zivatarrendszer kialakulása az adott időlépcsőben. Végigpörgetve az időlépcsőket, a zivatarrendszer haladása is követhetővé válik.

A két modell összehasonlítása során ebben az esetben azt tudjuk nyomon követni, hogy egy-egy időlépcsőben a környezeténél nedvesebb terület tekintetében milyen különbségek mutatkoznak. Ugyanoda adja-e a két modell a nedves területet? Ha nem, mekkora az eltérés? Konkrétan mekkora értékeket ad a két modell a legnedvesebb területre? Mekkora ebben a különbség? Ilyen kérdésekre keressük a választ. Ez a módszer alkalmas továbbá arra is, hogy a kimenetet később a mérésekkel összevessük (valóban a modellek által nedvesnek mu-

tatott területeken jelentek-e meg a zivatarok), s ezáltal egy újabb szempont szerint összehasonlíthatjuk a modelleket (melyik járt közelebb a valósághoz). Ily módon alkalmas lehet a rendszer verifikációk elkészítésére is. Ezen kívül hasonló módszerekkel láthatóbbá tehetünk rejtett hiányosságokat is, melyek hozzájárulnak a modellek fejlesztéséhez.

A vizsgált esetek az OMSz honlapján is jól dokumentálva vannak ([11], [12], [III]). A Szolgálat munkatársai az ezen esetekre történő ALADIN/CHAPEAU modellfuttatásokhoz szükséges bemenő adatokat rendelkezésünkre bocsátották, így lehetőségünk nyílt elvégezni a futtatásokat. Ezek a futtatások egy naposak, vagyis a vizsgált nap 00 UTC-től 24 UTC-ig tartanak.

Elsőként a 2010.08.16-ai tornádós helyzet elemzését hajtottuk végre, mert hazánkban ritkán fordul elő, hogy mezociklonális tornádók kialakulásához hasonlóan kedvező feltételek alakuljanak ki. Mivel ezen esetben a WRF és a CHAPEAU modell eltérő kimenetet adott, ezért kiválasztottunk néhány további esetet is, melyek az esemény időpontja szerinti sorrendben kerülnek bemutatásra.

6.3.1. Tornádós helyzet Magyarországon 2010. 08. 16-án

2010. augusztus 16-án egy, Magyarországtól nyugatra elhelyezkedő lassan mozgó frontrendszer, és egy északnyugatra lévő magassági hidegörvény alakította hazánk időjárását. Már a délelőtti órákban egy meleg nedves szállítószalag helyezkedett el a Dunántúl fölött, amely mentén délelőtt már kialakultak zivatarok. Ezek eleinte nem tudtak heves zivatarrá fejlődni. Kora délután középszinten nyugat felől egy erős divergens zóna érte el a térséget. Emellett az idő előrehaladtával növekedett a labilitás is. Ennek köszönhetően a zivatarok kora délután vonalba rendeződtek és kelet, északkelet felé indultak. Az így kialakult zivatarlánc, valamint az előterében kialakult izolált szupercellák elsősorban a délután második felében okoztak heves eseményeket az északkeleti országrészben, Hevesben, Borsodban, Zemplénben és a Nyírségben. [12]

A légkörben uralkodó áramlási és labilitási viszonyok hazánkban szokatlanul jó esélyt teremtettek mezociklonális tornádók kialakulásának. A zivatarlánc kora délutáni összeállása során annak északi végén, a Dunakanyar térségében alakult ki az első szupercella. Ez gyorsan északkelet felé haladt, s ebből a zivatarcellából máris kialakult egy tornádó. A tölcser Királyréten mellett ért földet először, majd Nógrád közvetlen közelében haladt el. A pusztítás nyoma Diósjenő-üdülőtelepen keresztülhaladva csaknem Borsosberényig követhető volt a szántóföldeken is, vagyis mintegy 7-8 km-t tett meg a tornádó [13]. A cellából Királyréten 4, Diósjenőn 5-6 cm nagyságú jég esett.

Ezután kis szünet következett, a zivatarlánc kelet felé haladva szignifikáns heves eseményeket csak az északkeleti országrészben produkált. Mezőkövesd térségében F2-es tornádó alakult ki. Ez a börzsönyinél erősebb volt, egy beton-villanyoszlopot is kettétört. [12] Nem sokkal később Edelénytől északra újabb, az előzőeknél gyengébb tornádó is kialakult. Emellett számos tubáról érkezett észlelés.

Kora este az Alföld déli részére Szerbiából egy másik zivatarlánc is belépett, s később

északkelet felé történő mozgása során hozzákapcsolódott a másik squall line déli végéhez. A rendszer késő este hagyta el az országot. Mögötte átmenetileg stabilizálódott a levegő, újabb zivatar nem alakult ki.

Modelleredmények

A kiválasztott esetek feldolgozásra kerültek az ALADIN/CHAPEAU és a WRF modellel, a két modellt közösen futtató rendszer használatával. Az elemzés során több fontos paramétert vizsgáltunk. Ezek közül kiemelten fontos a nedvességi viszonyok vizsgálata. A nedvességi és a hőmérsékleti rétegződésből (és ezzel együtt a belőlük származtatható labilitási paraméterekből) ugyanis a zivatarok több tulajdonságára is következtethetünk.

Jelen esetünkben a két modell kissé eltérő eredményt adott. A CHAPEAU az átlagos relatív páratartalmat és a kihullható vizet egyaránt magasabbnak becsülte, mint a WRF. Különösen szembetűnő a különbség a hajnali órákban (6. ábra, fent a CHAPEAU, lent a WRF).

A későbbi időpontokban a különbség kissé ugyan csökken, de így is jelentős marad. (7. ábra)

A nedves terület nyugati határa az esti órákban érdekesen alakul. A 0-3 km átlagos nedvesség esetében a délután második felében éles határvonal figyelhető meg a száraz és nedves terület között a WRF-ben. A CHAPEAU kimenetében ez az éles határvonal csak este jelenik meg, jóval keletebbre. Ugyanakkor a kihullható vizet figyelve éppen az ellenkezője történik: a CHAPEAU-ban késő délután a Tisza vonalában jelenik meg az éles határvonal, míg a WRF esetében ebben a mezőben jóval elnyújtottabb az átmenet.

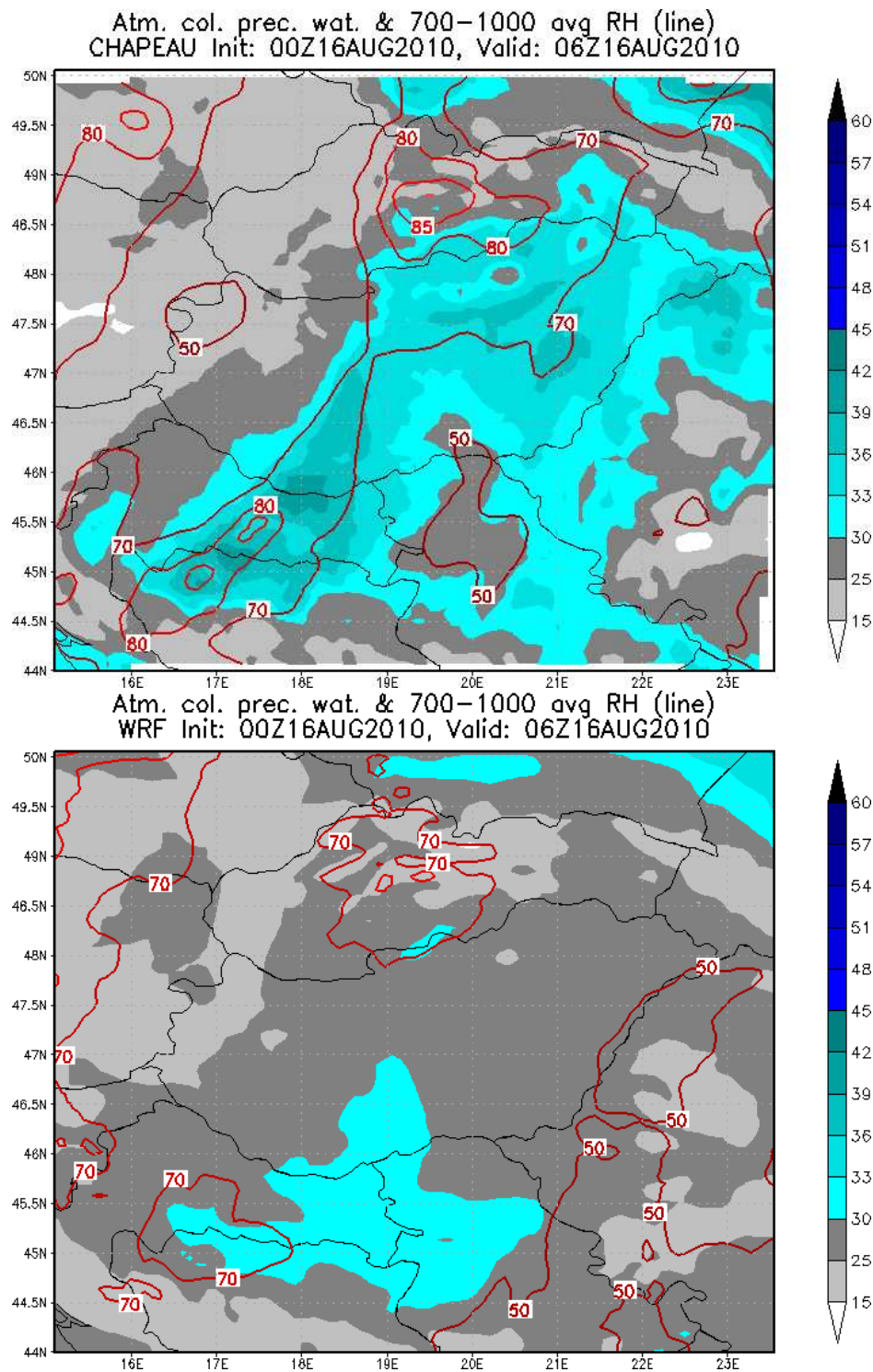
Az ilyen különbségek megjelenésének két oka van. Elsődlegesen a két modell különböző működése is okozhat eltérést. Szembetűnőbb azonban, hogy a két modell által kezdeti feltételként használt két globálmodell (a WRF-nél a GFS, a CHAPEAU-nál az IFS) kimenet eleve különbözik.

Érdekessége ennek az esetnek, hogy bár a két modell látszólag jelentősen eltérő kimenetet adott, mindkettő viszonylag nagy pontossággal eltalálta az eseményeket, a valóság a két kimenet közé esett. Ennek köszönhetően előrejelzői szempontból az év legsikeresebb előrejelzései születtek, néhány aznap reggeli szöveges előrejelzés fél óra pontossággal eltalálta az események alakulását.

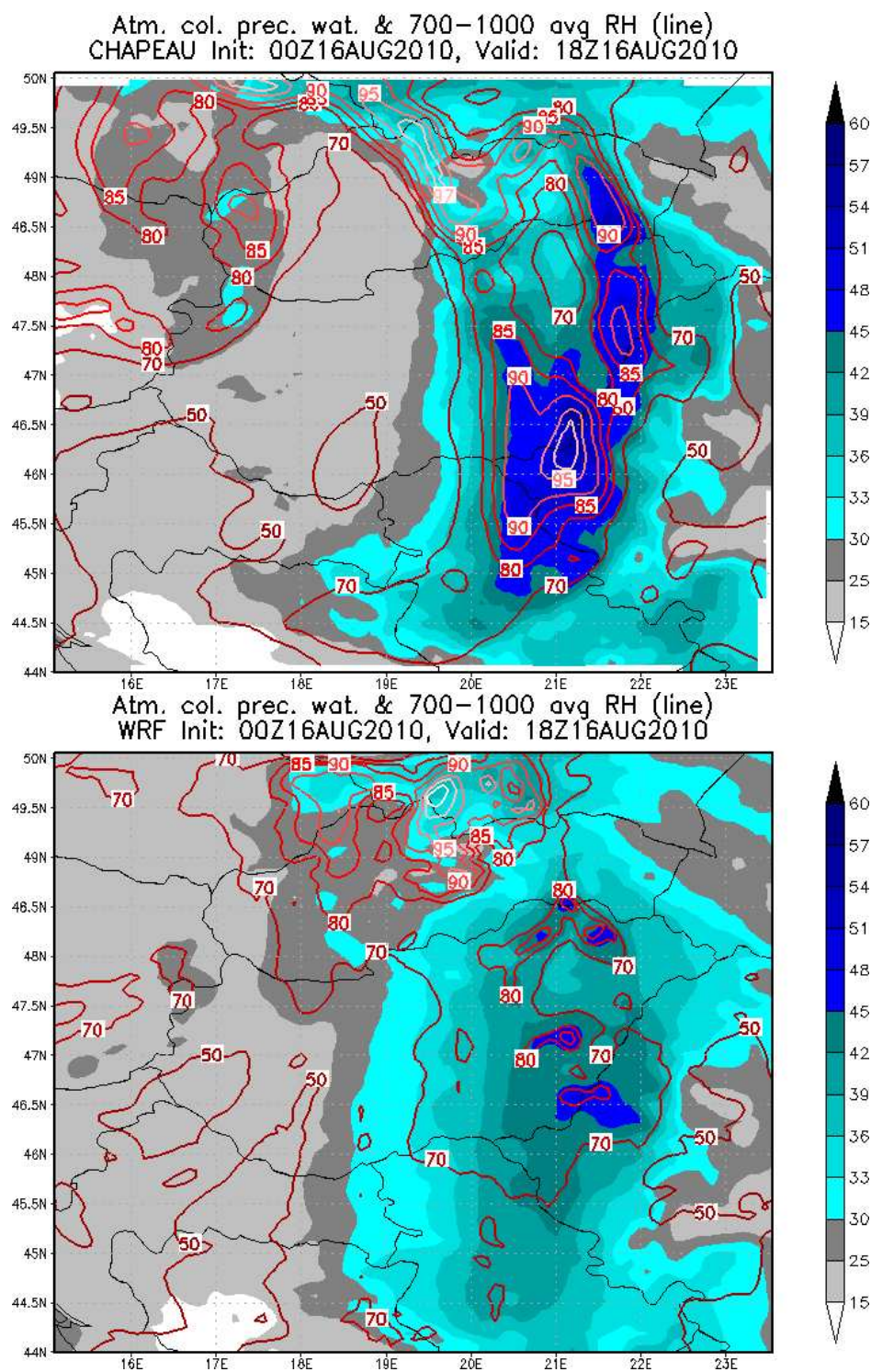
6.3.2. Pusztító zivatarok 2010. 06. 18-án [11]

Az előző eset vizsgálatakor a két modell tehát némileg eltérő eredményt adott, ezért az OMSz által javasolt esetek közül kiválasztottunk még néhányat.

2010. június 18-án hazánktól nyugatra egy magassági hidegörvény helyezkedett el, mely alatt a talajon egy hosszan kelet felé elnyúló okklúziós frontot lehetett analizálni. Ennek délkeleti oldalán dél felől alacsony szinten meleg levegő áramlott a Kárpát-medencébe. Ezzel



6. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 08. 16-án 06 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja



7. ábra. Kihullható víz és 0–3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 08. 16-án 18 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja

egyidőben a magasban nyugat felől hidegadvekción zajlott. A helyzet már egy ideje fennállt, így az előző napokban is alakultak már ki heves zivatarok. 18-án kora hajnalban még az előző napon kialakult konvektív rendszer feloszló maradványa vonult északkelet felé a főváros térségében, amikor Szlovéniában és Horvátországban már alakultak az újabb rendszer zivatarcellái. Ennek első tagjai 03 UTC körül léptek be az országba a délnyugati határ mentén. Ezután gyorsan pattantak ki újabb zivatarok a Dunántúlon, elsősorban annak déli és középső tájain, majd 05 UTC-től vonalba rendeződtek és kelet, északkelet felé haladtak. [11]

Fontos előzménye az eseményeknek, hogy a hónap elején, illetve május közepén Angéla és Zsófia ciklonok igen nagy mennyiségű csapadékot okoztak Magyarország területén. Ennek köszönhetően főleg a sík vidékeken, különösen az Alföldön igen nagy területeket borított belvíz. Emiatt az alsó légkörben igen nagy páratartalom tudott kialakulni, ami a dél felől besodródó meleg levegővel együtt extrém labilitást hozott létre. Így dél körül, amikor a zivatarlánc déli ága a Dél-Alföld fölé ért, szupercellák alakultak ki rajta. Ezen szupercellák egyike okozta a híradásokból is ismert mezőhegyesi nagy káreseményt.

A reggeli órákban kialakuló zivatarlánc északi és középső szakaszán kevesebb heves esemény volt, itt nem alakultak ki a dél-alföldihez hasonló erős szupercellák. 11 UTC körül azonban átmenetileg megerősödött a zivatarlánc északi vége. Ekkor körülbelül a Zólyom-Hatvan vonal térségében sok helyen, többek között Balassagyarmaton észleltek heves felhőszakadást.

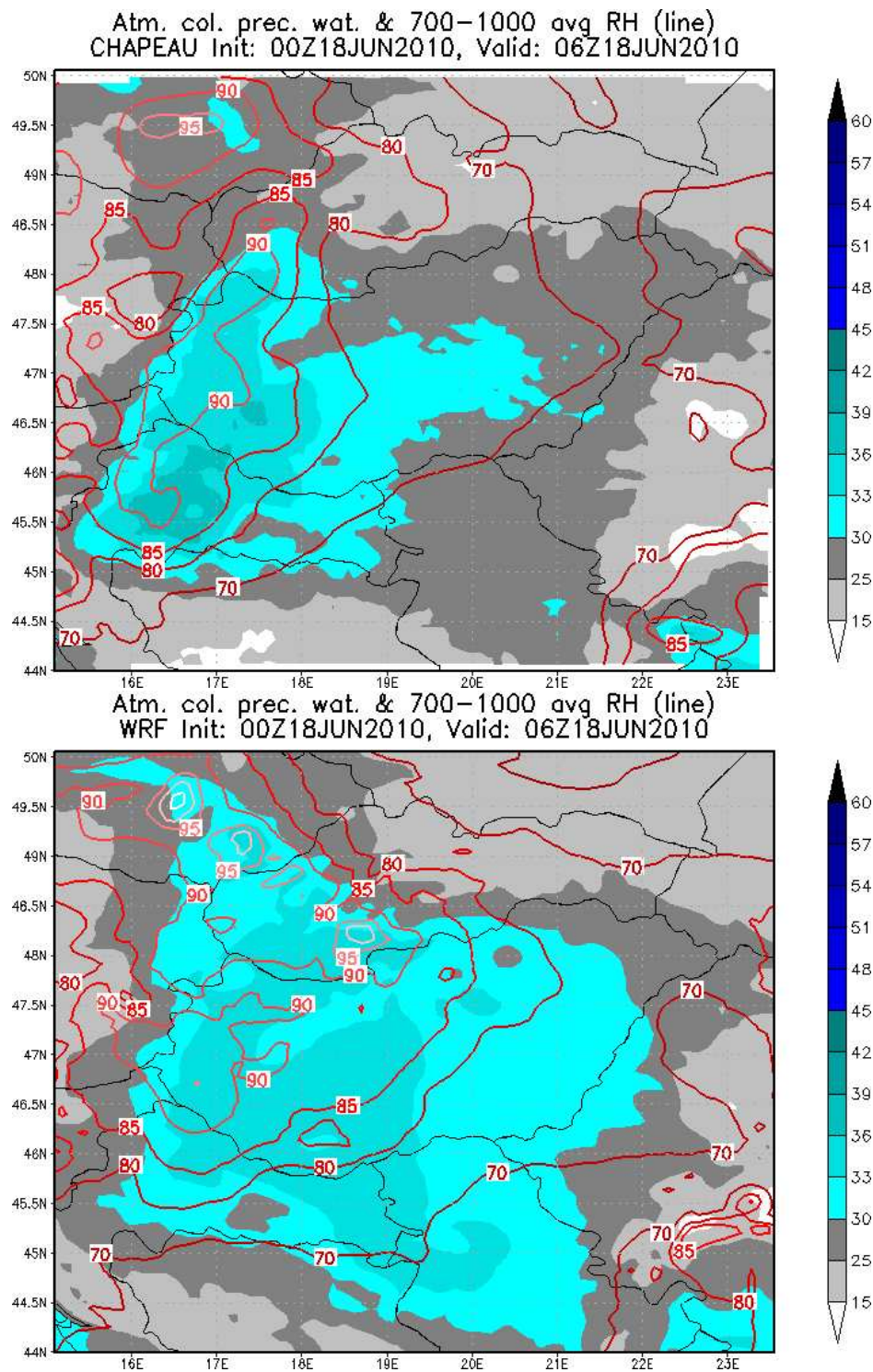
A zivatarlánc mögött nyugat felől felszakadozott a felhőzet. Ennek köszönhetően a Dunántúlon, majd a Duna-Tisza közén újra labilizálódott a levegő, és délután, este többfelé alakultak ki újabb záporok, zivatarok. Ezek már nem rendeződtek vonalba, de a délelőttihez hasonlóan heves zivatarok illetve szupercellák ekkor is előfordultak. Lassabb mozgásuk miatt ezek a cellák helyenként rövid idő alatt lokálisan nagy csapadékot okoztak, Kiskunmajsán "kb. 2 óra alatt közel 60 mm eső hullott le" [11]. A légkört az esti órákban érkező hidegfront stabilizálta.

Modelleredmények

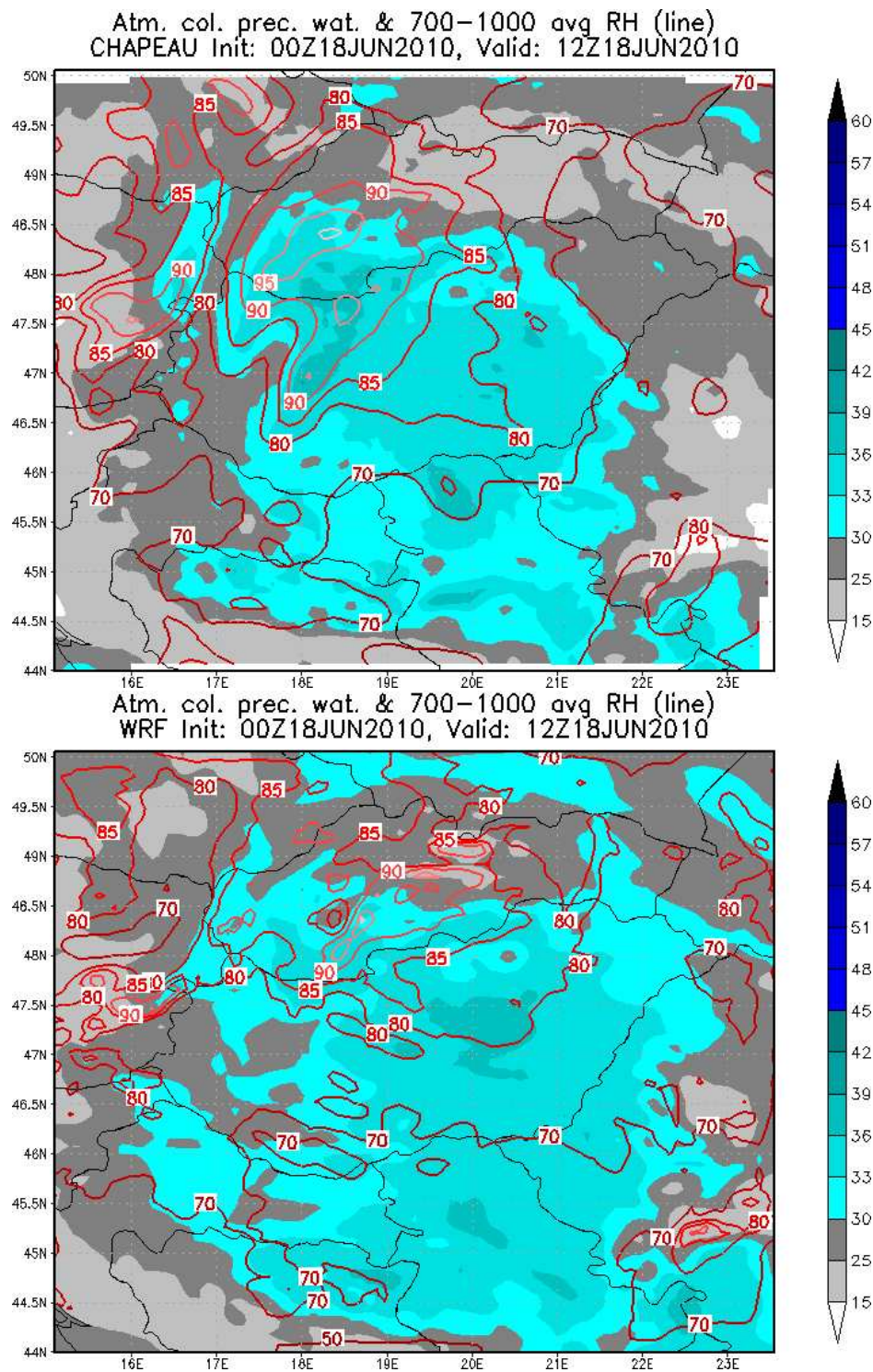
Érdemes összevetni ebben az esetben is a futtatott ALADIN/CHAPEAU és WRF modellkimeneteket. A hajnali órákban ezúttal a WRF kimenetében jelenik meg nagyobb kihullható víz és nedvesség is. Fontos különbség, hogy a WRF szerint 06 UTC-re már nagy területen jelenik meg magas nedvességtartalom, a CHAPEAU szerint viszont ekkor még a nedves területek jórésze Horvátországban és a Nyugat-Dunántúlon marad (8. ábra).

A 0-3 km átlagos relatív páratartalom mezőben mindkét modell kimenetében a délelőtti órákban a Dunántúlon északkelet felé haladó nedves terület jelenik meg, mely 12 UTC-re a Dunántúl és a Duna-Tisza köze északi részén adja a legmagasabb nedvesség értékeket (9. ábra).

A kihullható víz legmagasabb értékei alapján a WRF a rendszer helyzetét keletebbre adta a délutáni órákban, mint a CHAPEAU, illetve a fő eseményekre ez alapján a délutáni órákban



8. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 06. 18-án 06 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja



9. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 06. 18-án 12 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja

számíthattunk. (A legtöbb írott előrejelzés, főleg az amatőr oldalakon ezt követve a délutáni órákban az Északi-középhegységben, a Dunántúl és a Duna-Tisza köze északi részén várta a leghevesebb eseményeket). (10. ábra)

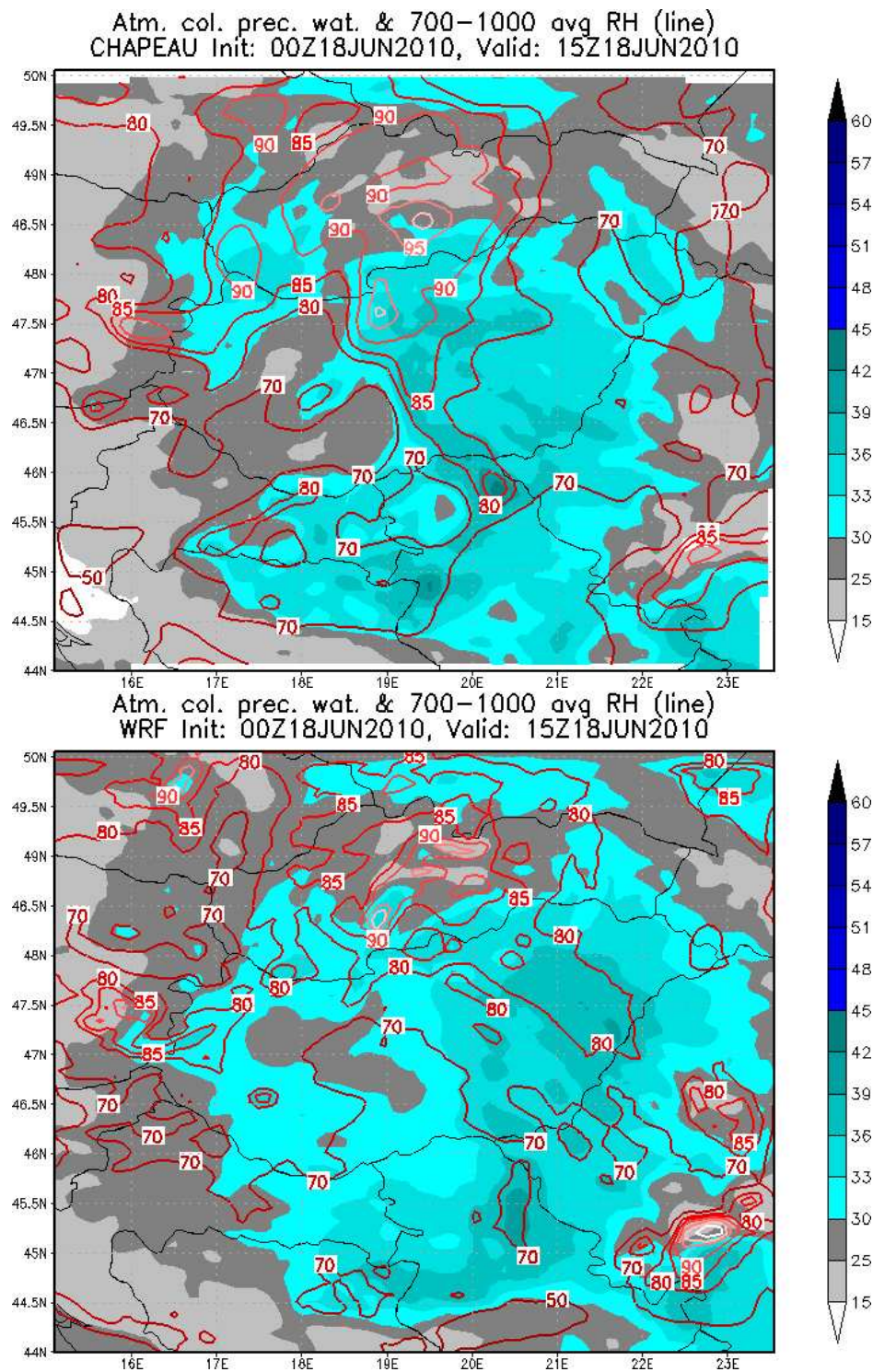
Az, hogy a heves események a vártnál jóval korábban és jóval délebbre történtek, több okra vezethető vissza. A modellek által számoltnál erősebb labilitás következtében már reggel megtörtént a vonalba rendeződés, aminek következtében gyorsan kelet felé vonultak a zivatarok. Másrészt a nagy belvízzel borított területek fölé dél felől érkező levegő a Dél-Alföldön igen extrém labilitást eredményezett. A modellek számoltak ugyan a nagy talajnedvességgel, de valószínűleg ez pontatlanul van parametrizálva. (A nagy belvizes területek inkább úgy viselkednek, mint egy tó, nem úgy mint nedves talaj.) Ez a helyzet a nowcasting-előrejelzőknek is nehéz feladatot adott, ugyanis nagyon későn derült ki, hogy ez a fő esemény, és nem egy azt megelőző gyengébb hullám. Ebben az esetben a két modell között nem jelentkezett olyan jelentős különbség. A fő esemény térbeli helyzetének és időbeli lefolyásának előrejelzése azonban meglehetősen pontatlan volt. Ellenben a front érkezését mindkét modell pontosan előrejelezte, mely a nedvességkarakterisztikákban az északnyugat felől végbemenő kiszáradásként jelenik meg. (11. ábra)

6.3.3. Helyi zivatarok hazánk középső sávjában 2010. 07. 01-én

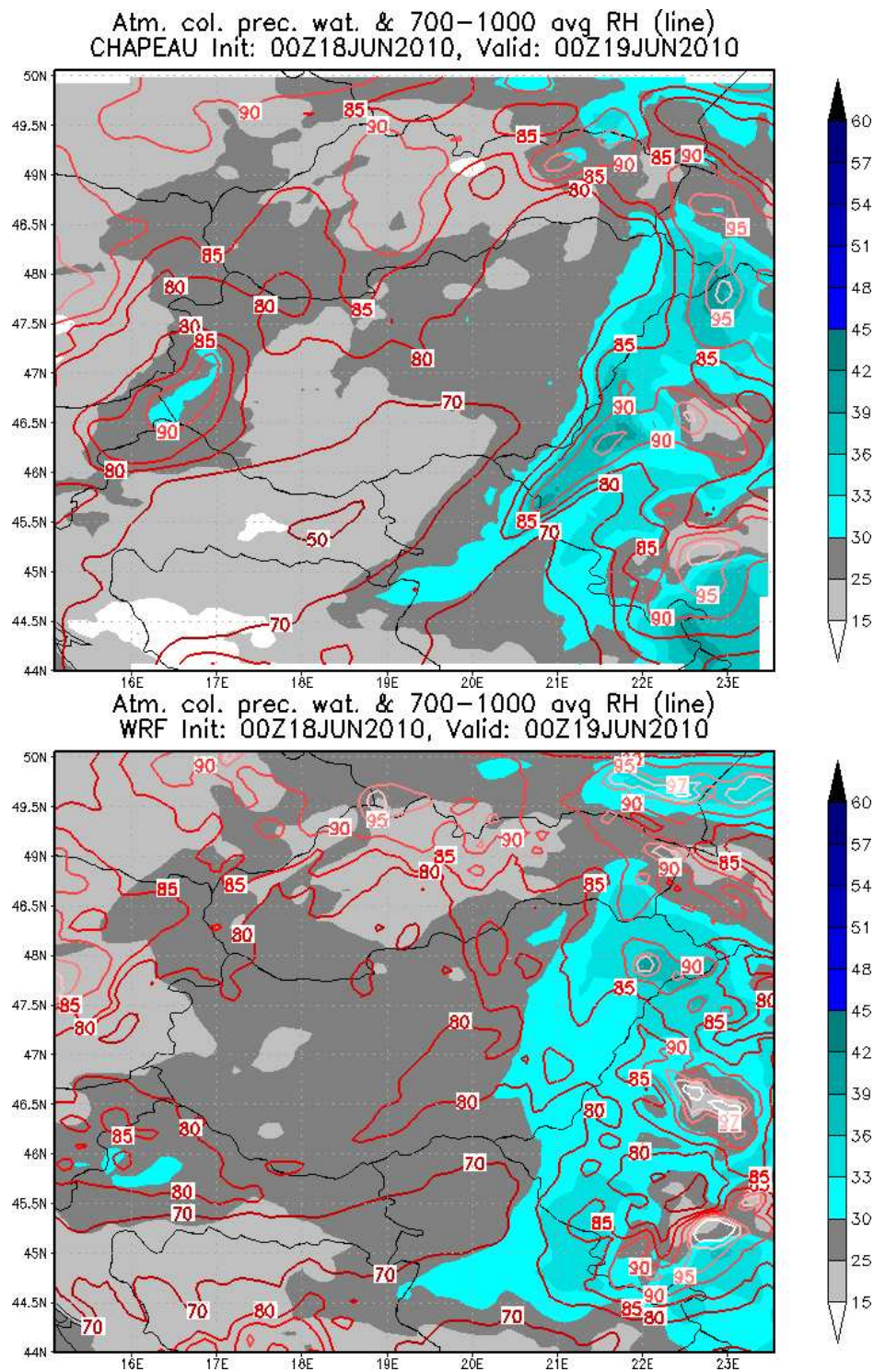
Térségünkben ezen a napon jellegtelen nyomási kép volt a jellemző. A Kárpát-medence időjárását jellemzően helyi hatások alakították. Hazánktól keletre és északra egy-egy hidegörvény helyezkedett el, a kettő közötti magasabb légnyomású terület hatására az ország nyugati felén száraz, nyugodt időjárás volt. Ettől a területtől keletre több kisebb konvergenciazóna alakult ki, melyek mentén a délutáni órákban zivatarok pattantak ki. Először az Északi-középhegységben, majd a délután második felében a Duna-Tisza közén többfelé alakult ki zivatar. Estétől a Tiszántúl déli részén és az Északi-középhegység keleti felében alakultak ki újabb zivatarok, a Duna-Tisza közén stabilizálódott a légkör. E napon szupercellás zivatar lehetősége jelentéktelen volt, heves esemény nem történt.

Modelleredmények

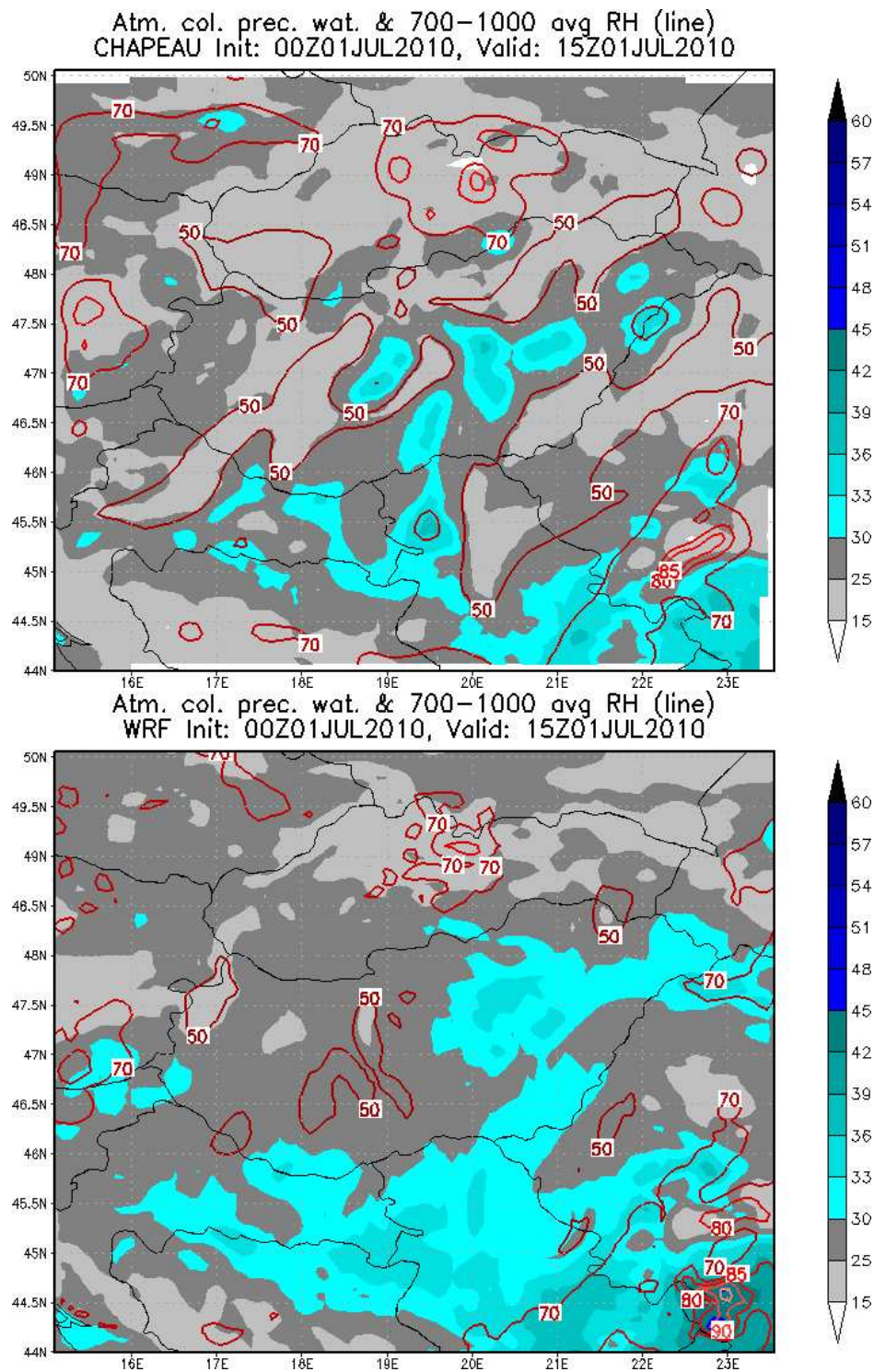
A két modell között ebben az esetben alig mutatkozott eltérés. A kihullható víz általában 30 mm alatt, a Tiszántúlon 30 mm körül alakult. A délutáni órákban mindkét modell szerint kisebb körzetekben a Dunától keletre eső területeken megnövekedett (12. ábra). A zivatarok térbeli és időbeli megjelenése egybeesett a modellek által előrejelzettel, e nap eseményeit tehát a CHAPEAU és a WRF egyaránt sikeresen előrejelezte.



10. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 06. 18-án 15 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja



11. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 06. 19-én 00 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja



12. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 07. 01-én 15 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja

6.3.4. Helyi konvekcióval keletkező heves zivatarok 2010.07.03-án

A Kárpát-medencétől keletre, északkeletre elhelyezkedő hidegcsepp kissé erősödve hazánk keleti része felé közeledett. Az ország keleti tájain a magasban északkelet felől hidegadvekción zajlott, míg alacsony szinten nyugat felől meleg, nedves levegő érkezett a térségbe. A délutáni órákban először a Tiszántúl déli felén és az északi-középhegységben alakultak ki zivatarok. Kora estére az északi országrészben megszűnt a konvekció, ekkor a Tiszántúl és a Duna-Tisza köze volt az események színtere. A Tiszántúl déli felén szerveződött a konvekció, egy zivatarrendszer is kialakult, mely dél felé haladva hamarosan elhagyta az országot. Mindezekon kívül néhány kisebb zivatar kialakult a Dunántúlon és a nyugati határ mentén. A Tiszántúl déli felén a zivatarláncból Csongrád megyéből észleltek heves eseményeket a kora esti órákban.

Modelleredmények

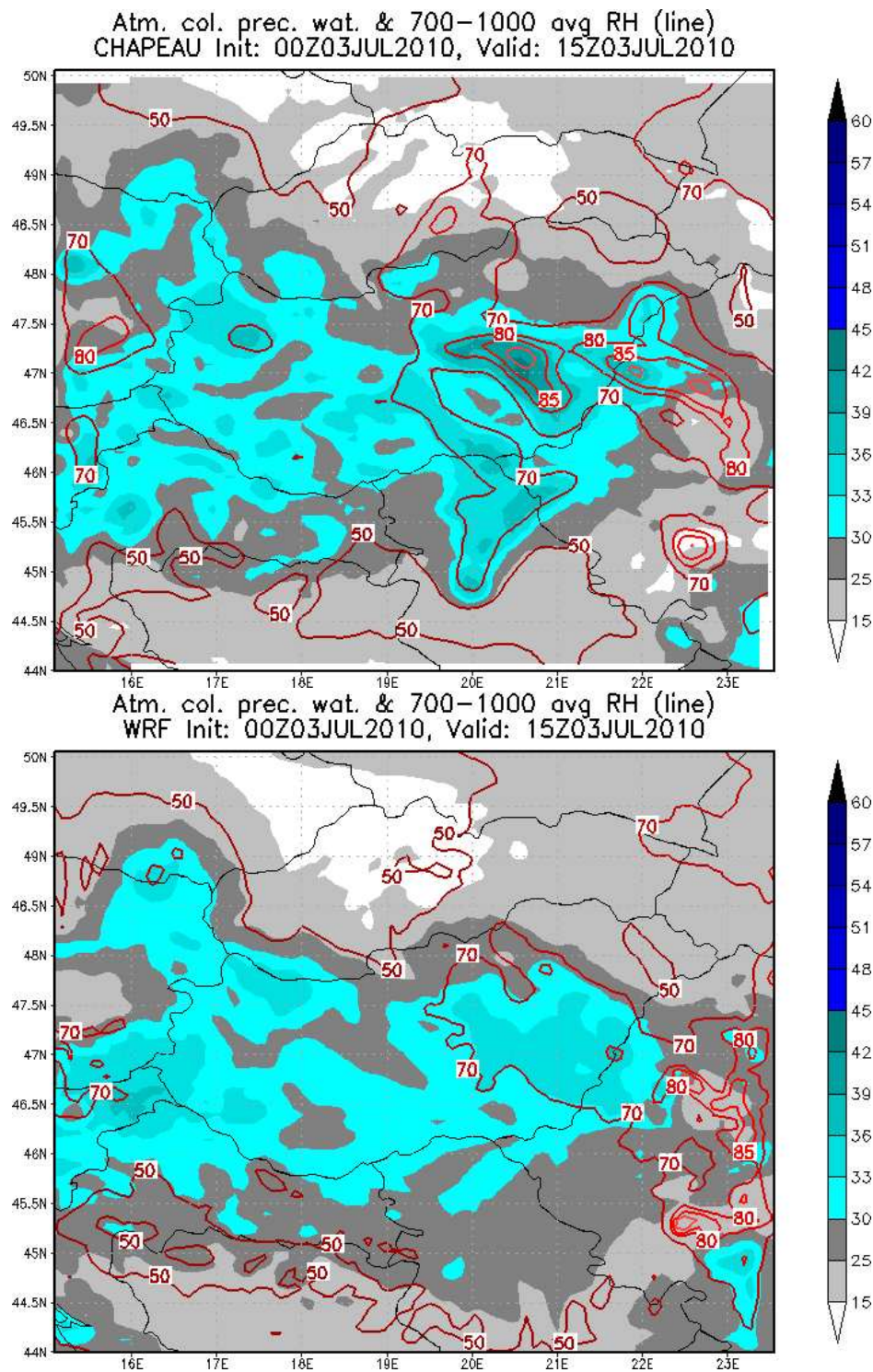
A két modell előrejelzése szerint a nap első felében még nem volt jelentős nedvesség hazánk területén, többnyire 30 mm alatti kihullható vizet és 50-70% közötti 0-3 km-es relatív nedvességet jeleztek. A Dunántúlon nagytérségű divergencia hatására nem várhattunk zivatarokat.

Mindkét modellben kora délután jelenik meg a Tiszántúlon a nedvesebb terület, ekkortól kezdve azonban eltér a két modell kimenete. 15 UTC-re a CHAPEAU egy kisebb területen jelentős, 39-42 mm közötti kihullható vizet prognosztizál, ugyanezen a területen megjelenik a magasabb, 90% körüli 0-3 km-es nedvesség is. A WRF-ből ez hiányzik, nagy területen 36 mm alatt marad a kihullható víz, és 70-80% között a nedvesség. (13. ábra)

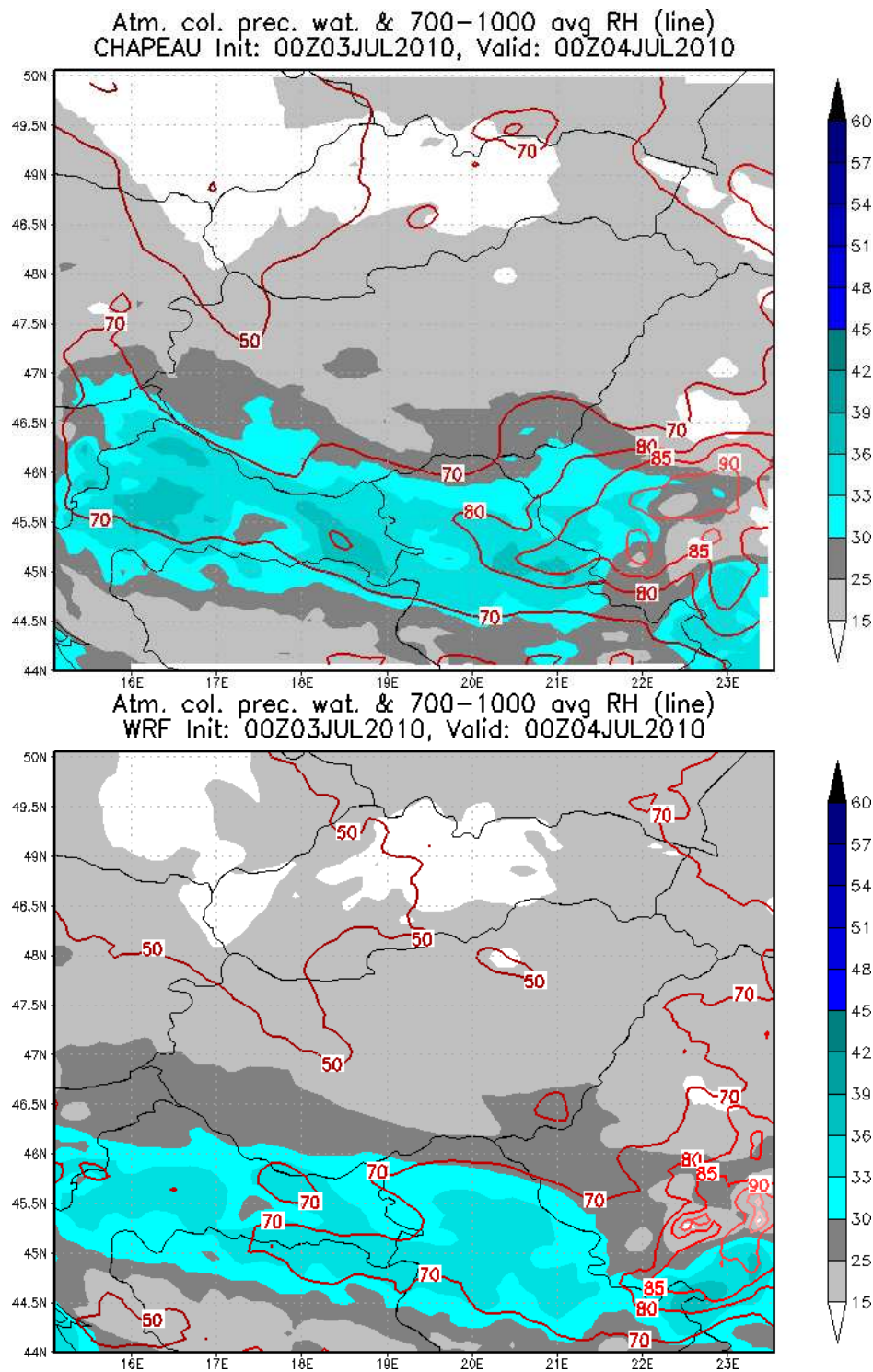
A CHAPEAU kimenetében megjelenő nedves terület idővel dél felé halad. A WRF-nél ez a nedves terület később sem jelenik meg. Ugyanakkor mindkét modell szerint az esti óráktól észak felől kiszárad a levegő, amelynek határa az éjjeli órákban éri el a déli országhatárt (14. ábra). Ami fontosabb különbség, hogy a 0-3 km-es relatív nedvesség nagyobb értékei a WRF esetében a CHAPEAU-hoz képest jóval keletebbre, országhatárainkon kívül jelennek meg. (13. ábra, piros vonalak.)

6.3.5. Éjszakai zivatarlánc a Dél-Dunántúlon 2010.08.05-én

Hazánktól nem messze nyugatra egy hosszan elnyúló hullámzó frontrendszer helyezkedett el, melynek déli ágán ciklogenezis zajlott a Mediterráneumban. A magasban a tőlünk nyugatra eső területeken erős hidegadvekción zajlott. Alacsony szinten azonban a kimélyülő új ciklon előoldalán dél felől meleg, nedves levegő áramlott a térségbe. A meleg nedves szállítószalag csak a kora esti órákra fejlődött ki, akkor alakultak ki az első zivatarcellák Horvátországban és Szlovéniában. Először este egy gyengébb zivatarlánc lépett be a szlovén határon, ez azonban gyorsan szétesett. Mögötte késő este egy kiterjedtebb zivatarrendszer érkezett. Ennek ekkor a keleti vége vonult a Dunántúlon északkelet felé, a főváros térségét és a Börzsöny környékét



13. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 07. 03-án 15 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a satírozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja



14. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 07. 04-én 00 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátirozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja

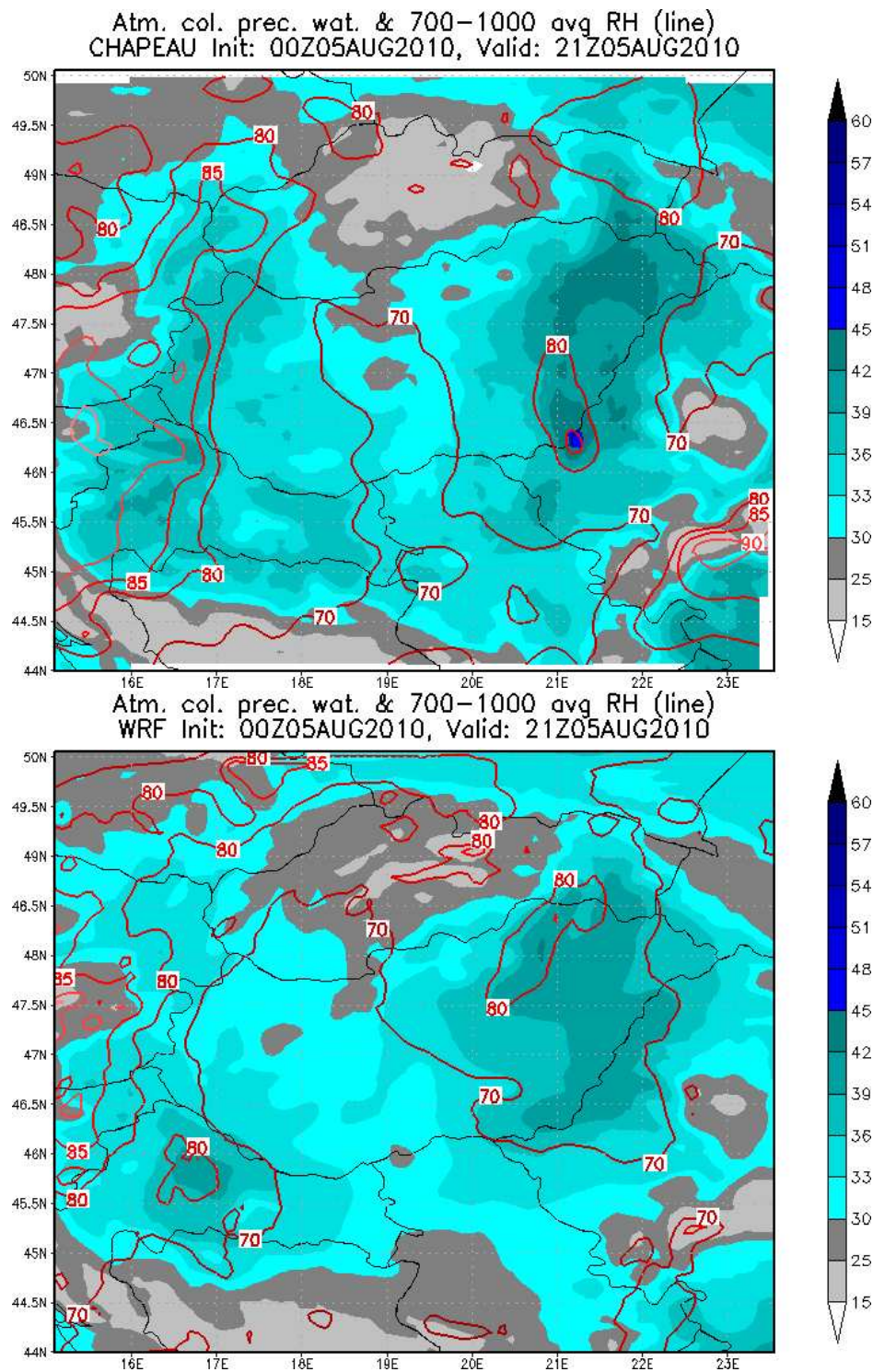
másnap reggel érte el. Ez a zivatarlánc a leghevesebb eseményeket a Balaton és a Bakony térségében, valamint a Kisalföld keleti részén produkálta. A nyugat felől közeledő frontrendszer hatására aztán 08.06-án sokfelé alakultak ki újabb heves események. A Börzsönyben a reggeli zivatart követően kora délután és kora este is átvonult egy-egy heves zivatar. E napon a zivatarokat a lassú cellamozgás, és az egyébként is nagy csapadékintenzitás miatt igen nagy csapadékhozamok jellemezték. Ennek köszönhetően pl. a Börzsönytől keletre lévő Tolmácson mindhárom zivatar után kisebb hirtelen árvíz vonult le a Börzsönyben eredő két patakon.

Modelleredmények

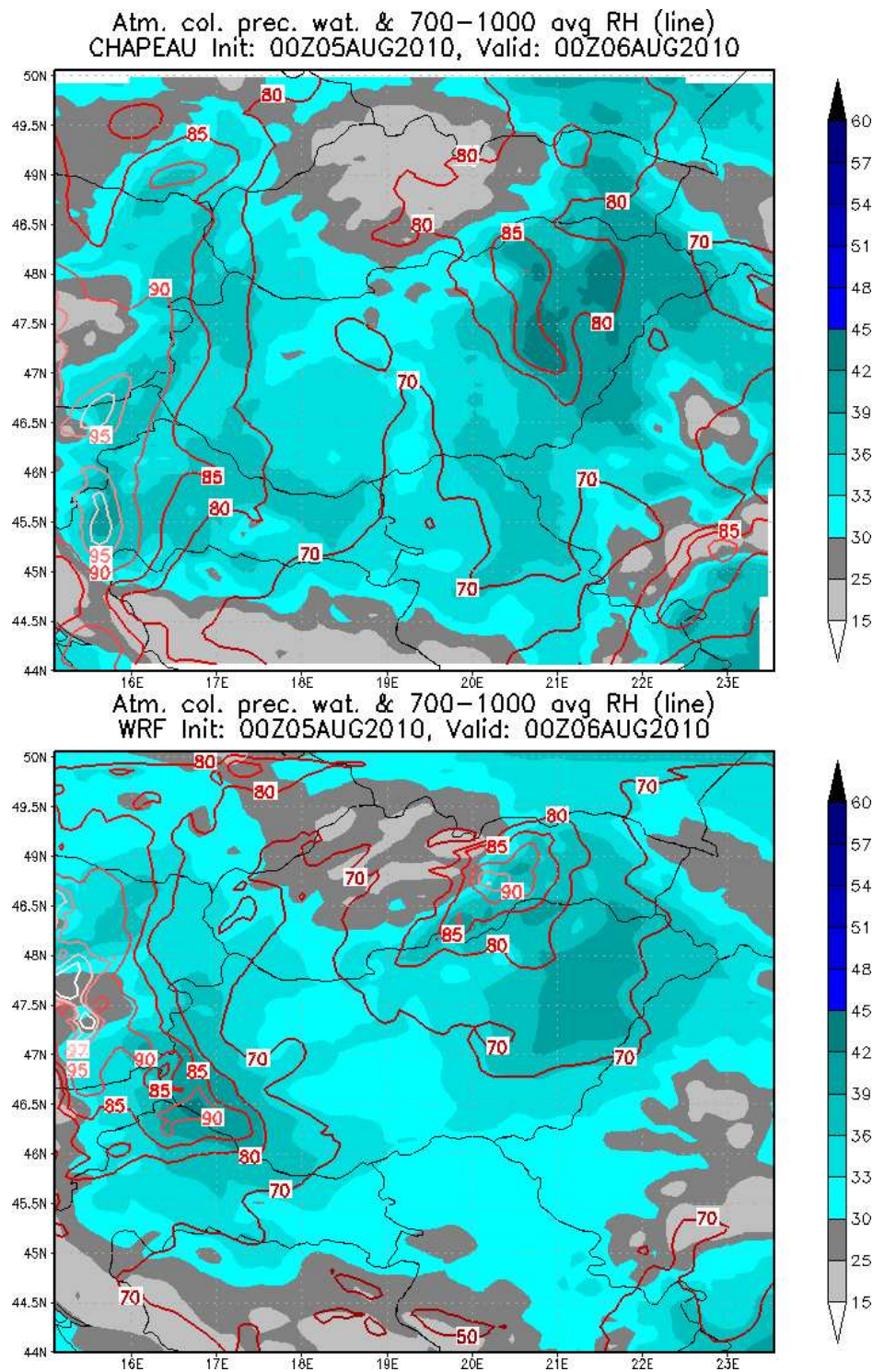
A modellfuttatások a 2010. 08. 05-ei napra vonatkoznak. A nap első felében a Tiszántúlon, majd Erdélyben látszik nagyobb nedvesség, a modellszámítások szerint a Dunántúlon sokáig viszonylag száraz volt a légrétegződés. Utóbbi területen a meleg nedves szállítószalag megjelenésével együtt kezd megjelenni nagyobb nedvesség a délutáni órákban. Késő estére a kihullható víz a WRF szerint Horvátországban már nagyobb területen elérte a 36 mm-t, a CHAPEAU szerint némileg alacsonyabb értékekkel ugyan, de a nedves terület az egész Nyugat-Dunántúlra kiterjedt (15. ábra).

A következő pár órában a nedves terület a WRF szerint észak felé haladt, míg a CHAPEAU inkább a terület nagyságának növekedésével, észak, észak nyugat felé történő terjedéssel számolt. Az utolsó időlépcsőre, 6-a 00 UTC-re jelentős eltérés keletkezett a két modellkimenet között. Míg a WRF-ben a legnagyobb nedvességtartalmú terület Zala megye és a horvát-szlovén hármashatár környéke, addig a CHAPEAU szerint ez Horvátország belső területeire húzódott vissza. (16. ábra)

A zivatarok kialakulása után végbemenő eseményekből arra következtethetünk, hogy ebben az esetben a WRF pontosabban becsülte a kihullható vizet, míg a Dunántúl nyugati részén a CHAPEAU alábecsülte azt. A 0-3 km-es relatív páratartalomban mind a WRF, mind a CHAPEAU kimenetében megjelennek magas értékek. A Dunától keletre eső területeken egész nap meglévő magas kihullható víz értékek másnap, ahogy a meleg nedves szállítószalag oda megérkezett, tovább növekedtek. Ez összhangban áll az azokon a területeken másnap leesett nagy csapadékmennyiségekkel.



15. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 08. 05-én 21 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a satírozás a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja



16. ábra. Kihullható víz és 0-3 km átlagos relatív páratartalom 2010. 08. 06-án 00 UTC-kor az ALADIN/CHAPEAU (fent) és a WRF (lent) előrejelzése szerint. A piros vonal az alsó 3 km-es légréteg átlagos relatív nedvességét, a sátozóság a légoszlopra integrált kihullható vizet mutatja

Összegzés

5. táblázat. Az esetek összefoglalása

Dátum, esemény	Esemény rövid leírása	Modelleredmények (különbségek) összefoglalása
Tornádós helyzet Magyarországon 2010.08.16-án	Kora délután a Dunántúl keleti felén kialakult zivatarlanc haladt kelet felé. Előterében izolált szupercellák is kipattantak. Ezek némelyikéből tornádó alakult ki.	A modellek pontos előrejelzést adtak. A fő különbség a nedvesség mértéke , a CHAPEAU magasabbnak adta. A nedves terület, mely a zivatarlancot kijelöli, minden időpontban ugyanott van helyileg a két modell kimenetében.
Pusztító zivatarok 2010.06.18-án	A reggel kialakuló zivatarlanc déli ágában szignifikáns heves jelenségeket okozó szupercellák vonultak a Dél-Alföldön, jelentős károkat és súlyos személyi sérüléseket is okozva.	Itt a nedves terület elhelyezkedésében is adódik jelentősebb eltérés . A WRF ad nagyobb nedvességet, s a nedves területet keletebbre helyezi, mint a CHAPEAU a reggeli órákban. A legnedvesebb területek mindkét modell szerint északkelet felé haladnak. A valóságban a modellek által jelzettől néhány órával előbb indultak az események, valamint a fő esemény nem a Dunántúlon északkelet felé, hanem a Dél-Alföldön kelet felé haladt.
Helyi zivatarok hazánk középső sávjában 2010.07.01-én	E napon nem számíthattunk heves eseményekre. Helyi zivatarok alakultak ki először az Északi-középhegységben és a Duna-Tisza-közén, majd este kissé keletebbre.	Alig mutatkozik különbség a nedvességben a modellek kimenete között. A zivatarok a nagyobb nedvességtartalom által kijelölt területen alakultak ki, tehát az előrejelzés pontos volt.
Helyi konvekcióval keletkező heves zivatarok 2010.07.03-án	A Tiszántúlon és a Duna-Tisza-közén alakultak ki zivatarok, ezek némelyike heves volt. Az események súlypontja idővel egyre délebbre helyeződött, az estére kialakult zivatarlanc így csak Csongrád megyében okozott heves eseményeket.	Ebben az esetben a nedves területen belül a nedvesség eloszlása különbözik a két modellben. A nedves terület mérete a CHAPEAU-ban kisebb, de magasabb értékek jelennek meg, mint a WRF-ben. A WRF a 0-3 km-es relatív nedvesség esetében keletebbre helyezi a nagyobb értékeket, mint a CHAPEAU. Összevetve ezt az eseményekkel, a CHAPEAU jóval pontosabb előrejelzést adott, mint a WRF.
Éjszakai zivatarlanc a Dél-Dunántúlon 2010.08.05-én	Az esti órákban Szlovénia felől zivatarlanc lépett az országba, mely másnap reggel érte el a főváros térségét.	A modellek által jelzett nedves terület mozgása a két modell kimenetében időben különbözőképpen történt . A CHAPEAU kimenetében elsősorban a mérete változott (először növekedett, majd Horvátország felé visszahúzódott), míg a WRF szerint haladt észak felé. Az események alakulása alapján ezúttal a WRF szolgáltatott pontosabb előrejelzést.

Az imént bemutatott esetek példaként szolgálnak arra, hogy a rendszert hogyan alkalmazhatjuk a CHAPEAU és a WRF összehasonlítására. A fenti esetekben nedvességi karakterisztikák vizsgálatát mutattuk be, de természetesen egyéb meteorológiai elemek, származtatott paraméterek is (jelen esetekben pl. a CAPE, az SRH, a szélnyírás, nedvesség- konvergencia) vizsgálhatók.

Ezen felül más jelenségek leírására, modellezésére is alkalmazható (pl. hideg légpárna fejlődése téli anticiklon esetén, ebben milyen különbség jelentkezik a két modell között). Ilyen módon pedig az előzőeknél jóval részletesebb esettanulmányok elkészítésére is alkalmas a két modellt közösen futtató rendszer.

7. Összefoglalás, további tervek

Munkánk során összehasonlíthatóvá tettünk két közösségi numerikus időjárás-előrejelző modellt, a WRF-et és a CHAPEAU-t. Létrehoztunk egy rendszert, amely egy megadott tartományra, időpontra és időtartamra elvégzi a modellek futtatását. A rendszer használhatóságát az inicializáció tesztelésével szemléltettük. Munkánk harmadik részében esettanulmányokon keresztül mutattuk be a rendszer használhatóságát, egyúttal ismertetve néhány nagy-csapadékos időjárási eseményt.

További terveink között szerepel a létrehozott rendszer továbbfejlesztése, hordozhatóságának biztosítása: minimális felhasználói beavatkozást igénylő telepítése különböző (pl. 32 illetve 64 bit-es, Debian, Ubuntu stb.) rendszerekre. Fontos tennivalónk a megfelelő dokumentáció elkészítése magyarul és idegen nyelven is, ami elősegíti a rendszer használhatóságát mind itthon mind külföldön.

Az inicializációval kapcsolatban további vizsgálatokat tervezünk elvégezni, melyre lehetőséget ad például, hogy az alkalmazott modell és a bemenő adatokat szolgáltató globális modell rácsfelbontása közötti különbség csökkentésével az inicializáció egyre kevésbé válik szükségessé. Ezen kívül a modell egyszerűsítéseiből adódó zaj viselkedése is vizsgálatra váró témakör. Az inicializáció hatásának kimutatására további diagnosztikákat lehet alkalmazni, ki dolgozni [10]. Az ilyen jellegű vizsgálatok jelen munkánk keretein túlmutatnak.

Az esettanulmányokkal kapcsolatban tervünk, hogy az adott esetekben kvantitatív összehasonlító vizsgálatokat is végezzünk (pl. különbségi mezők előállítása, térben integrált mezők időbeli lefutásának vizsgálata), valamint a konvektív esetek mellett egy nyári anticiklonális időjárási helyzetben vizsgáljuk a két modell dinamikáját. Emellett tervezzük a modellek eredményeinek mérési adatokkal való összevetését. A 5. fejezet elején említett – a bemenő adatok forrására vonatkozó – lehetőségeken kívül módunkban áll a WRF-et IFS vagy ALADIN modellből származó bemenő adatokkal futtatni. Ezzel kiküszöbölhető a két modell produktumában a kezdeti feltételek eltérése miatt megjelenő különbség.

Látható tehát, hogy az elkészült rendszer sokféle jelenség vizsgálatának elvégzését lehetővé teszi. Emellett könnyű kezelhetősége és viszonylag kis erőforrás-igénye is elősegíti használ-

hatóságát a gyakorlati oktatásban, ezzel hozzájárulva a numerikus időjárás-előrejelző modellek működésének megismeréséhez.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani témavezetőinknek. Tasnádi Péter és Weidinger Tamás tanár uraknak támogatásukért, hasznos tanácsaikért, valamint Gyöngyösi András Zénónak, amiért bevezetett bennünket a numerikus időjárás-előrejelző modellek világába, fáradhatatlanul segített megoldani technikai és egyéb problémáinkat, útmutatásával segítve munkánkat.

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársainak is: Bölöni Gergelynek, Horányi Andrásnak, Kullmann Lászlónak, Mile Máténak valamint Szépszó Gabriellának, amiért lehetővé tették számunkra az ALADIN/CHAPEAU modell és a gribeuse program használatát, valamint amiért tanácsaikkal és észrevételeikkel támogatták munkánkat.

A kutatás az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával a TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003 program keretében folyt.

Hivatkozások

- [1] J.B. Klemp, W.C. Skamarock, and J. Dudhia. Conservative Split-Explicit Time Integration Methods for the Compressible Nonhydrostatic Equations. *Mon. Wea. Rev.*, 2007.
- [2] A. Horányi, I. Ihász and G. Radnóti. ARPEGE/ALADIN: a numerical weather prediction model for Central-Europe with the participation of the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 100, 1996.
- [3] E. Kalnay. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge University Press, 2003.
- [4] R. El Khatib. *FullPos users guide for Arpege/Aladin cycle 25T1*. METEO-FRANCE – CNRM/GMAP, 2002.
- [5] K.F. Brill, M.L. DesJardins, et al. *GEMPAK User's Guide. Version 5.7.3*. National Center for Environmental Prediction, October 2004.
- [6] W. Wang, C. Bruyère, et al. *WRF-ARW V3: User's Guide*. National Center for Atmospheric Research, April 2012.
- [7] I. Csigó. Inicializáló eljárások összehasonlítása numerikus prognosztikai modellekben. Szakdolgozat, ELTE, 1994.
- [8] P. Lynch. The Dolph–Chebyshev Window: A Simple Optimal Filter. *Mon. Wea. Rev.*, 125, April 1997.
- [9] P. Lynch and X.-Y. Huang. Diabatic initialization using recursive filters. *Tellus*, 1992.
- [10] P. Lynch and X.-Y. Huang. Initialization of the HIRLAM Model Using a Digital Filter *Mon. Wea. Rev.*, 120, June 1992.
- [11] Á. Horváth. Pusztító zivatarok 2010. június 18-án., 2010. Országos Meteorológiai Szolgálat.
- [12] Z. Polyánszky és K. Csirmaz. A 2010. augusztus 16-i tornádós helyzet meteorológiai körülményei., 2010. Országos Meteorológiai Szolgálat.
- [13] L. Nagy. Tornádókárok a Börzsönyben, 2010. Ipolyerdő ZRt.

Internetes hivatkozások

[I] ***fimex*** – <https://wiki.met.no/fimex/start>

[II] ***bilingrb*** – <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/bilingrb.html>

[III] ***OMSz*** – met.hu