

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A WRF modell érzékenysége ECMWF és GFS kezdeti feltételekre a Kárpát-medence térségében különböző szinoptikus helyzetek esetén

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Brunner Máté

Meteorológus mesterszak,

Előrejelző szakirány

Témavezető:

dr. Breuer Hajnalka

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

1.	Bevezetés.....	- 3 -
2.	Irodalmi áttekintés.....	- 4 -
2.1.	A kezdeti feltétel problematikája	- 4 -
2.2.	A fizikai parametrizációk hatása a modellekben.....	- 7 -
3.	Adatok	- 11 -
3.1.	Kezdeti feltételek (ECMWF és GFS).....	- 11 -
3.1.1.	Analízisek és reanalízisek előállítása	- 11 -
3.1.2.	ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)	- 13 -
3.1.3.	NCEP (National Centers for Environmental Prediction)	- 14 -
3.2.	E-OBS	- 15 -
3.3.	METEOSAT.....	- 15 -
3.4.	Esettanulmányok	- 15 -
4.	Módszer.....	- 20 -
4.1.	A WRF modell	- 20 -
4.2.	Parametrizációk	- 20 -
4.2.1.	Cumulus parametrizáció.....	- 22 -
4.2.2.	Mikrofizika.....	- 24 -
4.2.3.	Planetáris határréteg	- 26 -
4.3.	Modell szimulációk és beállításai.....	- 28 -
4.4.	Statisztikai verifikációs módszerek	- 29 -
5.	Eredmények.....	- 31 -
5.1.	Ideális parametrizáció-kombináció meghatározása.....	- 31 -
5.2.	ECMWF és GFS kezdeti feltételekkel futtatott WRF verifikációja.....	- 33 -
5.2.1.	Napi átlagos tengerszinti légnyomás	- 34 -
5.2.2.	Rövidhullámú sugárzás	- 35 -
5.2.3.	2m-es napi átlaghőmérséklet.....	- 36 -
5.2.4.	Csapadékintenzitás	- 37 -
5.2.5.	Napi csapadékösszeg.....	- 39 -
5.2.6.	Összesített eredmények	- 40 -
5.3.	A WRF érzékenysége a kezdeti feltételekre.....	- 43 -
5.4.	A kezdeti feltételek összehasonlítása	- 46 -
5.4.1.	Az április 12-i eset.....	- 47 -
5.4.2.	A szeptember 30-i eset	- 49 -
5.4.3.	A június 18-i eset.....	- 51 -
6.	Összefoglalás.....	- 53 -
	Köszönetnyilvánítás	- 55 -
	Irodalomjegyzék.....	- 56 -
	Függelék	- 62 -

1. Bevezetés

Az időjárás előrejelzések fejlődésének egyik legfontosabb állomása a számítógép megjelenése volt az elmúlt évszázad közepén, illetve annak felhasználása a meteorológiában. A légkör dinamikájáról való ismereteket, melyek az előrejelzést egyáltalán lehetővé teszik, a szükséges technológia létrejötte után numerikus modellekben összegezték. Az évtizedek alatt számos modellt fejlesztettek attól függően, hogy milyen folyamat szimulációjára koncentrálnak. Feladattól függetlenül azonban, – parciális differenciálegyenletek lévén – mindenképpen szükség van egy kezdeti feltételre (regionális modellek esetén határfeltételekre is), melyből az integrálás elindulhat.

A kezdeti feltételek megadása a prognózisok bizonytalanságának egyik legfőbb forrása. Az operatíván működő globális modelleket futtató szervezetek rendkívül lényeges feladata minél pontosabb, a valóságot minél inkább megközelítő mező előállítása a rendelkezésre álló mérési adatok és technológia segítségével. A gyakorlatban ezt tipikusan az előbb említett adatok, illetve a modell egy korábbi futtatásának eredményének összehangolásával próbálják elérni.

Dolgozatom célja a két legjelentősebb globális modell, a GFS, illetve az ECMWF futtatásához használt, illetve azáltal létrehozott kezdeti feltételek (analízisek), valamint azok hatásának összehasonlítása a WRF mezoskálájú modellben alkalmazva. Vizsgálataimat a Kárpát-medence területére végeztem különböző szinoptikus helyzetekben futtatva a modellt. A kutatásom fontos részfeladata volt a megfelelő fizikai parametrizációs sémák kiválasztása is.

A 2. fejezetben az említett feladatok elméleti háttérét mutatom be: a kezdeti feltételek valamint a parametrizációk problematikáját. Ugyanitt kerül sor az említett kérdésekről folytatott korábbi kutatások eredményeinek összegzésére is. A 3. fejezetben részletesebben kitérek a két globális modell, illetve az általuk létrehozott analízisek tulajdonságaira, valamint bemutatom a verifikációhoz használt adatokat. Ezek után a vizsgálatokhoz szükséges módszerek taglalása és a használt fizikai parametrizációk rövid leírása következik. Az 5. fejezetben a két kezdeti feltétel különböző szempontok szerinti összehasonlításának eredményeit mutatom be. A 6. fejezetben a diplomamunka összefoglalása olvasható.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A kezdeti feltétel problematikája

A numerikus időjárás előrejelző modellek pontossága az évek folyamán egyre nő, illetve adott megbízhatósággal egyre hosszabb ideig vagyunk képesek a légkör állapotát meghatározni a jövőben (pl. 1998 és 2010 között, 7 napról 8,2 napra növekedett a 60%-os beválás). Azonban hangsúlyoznunk kell, hogy az időjárás pontos előrejelzése sem elméletben, sem gyakorlatban nem lehetséges (Kerr, 2012). A tökéletes előrejelzés elkészítésének számos akadálya van. A tényezőket, melyek egy hibátlan prognózishoz volnának szükségesek, két nagy csoportra oszthatjuk.

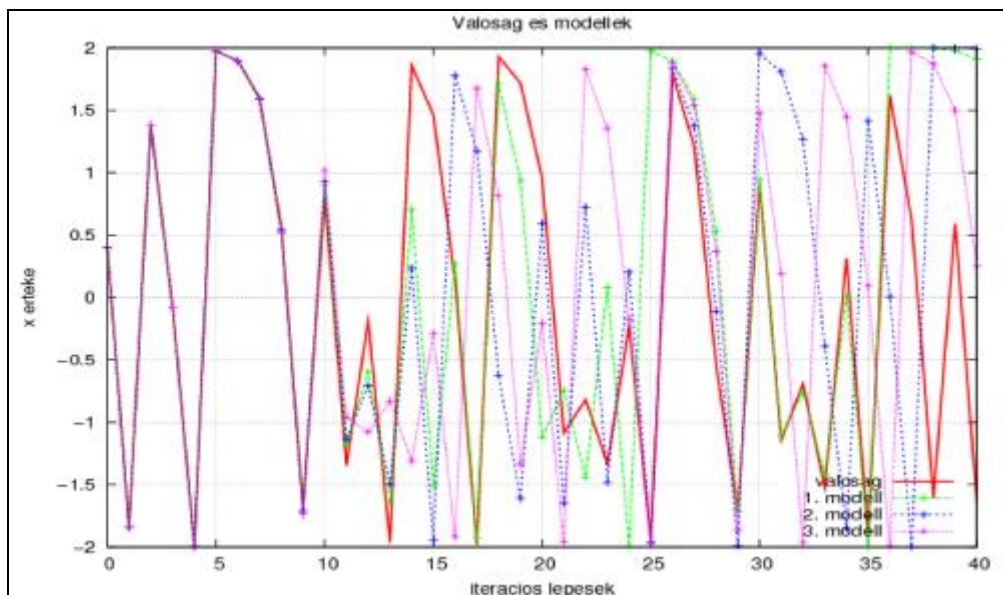
A tényezők egyik nagy csoportja maga a modellezés. A globális légköri mozgásokat leíró hidrotermodinamikai egyenletrendszer (HTER) analitikus megoldása nem lehetséges, ezért az egyenleteket numerikus módszerekkel vagyunk kénytelenek közelíteni, ezzel újabb hibaforrást teremtve a pontos prognózisnak. Ide tartozik a korlátozott számítási kapacitás, mely a térbeli és időbeli felbontást limitálja. Minél sűrűbb rácshálón dolgozunk, a térbeli felbontás növelése maga után vonja az időbeli felbontás növelését, így a számításigényt is. A rácspontok távolságától függetlenül nem nélkülözhetjük a parametrizációk használatát, melyek az adott felbontáson, explicit módon le nem írt, illetve a túlságosan összetett folyamatok hatásait veszik figyelembe. A parametrizációknak számos típusa létezik, melyek megválasztása szintén kritikus az előrejelzések eredményét tekintve, ahogy azt később látni fogjuk. Végül hibás eredményeket okoznak a program kerekítései is.

A másik a kezdeti-, illetve peremfeltételek megadása, mely a HTER differenciál-egyenletrendszer volta miatt szükséges, függetlenül attól, hogy analitikus vagy numerikus megoldást keresünk. A kezdeti feltételekhez kézenfekvő volna a Világ Meteorológiai Szervezetének (WMO) méréseit felhasználni, azonban egyrészt még a legfejlettebb műszerekkel sem teljesen pontosak, másrészt térbeli lefedettségük az adott modellezni kívánt feladathoz a Föld legnagyobb részén messze nem elégséges, harmadrészt a numerikus megoldáshoz szükséges egyes tagok nem mérhetők. A felszíni illetve légi mérések ritkaságát a műholdas mérésekkel lehet kompenzálni, azonban ezek megbízhatósága távérzékelő jellegük miatt általában rosszabb, mint az in-situ méréseké [1 – Mészáros]. Ezen túl a numerikus modellek futtatásához olyan kezdeti feltételekre van szükség, melyek az adott

felbontású háló rácspontjaiban adottak. Ahhoz, hogy ezeket létrehozzuk – a mérések ritkasága miatt – a modell korábbi időpontból indított prognózisának eredményeit is fel kell használnunk. Majd a rendelkezésre álló értékekből adatasszimilációs és inicializációs módszerekkel kiszámíthatjuk a kezdeti mezőket. Ezek a mezők tehát természetesen csak a valóság közelítései, melyek függenek az asszimilációhoz használt modell megválasztásától és az asszimilált adat mennyiségétől is.

Azonban, ha az említett hibaforrásokat képesek is lennénk megszüntetni, még mindig szemben találunk magunkat a légkör, mint nem-lineáris rendszer kaotikus jellegével. A rendszertől független összetevők is hatással vannak ugyanis rá: egy vulkán kitörését az időjárási modellek nem jelzik előre, azonban az általa okozott kezdetben kis perturbáció idővel az egész rendszerre hatással lesz.

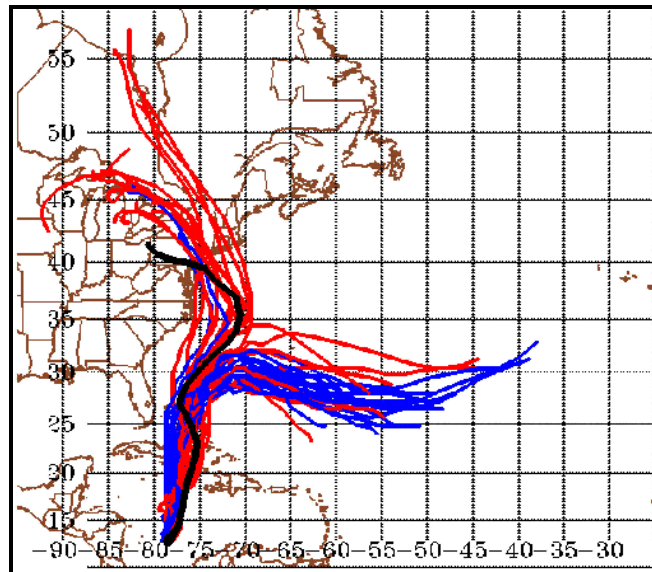
Az 1. ábrán egy egyszerű nemlineáris egyenlet megoldásai láthatók, egymástól kicsiny mértékben eltérő kezdeti feltételekkel és modell beállításokkal. Jól látszik, hogy néhány iterációs lépés után a modell alig eltérő beállításai eluralkoznak az eredményeket. Az előrejelzés bizonytalanságának mértéke azonban információ tartalommal bír. Ezt kihasználva az ensemble előrejelzések célja az összes említett bizonytalanság feltérképezése és modellbe való átültetése, ezáltal megmutatni a prognózisok megbízhatóságát.



1. ábra: Eltérő kezdeti feltételekből indított nemlineáris modell megoldásainak időbeli fejlődése [2 – Weidinger és mtsai.].

A korlátos tartományú időjárás előrejelző modellek kezdeti feltételeit valamely globális modellből nyerik. A két legjelentősebb ilyen modell az európai ECMWF (European

Centre for Medium-Range Weather Forecasts) és az amerikai egyesült államokbeli NCEP (National Centers for Environmental Prediction) központok modelljei. A két nagy szervezet modell-produktumainak összehasonlítása érdekes és tanulságos információkkal szolgálhat a rendszerek tulajdonságairól, előnyeiről és hátrányairól. Összehasonlító vizsgálatok tárgyát képezték már maguk a globális modellek eredményei, az általuk készített reanalízisek vagy azok kezdeti feltételként való felhasználása regionális modellekben.



2. ábra: A Sandy-hurrikán útvonalának ensemble előrejelzése WRF modellel ECMWF (piros) és GFS (kék) kezdeti feltételek használatával, inic.: 2012. október 23. 00:00 UTC (Bassill, 2014).

Az egyik leglátványosabb kutatás a 2012-es Sandy hurrikánhoz köthető, mely az Egyesült Államok északkeleti partvidékén tombolt (Bassill, 2014). Egy héttel a vihar partot érése előtt az ECMWF jól visszaadta a hurrikán haladási irányát, miközben a GFS modell szerint az jobbra fordult volna, elkerülve a keleti partot (2. ábra). Fontos, hogy a modellek ensemble előrejelzései is hasonló irányokat vártak, az eredményeket pedig az európai modell jobb felbontásának és adatasszimilációs rendszerének tulajdonították. Azonban az eseményt később szimulálták a WRF (Weather Research Forecast) mezoskálájú modellel is, különböző cumulus konvekció parametrizációk beállításával. Az egyik séma a GFS által használt egyszerűsített Arakawa-Schubert séma WRF-re optimalizált változata, míg a másik a Tiedke séma, amely az ECMWF modelljében alkalmazott parametrizációhoz hasonló. Az eredmények azt mutatták, hogy a WRF egyes parametrizációi visszaadták a hozzájuk tartozó globális modell eredményét. Futtatták a WRF-et a GFS kezdeti mezőivel, illetve az ECMWF parametrizációjával és ebben az esetben is utóbbi bizonyult meghatározónak. Továbbá több

különböző felbontást is alkalmaztak, ám ebben az esetben azok sem befolyásolták az eredményeket. Rámutattak tehát, hogy nem minden a modell felbontása és adatasszimilációs rendszere, a fizikai parametrizációk fejlesztése éppúgy elengedhetetlen.

A Közép-afrikai térség ideális különböző tesztelésekre a rendszeres, heves csapadéktevékenység miatt. *Jury és Sen* (2014) az Etióp-magasföld néhány zivataros időszakát szimulálta WRF modellel, GFS és ECMWF kezdeti mezőkkel. Az ilyen típusú időjárási események pontos előrejelzésénél a szélmező egy kritikus meghatározandó elem, mely hatással van a csapadéokra. Ez ebben az esetben is az ECMWF mezők használatával sikerült jobban a szimuláció.

Szintén az európai modell fölényét mutatta egy dél-kínai zivataros szituáció által okozott csapadékmező szimulálása, melyben a WRF futtatásában a globális modelleket kezdeti feltételként vették figyelembe. Az ECMWF inicializáció legfőbb erénye a csapadékos terület helyzetének pontos előrejelzése volt [12 – *ucar.edu*].

A reanalízisek összehasonlításáról többek között *Liu és mtsai.* (2012), *Fan és mtsai.* (2008), *Bao és Zhang* (2013) tanulmányaiban olvashatunk. Ezekben a tanulmányokban szintén az európai globális modell produktumainak a többinél magasabb minőségéről olvashatunk.

2.2. A fizikai parametrizációk hatása a modellekben

Ahogy arról már korábban szó volt, egy numerikus előrejelzés számtalan összetevőtől függ. Függ a kezdeti és peremfeltételektől, a modell dinamikájától, a fizikai parametrizációktól és közel sem elhanyagolható mértékben attól, hogy milyen területre, milyen szinoptikus helyzetben kívánunk prognózist készíteni. A világ számos területére végeztek szimulációkat különböző fizikai parametrizációkat összehasonlítva, javarészt csapadékos eseményeket alapul véve. A csapadék előrejelzése még napjainkban is az egyik, ha nem a legnehezebb feladat, a legkorszerűbb modelleket használva is. Gyakran előfordul, hogy bár a modell előrejelzi a csapadékrendszert, de annak elhelyezkedésében, vagy intenzitásában téved. Ennek oka nem feltétlenül a rossz parametrizációban, hanem a kezdeti feltételekben is keresendő. A továbbiakban néhány ilyen összehasonlító vizsgálat eredményét ismertetem.

Wang és Seaman (1997) az Egyesült Államok területén futtatta a PSU-NCAR (Pennsylvania State University) MM5 (Mesoscale Model version 5) mezoskálájú modellt téli, tavaszi és nyári csapadékos eseményeket szimulálva különböző felbontásokon. A kutatás célja az Anthes-Kuo (Anthes, 1977; Grell és mtsai., 1994), a Grell (Grell, 1993; Grell és mtsai., 1994), a Betts-Miller (1986) és a Kain-Fritsch (1993) cumulus parametrizáció sémák összehasonlítása volt. Ahogy arra előzetesen számítani lehetett, megállapították, hogy összességében a téli évszakban, amikor a nagyskálájú folyamatok a meghatározóak, a modell jobban teljesít, mint a nyári konvektív mezoskálájú rendszereknél. Az eredmények kimutatták, hogy általában a csapadékmező térbeli elhelyezése a modell által kevésbé sikeres, mint a mennyiségének meghatározása, azaz a modell a látens hő mértékét viszonylag jól reprodukálja. Valamint az is elmondható, hogy a gyenge csapadék területét a parametrizációk hajlamosak túl-, míg a heves csapadékát alulbecsülni. Előbbi felülbecsléséért, – melyet a Grell és a Kain-Fritsch sémáknál tapasztaltak – az említett sémák lezárási megközelítését, illetve a felszíni termális kényszerre való érzékenységüket tették felelőssé. A heves csapadék alulbecslése pedig ennek kompenzációjaként jelentkezik, mely alátámasztja azt, hogy a kondenzációból származó látens hő számítása jól történik. Összességében a Kain-Fritsch séma teljesített a legjobban, melyet kifejezetten erre a modellre terveztek és a hasznosítható potenciális energia lezárást használja. De az is igaz, hogy az egyes parametrizációk teljesítménye erősen függött az eseményektől. A konvektív csapadék előrejelzésével az Anthes-Kuo sémának volt a legtöbb problémája, melynek alapja a nedvességkonvergenciával való számítás lehet, ennek használatával ugyanis a mezoskálájú modellek gyakran alulbecslik a csapadékot. A Betts-Miller séma általában a gyenge csapadék területére ad megbízható előrejelzést, míg a közepes és heves csapadék területét hajlamos felülbecsülni.

Gilliland és Rowe (2007) szintén a cumulus parametrizációkat hasonlította össze a WRF modell futtatásával. Ugyancsak amerikai esetekre kimutatták, hogy kiszkálájú konvektív eseményeket cumulus parametrizáció használata nélkül 4 km-es felbontással nem lehet modellezni. Betts-Miller-Janjic (Betts és Miller, 1993; Janjic, 1994) séma alkalmazásával sem sikerült szignifikáns csapadékot előrejelezni, ugyanis mivel ez ún. stabilizációs séma, egy vastag nedves légréteget igényel, mely azonban abban az esetben nem volt adott, még ha a CAPE értéke elegendő is volt. Bár a Grell-Dévényi ensemble (2002) séma jól visszaadta a csapadék elhelyezkedését és intenzitását, azonban azt egy széles zónában prognosztizálta az izolált területek helyett. A legjobb eredményeket pedig ők is a Kain-Fritsch (Kain és Fritsch, 1990, 1993; Kain, 2004) séma használatával kapták.

A kutatások kedvelt modellezési helyszíne Közép-Afrika területe, ahol adott a heves csapadéktevékenység. *Kondowe* (2014) NCEP peremfeltételekkel futtatta a WRF-ARW modellt Tanzánia területén, cumulus konvekció sémák összehasonlítása céljából. A vizsgálat során az őszi-téli esetekben a Grell-Dévényi, míg tavasszal a Betts-Miller-Janjic séma szerepelt a legjobban. Előbbi időszak csapadéktevékenységei általában a víztározók párolgásához kapcsolódnak, utóbbiaké pedig a konvergencia vonalakhoz, instabilitásokhoz, mely magyarázhatja az adott sémák teljesítményét.

Gallus és Bresch (2006) a WRF két változatának, az NMM-nek (Nonhydrostatic Mesoscale Model) és az ARW-nek (Advanced Research WRF) érzékenységét vizsgálták különböző parametrizációs csomagok és kezdeti feltételek használatával. Azt találták, hogy a fizikai parametrizációk megválasztásának kérdése az esetek többségében nagyobb befolyással volt az eredményekre, mint a különböző kezdeti feltételek, kivéve a szimulációk korai (első 6-12 óra) szakaszában.

A planetáris határreteg sémák összehasonlításáról *Shin és Hong* (2011) folytatott vizsgálatot, a WRF modellt 5 különböző sémával futtatva. Az eredmények kimutatták, hogy a felszíni termodinamikai változók előrejelzett értékei nagyobb szórással rendelkeznek nappal, mint este, a határreteg parametrizációkat változtatva. A szél esetében ennek az ellenkezője igaz. Összességében arra a megállapításra jutottak, hogy instabil légköri körülmények esetén az elsőrendű megközelítést alkalmazó sémák (pl. YSU) jobban szerepeltek, mint a TKE (termikus kinetikus energia) lezárást használók (MYJ, BouLac), míg stabil légkörnél utóbbiak bizonyultak sikeresebbnek. Hozzá kell tenni azonban, hogy a planetáris határreteg parametrizációjának megválasztása nagyban függ a felszín-réteg parametrizációjától is.

Hasonló eredményre jutottak *Balzarini és mtsai.* (2014), akik a szintén különböző határreteg sémákkal végeztek szimulációkat, majd rádiószondás és LIDAR mérések segítségével verifikálták a kapott határreteg magasságokat. Az észak-olaszországi területen végzett WRF modellfuttatások során az összes sémával túlbecsülték a hőmérsékletet, a keverési arányt és a szélesebséget is. A határreteg magasságának becslésére az YSU parametrizáció bizonyult a legalkalmasabbnak.

Gallus és Pfeifer (2008) egy németországi squall line-t szimuláltak szintén WRF-fel, öt különböző mikrofizikai sémát alkalmazva. A számított reflektivitás értékeket radarmérésekkel vetették össze. Eredményeik jól mutatják az optimális parametrizáció kiválasztásának nehézségét, ugyanis egy adott szimuláción belül a különböző sémák különböző tényezőkben bizonyultak jobbnak. A zivatarvonalak nagy reflektivitású

tartományainak reprodukálása például a Lin és mtsai. (1983) és a Thompson (*Thompson és mtsai.*, 2004) sémákkal nem sikerült. A jég tartományának reflektivitása a Lin és a WSM6 (*Hong és mtsai.*, 2004) séma alkalmazásával volt túl alacsony, míg a régi Thompson parametrizációval túl nagy. Előbbi séma alulbecsülte az eső tartományának „fényességét” is, azonban a legjobbnak bizonyult az üllő reflektivitásának modellezésében. Egy indiai zivataros eseményeket szimuláló kutatás (*Rajevaan és mtsai.*, 2010) a később általunk is használt Thompson (*Thompson és mtsai.*, 2004) sémát mutatta legjobbnak. Ennek érdekessége az is, hogy jobbnak bizonyult a Morrison parametrizációnál, mely kétmomentumos, ellentétben az előbbivel, ami egy.

3. Adatok

3.1. Kezdeti feltételek (ECMWF és GFS)

Dolgozatom második részének célja a WRF modell érzékenységének vizsgálata különböző kezdeti feltételekre a Kárpát-medence területén.

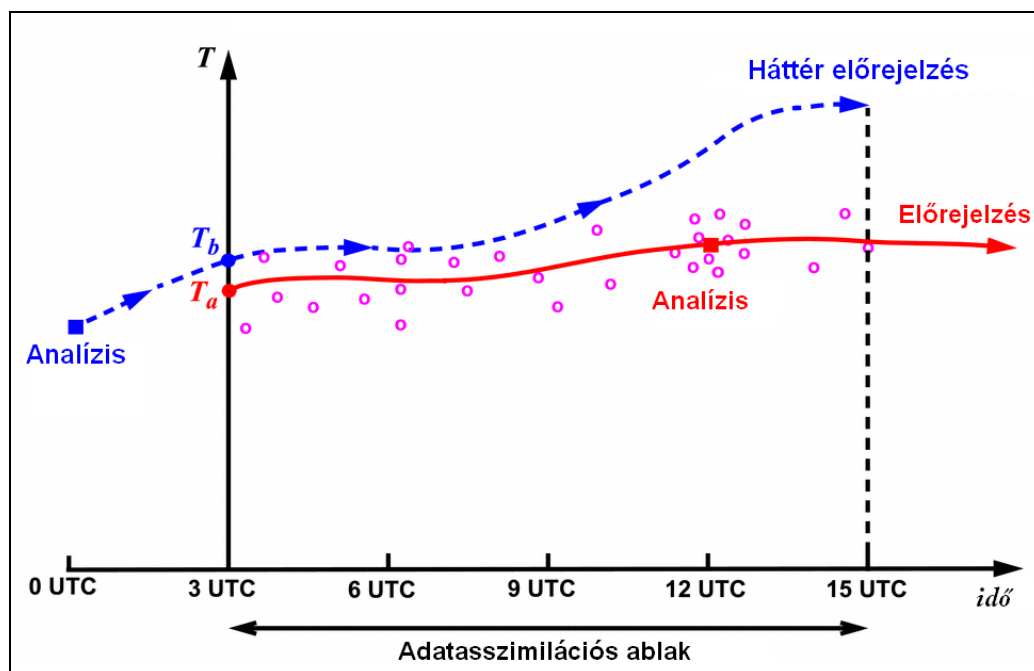
Ahogy arról fentebb szó esett a numerikus időjárási előrejelzések egyik legfontosabb eleme a kezdeti feltétel, mely a parciális differenciálegyenlet rendszer megoldásához szükséges. A nem-lineáris modellek roppant érzékenyek a kezdeti feltételekre, a prognózisok csekély mértékű kezdeti perturbációkkal is egészen különböző eredményeket mutathatnak a modell tulajdonságaitól függően néhány óra, vagy nap múlva, melyek figyelembevételével a prognózisok bevétele valószínűségére kaphatunk hasznos információt. Természetesen nem csak a kezdeti feltételekben rejlik bizonytalanság, hanem a korábban tárgyalt parametrizációkban, a modell közelítéseiben, stb. Ezen bizonytalanságok előrejelzésekben való számbavételével, hasznosításával az ensemble prognosztika foglalkozik (Parker, 2010).

3.1.1. Analízisek és reanalízisek előállítás

A modellintegráláshoz szükséges kezdeti mezőket, az analíziseket az adatasszimiláció segítségével állítják elő. E folyamat során figyelembe veszik a földi mérőhálózat (szinoptikus állomások, hajók, repülőgépek, műholdak, szondák, stb.) által kapott adatokat, ám mivel ezek térbeli lefedettsége messze nem elégséges, egy néhány órával korábbról indított modellfuttatás (háttérmező, v. first guess) eredményeit is fel kell használni. Továbbá eszközként szolgálnak a légköri egyensúlyi folyamatokról alkotott ismereteink.

Az adatasszimiláció két típusa az optimális interpoláció és a variációs adatasszimiláció [2 – Weidinger és mtsai.]. Előbbi egy lokális módszer, mely a változók értékeit egyes rácspontokban a legkisebb négyzetek módszerével határozza meg a környező megfigyelési pontok értékeinek felhasználásával. A variációs adatasszimilációs módszer ezzel szemben globális technika; ez a teljes mezőt egy vektorként kezeli, meghatározása céljából pedig a veszteségfüggvény minimalizálására törekszik, melyet a gyakorlatban iteratív keresőalgoritmusokkal számítanak. Utóbbi típuson belül létezik 3, illetve 4 dimenziós

változat. A 3D-VAR során az analíziseket egyenként, egymástól függetlenül állítják elő úgy, hogy az időszak különböző időpontjaiban történt megfigyeléseket az analízis idejére aktualizálják. A 4D-VAR előnye a 3 dimenziós társához képest az, hogy ebben az esetben a megfigyeléseket a tényleges idejükben veszik figyelembe, és a teljes first guess trajektóriát igazítják hozzájuk (3. ábra).



3. ábra: 4 dimenziós variációs adatasszimiláció [3 – *old.ecmwf.int*].

Az analízisek elkészítése a numerikus időjárás előrejelzés egyik alappillére, melyet az operatív gyakorlatban minden futtatás előtt végre kell hajtani. A hatalmas számításigény miatt ezt rendszerint a globális előrejelző központok végzik, mint az ECMWF (**E**uropean **C**entre for **M**edium-**R**ange **W**eather **F**orecasts) Európában vagy a NCEP (**N**ational **C**enters for **E**nvironmental **P**rediction) az Egyesült Államokban (*Lahoz és Schneider, 2014*).

A meteorológiában alkalmazott adatasszimilációs technikák felhasználása nem merül ki az aktuális analízisek létrehozásában. Klimatológiai, illetve egyéb, a múlt adatait felhasználó kutatások támogatásához a modern eszközökkel reanalíziseket is készítenek. Az ilyen módon létrehozott adatsorok térben és időben konzisztensek lesznek, illetve számításba veszik az idők során egyre bővülő megfigyelési hálózatot, illetve egyre jobban megismert kényszereket. Mivel utólag készülnek, ezért a háttérmező készítéséhez használt modell és adatasszimilációs rendszer végig azonos (*Hagemann et al., 2005*). Az ECMWF segítségével készítették többek között az ERA-15 (ECMWF **R**e-**A**nalysis), ERA-40, ERA-Interim

reanalíziseket, míg a GFS modellel az NCEP reanalíziseket. Az adatasszimilációs technikáknak fejlődésével és a mérések számának növekedésével párhuzamosan a reanalízisek minősége is növekszik.

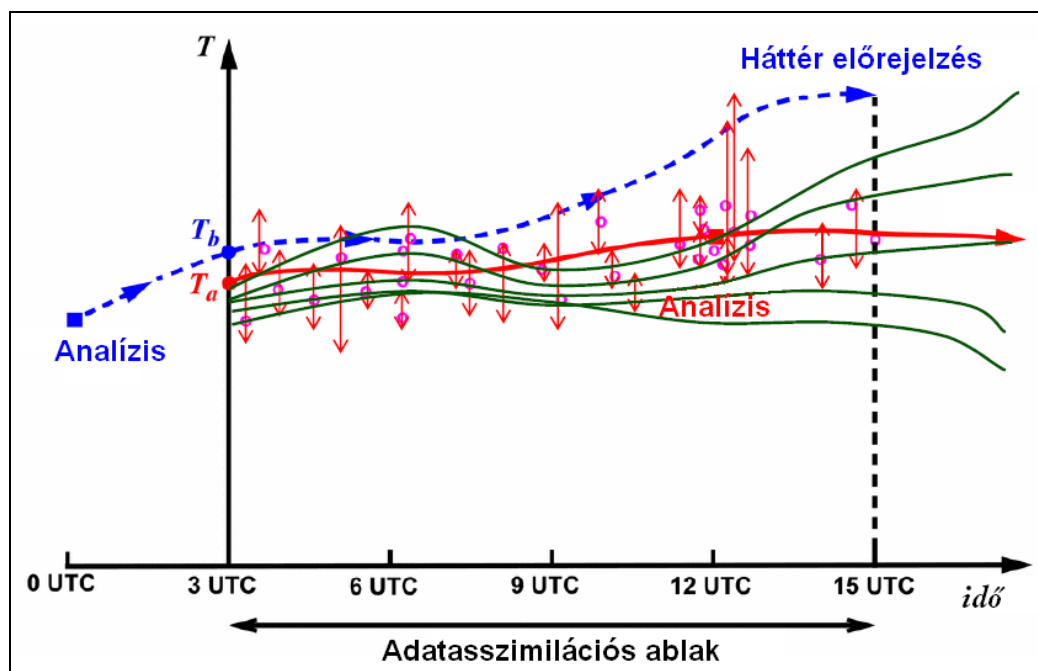
3.1.2. ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)

Az ECMWF az egyik, ha nem a legjelentősebb numerikus időjárás előrejelzéssel foglalkozó szervezet mind Európát, mind a világot tekintve (Kerr, 2012). Az 1975-ben alapított szervezet jelenleg 21 teljes jogú, illetve 13 együttműködő tagállamot (köztük Magyarországot) foglal magában. Az ECMWF legfőbb célkitűzése minél pontosabb globális középtávú előrejelzések készítése, melynek eredményeit aztán a regionális európai szervezetek használhatják fel saját modelljük futtatásához kezdeti-, illetve peremfeltételként. A jelenleg operatíván működő globális modell spektrális felbontása T1279, mely kb. 16 km-es (0,125°-os) horizontális felbontásnak felel meg, valamint 137 (2013. június 25-e előtt: 91) vertikális szinttel rendelkezik [4 – *old.ecmwf.int*]. Továbbá kisebb felbontással 15 napos, hónapos és fél éves ensemble előrejelzések is készülnek.

A modell futtatásához szükséges kezdeti feltételek minél pontosabb előállításához elengedhetetlen az adatasszimilációs módszerek folyamatos fejlesztése, amely az egyik leglényegesebb elem a szervezet vezető pozíciójának meghatározásában. Az ECMWF az analízisek elkészítéséhez 4D-Var adatasszimilációs rendszert használ [6 – *old.ecmwf.int*]. A módszer első lépése a begyűjtött megfigyelések ellenőrzése, átvizsgálása és szűrése. Az adatasszimilációs ciklusok 12 órát ölelnek fel, melyek mindegyikében megközelítőleg 15 millió megfigyelést vesznek figyelembe (ennek 96 %-a műholdas adat), melyekkel a nagyfelbontású modell korábbi futásának eredményeit korrigálják [3 – *old.ecmwf.int*]. Az adatasszimilációs feladat számítási igényét jól mutatja, hogy egy analízis elkészítése nagyságrendileg hasonló időt igényel, mint a 10 napos prognózis. Az egyre újabb típusú megfigyelések figyelembevételéhez az adatasszimilációs módszer folyamatos fejlesztésére van szükség.

Az adatasszimilációs feladat fontos eleme a háttérmező bizonytalanságának becslése, melyre az EDA (Ensemble of Data Assimilation) technikát alkalmazzák (4. ábra). Ekkor perturbált megfigyelésekkel, modell fizikával és tengerfelszín hőmérséklettel 25 (2013 novembere előtt: 10) analízist készítenek alacsonyabb felbontással. Azokon a területeken,

ahol a kapott analízisek a legjobban különböznek egymástól, azaz a legnagyobb a háttérmezőben rejlő bizonytalanság, ott nagyobb súllyal veszik figyelembe a megfigyeléseket.



4. ábra - 4 dimenziós ensemble adatasszimiláció (EDA) [5 – old.ecmwf.int].

3.1.3. NCEP (National Centers for Environmental Prediction)

Az NCEP (National Centers for Environmental Prediction) az egyesült államokbeli Nemzeti Időjárési Szolgálat (NWS – National Weather Service) többek között időjárás előrejelzéssel, ahhoz kapcsolódó veszélyjelzéssel, óceán előrejelzéssel foglalkozó szervezete. A feladatához tartozik a GFS (Global Forecast System) globális időjárás előrejelző modell futtatása, mellyel analíziseket és reanalíziseket is készítenek. A GFS modell az ECMWF-hez hasonlóan spektrális modell, azonban horizontális felbontása az általunk vizsgált 2013-as időszakban csak ~27 km volt (T574), melyet 2015 januárjában ~13 km-re (T1534) redukáltak, vertikálisan pedig 64 hibrid szigma-nyomási szinten számol [7 – nws.noaa.gov].

A GFS által használt adatasszimilációs módszer is különbözik az európai társától; 3 dimenziós variációs asszimilációt használnak, ensemble Kálmán-szűrővel. A Kálmán-szűrők lényege, hogy a háttérmező (first guess) hiba kovariancia mátrixának becslése időfüggő lesz, ezzel jobban közelítést elérve. Mivel ennek általános használata rendkívül számításigényes, ezért ensemble technikát alkalmaznak. Ennek során perturbált analízis mezőkből indítanak előrejelzéseket, majd a háttérhiba fejlődését a teljes eloszlásfüggvény helyett a tagok segítségével írják le (Szunyogh és mtsai., 2003).

3.2. E-OBS

A verifikációhoz használt egyik forrásunk az ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) projekt keretén belül létrehozott E-OBS adatbázis volt. A projekt Európa-szerte több, mint 10000 meteorológiai mérőállomás adatait tartalmazza. A kutatási és oktatási célokra létrehozott E-OBS adatbázisból ingyen letölthetők 0,25°-os felbontású rácshálózaton napi átlagos tengerszinti légnyomás- illetve 2-méteres hőmérsékletmezők, napi maximum- és minimumhőmérsékletek mezői, valamint napi csapadékösszeg adatok (*Haylock és mtsai.*, 2008; *van den Besselaar és mtsai.*, 2011).

3.3. METEOSAT

Az MSG (METEOSAT Second Generation) műholdak mérései a KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) adatbázisán keresztül érhetők el. Ingyenesen elérhetőek valós idejű és archív mérések felhőkkel kapcsolatos tulajdonságokról (pl. felhőtető magasság/hőmérséklet, optikai vastagság, halmazállapot), cseppkoncentrációkról, csapadékinzintzetről valamint beérkező napsugárzásról. Dolgozatomban a csapadékinzintzést, illetve a felszínre érkező rövidhullámú sugárzást alkalmaztam a verifikációhoz. A mérési adatok 0,04°-os felbontású rácson érhetők el.

3.4. Esettanulmányok

Az összehasonlításhoz 13 napot választottunk ki 2013-ból, a Péczy-féle makroszinoptikus osztályozás (1957) alapján, mely a Kárpát-medencére jellemző időjárásokat és áramlási helyzeteket kategorizálja a kontinens területén fennálló légköri objektumok szerint. Az egyes csoportok meghatározása aszerint történik, hogy ciklon, vagy anticiklon határozza-e meg a terület időjárását, valamint azok központja merre található. Bár a kategorizálás rendszere elméletig egyszerűnek tűnik, a valóságban az egyes napok megfelelő osztályba sorolása nem feltétlenül egyértelmű. Az áramlási rendszer irányítottsága alapján 11 kategóriát 4 nagyobb csoportba sorolhatunk: meridionális északias (mCc, AB, CMc) illetve

déli (mCw, Ae, CMw), zonális keleties (An, AF) illetve nyugatias (zC, Aw, As). A vizsgált esetek az 1. táblázatban láthatóak.

1. Táblázat

	szinoptikus helyzet	rövidítés	dátum
1)	ciklon hátoldali áramlásrendszere	<i>mCc</i>	2013. szeptember 12.
2)	anticiklon a Brit-szigetek térségében	<i>AB</i>	2013. július 8.
3)	mediterrán ciklon hátoldali áramlásrendszere	<i>CMc</i>	2013. március 15.
4)	ciklon előoldali áramlásrendszere	<i>mCw</i>	2013. április 12.
5)	anticiklon Magyarországtól keletre	<i>Ae</i>	2013. január 27.
6)	mediterrán ciklon előoldali áramlásrendszere	<i>CMw</i>	2013. szeptember 30.
7)	zonális ciklonális helyzet	<i>zC</i>	2013. december 23.
8)	nyugatról benyúló anticiklon	<i>Aw</i>	2013. június 12.
9)	anticiklon Magyarországtól délre	<i>As</i>	2013. október 22.
10)	anticiklon Magyarországtól északra	<i>An</i>	2013. október 2.
11)	anticiklon Fennoskandinávia térségében	<i>AF</i>	2013. augusztus 25.
12)	anticiklon a Kárpát-medence fölött	<i>A</i>	2013. június 18.
13)	cikloncentrum a Kárpát-medence fölött	<i>C</i>	2013. január 22.

1) 2013. szeptember 12. (mCc)

A hidegfront átvonulása után a Kárpát-medence területén változóan felhős, délen borult ég volt a jellemző. A nap folyamán többfelé záporok, illetve zivatarok okoztak többkevesebb csapadékot. A maximumhőmérsékletek az egész országban 20 °C körül alakultak, a szélmozgás pedig gyenge maradt.

2) 2013. július 8. (AB)

A brit-szigeteki központtal rendelkező anticiklon az egész kontinensre kiterjedt, így mint azon máshol is, Közép-Európában is a derült, illetve gyengén felhős ég volt a meghatározó. Az elegendő nedvességnek köszönhetően elszórtan záporok, zivatarok alakultak ki. A maximumhőmérsékletek 30 °C körül alakultak, melyhez az anticiklonhoz megfelelő alacsony szélsébségek társultak.

3) 2013. március 15. (CMc)

Az emlékezetes mediterrán ciklonhoz kapcsolódó hidegfront már átvonult az országon, kis mértékű havazás még a keleti területeken volt megfigyelhető. Ugyanakkor a borultság és a hótakaró továbbra is jellemző maradt szinte az egész Kárpát-medencében. A nap folyamán csak néhol emelkedett 0 °C fölé a hőmérséklet, a szél pedig továbbra is erős, viharos volt.

4) 2013. április 12. (mCw)

A Kárpát-medence felett a nyugat-európai ciklon meleg szektora helyezkedett el. A melegfront felhőzete miatt a napfénytartam minimális volt, országszerte eső is esett. A legmagasabb hőmérsékletek Magyarországon 15–20 °C körül alakultak, a délelőtti jellemző viharos szellőzések pedig a nap folyamán fokozatosan gyengültek.

5) 2013. január 27. (Ae)

A Kárpát-medence a kelet-európai anticiklon, valamint a nyugat-európai ciklonrendszer között helyezkedik el, ezzel változatos időjárást okozva. A délelőtti napsütést fokozatosan borultság váltotta fel, a térség keleti felén havazott is. A hőmérsékletek szinte mindenütt fagypont alatt maradtak, a légmozgás gyenge volt. Hajnalban néhol párásság is kialakult.

6) 2013. szeptember 30. (CMw)

A mediterrán ciklon előoldalán, főképp a térség délnyugati felén túlnyomóan felhős, borult volt az ég, míg északkeleten több óráig sütött a nap. A melegfronti felhőzet területén ezzel együtt jelentős mennyiségű csapadék hullott. Ennek megfelelően alakultak a maximumhőmérsékletek is, melyek értéke jellemzően 10 és 18 °C között változott.

7) 2013. december 23. (zC)

Míg Dél-Európa időjárását anticiklon határozta meg, addig északon több ciklon vonult végig a zonális nyomási helyzetben. A Kárpát-medence a két terület határán helyezkedett el, így eltérő időjárás volt a jellemző. Míg délen sok volt a napsütéses órák száma, addig északon erősen felhős, borult volt az ég. A vizsgált esetek közül ez volt az egyik, mely során nem, vagy csak elhanyagolható mennyiségű csapadék hullott. Ennek megfelelően alakultak a

legmagasabb hőmérsékletek is a két területen 11, illetve 3 °C körül. A szélmozgás az országban gyenge maradt.

8) 2013. június 12. (Aw)

A Kárpát-medence keleti területein egy frontálzóna húzódott keresztül, míg nyugaton a nyugat-európai anticiklon alakította az időjárást. Erdélyben többfelé záporok, zivatarok okoztak csapadékot. Magyarországon a mérsékelt felhőzetnek köszönhetően jellemzően 23 °C-ot mértek napközben.

9) 2013. október 22. (As)

A dél-európai anticiklon ezen a napon a decemberi esethez hasonlóan száraz időjárást okozott a csapadék tekintetében, párásság, köd azonban előfordult. Az északi frontálzóna miatt a térségben többfelé erősen felhős volt az ég, így némi változatosság is előfordult a legmagasabb hőmérsékletekben, melyek az országban 18 és 24 °C között alakultak. Jelentős szélmozgás nem volt.

10) 2013. október 2. (An)

Bár a Baltikum területén anticiklon helyezkedett el, a Kárpát-medence keleti oldalán még túlnyomóan felhős, borult volt az ég a korábban elhaladt mediterrán ciklonnak köszönhetően. Csapadék csak kis mennyiségben fordult elő. Az országban a maximum hőmérsékletek 12 °C körül alakultak, ehhez keleten időnként megerősödő szél társult.

11) 2013. augusztus 25. (AF)

Az északi anticiklon hatását fokozatosan a nyugatról érkező front váltotta fel, mely főképp a Kárpát-medence Alpok felőli oldalán jelentős mennyiségű csapadékot okozott a kialakuló záporok és zivatarok által. Ezzel együtt a derült, kevésbé felhős ég a keleti területekre korlátozódott. Míg ott majdnem 30 °C-os hőmérsékleteket mértek az országban, addig nyugaton több mint 10 °C-kal volt hűvösebb.

12) 2013. június 18. (A)

Ez az eset nem meglepően a legszárazabbak közé tartozott, a napsütést csak kevés felhőzet korlátozta. Ennek megfelelően a hőmérsékletek mindenhol 30 °C felett alakultak, jelentékeny szél nélkül.

13) 2013. január 22. (C)

A Kárpát-medence felett elhelyezkedő ciklon változatos időjárást okozott. Az összefüggő felhőzetből nyugaton hó, míg keleten eső, ónos eső hullott. A legmagasabb hőmérsékletek 0 és 10 °C között alakultak.

4. Módszer

4.1. A WRF modell

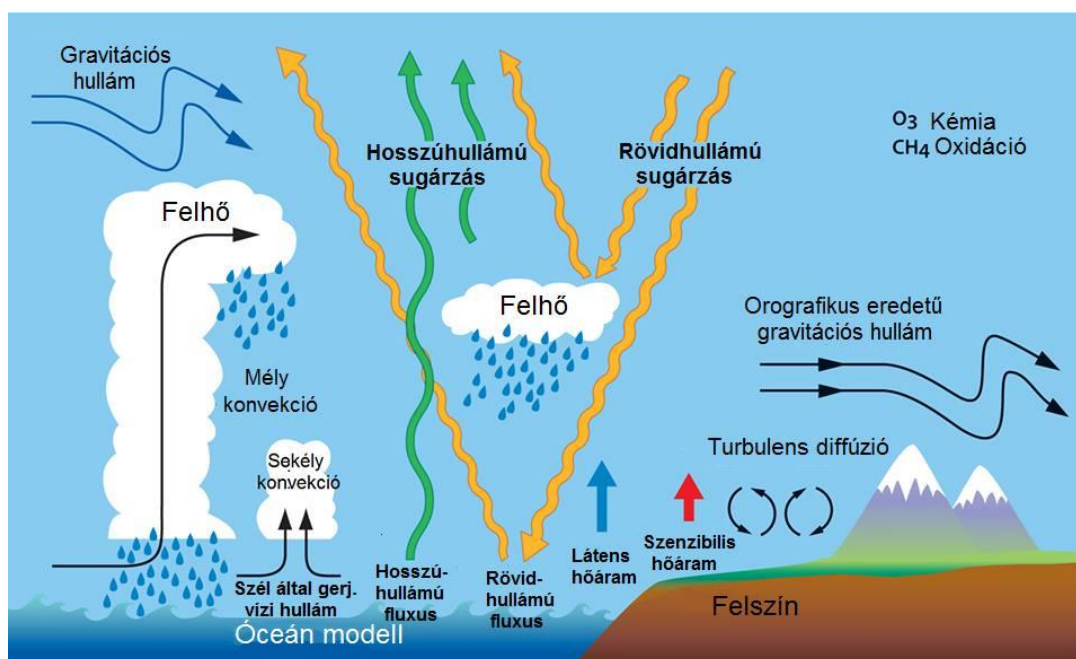
A dolgozathoz a Meteorológiai Tanszéken is futtatható WRF (**W**eather **R**esearch and **F**orecasting) modellt használtam. A WRF numerikus időjárás előrejelző modellt az Egyesült Államokban kezdték fejleszteni az 1990-es évek végén. Mind kutatási, mind operatív célokra alkalmazható. Népszerűségének oka (több 10000 regisztrált felhasználó, több mint 130 országban) az ingyenes hozzáférhetősége, valamint könnyű és széles körben lehetséges használata. Fejlesztésében számos amerikai és európai intézmény is részt vesz. Két típusa az ARW (**A**dvanced **R**esearch **W**RF), melyet ebben a dolgozatban használtunk, illetve az NMM (**N**onhydrostatic **M**esoscale **M**odel) [8 – wrf-model.org].

4.2. Parametrizációk

Az időjárási előrejelzések során fellépő egyik legjellemzőbb hibaforrás a numerikus modellek diszkretizációjából származik. A vizsgálandó légkört teljes egészében elméletileg és gyakorlatilag sem lehet folytonos térként modellezni, a számításokhoz mindenképpen szükség van egy diszkrét rácshálóra, melynek karakterisztikája az adott feladattól függhet. A numerikus előrejelzési modelleket, attól függően, hogy milyen matematikai diszkretizációs eljárást alkalmaznak a modellintegrálás során, két csoportra különíthetjük el: a véges differencia sémákat használókra, illetve a spektrális típusúakra. Előbbi a deriváltak rácspontbeli értékét a környező pontbeli értékek felhasználásával számolja, a folytonos differenciáloperátorokat különböző véges különbséges sémákkal helyettesítve. Ilyen elven működik a legtöbb modell, köztük az általunk használt WRF is. A spektrális módszer során ezzel szemben a változók teljes függvényét közelítjük függvénysorok segítségével, ahogy azt az ECMWF, vagy az ALADIN (**A**ire **L**imitée, **A**daptation **D**ynamique, **D**evelopment **I**nternational) modelleknél láthatjuk. Azonban ebben az esetben is meg kell határoznunk egy diszkrét rácshálót, ugyanis egyes feladatok hatékony elvégzése csak azon lehetséges. Így

minden időlépésben transzformációt kell végrehajtanunk oda-vissza a spektráltér és a rács között. Az utóbbin megoldandó feladatok közé tartozik a parametrizáció is.

A rácsháló térbeli felbontásának megválasztása több dologtól függ, elsősorban: a modellezni kívánt folyamat nagyságrendjétől, a számítási kapacitástól, a vizsgálandó terület méretétől, stb. Az operatív használatban lévő előrejelzési modelleknél, melyekkel legalább hazánk méretű területre készítenek előrejelzést, ez a felbontás általában 5–15 kilométer, legjobb esetben is néhány száz méter. Egy ilyen, dx felbontású ráccsal azonban legalább $2 \cdot dx$ nagyságrendű folyamatokat vagyunk képesek leírni. Az ennél kisebb skálájú folyamatok elhanyagolása viszont a valóstól jelentősen eltérő eredményeket okozhat az előrejelzésben. Egyes folyamatok leírásához azonban nem segítene a felbontás növelése sem. Ennek megoldására parametrizációs sémákat kell használnunk, melyek empirikus, illetve statisztikai összefüggésekkel próbálják pótolni a hiányosságokat. Ilyen sémákat használunk a sugárzás-átvitelre, a határrétegben zajló turbulens folyamatokra, a sekély és mély konvekcióra, a felhő-mikrofizikára és a felszín-légkör közötti kölcsönhatásokra (5. ábra).



5. ábra: Numerikus előrejelző modellek parametrizált folyamatai [9 – ecmwf.int]

Az elmúlt évtizedekben számtalan parametrizációs sémát fejlesztettek és teszteltek a különböző modellek számára. A később tárgyalt szimulációk során három parametrizációra hasonlítottunk össze különböző sémákat, ezek a mikrofizika, a határréteg és a cumulus konvekció. Az áttekintésükhöz Skamarock és mtsai. (2008) munkáját vettem alapul.

4.2.1. Cumulus parametrizáció

Az első folyamatrendszer, melyre különböző parametrizációs sémákat használtunk, a cumulus konvekció volt. Ezekre a parametrizációkra elméletben akkor van szükség, ha a modell felbontása nem éri el egy feláramlás karakterisztikus méretét, amely tipikusan néhány száz métert jelent. A gyakorlatban azonban már néhány kilométeres felbontáson is jól működhetnek a modellek ilyen parametrizációk nélkül (*Weisman et al.*, 1997), ekkor ugyanis együttesen kezeli a feláramlásokat. A cumulus parametrizáció fontossága természetesen nem merül ki a csapadék minél pontosabb előrejelzésében, a hideg, nedves leáramlásra keresztül ugyanis a többi változóra is lényeges hatást gyakorol. A cumulus parametrizációk feladata a felhőkön kívüli kompenzáló mozgások pontos modellezése is.

Ezen sémáknak két nagy csoportja létezik. Az első és régebbi a stabilizációs vagy angolul „adjustment” típusú sémák. Ezeknek lényege, hogy a hőmérsékleti és nedvesség profilt egy adott értékhez, például *Kuo* (1974) séma esetében a nedves adiabatához igazítja, ezáltal nedvesítve az adott légoszlopot, majd a „felesleges” nedvességet csapadék formájában eltávolítják a rendszerből. A másik nagy csoport a tömegfluxuson alapuló sémák. Ez utóbbiak a rácsdoboz határain áthaladó tömegáramokkal számolnak, azok segítségével határozzák meg a mélykonvekciós felhők vastagságát és vannak hatással a különböző prognosztikai változókra [10 – *meted.ucar.edu*].

Kain-Fritsch (2004)

A *Fritsch-Chappell* (1980) sémából továbbfejlesztett tömegfluxus séma. Ebben a sémában a konvekciót a CAPE (Convective Available Potential Energy – konvektív hasznosítható potenciális energia) rácsponthelyi értéke határozza meg. Amennyiben létrejött a feláramlás a felhasználható potenciális energia csökkenni fog, ahogy az kinetikus energiává alakulva a konvekció mélyülését eredményezi, de a fázisátalakulásból származó hő pótolhatja ezt. A hasonló *Arakawa-Schubert* (1974) sémával ellentétben, a rácsdobozban csak azonos magasságú konvektív cellák jelenlétét engedi meg. A tömegmegmaradást alkalmazó séma leírja a felhő-környezet kölcsönhatást, a nedves leáramlásokat, a csapadék kiszámításához pedig a csapadék hatékonyság nedvességfluxusokkal való szorzatát használja fel (*Wang és Seaman*, 1997).

Betts-Miller-Janjic (1994)

Ez a többivel ellentétben egy stabilizációs séma, mely a hőmérsékleti és nedvesség profilt egy klimatológiailag meghatározott referencia profilhoz igazítja. Operatíván használják az NCEP NAM (North American Model) modelljében, illetve az NCEP rövid távú ensemble előrejelzése során néhány tagban. A konvekciót ebben a sémában is a CAPE indítja el, illetve szükséges egy meghatározott (200 hPa) felhővastagság meghaladása [10 – *meted.ucar.edu*]. A modellnek több hátránya is van, többek között nem tartalmazza a nedves leáramlás által okozott hűlést a felhő alatt, illetve hajlamos túlbecsülni a csapadék mennyiségét, ha a referencia profil túl száraz, vagy az igazítás túl gyorsan megy végbe. A csapadék kiszámítása ebben a sémában a modell és a referencia specifikus nedvességek különbségeinek nyomás szerint történő integráltjából származik (*Wang és Seaman, 1997*).

Arakawa-Schubert (1974)

Ez egy összetett séma, mely magába foglalja mind a nedvesség bekeveredését, mind a kompenzáló leáramlás okozta melegedést, illetve a konvektív stabilizációt. A felhőképződés triggereléséhez szintén a CAPE-t veszi figyelembe, de képes számolni a CIN (konvektív gátlás) hatásával is. A rácsdobozban több különböző intenzitású felhő is létezik, melyek eloszlását egy spektrummal jellemez. Ehhez kapcsolódik az egyik hátránya is, mivel a feláramlási csatornákat az adott légoszlop csak kis részében hozza létre, mely a modell felbontásának növelésével rossz közelítéssé válik [10 – *meted.ucar.edu*]. A séma egyszerűsített változatát használják például a GFS modellben.

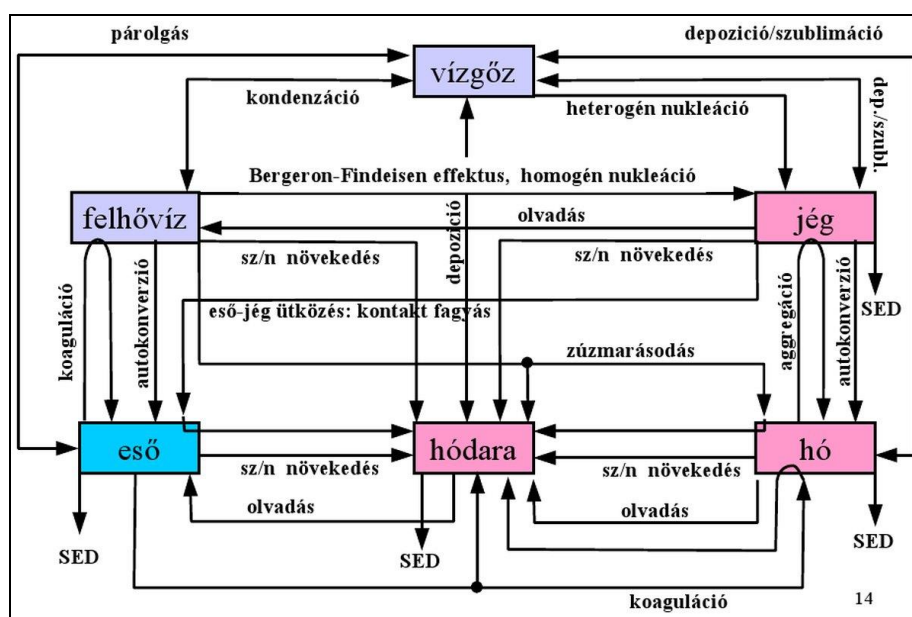
Grell 3D ensemble (2002)

A cumulus parametrizációk, ahogy általában a többi parametrizáció család tagjai is, kisebb-nagyobb mértékben eltérő egyenletekkel, azokban eltérő állandókkal számolnak. A Grell 3D ensemble séma lényege, mint ahogy a nevéből is látszik, hogy több különböző beállítású és tulajdonságú séma felhasználásával és átlagolásával (esetlegesen súlyozott átlaggal) modellezi a konvekciót (*Grell és Dévényi, 2002*). A felhasznált sémák típusukban hasonlóak (mind tömegfluxus sémák), de különböző bekeveredési paramétereket és csapadék hatékonysági együtthatókat alkalmaznak. A különböző dinamikus lezárási megközelítések is újabb bizonytalanság forrásai lehetnek (pl. a CAPE-t, az alacsonyszintű vertikális sebességet

vagy a nedvesség-konvergenciát veszik alapul). A séma optimális működése a 10 km-nél nagyobb felbontás esetében valósul meg (Skamarock és mtsai., 2008).

4.2.2. Mikrofizika

A mikrofizika parametrizálása a felhőben található hidrometeorokhoz köthető tulajdonságok, folyamatok leírását jelenti. Ezek közé tartoznak a felhő-, illetve csapadékelemek különböző halmazállapot változásai, az ebből eredő energia felszabadulás, de ezek írják le a részecskék ütközési, növekedési mechanizmusait is. Ezen folyamatok leírása egyrészt nehéz azok összetettsége és kevésbé ismert voltuk miatt, másrészt nagy számítási kapacitást igényel, így fejlesztésük számos jövőbeli kutatás tárgyát kell, hogy képezze.



6. ábra: Az AROME modell mikrofizikai parametrizációjának sematikus ábrája (SED: sedimentáció) [11 – met.hu]

A legelterjedtebb mikrofizika sémák a momentumos (v. bulk) módszert alkalmazzák. Ezek a hidrometeorokat tulajdonságaik (alak, méret, halmazállapot) szerint különböző kategóriákba sorolják, majd az egyes kategóriákra külön számolják ki a momentumokat, a keverési arányt, illetve a koncentrációt (6. ábra). A kategóriákon belül a részecskék méretét Gamma-eloszlással közelítik [2 – Weidinger és mtsai., 2013] (a mikrofizika sémák másik csoportjában a méreteloszlást folytonos függvény helyett diszkrét méret kategóriákkal írják le). Így analitikusan megoldható egyenleteket kapunk, viszont a cseppek nagy esési sebessége

miatt a feladat instabillá válhat. Ezt általában az időlépés feldarabolásával küszöbölik ki, továbbá az egyes időlépcsőkön belül mindig utoljára hívják meg a sémát. Attól függően, hogy hány hidrometeorot különítenek el és hogy egy- vagy kétmomentumos a módszer, további prognosztikus egyenletekkel bővül a modell. Az általunk használt mikrofizika sémák a következők:

Lin (1983)

Ez a séma 6 hidrometeor típust különít el, melyek: a vízgőz, felhővíz, eső, jég, hó és graupel. Ez a viszonylag kifinomult séma a legalkalmasabb a WRF-fel végzett kutatásokhoz (Skamarock és mtsai., 2008). A séma korábbi változatához képest realisztikusabban írja le a jégeső kialakulását, mely már nem közvetlenül a felhőjégből alakul át, hanem a kettő között a hó állapotát is felveszi. A szimulált hó a felhőben ezáltal csökkenti a felhőjég mennyiségét, valamint az esőt a felhő kialakulásának korai fázisában (Lin és mtsai., 1983).

WRF Single-Moment (WSM) 3/5/6 fázisú sémák

A WSM3 által tartalmazott hidrometeor típusok a vízgőz, felhővíz/felhőjég, és eső/hó. Utóbbiak esetében a fagyási szinthez képesti elhelyezkedés jelenti az elkülönítést. A séma hatékonyan kezeli a jéggel kapcsolatos folyamatokat, a túlhűlt vízzel és a fokozatos olvadással azonban nehezebben számol. Az 5 fázisú változata ugyanezeket a hidrometeorokat tartalmazza, azonban utóbbiakat külön kategóriaként, így lehetővé téve a túlhűlt víz jelenlétét, és a hó fokozatos olvadást a fagyási szint alatt. A 6 fázisú séma már a graupelt is külön változóként kezeli. Míg a WSM5 a mezoskálájú és a tényleges felhőméret közötti átmeneti felbontáson lehet ideális, addig a WSM6 az utóbbi, nagyobb felbontáson (Skamarock és mtsai., 2008). Ahogy a nevük is jelöli, ezek a sémák a többmomentumos sémákkal szemben csak a keverési arányt prognosztizálják [13 – *ucar.edu*].

Thompson graupel séma (2004)

Ennek a bulk-típusú parametrizációnak különlegessége, hogy a hó feltételezett méreteloszlását a víztartalomtól és a hőmérséklettől is függővé teszi, ami így egy exponenciális és egy gamma eloszlás összegeként jelenik meg. Valamint a hóhehely alakját nem gömbölyűként feltételezi, ezzel tovább közelítve a valóságot. Exponenciális helyett

gamma eloszlással írja le a graupel méreteloszlását, valamint jól szimulálja a szitáló esőcseppek esési sebességét is. De a séma korábbi változatához képest más téren is fejlesztették, mint a fázisátalakulásokhoz, vagy telítettséghez kapcsolódó folyamatok pontosabb modellezése (*Skamarock és mtsai.*, 2008).

4.2.3. Planetáris határréteg

A planetáris határréteg (PHR) a légkör alsó néhány száztól néhány kilométerig terjedő rétege, melyben turbulens átkeveredés valósul meg. Ez a réteg felelős a kisskálájú függőleges turbulens fluxusok kialakulásáért a légkörben, melyek kiszámítása, – a réteg magassága mellett – a parametrizáció elsődleges feladata. A réteg tulajdonságainak meghatározásában a sugárzás, a stabilitási viszonyok, a szélnyírás és a bekeveredés játszanak szerepet [2 – *Weidinger és mtsai.*]. A numerikus modell explicit módon nem számolja a vertikális diffúziót, azt parametrizálni kényszerülünk a PHR sémák alkalmazásával. A fluxusok meghatározásával a séma kiszámítja a hőmérséklet, a nedvesség és a horizontális momentum változását a légkör különböző szintjein. A legtöbb PHR séma száraz keveredést feltételez, egyesek azonban képesek kezelni a telítési folyamatokat, melyek visszahatnak a keveredésre. Továbbá elkülönítik a rácsméretű, illetve az annál kisebb örvényeket. A néhány kilométeres felbontásnál ez a megközelítés már háttérbe szorul és az egydimenziós határréteg sémák helyett 3 dimenziós diffúziós sémákat alkalmaznak.

A sémák által használt lezárások egyik fajtája a lokális lezárás, melynél a fluxusok csak az adott rácspont változóitól, illetve azok gradienseitől függnnek. Ez azonban instabil, konvektív környezetben, ahol nagyobb örvények dominálják a légköri transzportot, már nem jó közelítés. Ezt a problémát a nem-lokális sémák alkalmazásával próbálják kiküszöbölni (*Hu et al.*, 2010)

YSU (Yonsei University) (2006)

Ez az elsőrendű lezárást alkalmazó, nem-lokális séma a korábbi változatával (MRF – **Medium Range Forecast**), illetve több másik határréteg parametrizációval ellentétben, a réteg tetején, explicit módon kezeli a bekeveredést a szabadlégkör irányából. Az instabil határréteg keveredését a K diffúziós együttható profilja, illetve gradiens módszer segítségével számolja.

A réteg tetejének magasságát a bulk Richardson szám kritikus értéke alapján határozza meg, mely a felhajtóerő vertikális eloszlásától függ. Szelesebb, stabil környezetben egy kiterjesztett diffúziós algoritmus biztosítja a mély átkeverést (*Skamarock és mtsai.*, 2008).

Mellor-Yamada-Janjic (2002)

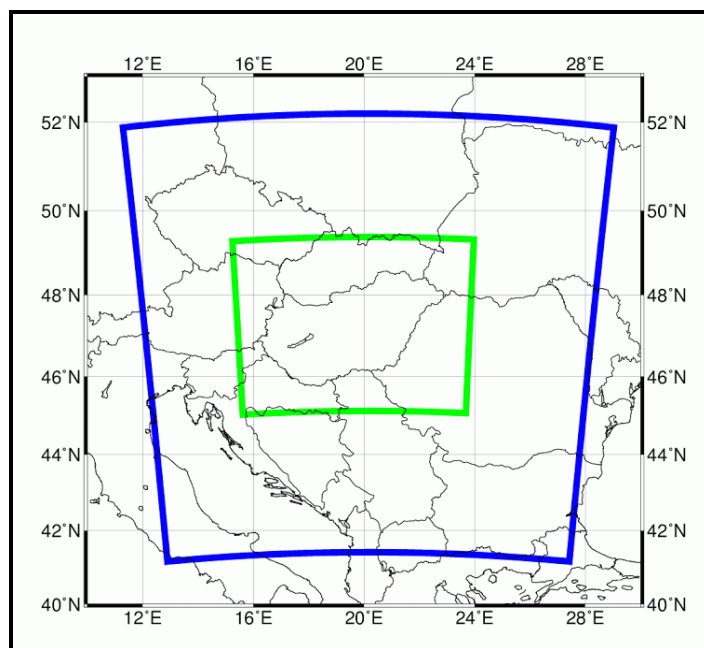
Az YSU sémával ellentétben ez egy lokális séma, mely 1,5-rendű lezárást alkalmaz, ezzel megkövetelve egy további prognosztikus egyenletet. Ebben a turbulens kinetikus energia (TKE) kerül meghatározásra, majd ennek segítségével a diffúziós együttható kiszámítása történik. Az örvények karakterisztikus méretére egy felső határt alkalmaz, mely a TKE, a felhajtóerő és a szélnyírás függvénye (*Skamarock és mtsai.*, 2008). A planetáris határréteg magasságát szintén a TKE alapján számítja, míg a bekeveredést nem explicit módon, hanem a határréteg keveredésének részeként. A séma hátránya, hogy a szabad konvekciós áramlás felé közelítve egyre kevésbé megbízható, mint stabil körülmények esetén (*Hu és mtsai.*, 2010)

Bougeault és Lacarrere (1989)

A harmadik PHR séma, melyet használtunk, az MYJ parametrizációhoz hasonlóan: turbulens kinetikus energia, azaz 1,5-rendű lezárást alkalmazó lokális séma, mely a turbulens fluxus értékeit a változók rácspontbeli értékeiből és deriváltjaiból határozza meg. A diffuzivitás a TKE-val, a keveredési hosszal, illetve egy állandóval arányos. Utóbbiak megválasztása és a határréteg magasságának kiszámítása a MYJ sémától eltérő. Továbbá míg előbbi sémánál a momentumra, a hőre, valamint a TKE-ra használt diffúziós együtthatók értéke különbözik, addig a BouLac-nál ezek egyenlők.

4.3. Modell szimulációk és beállításaik

A vizsgálataim első felének célja az volt, hogy az általunk használt térbeli tartományokon és időpontokban a lehető leghatékonyabb fizikai parametrizációkat válasszuk ki a dolgozat második felének alapjául szolgáló számításoknak. Ebben az esetben a WRF modellhez a GFS FNL (Final aNaLysis) analízis mezőket használtam kezdeti- és peremfeltételként. Ezeket a modellfuttatásokat két domainen végeztük el; egy, a Kárpát-medencét egészében tartalmazó tartományon, illetve egy finomabb felbontású belső tartományon, mely hozzávetőlegesen Magyarország területét fedi le (7. ábra). Előbbi terület horizontális felbontása 20*20 km és 63*62 rácspontot tartalmaz, míg az utóbbi esetében ezek az adatok 6,67*6,67 km és 96*72 rácspont. A vertikális szintek száma mindkét domainen 44, a modell alsó 3 km-es rétegében sűrített szintekkel.



7. ábra: A vizsgálatok során alkalmazott modellrácsok földrajzi elhelyezkedése.

A fizikai parametrizációk közül a tesztelések során hármat, a mikrofizika, a cumulus konvekció és a planetáris határréteg sémáit változtattuk. A mikrofizika esetében öt parametrizációt vizsgáltunk, melyek a következők voltak: Lin et al. séma (röv.: LIN), WRF Single-Moment 3/4/6 fázisú sémák (WSM3, WSM4, WSM6) és a Thompson graupel séma (THG). A cumulus konvekció parametrizációi közül négygel futtattuk a modellt: Kain-Fritsch (KF), Betts-Miller-Janjic (BMJ), Arakawa-Schubert (AS) és Grell 3D ensemble (GR)

sémával. A határréteg fizika sémái közül hármat, az YSU (YSU), a Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) és a Bougeault and Lacarrere (BL) parametrizációkat vizsgáltuk.

A 60 lehetséges konfiguráció közül 12 különböző beállítással futtattuk a modellt, melyek az 2. táblázaton láthatóak (zárójelben a séma WRF-ben használt sorszáma). A későbbi szimulációk során használt 13 szinoptikus helyzet közül kettőt választottunk ki; egy nyári (2013. június 12., Péczely: Aw), illetve egy téli esetet (2013. január 22., Péczely: C).

2. Táblázat: Az ideális parametrizáció kombináció megállapításához használt beállítás együttesek (zárójelben a WRF-ben használt azonosítójuk).

Mikrofizika	Cumulus konvekció	Planetáris határréteg
<i>Lin et al. (2)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM4 (4)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM4 (4)</i>	<i>Arakawa-Schubert (4)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM4 (4)</i>	<i>Grell 3D ensemble (5)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM4 (4)</i>	<i>Betts-Miller-Janjic (2)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM3 (3)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM6 (6)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>Thompson graupel (8)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>YSU (1)</i>
<i>WSM4 (4)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>Mellor-Yamada-Janjic (2)</i>
<i>WSM4 (4)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>Bougeault and Lacarrere (8)</i>
<i>Thompson graupel (8)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>Mellor-Yamada-Janjic (2)</i>
<i>Thompson graupel (8)</i>	<i>Kain-Fritsch (1)</i>	<i>Bougeault and Lacarrere (8)</i>

4.4. Statisztikai verifikációs módszerek

A következő fejezetben bemutatott verifikációhoz 4 különböző statisztikai módszert alkalmaztam. Ezek a következők voltak:

Átlagos eltérés (Mean Bias, MB)

Ez a statisztika két mező között az egyik legegyszerűbb összehasonlítási módszer. Számításának alapja a két adatsor egyes rácspontjaihoz tartozó értékek különbségeinek összegzése. Hátránya, hogy csak ezeket az eltéréseket veszi figyelembe, így lényegében csak az állapítható meg, mekkora az egyik mező másikhoz képesti alul- vagy felülbecslése.

$$MB = \frac{1}{N} \sum [O(x) - M(x)] \quad (1)$$

ahol O a megfigyelési mező, míg M a modell által szimulált mező.

Átlagos négyzetes eltérés (Root Mean Square Error, RMSE)

Az RMSE az előzőhöz hasonló, azzal a különbséggel, hogy jobban súlyozza azokat a pontokat, ahol adatsor eltérése nagy, mivel a differenciák négyzetét összegzi. Viszont a statisztika itt használt változata csak abszolút eltérést mér a gyökvonás miatt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O(x) - M(x))^2} \quad (2)$$

Pearson-korreláció

Az előbbiekkal ellentétben ez a statisztika, – mint minden korreláció – az adatsorok átlagát, valamint szórását felhasználva nem a két mező közötti effektív különbséget, hanem az értékek „mintázatát”, változását veszi figyelembe.

$$r = \frac{\sum [(M(x) - \bar{M}) \times (O(x) - \bar{O})]}{\sqrt{\sum (M(x) - \bar{M})^2} \sqrt{\sum (O(x) - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

Heidke Skill Score (HSS)

Az utolsó statisztikai módszer melyet használtam, a kontingencia-táblázaton (3. táblázat) alapuló HSS (Nurmi, 2003). Utóbbi tulajdonságának köszönhetően az eredmény szignifikanciája χ^2 próbával vizsgálható. Az értékek $-\infty$ és 1 között változnak. 1 felé haladva az előrejelzés minősége javul, míg egy véletlenszerű becslés eredménye 0.

3. Táblázat: Kontingencia táblázat

Esemény előrejelezve	Esemény megfigyelve	
	Igen	Nem
Igen	a	b
Nem	c	d

$$HSS = \frac{2 \times (ad - bc)}{[(a + c) \times (c + d) + (a + b) \times (b + d)]} \quad (4)$$

5. Eredmények

5.1. Ideális parametrizáció-kombináció meghatározása

A szimulációk verifikálásához két különböző adatbázist használtam. Az egyik az MSG (METEOSAT Second Generation) műholdak mérései, melyek a KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) adatbázisában érhetők el. Ezek a műholdak rendszeresen mérik többek között a felhőzet fizikai tulajdonságait, a csapadékintenzitást, illetve a földfelszínre érkező rövidhullámú sugárzást. Az összehasonlításokhoz a műholdas mérések közül az utóbbi kettőt használtam. A másik forrás a szintén KNMI által elérhető E-OBS adatbázis, melyből a napi csapadékmennyiséget vettem számításba.

Az eredmények a 4. táblázatban láthatóak összefoglalva. A legideálisabb sémák kiválasztásához egy rendkívül egyszerű módszert alkalmaztam. Ahogy a táblázatban látható, minden szám az adott esetben legjobban teljesítő parametrizációt jelöli. Így a bal felső sarokban található „4”-es azt jelenti, hogy a nyári (júniusi) esetben az 1-es domainen szimulált sugárzás eltérése (alul- vagy felülbecslése) a megfigyelésektől BIAS statisztikával számolva a WSM4 mikrofizika használatakor volt a legcsekélyebb. A sugárzás oszlopban található esetenként három, illetve a másik kettő változó alatti, esetenként egy sor a vizsgált mérési intervallumokat jelöli. Fontos megemlíteni, hogy az értékek összehasonlításakor amennyiben egy séma többször szerepel (pl. a *Kain-Fritsch* séma a 12 konfigurációból 9-ben), az értékei átlagolódnak. Ezek után a kiválasztott sémák azok lettek, melyek a legtöbbször bizonyultak ideálisnak. Bár a módszer létjogosultsága némiképp megkérdőjelezhető, azonban mivel igen egyértelmű eredmények adódtak, illetve számunkra csak az ideális parametrizációk kiválasztása volt a cél, ebben az esetben jól használható.

A mikrofizika sémák közül a WSM4-es bizonyult a legjobbnak, a 40 esetből 15-ben adta a legjobb eredményt. Ezek után következett a WSM6 (9), a WSM3 és a *Lin et al.* (8-8). Némileg meglepő, hogy a *Thompson* séma egyik esetben sem volt a legeredményesebb. Feltűnő továbbá, hogy a WSM sémák nyáron annál inkább teljesítettek jobban, minél több hidrometeor kategóriát írnak le. Az előrejelzett változókat külön tekintve a mikrofizika sémák eredményei hasonlóak voltak.

4. Táblázat: A 2. táblázatban bemutatott kombinációkkal készült szimulációk verifikációja a téli illetve nyári esetre. A számok a legjobb verifikációs mérőszámmal rendelkező parametrizáció sorszámat jelöli (a többször használt parametrizációk esetén átlagolt mérőszám alapján).

	Sugárzás				Napi csapadékösszeg				Csapadékkintenzitás			
	BIAS		HSS		BIAS		HSS		BIAS		HSS	
domain	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
mikrofizika												
Nyár	4	6	4	4	4	4	6	4	4	6	3	2
	6	3	4	4								
	6	6	6	6								
Tél	3	2	4	3	2	2	4	3	2	3	3	4
	2	4	4	4								
	2	6	2	3								
cumulus												
Nyár	5	5	5	4	4	4	1	4	4	4	2	4
	5	5	5	5								
	5	5	5	1								
Tél	1	1	5	5	1	1	5	5	1	2,4,5	5	2,4,5
	5	1	5	2								
	1	4	1	1								
PHR												
Nyár	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	8	8
	1	1	8	1								
	1	1	1	8								
Tél	2	2	1	1	2	2	1	1	2	8	1	1
	1	8	2	1								
	8	1	8	2								

A cumulus konvekció parametrizációi közül az esetek majdnem felében (19-szer) a *Grell* séma bizonyult legjobbnak. Átlagosan teljesített a *KF* és az *AS* séma (11-10), míg a legrosszabb a *BMJ* lett. Ami a változókat illeti, a *Grell* csak a sugárzás tekintetében volt a legsikeresebb, míg a csapadékos változók esetében az *AS*-t kell megemlíteni.

A határréteg sémák között még erősebb dominancia rajzolódott ki. Az esetek több, mint felében (22-szer) a *YSU* séma használata volt a legeredményesebb, míg 10-szer a *MYJ*, 8-szor pedig a *BL* parametrizáció. Előbbi séma adta a legjobb statisztikákat mind nyáron és télen, illetve mindhárom változó tekintetében is.

Az eredmények alapján tehát a dolgozat második felében bemutatott számítások alapjához a WRF-ben a *WSM4* mikrofizika-, *Grell 3D ensemble* cumulus konvekció, és *YSU* planetáris határréteg sémákat használtam.

5.2. ECMWF és GFS kezdeti feltételekkel futtatott WRF verifikációja

Az ideális fizikai parametrizációk kiválasztása után az ECMWF és GFS által előállított kezdeti feltételek összehasonlítása következett. Ezt két részre különítettem el: az első esetben – melyet ebben a fejezetben tárgyalok – a WRF szimulációkat a korábban is használt adatbázisok adataival vettem össze, ezáltal arra engedve következtetni, hogy az egyes helyzetekben melyik globális modell produktumainak használata vezet jobb eredményekre. A következő fejezetben a WRF szimulációk egymással való összehasonlítását mutatom be, illetve azok érzékenységét a kezdeti feltételek és a cumulus parametrizáció megválasztására.

A mérésekkel való összehasonlításhoz szintén a parametrizációs részben használt adatbázisokat vettem alapul. Az E-OBS által nyújtott napi csapadékösszeg mezőket napi átlagos tengerszinti légnyomás-, illetve átlagos hőmérséklet mezővel egészítettem ki. A műholdas mérések változói azonosak a korábbiakkal: felszínre érkező rövidhullámú sugárzás és csapadékinzítás. Utóbbi változók esetében a 12 UTC-re vonatkozó mérést vettem számításba. Összesen tehát a változók száma ötre bővült. Az egyes változókra levágási szintet alkalmaztam, mely segítségével kiszűrtem az esetlegesen irreális eltéréseket a modell eredmények és a megfigyelések között. Az átlagos légnyomás esetében ez 5 hPa, az átlaghőmérsékletnél 5 °C, míg a sugárzásnál 300 W/m². Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban az ECMWF/GFS kezdeti feltételekkel indított WRF modellfuttatások helyett csak a globális modellek (rövidített) nevét használom (ECM/GFS). A verifikációs statisztikák közül ebben az esetben az MB-t, az RMSE-t valamint a Pearson-korrelációt használtam. A táblázatokban látható színezés értelmezése az 5. táblázatban látható. A GFS és ECM közül az aktuális szimulációban, adott statisztika szerint jobban szereplő modell eredményét zöldes-, míg a rosszabbat pirosas árnyalattal színeztem. Azonos értékek esetén mindkettő középkék háttérrel kapott.

5. Táblázat: Az eredményekhez vonatkozó színskála

	MB és RMSE	Pearson-korr.	
	0-1	0,9<	
	1-10	0,7-0,9	
	10<	0,7>	

5.2.1. Napi átlagos tengerszinti légnyomás

Az első bemutatott változó a tengerszintre vonatkoztatott légnyomás napi átlagértékei, melyet az E-OBS méréseinek segítségével verifikáltam (6. táblázat). Az MB értékek szinte az összes esetben 1 hPa-on belül maradnak, míg az RMSE statisztika értékei általában 0,9 és 1,6 között alakulnak, így viszonylagosan jó becsléseket produkálva. A Pearson-korreláció szórása az egyes napok között ennél a változónál a legnagyobb: ugyanúgy található 0,1-es érték a táblázatban, mint 0,96. Feltűnő, hogy a korreláció az esetek többségében a 2-es domainen rosszabb, mint a nagy modellrácon. Ennek oka, hogy a nagyskálájú folyamatok leírása az egyes modellekben pontosabb, mint a kisskálájúaké. Érdekes továbbá, hogy a korrelációk a nyári félévben általában alacsonyabbak, mint télen.

A táblázatról némi szemrevételezés esetén az ECM kezdeti feltételek jobb teljesítménye olvasható le. Az átlagos eltérések szerint az ECM adatok használata 13-ból 8 esetben adott jobb becslést az GFS-es társánál az 1-es, valamint a 2-es domainen is. Az RMSE értékek azonban fordított teljesítményt mutatnak, ugyanis mindkét területen 7 alkalommal a GFS oszlopában szerepel kisebb érték. Végül a Pearson-korreláció szintén az ECM felé hajlik, ha csak minimálisan is. Utóbbi statisztika szerint az európai modell kezdeti feltételei 7-7 alkalommal voltak sikeresebbek az amerikaiénál. Összességében a sikeresebb teljesítmények száma 41 (ECM) – 35 (GFS).

6. Táblázat: A napi átlagos tengerszinti légnyomás verifikációjának eredményei.

	MB - D1 [hPa]		MB - D2 [hPa]		RMSE - D1 [hPa]		RMSE - D2 [hPa]		PR - D1		PR - D2	
	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS
január 22.	-0,760	-1,138	-0,125	-0,664	1,405	1,578	1,209	1,348	0,799	0,811	0,733	0,743
január 27.	0,287	-0,096	0,303	0,017	1,162	1,158	0,947	0,915	0,786	0,765	0,476	0,483
március 15.	-0,327	-0,428	-0,677	-1,031	1,587	1,586	1,493	1,600	0,924	0,938	0,925	0,941
április 12.	-0,214	-0,306	-0,303	-0,462	1,278	1,230	1,025	0,988	0,913	0,913	0,885	0,860
június 12.	0,214	-0,176	0,387	-0,115	0,961	0,961	0,941	0,865	0,960	0,957	0,913	0,910
június 18.	-0,527	-0,654	-0,581	-0,523	1,144	1,188	1,062	1,023	0,300	0,276	0,103	0,094
július 8.	-0,121	-0,115	0,317	0,364	1,157	1,125	0,939	0,953	0,883	0,887	0,783	0,789
augusztus 25.	-0,100	-0,212	0,348	0,290	1,134	1,142	0,965	0,941	0,667	0,664	0,340	0,375
szeptember 12.	0,050	-0,218	-0,013	-0,224	0,886	0,918	0,835	0,842	0,654	0,637	0,482	0,457
szeptember 30.	0,597	0,287	1,202	0,638	1,624	1,428	1,612	1,196	0,921	0,923	0,847	0,843
október 2.	-0,877	-1,045	-0,676	-0,995	1,413	1,538	1,129	1,343	0,932	0,926	0,880	0,865
október 22.	-0,377	-0,438	-0,263	-0,321	1,264	1,227	1,062	1,015	0,816	0,821	0,771	0,759
december 23.	0,130	-0,085	0,126	-0,143	1,210	1,200	0,981	1,035	0,902	0,887	0,575	0,592

Ami a szinoptikus helyzeteket illeti, az ECM 5, a GFS pedig 4 esetben gyűjtött több jobb statisztikát, míg a maradék 4 esetben ilyen szempontból hasonlóan sikeresen szerepeltek.

A legmeghatározóbb ECM sikerrel zárult szimulációk a szeptemberi ciklonhoz (mCc), valamint az októberi anticiklonhoz (An) kapcsolódnak. Ezzel szemben az GFS hasonlóan meggyőző fölényt a januári anticiklonnál (Ae) és a szeptemberi mediterrán ciklonnál (MCw) ért el. A legrosszabb korreláció a június 18-i napon figyelhető meg, mely jellegzetes anticiklonális nyári nap volt. Az egész külső domain területén a tengerszinti légnyomás 1014–1017 hPa között változott. Markáns szinoptikus vonások hiányában a nyomási területi eloszlását és ezzel párhuzamosan a szimulációkkal vett korrelációt a helyi hatások határozták meg.

5.2.2. Rövidhullámú sugárzás

A következő vizsgált változó a felszínre érkező rövidhullámú sugárzás volt, melynek verifikációjához az MSG műholdas mérések szolgáltak alapul. Szinoptikus helyzettől függetlenül az összehasonlítások a 12 UTC-s méréseket veszik számításba. Elsőként megemlíthető, hogy mind abszolút, mind relatív viszonylatban is ebben az esetben születtek a leginkább eltérő eredmények a megfigyelt értékektől, valamint jól látható, hogy két téli szimulációt leszámítva a modell minden esetben felülbecsülte a sugárzás mértékét a műholdas mérésekhez képest (7. táblázat). Többé-kevésbé megállapítható az is, hogy a nyári félévben a modellek abszolút tévedése nagyobb volt, mint a téli félévben, amikor a sugárzás mértéke egyébként is kisebb.

7. Táblázat: A rövidhullámú sugárzás verifikációjának eredményei (12 UTC-s mezők alapján).

	MB - D1 [W/m ²]		MB - D2 [W/m ²]		RMSE - D1 [W/m ²]		RMSE - D2 [W/m ²]		PR - D1		PR - D2	
	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS
január 22.	-4,145	0,808	21,478	0,579	121,541	124,301	81,368	95,820	0,458	0,387	0,347	0,351
január 27.	-127,270	-99,992	-79,282	-28,640	163,564	163,196	128,589	145,870	0,499	0,343	0,412	-0,171
március 15.	-108,712	-119,212	-114,567	-126,029	152,293	153,291	148,164	153,417	0,626	0,614	0,504	0,355
április 12.	-67,920	-56,100	-44,798	0,055	149,391	151,766	138,505	136,169	0,667	0,611	0,410	0,351
június 12.	-71,958	-63,427	-43,024	-51,037	150,756	150,363	153,616	161,009	0,562	0,605	0,345	0,297
június 18.	-86,652	-85,547	-85,581	-82,675	100,355	100,548	87,681	87,196	0,301	0,382	0,362	0,399
július 8.	-95,141	-106,546	-86,117	-93,286	132,558	134,144	107,059	108,831	0,244	0,290	0,433	0,433
augusztus 25.	-92,387	-76,801	-79,828	-56,429	149,212	144,068	141,743	138,354	0,683	0,673	0,710	0,788
szeptember 12.	-89,483	-75,690	-35,919	-43,677	158,527	156,322	149,974	148,269	0,496	0,462	0,458	0,329
szeptember 30.	-17,327	-26,386	64,034	51,176	115,825	115,840	108,552	109,630	0,741	0,777	0,839	0,810
október 2.	-80,790	-85,651	-94,649	-95,996	146,032	149,584	180,112	173,651	0,553	0,515	0,174	0,247
október 22.	-47,217	-37,935	-33,545	1,155	137,573	142,495	163,738	171,228	0,566	0,556	0,370	0,176
december 23.	4,134	16,870	45,910	38,213	106,600	104,086	130,075	125,727	0,514	0,591	0,137	0,246

Ami az ECM-GFS összehasonlítást illeti, a légnyomáshoz hasonlóan, ha minimálisan is, de az európai modell teljesített meggyőzőbben (össz.: 40 – 37). A MB értékeket tekintve ebben az esetben a GFS kezdeti feltételek használata bizonyult jobbnak: az 1-es és 2-es domainen is a 13-ból 8-8 esetben múlta felül az ECM-et. Némiképp érdekes módon azonban az RMSE értékek ellentétes eredményeket adtak: az 1-es domainen az ECM 8, míg a 2-esen 7 helyzetben eredményezett kisebb értékeket, mint a másik. A Pearson-korreláció szintén az európai modell által származtatott kezdeti feltételek használatával mutat több magasabb értéket, az 1-es területen 8, míg a 2-esen 7 alkalommal.

A szinoptikus helyzetek alapján összegezve az ECM 5, míg a GFS 3 esetben bizonyult jobbnak, míg a többiben hasonlóan teljesítettek. Előbbi modell minden statisztika szerint sikeresebb volt a márciusi mediterrán ciklon (CMc) esetén, míg utóbbi meggyőző eredményei a nyári, illetve őszi anticiklonokhoz (A, AF és As) köthető. Látható, hogy a január 22-i szimulációban a 2-es domainen a GFS nagyon pontos MB értéket adott, míg az ECM alulbecsülte a sugárzást. A két modell között a délnyugati területeken volt különbség, ahol előbbi modell a gyengébb felhőzet előrejelzésében teljesített jobban, így jobban közelítve a sugárzást. Érdekes a szeptember 30-i, mediterrán ciklon előoldali helyzete, mely során mindkét kezdeti feltétellel hasonlóan magas korreláció értékek születtek. A többi változó esetében azonban ekkor a GFS fölénye volt jellemző.

5.2.3. 2m-es napi átlaghőmérséklet

A 2-méteres napi átlaghőmérséklet (E-OBS) szimulációjának minősége nagyon kiegyenlített a különböző helyzetekben (7. táblázat). Míg az abszolút átlagos eltérések 0,5 és 2 °C között változnak, addig az átlagos négyzetes eltérések az esetek nagy százalékában 1,5 és 2,3 °C között maradnak. Feltűnő az is, hogy szinte minden esetben a WRF szimulációk alulbecsülték az átlaghőmérsékleti értékeket. Hasonlóan kiegyenlített, illetve ezzel együtt jó eredményeket mutat a Pearson-korreláció is, mely csak néhány esetben esik 0,8 alá, legtöbbször a 2-es domain területén.

Az összehasonlítást vizsgálva kismértékű GFS fölény rajzolódik ki (össz.: 34 – 43). Az MB statisztika az előző változókhoz hasonlóan a GFS jobb teljesítményét mutatja. Míg az 1-es domain területén 9-szer, a 2-esen 8 alkalommal adott alacsonyabb értékeket. Ugyanezek a számok az RMSE értékek szerint 7, illetve 8. A Pearson-korreláció ennél a változónál is

billenti a mérleg nyelvét az ECM felé: míg az 1-es domainen 7 alkalommal jobb a GFS, addig a 2-esen ugyanennyiszor az ECM a sikerebb.

8. Táblázat: 2m-es napi átlaghőmérséklet verifikációjának eredményei.

	MB - D1 [°C]		MB - D2 [°C]		RMSE - D1 [°C]		RMSE - D2 [°C]		PR - D1		PR - D2	
	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS
január 22.	1,465	1,703	2,323	2,572	2,262	2,418	2,603	2,824	0,935	0,927	0,873	0,875
január 27.	-0,768	0,712	-0,556	0,614	1,932	1,991	1,697	1,820	0,848	0,875	0,780	0,777
március 15.	1,153	1,063	0,913	0,821	2,006	1,938	1,615	1,610	0,854	0,876	0,427	0,471
április 12.	0,933	1,035	0,952	1,475	1,609	1,710	1,383	1,850	0,883	0,874	0,896	0,870
június 12.	1,418	1,418	1,435	1,376	1,870	1,919	1,798	1,744	0,834	0,817	0,716	0,736
június 18.	1,778	1,688	1,865	1,521	1,980	1,988	2,057	1,799	0,910	0,865	0,769	0,687
július 8.	1,846	1,751	1,903	1,746	2,171	2,095	2,147	2,036	0,884	0,885	0,865	0,848
augusztus 25.	1,867	1,463	1,957	1,510	2,186	1,816	2,164	1,840	0,929	0,937	0,895	0,887
szeptember 12.	1,435	1,380	1,700	1,588	1,895	1,784	1,995	1,844	0,925	0,936	0,692	0,746
szeptember 30.	1,102	0,870	1,018	0,965	1,889	1,559	1,512	1,433	0,919	0,921	0,774	0,800
október 2.	1,236	1,484	1,363	1,946	1,925	2,044	1,750	2,286	0,846	0,853	0,853	0,828
október 22.	1,929	1,370	1,576	1,143	2,299	1,884	1,934	1,616	0,824	0,814	0,816	0,790
december 23.	0,893	0,690	1,402	1,501	2,005	2,168	1,842	2,171	0,687	0,573	0,630	0,527

Ami a szinoptikus helyzeteket illeti, az ECM 5, míg a GFS 7 helyzetben volt jobb a másikonál. Előbbi meggyőzően jól teljesített a januári ciklonnál (C), az októberi északi anticiklonnál (An), illetve a decemberi zonális helyzetnél (zC). Utóbbinál többek között kiemelhető a márciusi mediterrán ciklon (CMc), valamint a szeptemberi hidegfront (mCc) és mediterrán ciklon (CMw). Részletesebben megvizsgálva érdekes a január 27-i keleti anticiklon esete, mely során az ECM felül-, míg a GFS alulbecsülte a hőmérsékletet. Ennek oka, hogy az európai modell kezdeti feltételeivel a WRF kevesebb felhőzetet szimulált, ezáltal a felmelegedés nagyobb mértékű volt. Több esetben is kimagaslóan jó korrelációkat láthatunk, főleg az 1-es tartományon. A legmagasabb értékek az augusztusi anticiklonhoz köthető, mely képződmény tulajdonságait tekintve ez nem is meglepő. Annál inkább az, hogy a modellek jól szerepeltek a január 22-i, illetve a szeptemberi helyzetekben is, melyek mindegyikében egy ciklon határozta meg a térség időjárását.

5.2.4. Csapadékintenzitás

A csapadékintenzitás verifikációjához használt adatokat szintén a műholdas mérések szolgáltatták. Az egyes statisztikák kiszámítása csak abban az esetben történt, ha a csapadékos rácpontok száma elért egy minimális darabszámot (7%). Bár maguk az értékek az egyes helyzetekben a csapadékos rácpontok eltérő száma miatt nem hasonlíthatók össze egymással,

azonban elmondható, hogy legtöbbször az átlagos eltérés 1 mm alatti (7. táblázat). Jól látszik továbbá, hogy a modell szinte kivétel nélkül felülbecsülte a csapadékokat, valamint az, hogy a korreláció ezen változó esetén volt a legalacsonyabb, hiszen az értékek túlnyomó többsége a 0,3-at sem éri el. Ennek oka a műholdas mérés lehet, mely egyrészt a távérzékelő jellege miatt pontatlanabb, valamint minden pontban mért, nem pedig interpolált értékeket ad, így a közeli pontok közti korreláció sokkal kisebb, mint az E-OBS mezői esetében.

9. Táblázat: A csapadékkintenzitás verifikációjának eredményei (12 UTC-s mezők alapján).

	MB - D1 [mm/óra]		MB - D2 [mm/óra]		RMSE - D1 [mm/óra]		RMSE - D2 [mm/óra]		PR - D1		PR - D2	
	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS
január 22.	0,080	-0,397	0,115	-0,045	2,745	3,409	2,463	2,569	0,134	0,149	0,023	0,009
január 27.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
március 15.	-0,833	-0,514	-0,609	-0,316	2,180	1,488	1,319	0,938	0,418	0,439	0,240	0,320
április 12.	-0,268	-0,091	-0,770	-0,870	1,997	1,833	2,300	2,323	0,194	0,121	0,111	0,078
június 12.	-1,242	-1,034	N.A.	N.A.	4,638	3,918	N.A.	N.A.	0,118	0,153	N.A.	N.A.
június 18.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
július 8.	-0,428	-0,231	N.A.	N.A.	2,001	1,608	N.A.	N.A.	0,251	0,361	N.A.	N.A.
augusztus 25.	-0,984	-0,827	-1,105	-0,558	3,417	3,004	5,778	2,783	0,147	0,133	0,151	0,188
szeptember 12.	-0,229	-0,204	-0,702	-0,204	3,607	3,495	3,262	1,263	0,230	0,282	0,097	0,091
szeptember 30.	-1,238	-1,132	-0,787	-0,503	5,029	3,988	1,888	1,387	0,112	0,207	0,130	0,202
október 2.	-0,237	-0,223	N.A.	N.A.	1,149	0,931	N.A.	N.A.	0,298	0,338	N.A.	N.A.
október 22.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
december 23.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Az ECM-GFS összevetés szempontjából ennél a változónál jelenik meg a legjelentősebb GFS fölény (össz.: 10 – 35). A MB értékek 9-ből 8 esetben a GFS-t mutatják jobbnak az 1-es domain esetén, míg 6-ból 5-ször a 2-esen. Hasonló eredményeket ad az RMSE statisztika is (8-ból 7, illetve 6-ból 4). Ha minimálisan is, de itt is árnyalja a képet a korreláció (8-ból 6, illetve 6-ból 3).

A szinoptikus helyzetek tekintetében is jól megmutatkozik az amerikai modell kezdeti feltételeivel kapott eredmények sikeressége: míg az 7 esetben, addig az ECM 2 esetben volt jobb. Határozottan jobban szerepelt a GFS többek között a márciusi és szeptemberi mediterrán ciklonoknál (CMc és CMw), de több anticiklonos helyzetenél is (AB, An, Aw). Eltérő előjelű MB értékeket kaptam a január 22-i szimulációban. Az eltérés főképp az 1-es domainen határozott, melynek a délnyugati részén a GFS túlbecsli a nem-konvektív jellegű csapadékokat.

5.2.5. Napi csapadékösszeg

Az utolsó változó, melyet vizsgáltam a napi csapadékösszeg volt (E-OBS). A csapadékinzintázáshoz hasonlóan nem szerepelnek az összehasonlításban azok az esetek, melyeknél a csapadékos rácsponatok száma nem haladta meg a 7%-ot. Ez a napi csapadékösszegeknél a két utolsó eset kiesését jelenti. Mind az MB, mind az RMSE értékeknél jelentős szórás látható az eredményekben, általában túlbecsülve a méréseket (9. táblázat). A Pearson-korreláció értékei jelentősen különböznek a két domain esetén. Míg az 1-esnél túlnyomóan sokszor rendkívül alacsony, – nem ritkán negatív – értékeket kaptunk, addig a 2-es domain értékei általában jónak mondhatóak.

10. Táblázat: A napi csapadékösszeg verifikációjának eredményei.

	MB - D1 [mm]		MB - D2 [mm]		RMSE - D1 [mm]		RMSE - D2 [mm]		PR - D1		PR - D2	
	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS	ECM	GFS
január 22.	-2,600	-3,992	-3,340	-1,808	6,193	8,134	5,855	3,586	0,016	0,007	0,550	0,722
január 27.	-0,490	-0,823	-1,020	-1,995	1,769	2,283	2,613	3,713	0,336	0,071	0,681	0,631
március 15.	-9,006	-6,962	-10,944	-7,565	15,918	11,876	15,870	9,937	0,120	0,132	0,625	0,634
április 12.	-0,373	-0,537	-1,019	-2,783	3,059	3,293	4,844	6,166	-0,090	-0,058	0,288	0,213
június 12.	-4,206	-4,307	-3,261	-1,316	10,887	12,271	6,327	3,042	-0,051	-0,026	0,706	0,776
június 18.	-1,693	-0,535	-0,061	0,123	4,937	2,730	0,800	0,951	0,559	0,755	0,879	0,654
július 8.	-2,187	-1,224	-1,457	-0,660	4,776	2,991	3,459	1,729	-0,211	-0,452	0,278	0,652
augusztus 25.	0,227	0,713	-1,190	-0,237	7,392	7,632	10,824	10,026	-0,060	-0,087	-0,138	-0,046
szeptember 12.	1,043	1,310	-0,033	-0,821	6,644	6,906	4,180	5,179	0,062	0,057	0,526	0,730
szeptember 30.	-1,432	-2,862	-3,607	-1,796	11,979	12,174	6,734	5,734	-0,078	-0,223	0,836	0,860
október 2.	-0,753	-0,859	-0,855	-0,757	2,893	3,185	2,685	2,511	0,156	-0,223	0,911	0,945
október 22.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
december 23.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Megállapítható, hogy a két modell teljesítménye rendkívül hasonló, minimálisan jobb ECM teljesítményt mutatva (össz.: 34 – 32). A MB statisztika az 1-es domain területén 11-ből 8-szor az ECM jobb becslését mutatja, míg a 2-es domainen 11-ből 7-szer ad hasonlókat. Az RMSE esetében ezek az értékek 8, illetve 4, azaz utóbbi domainen már a GFS teljesítményét mutatta sikeresebbnek. A korreláció alapján az 1-es domain területén szintén 8 alkalommal jobb az ECM, bár nagyon alacsony, néhol negatív értékekkel, míg a 2-es területen már csak 3-szor ad jobb eredményeket a GFS-nél.

A szinoptikus helyzeteket tekintve is kiegyenlítettek az eredmények, mindkét modell 3-3 esetben múlta felül a másikat. Míg az ECM a januári anticiklon (Ae), az áprilisi, valamint a szeptemberi ciklonok (mCw, mCc) alkalmával volt meggyőző a napi csapadékösszeg előrejelzésében, addig a GFS-nek ez a márciusi mediterrán ciklonnál (CMc), illetve a júliusi

anticiklonnál (AB) sikerült. Az említett márciusi helyzetben azonban mindkét modellnél kimagaslóan nagy abszolút értékeket vesz fel a MB statisztika. Az emlékezetes hidegbetörés idején mindkét kezdeti feltétel jelentősen túlbecsülte a csapadék mennyiségét. Feltűnő továbbá az októberi eset nagyon eltérő korreláció értékei. Ennek oka, hogy a csapadék túlnyomó része csak a nagyobb tartomány területén hullott, míg a kisebbben elhanyagolható, amit a WRF jól vissza is adott.

5.2.6. Összesített eredmények

Az egyes változók kiértékelése után ebben a fejezetben néhány összesített eredményt mutatok be a két modellhez, a verifikációhoz használt megfigyelési adatbázisokhoz, a különböző statisztikákhoz illetve szinoptikus helyzetekhez kapcsolódóan.

Ahogy az előbbi fejezetekből látható volt, az 5 változóból 3-szor a GFS, míg 2-szer az ECM kezdeti feltételek használata eredményezett több, a másikonál jobb statisztikai értékeket, ha utóbbi két esetben ez a fölény nagyon minimális is volt. Összességében így a GFS jobb teljesítménye rajzolódott ki, mely az értékpárok 53,4%-ban adott jobb egyezést. Ez természetesen nem tekinthető szignifikáns különbségnek. Utóbbi arány az 1-es domaint tekintve 51,7%-ra, míg a 2-eset tekintve 55,1%-ra módosul, így elmondható, hogy a nagyobb felbontású, nagyrészt Magyarországot tartalmazó modellrácon valamivel meghatározóbb az amerikai modell produktumának használata.

Érdemes megemlíteni az egyes statisztikákat is külön-külön, ugyanis ebből a szempontból nem egyoldalú az eredmény, bár szignifikáns különbséggel továbbra sem találkozunk. A MB statisztika esetében a GFS 57,9%-ban sikeres, míg az RMSE esetében 53,5%-ban. Ezzel szemben azonban, a Pearson-korreláció az esetek 51,3 %-ban az ECM mellett mutatott nagyobb értéket.

Vizsgáltam továbbá a verifikációhoz használt adatbázisok szerinti teljesítményt is. Az öt változó közül hármat az E-OBS szolgáltatott, melyek a napi átlagos tengerszinti légnyomás, a 2-méteres napi átlaghőmérséklet, valamint a napi csapadékösszeg voltak. Ezen változók eredményeit összegezve a két modell szinte tökéletesen megegyező teljesítményt nyújtott: míg 109 értékpár esetében az ECM, addig 110 esetben a GFS adott jobb eredményeket. Értelemszerűen ezek után nem meglepő, hogy a mérleg nyelvét a műholdas

változók (csapadékintenzitás és sugárzás) billentik a GFS felé, mely ebben az összevetésben az esetek 59 százalékában teljesített jobban.

Végül a szinoptikus helyzetek szerinti értékelést mutatom be, mely talán a legérdekesebb, hiszen az egyes helyzetekben általában a két modell teljesítménye között már szignifikáns különbségek is találhatóak mindkét modell javára. Összességében az ECM 4 esetben produkált több jobb értéket a GFS-nél, míg utóbbi 6-szor múlta felül a másikat. Az európai modell határozottan jobb volt az amerikaiénál (72,4%) az áprilisi ciklon előoldali áramlásrendszerénél (mCw), az északi anticiklonnál októberben (An – 66,7%), valamint a januári ciklonnál a Kárpát-medence fölött (C – 63,3%). Ezzel szemben a GFS legjobb eredményei a márciusi és szeptemberi mediterrán ciklonokhoz (CMc – 70%, illetve CMw – 73,3%), továbbá a nyári anticiklonokhoz köthetőek (AB – 69,2%, illetve AF – 70%). Nem meglepő például, hogy a Kárpát-medence feletti anticiklon esetében a két modell hasonlóan teljesített. Ami pedig a ciklonális és anticiklonális helyzetek szerinti bontást illeti, mindkét esetben a GFS szerepelt jobban: előbbi helyzetekben minimálisan (51,5%), utóbbiakban pedig valamivel határozottabban (55,2%). A kiegyenlítettség megfigyelhető az egyik illetve másik modell által jobban szimulált helyzetek közötti kapcsolat hiányában is. Mindkét modell volt jobb a másikonál ciklonális, illetve anticiklonális helyzetben is.

Összességében az eredményekből az szűrhető le, hogy bár a GFS kezdeti feltételek használata valamivel sikeresebbnek tűnik a vizsgált helyzetekben, azonban jelentős eltérés általában semmilyen összehasonlítás esetében nem jelentkezett. Az egyes szinoptikus helyzeteknél kapott egyik, vagy másik modellt pártoló, meggyőzőnek tűnő eredmények hitelességének bizonyítása alighanem több eset vizsgálatát tenné szükségessé.

A teljesség igényével megvizsgáltam néhány további, a felhasznált statisztikákkal kapcsolatos információt is. Kíváncsi voltam például arra, hogy egyes szempontok szerint csoportosítva a felhasznált statisztikai módszerek eredménye mennyire korrelál egymással. A korrelációt az alapján számoltam, hogy az egyes statisztikák melyik modellt mutatták jobbnak, a konkrét értékeket nem vettem figyelembe. Így például, ha két különböző statisztika minden esetben az ECM kezdeti feltételek használatával adna jobb eredményeket, akkor a köztük lévő korreláció értéke 1 lenne. Ezek után nem meglepő módon a legnagyobb egyezés az átlagos eltérések (MB) és az átlagos négyzetes eltérések (RMSE) között adódott (0,677). Ennél kisebb volt a MB és a Pearson-korreláció közötti „egyvetértés” (0,328), végül az RMSE és a PR közötti (0,214). Általánosan elmondható, hogy a 2-es domainben a statisztikák közti korrelációk (átlagosan 0,492) nagyobbak, mint az 1-es esetén (0,321). Ami az egyes

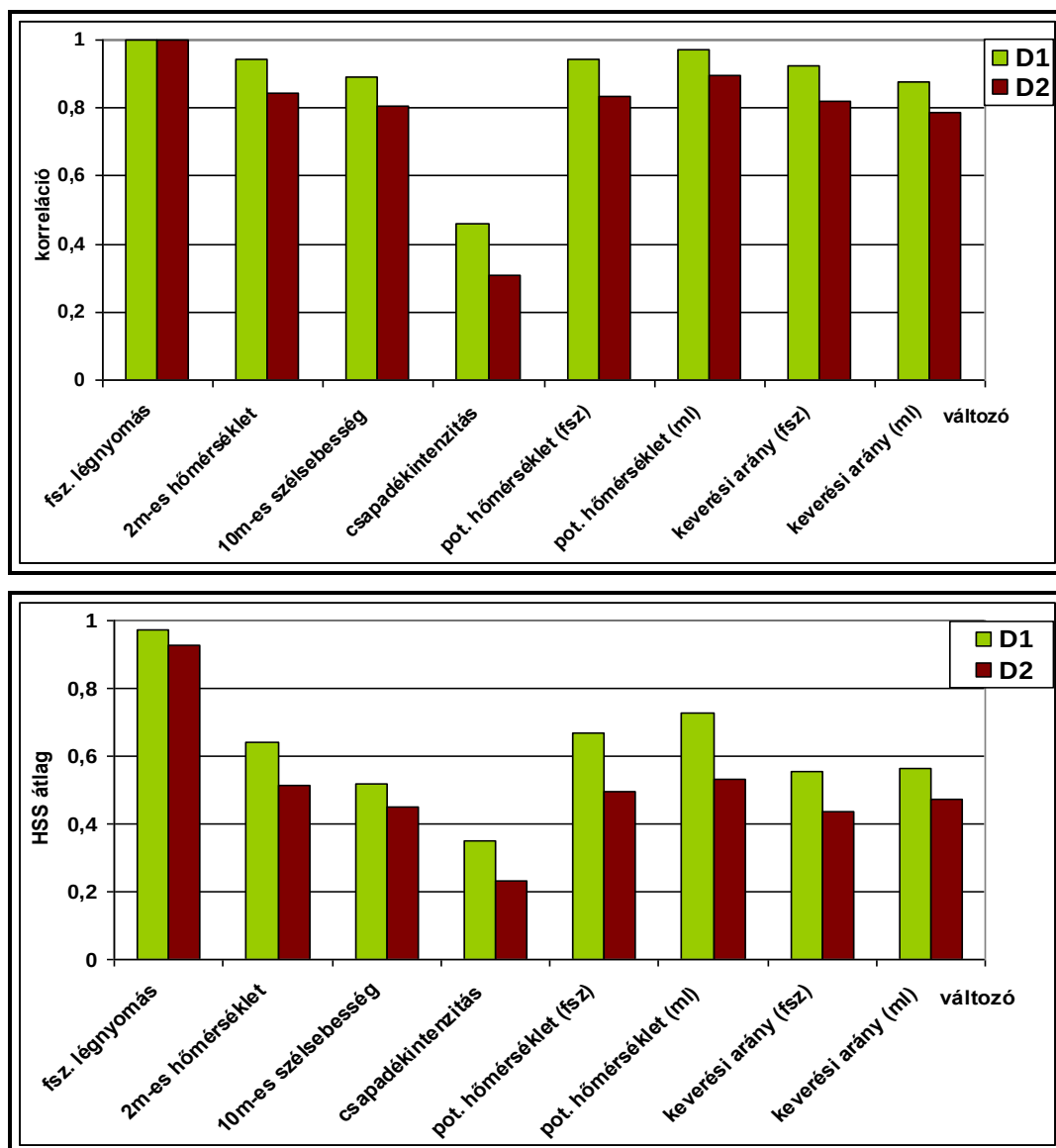
változókat illeti, a legnagyobb egyezés a statisztikák eredményei között a napi csapadékösszeg volt (0,732). Némiképp szerencsétlen, hogy a GFS/ECM teljesítmény pont ennél a változónál volt a legkiegyenlítettebb. Ezután következett az átlaghőmérséklet (0,511), majd a csapadékintenzitás (0,401). A statisztikák közötti legkisebb fokú egyetértések a sugárzás (0,126) és a légnyomás (0,262) esetén voltak. Végül meghatároztam az egyes statisztikák eredményeinek domainek közötti korrelációját. Ekkor kaptam a legalacsonyabb értékeket. Az RMSE esetében a két modellezési terület eredményei közötti korreláció 0,355, a MB-nál 0,193, míg a Pearson-korrelációnál -0,029.

5.3. A WRF érzékenysége a kezdeti feltételekre

A verifikációs vizsgálatok után azt vizsgáltam, hogy effektíven mekkora különbséget jelent a különböző kezdeti feltételekkel való futtatás. A számításokat az előzőekhez képest több változóval végeztem el; ezek a potenciális hőmérséklet, 2 méteres hőmérséklet, keverési arány, 10 méteres szélesség, felszíni légnyomás, valamint a csapadékinテンzítás voltak. Vizsgáltam a szimulációk közti eltérések napi menettől, illetve egyes változók esetén a magasságtól való függését. Továbbá arra is kíváncsi voltam, hogy mekkora a kezdeti feltételekből adódó bizonytalanság a cumulus parametrizáció megválasztásából adódóhoz képest. Ehhez a Grell séma mellett az 5.1. fejezetben bemutatott vizsgálatok során második legjobban teljesítő Kain-Fritsch sémát használtam. Az összehasonlításokhoz 3 statisztikai módszert használtam. Ezek a Pearson-korreláció, az átlagos eltérés (MB), valamint a HSS voltak.

A 8. ábrán látható az ECM és GFS kezdeti feltételekkel készült szimulációk közötti átlagos Pearson-korreláció, valamint HSS statisztika értéke az egyes változókra a két modelltartomány esetén. Az átlagolás a különböző kezdeti feltételekkel végrehajtott szimulációk minden órájában kiíratott mezők között kiszámított Pearson-korreláció vagy HSS értékekre, majd az összes szimulált esetre történt. Feltűnő, hogy a belső, nagyobb felbontású területen (D2) kisebbek az egyezések, azaz nagyobb az eredmények egymástól való eltérése. Ami az egyes változókat illeti, általában magas korrelációk jelennek meg, kivéve a csapadékot. Tudván, hogy a csapadék előrejelzése az egyik legnehezebb modellezési feladat, ez egyáltalán nem meglepő eredmény, hiszen mint láttuk itt volt a legnagyobb különbség is a modellek teljesítménye között. És ahogyan láttuk is a legnagyobb különbségek is a csapadék bevalásában adódtak a két modell között. A potenciális hőmérséklet, valamint a keverési arány esetében a vertikális magasság hatását is vizsgáltam. Előbbi változónál a légkör magasabb szintjén (a 20. modellszinten) az egyezések jobbak, míg utóbbi változónál valamivel alacsonyabbak, mint a felszín közelében. A változók fizikai tulajdonságaiból kifolyólag ez is reálisnak mondható. A HSS értékek alapján egyértelműen elmondható, hogy a modellszimulációk a nyomási mezőben térnek el a legkevésbé, a többi változó 0,2–0,4-del rosszabb bevalással rendelkezik, azaz jobban eltérnek egymástól a szimulációk. A domainek közötti legnagyobb különbséget a potenciális hőmérséklet mutatta, ez annak tudható be, hogy

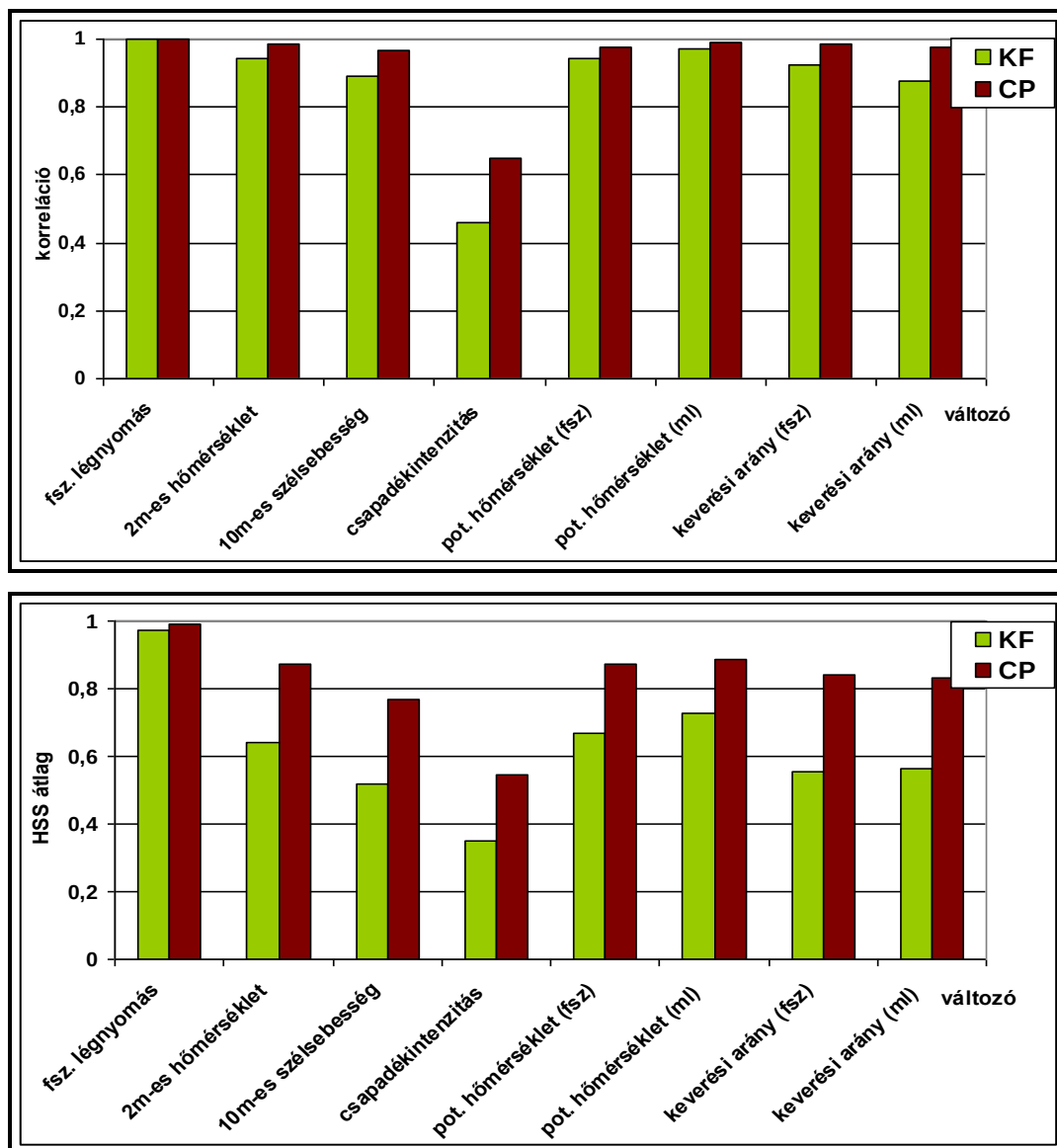
a két globális modellben a hőmérséklet a felszín közeli rétegekben igen jelentősen akár 3-6 °C-kal is eltérhet – mint ahogy erre a következő fejezetben ki is térek.



8. ábra - A különböző kezdeti feltételű szimulációk közötti átlagos korreláció (fent) és Heidke Skill Score (HSS) (lent) (fsz: felszín, ml: magaslégkör, D1: külső domain, D2: belső domain).

Az 9. ábrán egy másik összehasonlítás, a különböző kezdeti feltételeket, illetve különböző cumulus parametrizációs sémákat használó szimulációk közötti korreláció látható, az előzőhöz hasonló módszerrel számolva (a különböző cumulus parametrizációs szimulációk az ECM kezdeti feltételeivel készültek). Ugyanez a HSS statisztikával számolva ezzel megegyező tendenciákat mutat (9. ábra). Mivel az eredmények az 1-es domainre vonatkoznak, a baloldali oszlopok megegyeznek az előző ábrán látottakkal. A grafikonról kitűnik, hogy az összes változó esetén a különböző parametrizációjú modell előrejelzések

között magasabbak a korreláció és a HSS értékek, mint a kezdeti feltételek variálásával, azaz a modell ezen számítások szerint jóval érzékenyebb a kezdeti feltételekre, mint a cumulus parametrizáció megválasztására. Ez igaz a csapadéokra is. A szinoptikus helyzeteket vizsgálva elvértve találhatunk az átlagos tendenciákkal szembemenő esetet is, amikor a fizikai parametrizációból eredő bizonytalanság, volt a nagyobb, ha minimálisan is. Ezek rendszerint nyári, konvektív időjárású, általában anticiklonális helyzetek voltak (pl. AF – augusztus 25., Aw – június 12.)



9. ábra - A különböző kezdeti feltételű, valamint különböző cumulus parametrizációjú szimulációk közötti korreláció (fent) és Heidke Skill Score (HSS) (lent) (fsz: felszín, ml: magas légkör, 1-es domain eredményei, KF: kezdeti feltétel, CP: cumulus parametrizáció).

5.4. A kezdeti feltételek összehasonlítása

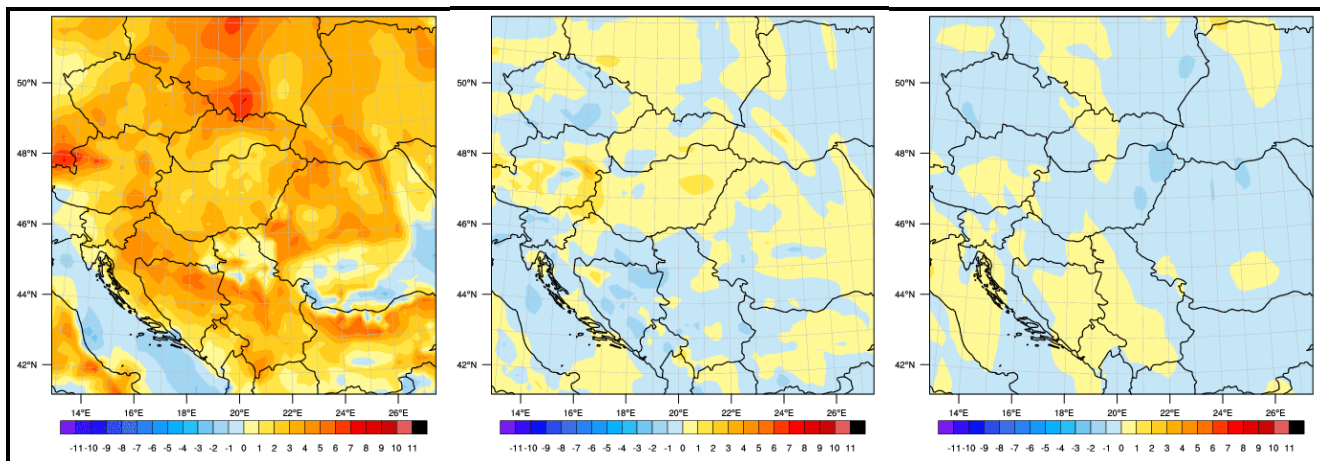
A vizsgálatok befejezéseként magukat a kezdeti feltételeket hasonlítottam össze. A két modell kezdeti mezői között alapvető különbségek vannak, mint a horizontális és a vertikális felbontás. Míg az általunk használt GFS kezdeti mezők 27 nyomási szint adatait tartalmazták 0,5°-os horizontális felbontáson, addig az ECM esetében ez a szám 13, azaz kevesebb, mint az előbbi fele, azonban az értékek 0,125°-os felbontáson álltak rendelkezésre.

Annak céljából, hogy esetlegesen magyarázatot találjak a GFS/ECM kezdeti feltételek 5.2. fejezetben bemutatott teljesítményeihez és eredményeihez, a 13 esetből hármat vizsgáltam meg. Az első egy olyan szinoptikus helyzet, mely során az ECM kezdeti feltételekkel kaptam határozottan jobb eredményeket (április 12.), a második egy olyan, melynél a GFS volt a jobb (szeptember 30.), míg a harmadik egy olyan, ahol a 2 modell megközelítőleg hasonló teljesítményt produkált (június 18.).

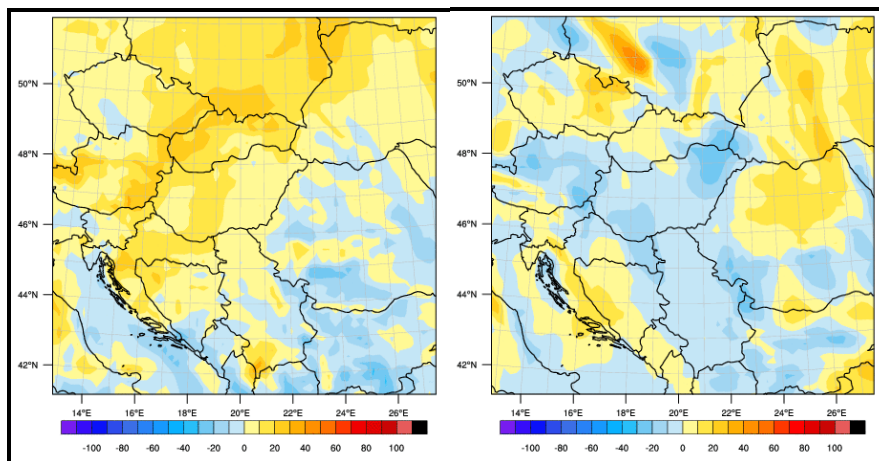
Az összehasonlítások során a WRF szimulációk által kezdeti feltételként használt mezők különbségeit számoltam ki és ábrázoltam néhány változó és nyomási szint esetén. Az első változó a hőmérséklet, melynek különbségeit az 1000 hPa-os, a 850 hPa-os, valamint az 500 hPa-os szint szinteken számoltam. A következő a relatív nedvesség volt, melyet az 1000 hPa-os, illetve a 700 hPa-os szinteken vizsgáltam. Végül az utolsó két változó a szélsébség u - és v -komponense volt. A horizontális mezők különbségeinek ábrázolása után a kezdeti feltételek alapján a vertikális profilokat is kiszámítottam a modelltartomány átlagolásával. Így került ábrázolásra a potenciális hőmérséklet, a keverési arány, valamint a két szélkomponens is (Függelék, 1., 2., 3., 4. ábrák). Az e fejezetbeli számítások minden esetben a külső, 1-es domain értékeit tartalmazzák.

5.4.1. Az április 12-i eset

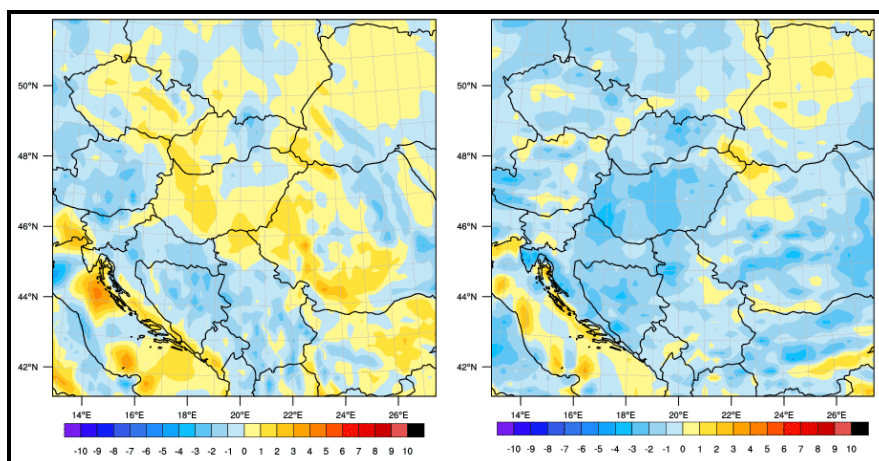
Ezen a napon a korábbi vizsgálatban az ECM kezdeti feltételek használata vezetett jobb eredményekhez. Ahogy a 6. táblázaton látható, ebben az esetben a modellek alulbecsülték a 2 méteres hőmérséklet napi átlagértékeit (pozitív BIAS értékek). Ez az alulbecslés az ECM kezdeti feltételek esetében volt kisebb mértékű, azaz ebben az esetben jelentkeztek magasabb hőmérsékleti értékek. Ezt támasztja alá a kezdeti mezők különbsége is (10. ábra). Az ábrán jól látható 1000 hPa-os szinten a két modell különbsége, mely egyes területeken a 6 °C-ot is eléri. Feljebb haladva (850 hPa és 500 hPa) ez a különbség eltűnik, majd a GFS oldalára billen. Ami a relatív nedvességet illeti, a helyzet megközelítőleg fordított: ahol az ECM melegebb, ott kisebb a relatív nedvesség ($\Delta RH(\min) \approx -30 - -40\%$), mint a GFS-nél (11. ábra). Magasabb szinten (700 hPa) a hőmérséklethez hasonló kiegyenlítődés látható. A fordított arányosság a hőmérséklet és a relatív nedvesség között azonos abszolút nedvességtartalom esetén lehetséges. Ezt tökéletesen visszkapjuk a keverési arány vertikális profilját tekintve (Függelék, 1. ábra), amelyen a két kezdeti feltétel értékei között csak minimális eltérés jelentkezik. Bár pusztán ezen-, illetve a korábban kapott eredmények felhasználásával, közöttük lévő összefüggéseket keresni némiképp felelőtlen és veszélyes, de az átlaghőmérséklethez hasonló magyarázatot találhatunk a csapadékösszeg esetében is. A korábbi vizsgálatban ugyanis az ECM kezdeti feltételek használatával a modell kevésbé becsülte túl a csapadékot, mint a GFS-sel, melynek többek között a kisebb relatív nedvesség is az oka lehet. A szélsőbesség komponenseit tekintve az 1000 hPa-os szinten, a zonális irányú összetevő kiegyenlített különbségeket mutat, míg meridionális irányban jóval nagyobb differenciákat a GFS javára (12. ábra).



10. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti hőmérsékletkülönbségek, 2013.04.12. 00:00 UTC-kor (balról jobbra: 1000 hPa-os, 850 hPa-os és 500 hPa-os szint). A melegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.



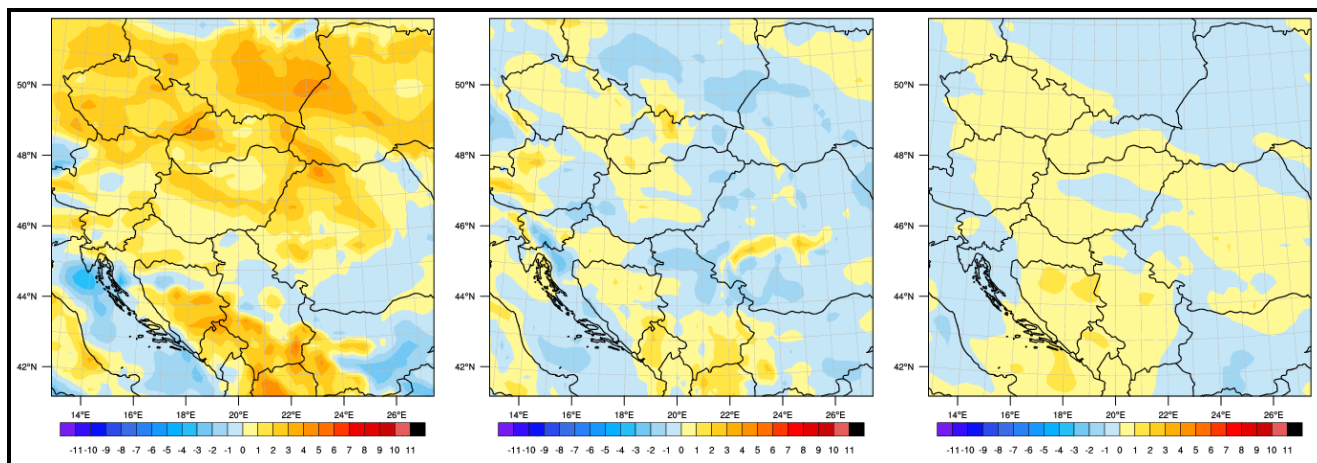
11. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti relatív nedvesség különbségek, 2013.04.12. 00:00 UTC-kor (1000 hPa-os és 700 hPa-os szint). A hidegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.



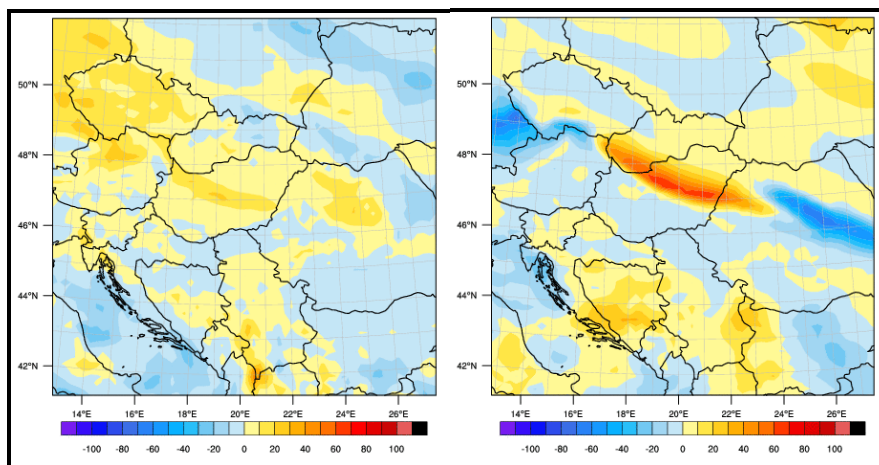
12. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti szélsősebesség különbségek (u, ill. v komponens), 2013.04.12. 00:00 UTC-kor (1000 hPa). A melegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.

5.4.2. A szeptember 30-i eset

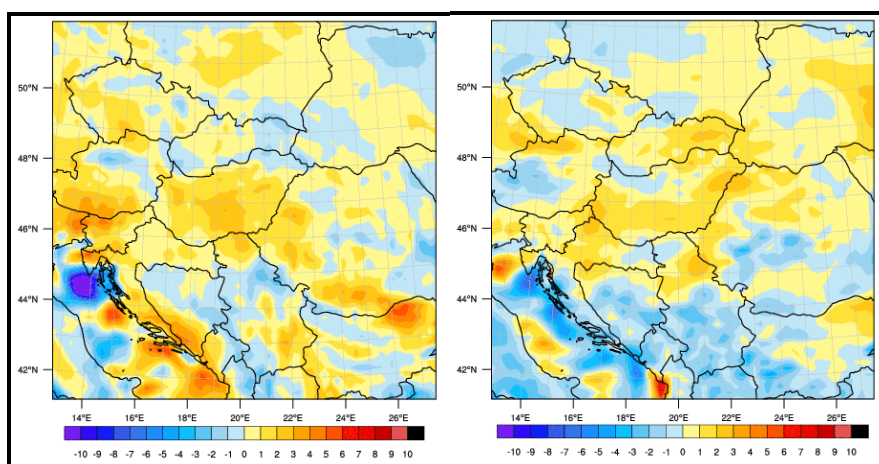
A szeptember 30-i szimulációban a GFS kezdeti mezők használatával születtek jobb eredmények a verifikáció során. Az előzőhöz hasonlóan a modellek ekkor is alulbecsülték az átlaghőmérsékletet, ám az amerikai modell használata tette azt kevésbé. A kezdeti hőmérsékleti mezők különbségét tekintve az 1000 hPa-os szinten azonban itt is az ECM magasabb értékei rajzolódnak ki, bár jóval kisebb mértékben, jellemzően 1-3 °C-kal, valamint nagyobb a GFS „pozitív” területek aránya (13. ábra). A magasabb szinteken ez a különbség megint eltűnik, 850 hPa-on meg is fordul. A relatív nedvesség különbségének mintázata szintén hasonlít az előbbi esethez: a hőmérséklet, illetve a relatív nedvesség különbségek között fordított arányosság figyelhető meg (14. ábra). A 700 hPa-os szinten látható élénk sávok oka a mediterrán ciklon frontálzónájának elhelyezéséből eredő bizonytalanság lehet. Ezzel együtt a mezők értékei kiegyenlített mintázatot mutatnak. A keverési arány vertikális profiljai ugyancsak nagyon hasonló légkört írnak le a maguk szempontjából (Függelék, 1. ábra). A szélkomponensek mezőinek különbségei térben és mértékben is többnyire kiegyensúlyozottak (15. ábra).



13. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti hőmérsékletkülönbségek, 2013.09.30. 00:00 UTC-kor (1000 hPa-os, 850 hPa-os és 500 hPa-os szint). A melegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.



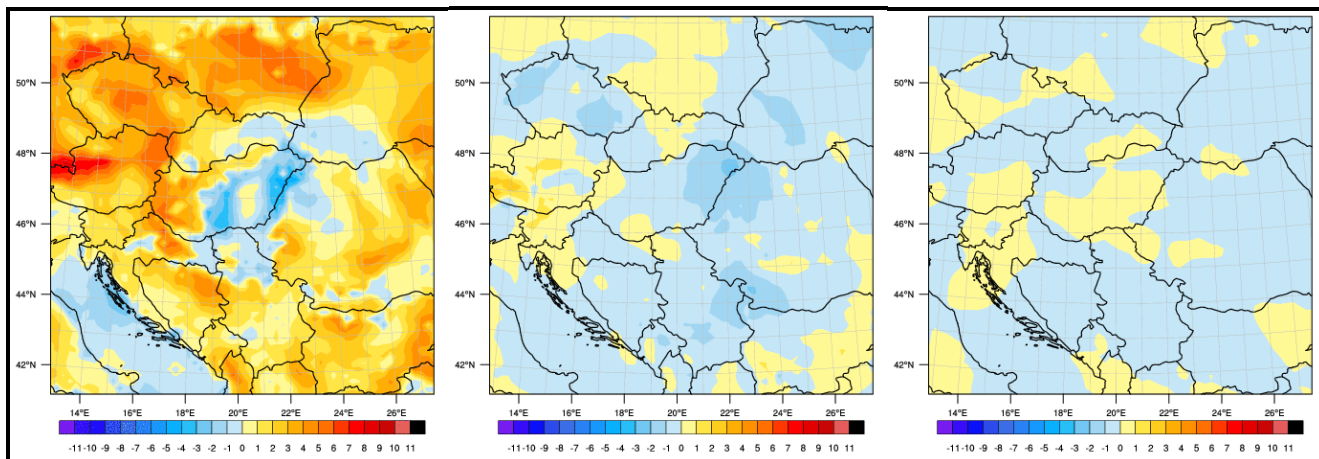
14. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti relatív nedvesség különbségek, 2013.09.30. 00:00 UTC-kor (1000 hPa-os és 700 hPa-os szint). A hidegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.



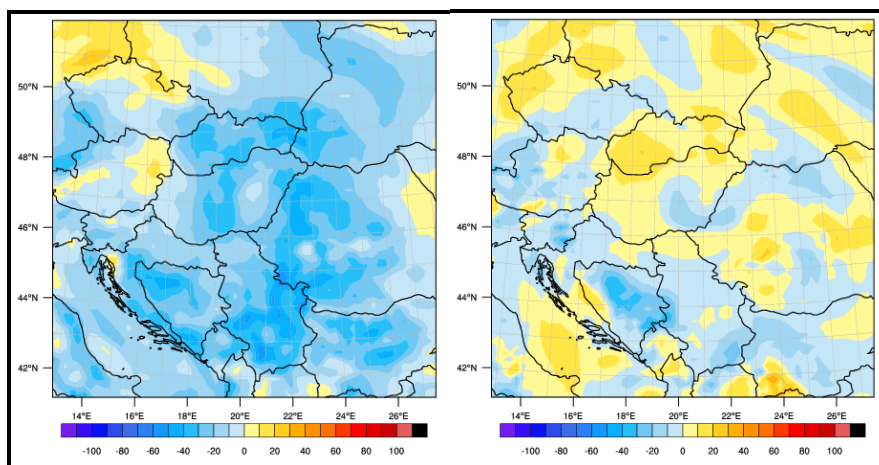
15. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti szélsébség különbségek (u, ill. v komponens), 2013.09.30. 00:00 UTC-kor (1000 hPa). A melegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.

5.4.3. A június 18-i eset

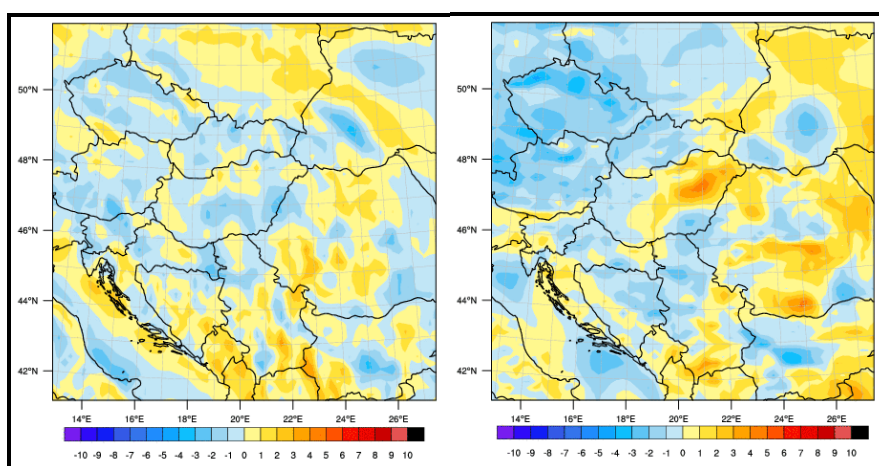
A harmadik eset, melyet külön vizsgáltam a júniusi anticiklon volt, mely során a két globális modell kezdeti feltétele hasonlóan teljesített egymáshoz képest. Ez az eredmény szerencsére nem is meglepő egy ilyen szinoptikus helyzetben. Ami a 2 méteres átlaghőmérsékletet illeti, a korábbi vizsgálat domaintől és statisztikától függően mutatta egyik, vagy másik kezdeti feltételt sikeresebbnek. Ahogy az 16. ábrán látható, attól függetlenül, hogy az említett sikeresség kiegyenlített volt, a kezdeti hőmérséklet különbség mezők korántsem azok. Az 1000 hPa-os szinten 5–6 °C-os eltérések is láthatóak, melyek térbeli elhelyezkedése igen jellegzetes: a GFS kezdeti mező a Kárpát-medence nagy részén, valamint az Adriai-tenger területén tartalmaz magasabb értékeket. Lehetséges, hogy ez is közrejátszik abban, hogy a 2-es, belső domainen kapott átlagos eltérés (MB) értékek az amerikai modell jobb becslését mutatták. Némiképp árnyalja a képet, hogy az 1-es domain esetén is a GFS volt a jobb, igaz, jóval kisebb mértékben. Ezt azonban magyarázhatja a magas légkör kezdeti állapota is, ott ugyanis a GFS mezői egyértelműen magasabb értékeket tartalmaztak (16. ábra). Feltűnő továbbá, hogy az 1000 hPa-os szinten szinte az egész modelltartomány területén jóval nagyobb relatív nedvességet mutatott az egyébként többnyire melegebb ECM kezdeti mezője (17. ábra). Ez az eltérés a magasban a többi esethez hasonlóan eltűnik. Előbbi csak úgy lehetséges, ha a levegő abszolút nedvessége is magasabb az európai modellnél. Ezt tökéletesen reprezentálja a keverési arány vertikális profilja (Függelék, 1. ábra), mely jóval nedvesebb légkörről árulkodik az ECM esetében. Alighanem a 2 domain között jelenlévő hőmérsékleti kontrasztnak is szerepe lehet abban, hogy míg a 1-es domain területén minden statisztika szerint az ECM-, addig a 2-es területén a GFS kezdeti feltételek voltak jobbak. A szélsőségeket illetően ebben az esetben sem tapasztalunk jelentős függést a kezdeti feltételektől (18. ábra).



16. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti hőmérsékletkülönbségek, 2013.06.18. 00:00 UTC-kor (1000 hPa-os, 850 hPa-os és 500 hPa-os szint). A melegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.



17. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti relatív nedvesség különbségek, 2013.09.30. 00:00 UTC-kor (1000 hPa-os és 700 hPa-os szint). A hidegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek



18. ábra - ECM és GFS kezdeti mezők közötti szélsebesség különbségek (u, ill. v komponens), 2013.09.30. 00:00 UTC-kor (1000 hPa). A melegebb színek magasabb ECM értékeket jelölnek.

6. Összefoglalás

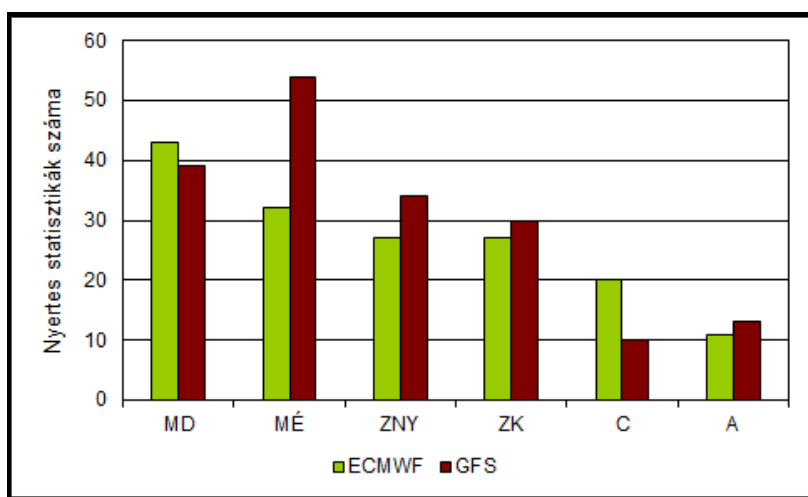
Diplomamunkám célja a GFS és ECMWF globális modellek által készített analízisek összehasonlítása volt a WRF modellben kezdeti és peremfeltételekként alkalmazva azokat. A vizsgálatom modellezési területe és ideje a Kárpát-medence térsége volt. A szimulációkat 13 különböző szinoptikus helyzetben végeztem el, valamennyit a 2013-as évből kiválasztva. Az ehhez használt fizikai parametrizációs sémákat külön számítások során választottam ki úgy, hogy az aktuális feladat számára a lehető legideálisabb legyen.

Dolgozatom elején e problémák elméleti hátterét mutattam be: a kezdeti feltételek, valamint a parametrizációk problémáját. Emellett röviden összegeztem a témával kapcsolatos korábbi kutatások eredményeit is. Az elméleti részt a GFS és az ECMWF modellek, illetve az azok által készített analízisek ismertetésével zártam.

Első feladatom tehát a megfelelő parametrizációs sémák kiválasztása volt. Ehhez azok három típusát, a cumulus konvekció, a mikrofizika, valamint a planetáris határréteg beállításait változtattam 12 konfiguráció szerint egy nyári és egy téli napot modellezve. A szimulációkat E-OBS és műholdas mérési adatsorokkal verifikáltam. Az eredmények azt mutatták, hogy a határréteg leírására ebben az esetben az YSU séma a legalkalmasabb, míg a mikrofizika parametrizációjára a WSM 4-fázisú séma. A használt cumulus konvekció sémák közül a Grell 3D ensemble volt a legsikeresebb. Későbbi vizsgálataim során így ezeket a sémákat használtam.

Ezek után került sor a dolgozat fő célkitűzéséhez kapcsolódó eredmények bemutatására. Az ECMWF és GFS kezdeti feltételeket több szempont szerint hasonlítottam össze. Elsőként 5 változót (napi átlaghőmérséklet, napi átlagos légnyomás, napi csapadékösszeg, csapadékinzintás, valamint sugárzás) verifikáltam szintén E-OBS és műholdas mezőkkel. A kapott eredmények az 5 változóból 3-nál (légnyomás, sugárzás, csapadékösszeg) az ECM kezdeti feltételek használatával kaptam jobb egyezéseket, bár ezek közül mindegyik esetben ez a fölény minimális volt. A másik két változónál azonban ennél jóval határozottabban volt jobb a GFS kezdeti feltétel, így összességében is az amerikai modell produktuma bizonyult jobban. Ezek az eredmények így természetesen meglepőek, ha azt vesszük figyelembe, hogy napjainkban az ECMWF a legjobb globális modell, mely a legnagyobb felbontást és legfejlettebb adatasszimilációs módszert alkalmazza, továbbá az általunk alkalmazott kezdeti feltételek horizontálisan 16-szor több rácspontot tartalmaztak. Ezzel szemben a GFS kezdeti mezők 2-szer akkora vertikális felbontása állt, mely e

vizsgálatok során meghatározónak bizonyulhatott. Bár az is igaz, hogy a kezdeti mezőkről átlagolva készített vertikális profilok a megfigyelt esetekben alig tértek el egymástól. A szinoptikus helyzetek szerint csoportosítva sem igazán adódtak szignifikáns eredmények. A fő kategóriák alapján a legtöbb esetben a két modell hasonlóan teljesített, a 6-ból 4-hez a GFS főlénye kapcsolható (19. ábra). Az ábrán látható, hogy a Kárpát-medence feletti ciklon szimulációjakor az ECM kétszer annyi jobb statisztikát szerzett, mint a GFS, bár ebbe a kategóriába csak ez az eset tartozott. Ezzel szemben a GFS a meridionális északi áramlási helyzetek előrejelzésében teljesített határozottan jobban, mely kategória három esetet tartalmaz (mCc, AB, CMc).



19. ábra: Verifikációs eredmények összesítése a Péczy-féle fő kategóriák alapján (MD: meridionális déli, MÉ: meridionális északi, ZNY: zonális nyugati, ZK: zonális keleti, C: ciklon Kárpát-medence felett, A: anticiklon Kárpát-medence felett).

Azonban mivel azt az eredmények is jól kimutatták, a kezdeti feltételek megválasztása egyáltalán nem irreleváns és a fizikai parametrizációs sémák kiválasztásánál is nagyobb fontossággal bír, fontos lenne akár több esetre, több szempont alapján további összehasonlításokat végezni a valós állapotokat és „erőviszonyokat” jobban tükröző kezdeti feltételek használatával.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Breuer Hajnalkának a dolgozatommal kapcsolatos egy éves közreműködését, ezáltal elengedhetetlen érdemeit a diplomamunkám elkészülésében. Fáradhatatlan munkájával, segítségnyújtásával, valamint látóköröm szélesítésével nagy szerepet játszott szakmai fejlődésemben.

Köszönetet mondok továbbá Szépszó Gabriellának, Szűcs Mihánynak, illetve Szintai Balázsnak az irodalomkutatásban nyújtott segítségükért.

Irodalomjegyzék

- Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 270–286.
- Arakawa, A., and Schubert, W. H., 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences* 31.3, 674–701.
- Balzarini, A., F. Angelini, L. Ferrero, M. Moscatelli, M. G. Perrone, G. Pirovano, G. M. Riva, G. Sangiorgi, A. M. Toppetti, G. P. Gobbi and E. Bolzacchini, 2014: Sensitivity analysis of PBL schemes by comparing WRF model and experimental data. *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 7, 6133–6171.
- Bao, X., and F. Zhang, 2013: Evaluation of NCEP–CFSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate* 26(1), 206–214.
- Bassill, N. P., 2014: Accuracy of early GFS and ECMWF Sandy (2012) track forecasts: Evidence for a dependence on cumulus parameterization. *Geophysical Research Letters* 41.9, 3274–3281.
- Betts, A. K., and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX, and Arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112, 693–709.
- Betts, A. K., and M. J. Miller, 1993: The Betts-Miller scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models, Meteor. Monogr.*, No. 24, Amer. Meteor. Soc., 107–121.
- Betts, A. K., M. Köhler and Y. Zhang, 2009: Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalyses with observations. *J. Geophys. Res.*, 114, D02101.
- Bougeault, P., and Lacarrere, P., 1989: Parameterization of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta--Scale Model. *Monthly Weather Review* 117.8, 1872–1890.
- Fan, X., J. E. Walsh and J. R. Krieger, 2008: A one-year experimental Arctic reanalysis and comparisons with ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Geophysical Research Letters* 35(19), L19811.

- Fritsch, J. M., and C. F. Chappell., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences* 37.8, 1722-1733.
- Gallus Jr, W. A., and J. F. Bresch, 2006: Comparison of impacts of WRF dynamic core, physics package, and initial conditions on warm season rainfall forecasts. *Monthly Weather Review* 134(9), 2632–2641.
- Gallus Jr, W. A., and M. Pfeifer, 2008: Intercomparison of simulations using 5 WRF microphysical schemes with dual-Polarization data for a German squall line. *Advances in Geosciences* 16, 109–116.
- Gilliland, E. K., and C. M. Rowe, 2007: A comparison of cumulus parameterization schemes in the WRF model. *Proceedings of the 87th AMS Annual Meeting & 21th Conference on Hydrology*. Vol. 2., P2.16, pp 12.
- Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 764–787.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR/TN-3981STR, 138 pp.
- Grell, G. A., and D. Dévényi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters* 29(14), 38/1–4. doi:10.1029/2002GL015311
- Hagemann, S., K. Arpe, and L. Bengtsson, 2005: Validation of the hydrological cycle of era 40. *ERA-40 Project Report Series* 24, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK. (2005)
- Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New, 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., and Chen, S.-H.: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation, *Mon. Weather Rev.*, 132, 103–120, 2004
- Hu, X.-M., J. W. Nielsen-Gammon, and F. Zhang, 2010: Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49.9, 1831–1844.

- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further development of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
- Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note*, No. 437, 61 pp.
- Jury, M. R., and S. Chiao, 2014: Representation of Ethiopian Wet Spells in Global and Nested Models. *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2014/237374.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170-181.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A onedimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2784-2802.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain–Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, *Meteor. Monogr.*, No. 46, Amer. Meteor. Soc., 165–170.
- Kerr, R. A., 2012: Weather forecasts slowly clearing up. *Science* 338, 734–737.
- Kondowe, A. L., 2014: Impact of Convective Parameterization Schemes on the Quality of Rainfall Forecast over Tanzania Using WRF-Model. *Natural Science*, 6, 691–699.
- Kuo, Y-H., 1974: Further studies of the parameterization of the effect of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1232-1240.
- Lahoz, W. A., and P. Schneider, 2014: Data assimilation: making sense of Earth Observation. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 16, doi: 10.3389/fenvs.2014.00016.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22.6, 1065–1092.
- Liu, Z., Z. Xu, Z. Yao and H. Huang, 2012: Comparison of surface variables from ERA and NCEP reanalysis with station data over eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3-4), 611–621.
- Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. *ECMWF Tech. Memo.*, 430, 18 p.
- Parker, W. S., 2010: Predicting weather and climate: Uncertainty, ensembles and probability. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41(3), 263–272.
- Péczely, Gy., 1957: Áramlási viszonyok Magyarországon különböző makroszinoptikus helyzetekben. *Időjárás* 61(6), 408–419.

- Rajeevan, M., Kesarkar, A., Thampi, S. B., Rao, T. N., Radhakrishna, B., Rajasekhar, M., 2010: Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over Southeast India. *Annales Geophysicae*. Vol. 28. No. 2., 603-619., European Geosciences Union
- Skamarock, W., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR technical note*, NCAR/TN/u2013475. pp 113.
- Shin, H. H., and S.-Y. Hong, 2011: Intercomparison of planetary boundary-layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES-99. *Boundary-Layer Meteorology*, 139(2), 261–281
- Szunyogh I., Gyarmati Gy., Hunt, B., Kalnay, E., Kostelich, E., Ott, E., Dhanurjay Patil, Sauer, T., Yorke, J., és Zimin, A., 2003: Az University of Maryland új adatasszimilációs sémája: A 4-dimenziós lokális ensemble Kálmán-szűrő (4D-LEKF). *29. Meteorológiai Tudományos Napok kiadvány*, Országos Meteorológiai Szolgálat, 57–75.
- Thompson, G., Rasmussen, R. M., and Manning, K.: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme, Part I: Description and sensitivity analysis, *Mon. Weather Rev.*, 132, 519–542, 2004.
- van den Besselaar, E.J.M., M.R. Haylock, G. van der Schrier and A.M.G. Klein Tank, 2011: A European Daily High-resolution Observational Gridded Data set of Sea Level Pressure. *J. Geophys. Res.*, 116, D11110, doi:10.1029/2010JD015468.
- Wang, W., and N. L. Seaman, 1997: A comparison study of convective parameterization schemes in a mesoscale model. *Monthly Weather Review*, 125(2), 252–278.
- Weisman, M. L., W. C. Skamarock, and J. B. Klemp, 1997: The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Monthly Weather Review* 125(4), 527–548.

Internetes források

[1 – *Mészáros*, 2013]

<http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/meteorologia/book.pdf>

[2 – *Weidinger és mtsai.*, 2013]

http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/numerikus_prognosztika/index.html

[3 – *old.ecmwf.int*]

http://old.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological_presentations/2013/PR2013/Buizza/RB_2013_05_TCL1_sources_uncert.pdf

[4 – *old.ecmwf.int*]

http://old.ecmwf.int/products/changes/horizontal_resolution_2009/

[5 – *old.ecmwf.int*]

http://old.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological_presentations/2013/PR2013/Buizza/RB_2013_05_TCL3_EDA.pdf

[6 – *old.ecmwf.int*]

http://old.ecmwf.int/products/forecasts/guide/user_guide.pdf

[7 – *nws.noaa.gov*]

http://www.nws.noaa.gov/om/notification/tin14-46gfs_cca.htm

[8 – *wrf-model.org*]

<http://www.wrf-model.org/index.php>

[9 – *ecmwf.int*]

<http://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction/atmospheric-physics>

[10 – *meted.ucar.edu*]

https://www.meted.ucar.edu/nwp/model_precipandclouds/

[11 – *met.hu*]

<http://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/idojarasmodellezes/parametrizacio/>

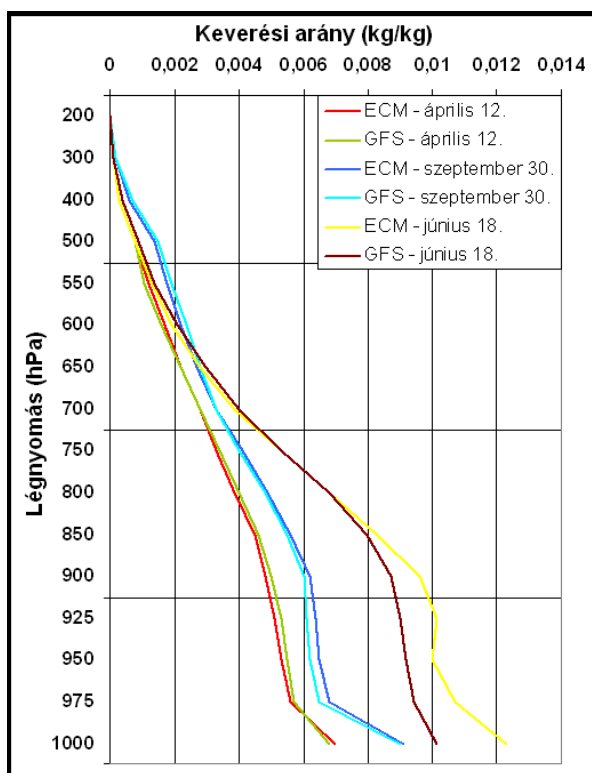
[12 – *ucar.edu*]

http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2011/Extended%20Abstracts%202011/P36_Hou_ExtendedAbstract_11.pdf

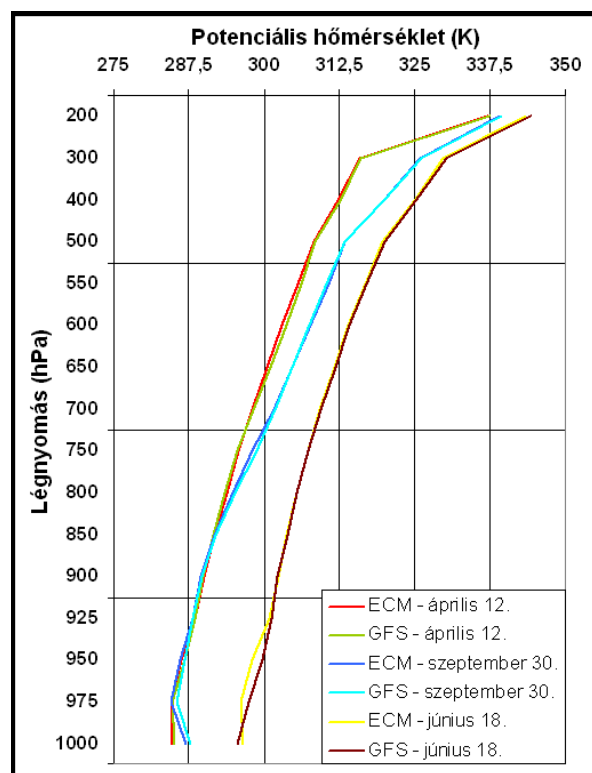
[13 – *ucar.edu*]

http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2010/presentations/Lectures/morrison_wrf_workshop_2010_v2.pdf

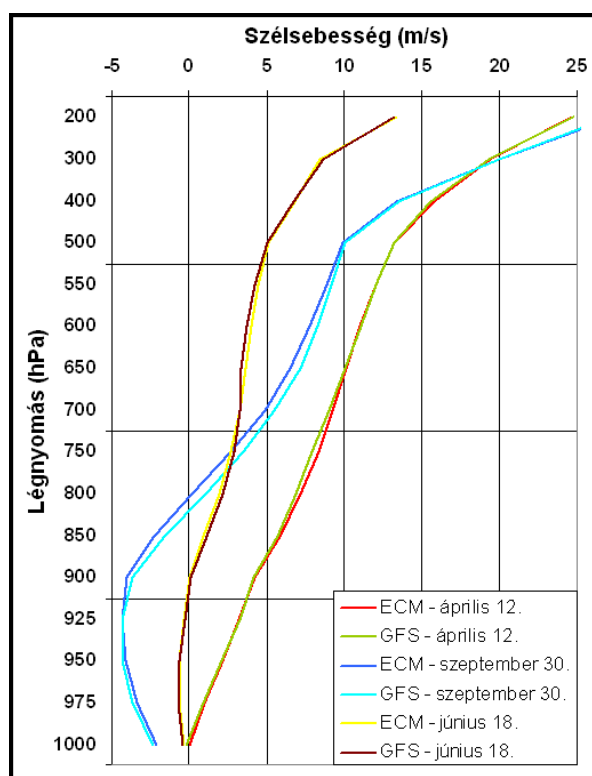
Függelék



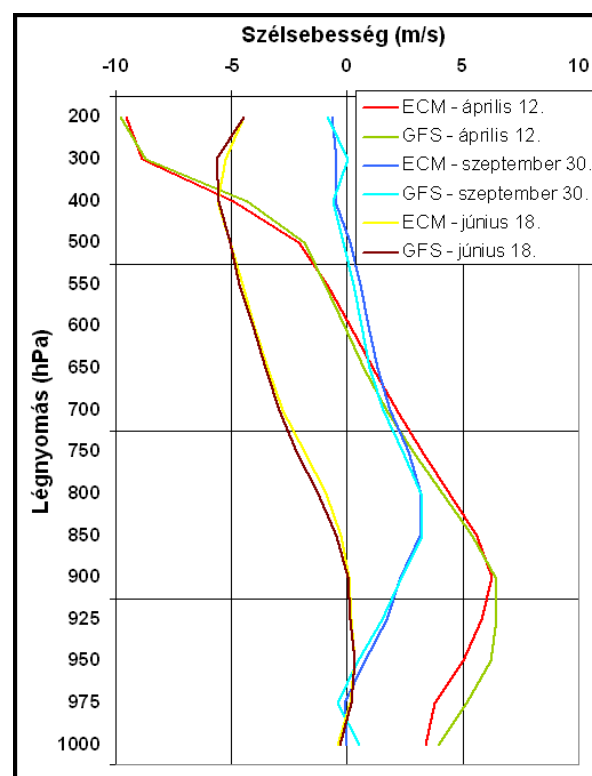
F1. ábra - A keverési arány vertikális profiljai a kezdeti feltételekben



F2. ábra - A potenciális hőmérséklet vertikális profiljai a kezdeti feltételekben



F3. ábra - Az u-szélkomponens vertikális profiljai a kezdeti feltételekben



F4. ábra - A v-szélkomponens vertikális profiljai a kezdeti feltételekben