

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

Az ECMWF kalibrált valószínűségi előrejelzéseinek verifikációja



KÉSZÍTETTE:

**Németh Csilla
Földtudomány BSc
Meteorológia szakirány**

Témavezető:

**Ihász István
(Országos Meteorológiai Szolgálat)**

Tanszéki konzulens:

**Dr. Barcza Zoltán
(ELTE Meteorológiai Tanszék)**

Budapest, 2010

Bevezetés	4
1. Numerikus előrejelzési modellek.....	5
1.1. Történelmi áttekintés	5
1.2. Numerikus előrejelzés.....	6
1.3. Az ensemble (valószínűségi) előrejelzés	7
1.4. Az ECMWF Előrejelző Központ.....	9
2. Utófeldolgozási módszerek.....	11
2.1. Statisztikai utófeldolgozások	11
2.1.1. Perfekt Prognózis Módszer (PPM)	11
2.1.2. Modell Output Statisztika (MOS).....	12
2.1.3. Kálmán-szűrő.....	12
2.2. Az EPS előrejelzés kalibrációja.....	13
2.2.1. Regressziós módszer.....	13
2.2.2. Eloszlásfüggvények összehasonlítása.....	13
2.2.1. SYNOP adatok.....	15
2.3. Reforecast előrejelzések használata.....	16
3. A valószínűségi előrejelzések verifikációja.....	17
3.1. Verifikáció	17
3.2. Ensemble előrejelzések verifikációja.....	17
3.3. Folytonos meteorológiai változók verifikációja	18
3.3.1. Négyzetes középhiba	18
3.3.2. Talagrand diagram	18
3.3.3. „Eyeball verification”	19
3.4. Kategorikus előrejelzések.....	19
3.4.1. ROC-diagram.....	20
3.4.2. Brier Score	21
3.4.3. Brier Skill Score.....	21
3.4.4. Megbízhatósági diagram.....	22

4. Rácsponti kalibrált ensemble mezők objektív verifikációja.....	23
4.1. Célkitűzés.....	23
4.2. Verifikáció	25
4.3. Havi EPS térképek	25
4.4. Átlagos hiba különbségtérképek.....	26
4.5. Átlagos négyzetes hiba különbségtérképek (RMSE).....	27
4.6. Talagrand-diagram.....	28
4.7. Bakonyi rácspont vizsgálata	30
Függelék.....	33
5. Irodalomjegyzék	44

Bevezetés

Az időjárás jövőbeli alakulásának minél pontosabb előrejelzése már évszázadok óta foglalkoztatja az emberiséget. A mai modern világban szinte már létszükségletté vált a modellek egyre dinamikusabb fejlesztése, hiszen a várható időjárás pontos ismerete döntő fontosságú a gazdaságban, a közlekedésben, az egészségügyben és az élet számtalan más területén. A tömegkommunikáció megjelenésével az időjárás előrejelzés a hétköznapi ember számára is elérhetővé vált, ma már szinte elvárjuk a meteorológusoktól a várható időről való tájékoztatást, hogy ezzel is megkönnyítsék a mindennapi életünket. Mindez megköveteli, hogy az időjárás előrejelzését minél pontosabb eljárásokkal tegyük lehetővé.

Ehhez újabb és újabb numerikus időjárás előrejelző modelleket kell kidolgozni és kipróbálni, illetve a régi modelleket fejleszteni és pontosabbá tenni. Ehhez pontosabb kezdeti feltételt kell adnunk az előrejelzési modellt képező differenciálegyenletek számára, illetve ki kell dolgozni a parametrizált fizikai folyamatok pontos leírását és egy minél jobban működő utófeldolgozási módszert (*Csima, 2002*).

Dolgozatomban elsősorban kalibrációs módszerekkel, illetve azok verifikációjával foglalkozom, ezen belül is különös figyelmet szentelve az Országos Meteorológiai Szolgálatnál az utóbbi években kifejlesztett ensemble kalibrációs eljárásra (*Ihász, 2007, Ihász et al., 2009*), melyet Üveges Zoltán 2009-ben végzett meteorológus hallgató is alkalmazott, illetve verifikált 9 magyarországi SYNOP állomásra (*Üveges, 2009*). Célom az ő munkájának folytatása és továbbfejlesztése, illetve állomási kalibráció és verifikáció helyett az új rácsponti kalibráció megbízhatóságának vizsgálata.

Az Üveges Zoltán munkájához felhasznált modell előrejelzések az egyik legnagyobb numerikus időjárás előrejelző központ, az ECMWF (European Centre of Medium Range Forecast – Európai Középtávú Előrejelző Központ (*Woods, 2005*)) MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) adatbázisából származnak (*Raoult, 2001*). Az előrejelző modellt egy olyan rácshálózaton futtatták, amely determinisztikus előrejelzés során $\sim 25 \times 25$ km, ensemble előrejelzés során $\sim 50 \times 50$ km-es felbontással dolgozik. 2010 januárja óta a modell rácsfelbontását determinisztikus előrejelzések esetében $\sim 16 \times 16$, míg ensemble előrejelzések esetében $\sim 25 \times 25$ km-re finomították (*Marbouty, 2010*). Munkámban először Üveges Zoltán szakdolgozatában bemutatott és 9 magyarországi meteorológiai állomásra alkalmazott kalibrációs eljárását

(Üveges, 2009) használom az új rácshálózati felbontáson, majd az így kapott kalibrált eredményeket verifikálom.

Dolgozatomban az alábbi tematika szerint haladok:

- elsőként ismertetem a numerikus – determinisztikus és ensemble – előrejelző módszerek elméletét, gyakorlatát és történelmi hátterét;
- kitérek a különböző kalibrációs módszerek alkalmazására, amelyekkel javítható az előrejelzések pontossága;
- bemutatok néhány verifikációs eljárást, amelyekkel vizsgálható a kalibrációs módszerek alkalmazhatósága;
- saját munkám részeként pedig elvégzem az Üveges Zoltán által alkalmazott 9 állomásos kalibrációs eljárás verifikációját 70 állomásra, rácspontokra történő kalibráció alkalmazásával, majd havi térképeken megjelenítve bemutatom, milyen mértékben javította a kalibráció az eredeti előrejelzést.

1. Numerikus előrejelzési modellek

1.1. Történelmi áttekintés

Numerikus előrejelzések alatt az időjárás, illetve egy-egy meteorológiai állapothatározó (hőmérséklet, nyomás) számszerű, matematikai módszerekkel készített előrejelzését értjük. Számításigénye miatt fejlődése és pontosabb alkalmazása csak a számítógépek megjelenése után vált lehetővé. g bn

Elsőként Vilhelm Bjerknes norvég fizikus próbálkozott egy számszerű előrejelzési módszer kialakításával. Neki sikerült elsőként a termodinamika és a hidrodinamika tételeit szisztematikus formában a légkör kormányzó egyenleteinek teljes rendszerévé kombinálnia (Götz, 2001). Számítógépek nélkül azonban nem tudott tényleges időjárás előrejelzést készíteni, hiszen egy másnapra készített előrejelzés is egy évnyi számítást igényelt volna.

Az első tényleges számszerű előrejelzést a brit származású L.F. Richardson készítette, az eredményei azonban korántsem voltak kielégítőek. Richardson egyetértett Bjerknes nézeteivel a probléma fizikai vonatkozásait illetően, a matematikai megoldásokról viszont a maga saját nézeteit vallotta (Götz, 2001). Saját maga által alkotott modelljében a légkört L számú horizontális szintre osztotta, majd mindegyikben egy

rácshálózat M darab pontját jelölte ki. Az így kapott egyenleteket véges különbséges módszerrel oldotta meg, számítógép hiányában kézi úton.

Az egyenletek megoldásához természetesen mérési adatokra is szüksége volt, lehetőleg minél nagyobb tartományban végzett szinoptikus mérések alapján. Ehhez a Bjerknes javaslatára készített egységes időjárási adatbázis 1910. május 20-ára vonatkozó adatait használta. Hosszú időn át végzett számításokat egy arra a napra vonatkozó 6 órás előrejelzéshez, de a próbálkozása végeredményben csúfos kudarcot vallott, 145 hPa-os légnyomásváltozást jelzett előre, miközben a valóságban a légnyomás szinte nem is változott az eredeti értékhez képest.

Az 1940-es években megjelentek az első elektronikus számítógépek, amelyek forradalmasították a numerikus előrejelzés módszerét. A bonyolult számítások elvégzésére hónapok helyett immár csak néhány órára volt szükség. Három neves tudós, Fjörtoft, Charney és Neumann János végzett először kísérleteket az 500 hPa-os szint áramlási viszonyainak számítógépes előrejelzésére (*Charney et al.*, 1950), majd a sikeres próbálkozás után az '50-es évektől kezdve sorra alakultak meg a nemzeti meteorológiai szolgálatok számítógépes modellező és előrejelző központjai (*Horányi et al.*, 1998).

A II. világháború után ismét egy szoros nemzetközi együttműködés kezdett kibontakozni, mely nélkülözhetetlen volt az előrejelzési modellek további fejlesztéséhez. A korábbi IMO (Nemzetközi Meteorológiai Szervezet) 1950-re átalakul és létrejön a ma is működő WMO (Meteorológiai Világszervezet) (*Vissy*, 2006).

1.2. Numerikus előrejelzés

Numerikus modellnek a légkör állapotát meghatározó fizikai egyenleteknek, az ún. hidro-termodinamikai vagy kormányzó egyenletrendszernek különböző matematikai módszerekkel történő megoldását nevezzük. Az egyenletrendszer tagjai parciális differenciálegyenletek, melyek megoldásához szükség van kezdeti- és határfeltételek megadására is. Ehhez rendelkezésünkre állnak mérési adatok, az alkalmazott modell korábbi futásainak eredményei, illetve egyéb dinamikai és fizikai törvényszerűségek (*Horányi*, 2009).

Minél pontosabban ismerjük az egyenletrendszer megoldásához szükséges kezdeti- és peremfeltételeket, annál pontosabb előrejelzést készíthetünk. A kezdeti feltétel kellően pontos megadása tehát alapvető fontosságú egy numerikus előrejelzés készítése

során. Ezt azonban számos hibaforrás gátolja: egyrészt a szinoptikus mérést végző készülék műszer és mérési hibája, másrészt a domborzati és területi viszonyok eltéréséből származó szisztematikus hiba, amely a mérési adat egy-egy rácspontjára történő interpolálása során keletkezik. Ezen kívül maga az előrejelző modell is rendelkezik olyan rendszeresen fellépő hibákkal, amelyek tovább rontják az időjárás előrejelzés pontosságát.

Ráadásul a légkör kaotikus viselkedésű, nem lineáris dinamikai rendszer, amely kis perturbációkkal szemben is igen nagy instabilitást mutat (Götz, 2001). A kezdetben csak kis mértékben eltérő kezdeti feltételekkel készített előrejelzések eltérése az idő előrehaladtával rohamosan nő, lehetetlenné téve egy pontosabb hosszútávú előrejelzés készítését. Ezeket a modelleket tehát főként rövid- és középtávú előrejelzésekhez használják.

A numerikus előrejelzés elkészítése három fő lépésből tevődik össze:

- az ún. adatasszimilációs eljárás során történik meg a mérési adatok összegyűjtése és ellenőrzése, valamint a modell rácspontjaira történő interpoláció;
- a modell integrálásával kapjuk a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének közelítő megoldását, ami megadja az előrejelzés utófeldolgozás nélküli, „nyers” eredményeit;
- az utófeldolgozás során az előrejelzést különböző kalibrációs módszerekkel, speciális paraméterek származtatásával igyekeznek pontosabbá tenni, továbbá az elkészült előrejelzés grafikus megjelenítése is ebben a lépésben történik meg (Horányi, 2009).

1.3. Az ensemble (valószínűségi) előrejelzés

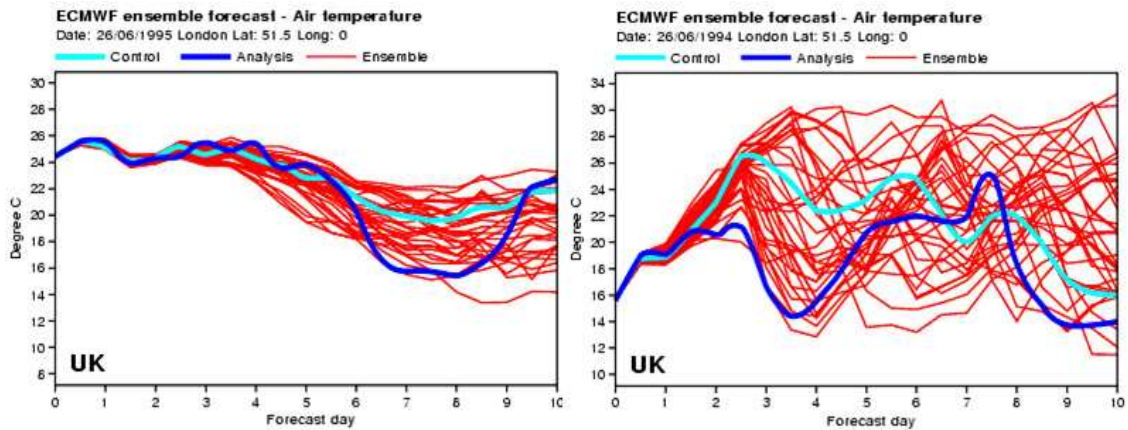
A mérések és a modellek pontatlanságából származó hibás előrejelzések pontosítására született meg az ún. EPS (Ensemble Prediction System) előrejelzési módszer, melynek fő célja a kis perturbációkkal szemben is fellépő instabilitás korrigálása. A valószínűségi előrejelzés során a modellt nem egyetlen kezdeti feltétellel futtatják, hanem a mért kezdeti érték mellett több tucat, különböző mértékben perturbált kezdeti érték együttes felhasználásával. Az előrejelzések összessége meghatározott valószínűségeket rendel minden várható meteorológiai eseményhez (Palmer *et al.*, 2006). Nem egyetlen előrejelzést készítenek, hanem előrejelzések együttesét, amelyek kezdeti

feltételükben csekély mértékben különböznek a bizonytalansági határon belül, ebből következtethetünk tehát az előrejelzés bizonytalanságára (*Hágel, 2008*). Az ensemble prognosztikai módszerek lehetővé teszik az előrejelzési hiba különböző forrásaiból származó hatások szimulációját, azoknak a légköri tartományoknak az azonosítását, ahol potenciálisan alacsony a folyamatok előrejelezhetőségének szintje, továbbá módot nyújtanak azoknak az áramlási helyzeteknek a felismerésére, amelyekhez rendszeresen alacsony előrejelezhetőségi időtáv kapcsolódik (*Götz et al., 2003*).

Ehhez természetesen lényegesen nagyobb számítógépkapacitásra van szükség, mint egy egyszerű determinisztikus modell futtatásához, így szükség van néhány kompromisszumos megoldás alkalmazására is. Az EPS modellek rácsfelbontása éppen ezért durvább, mint az eredeti, perturbálatlan kezdeti feltételekkel futtatott modellé (*Buizza et al., 2006*).

A durvább rácsfelbontás jóval pontatlanabbá teszi az előrejelzést, hiszen a kezdeti értékek interpolálásából származó szisztematikus hiba is jelentősen megnőhet. A megfelelő mértékű kezdeti perturbációk generálása, illetve az ún. sztochasztikus fizika alkalmazása jó becslést ad az előrejelzés várható hibájára (*Buizza et al., 1999*). A perturbált előrejelzések egyenletei sztochasztikus közelítéssel azokat a véletlen modellhibákat is szimulálják, amelyek a parametrizációval kezelt szubgrid-skálájú fizikai folyamatokhoz (a sugárzásátvitelhez, a turbulens kicserélődéshez, az orografikus eredetű sűrűlódásos ellenálláshoz, a nedves konvekcióhoz és felhőképződéshez, valamint a felszíni és a felszín alatti folyamatokhoz) kapcsolódnak (*Ihász, 2003*).

Az EPS előrejelzés megjelenítésére többféle grafikus módszer is létezik, ezek közül a legelterjedtebb az ún. fáklya diagram, amely egyetlen grafikonon ábrázolja az összes kezdeti feltétellel készült előrejelzést, külön kiemelve a kontrollfutás (perturbálatlan kezdeti feltétellel készített futtatás) görbáját. A fáklya szélességéből következtethetünk az előrejelzés bizonytalanságára, hiszen minél nagyobb a görbék értékeinek szórása egy adott időpontban, annál kisebb valószínűséggel következik be egy-egy futás eredménye (1. ábra)



1. ábra: Példa biztosabb és bizonytalanabb fáklya diagramra: a baloldali ábrán az 1995. június 26. 12 UTC-kor, a jobboldali ábrán az 1994. június 26. 12 UTC-kor készült előrejelzés látható

A bélyeg diagramon egyetlen időpontra vonatkozóan láthatjuk az egyes tagok előrejelzéseit egymás mellé- és fölérendezve, így ezen ábrázolásmód segítségével könnyen felismerhetők a tagok közötti nagyobb különbségek. Az ensemble átlagokat kontúrtérképeken szokták ábrázolni, ennek a módszernek azonban komoly hátránya, hogy az előrejelzés bizonytalanságáról nem kapunk információt – pedig ez az ensemble előrejelzések készítésének legfőbb indoka (Üveges, 2009).

1.4. Az ECMWF Előrejelző Központ

A European Centre for Medium Range Weather Forecasts (Európai Középtávú Előrejelző Központ) 1975-ben nemzetközi összefogásként jött létre (Woods, 2005). Célja egy egységes, globális rendszer kidolgozása és alkalmazása volt, mellyel megbízható középtávú (2-10 napos intervallumra vonatkozó) előrejelzést lehet készíteni. Előnye, hogy nem szükséges minden országnak saját előrejelzési modellt készíteni, a modellezésre fordítható erőforrások összeadódnak. Mivel a modell futtatása globális rácshálózaton történik, így külső modellre sincs szükség a körülvevő hatások ismeretéhez, mint ahogy azt egy lokális modellnél figyelembe kellene venni. Magyarország 1994-ben lépett be a társult tagok közé (Kaba, 1995), az OMSZ középtávú előrejelzései is döntően az ECMWF adatai alapján készülnek (Ihász, 2003; Ihász, 2008).

Az első operatív determinisztikus modellt 1979-ben alkalmazták, a központ azóta készít rendszeres középtávú előrejelzéseket. Eleinte csak determinisztikus modellekkel dolgoztak, az első valószínűségi előrejelző modell 1992-ben jelent meg, amely

akkoriban még csak 33 kezdeti feltétellel futott, a hét néhány napján (*Molteni et al.*, 1996).

A számítógépek további fejlődésével olyan újítások váltak lehetővé, amelyek nagy mértékben megnövelték az előrejelzések pontosságát. Az ensemble tagok száma 33-ról 1995-ben a mostani 51-re emelkedett és a modellt is immár a hét minden napján lefuttatták. Ezen kívül a horizontális szintek sűrűségének növelése is segítette az eredmények pontosabbá tételét.

Az ECMWF központjában több egyedülálló előrejelzési technikát is alkalmaznak. Itt készítenek egyedül ún. reforecast előrejelzéseket, amely egy elmúlt időbeli periódusra vonatkozó előrejelzést készít az akkori mérési adatokból az aktuális modell segítségével (*Hagedorn*, 2008). Ennek fontos szerepe van a mért és az előrejelzett modellklíma összehasonlításán alapuló kalibrációs eljárásoknál, hiszen egy korábbi modell eredményeit felhasználva nem következtethetünk kellő pontossággal az aktuális modell hibáira.

Az ECMWF által kifejlesztett másik újítás a 2006 novemberében bevezetett VAREPS (Változó Felbontású EPS) rendszer (*Buizza et al.*, 2006). Az alapvető célkitűzése a havi előrejelzések pontosságának javítása volt, amelyek akkoriban még csak hetente egyszer, gyenge rácshálózati felbontással készültek.

Az ötlet megvalósításához mindenképpen figyelembe kellett venni az ún. Courant-Friedrich-Levis (CFL) kritériumot, amely szerint a térbeli felbontás és az időlépcsők nagyságát egymástól függően kell megválasztani, hogy a légköri hullámok terjedését megfelelő pontossággal meg lehessen figyelni. Ha például felére csökkentjük a modell rácshálózati felbontását, az időlépcsőt is meg kell feleznünk, hogy egy egy-egy légköri hullámot még az adott rácspontokon belül meg tudjunk figyelni. Így ha durvábbra vesszük a modell felbontását, a számítási igény is jelentősen csökkenthető, ami viszont természetesen az előrejelzés pontosságának rovására is megy.

2003-tól az ECMWF központ naponta kétszer indít finom felbontással készített, 10 napos, rövidtávú előrejelzést és hetente egyszer 32 napos, durvább rácshálózati felbontású előrejelzést (*Vitart et al.*, 2004). 2006 novemberében indult az első VAREPS előrejelzés, amely az előbb említett kétféle technikát próbálja összefogni, vagyis az előrejelzést több, egyre növekvő területi és időbeli felbontást használó lépésre osztja. A 10 napos modellt azóta 15 napig integrálják, a 10. nap után másfélszer olyan durva térbeli és időbeli felbontást használva, mint az első 10 napban. Hetente egyszer – csütörtökönként - a 15 napot tovább viszik 32 napig (*Vitart et al.*, 2008), ahol a modell

felbontása a 15. nap után már 2,5-szer rosszabb, mint az első lépésre vonatkozó előrejelzése. Egy-egy területegység így több, mint hatszorosára növekszik, tehát az időlépcsőt is ebben az arányban kell növelni. Ezzel a módszerrel a második 20 napra vonatkozó modellfuttatás körülbelül ugyanannyi időt és számítógépkapacitást igényel, mint az első 10 napra készített előrejelzés.

2. Utófeldolgozási módszerek

Az előző fejezetben bemutattam, milyen módszerekkel lehet pontosítani a kezdeti feltétel megadását, ezzel javítva az előrejelzések megbízhatóságán. Természetesen még így sem kapunk megfelelően pontos előrejelzést, így a további pontosítás érdekében különböző utófeldolgozási módszerekkel igyekszünk korrigálni az eredményeket.

2.1. Statisztikai utófeldolgozások

Vannak olyan érzékeny meteorológiai paraméterek – például a látástávolság vagy a zivatarok várható helye és ideje –, amiket a numerikus előrejelzések nyers outputjai nem tartalmaznak, vagy azokból közvetlenül nem származtathatók. Más paraméterek – például a minimum és a maximum hőmérséklet – viszont nagyon érzékenyek a modell hibáira és térben is igen változékonyak. A fentiek alapján olyan statisztikai utófeldolgozásokat fejlesztettek ki, amelyekben a nyers modell eredményekre, a megfigyelésekre és a klímaadatokra támaszkodva készítenek előrejelzést egy adott területre (Csima, 2003).

2.1.1. Perfekt Prognózis Módszer (PPM)

Ez az eljárás a modell átfogó korrekciója helyett minden egyes előrejelzést múltbeli megfigyelésekre és statisztikákra alapozva próbál javítani. Rendszerint akkor alkalmazzák, amikor egy-egy meteorológiai változó csak nagyon pontatlanul jelezhető előre, vagy egyáltalán nem áll rendelkezésre megfelelő módszer az előrejelzéshez.

Ahogy a nevéből is következtethetünk, a PPM a modell előrejelzésének tökéletességét feltételezi, így egy adott múltbeli időszakra vonatkozó megfigyelések közötti összefüggést egy az egyben alkalmazza a modell előrejelzés és az előrejelzendő paraméter között is.

Ilyenkor az adott változót egy vagy több másik, pontosabban előrejelezhető meteorológiai paraméterből származtatják, oly módon, hogy a többi paraméter

előrejelzésének tökéletességét feltételezve a múltbeli megfigyelések összehasonlításával következtetnek az adott változó értékére, legtöbbször regressziós módszer alkalmazásával.

Tehát ha például a 2 m-es hőmérsékletre vagyunk kíváncsiak, de csak a 850 hPa-os szint hőmérsékleti adatai állnak rendelkezésünkre, akkor megvizsgáljuk, milyen összefüggést mutatott a két érték egy adott múltbeli időszakra vonatkozóan, majd ezen összefüggés alapján származtatjuk a 2 m-es hőmérséklet értékét a 850 hPa-os szint előrejelzéséből.

2.1.2. Modell Output Statisztika (MOS)

A Perfekt Prognózis módszeréhez hasonlóan ezt az eljárást is rosszul előrejelezhető paraméterekre alkalmazzák múltbeli statisztikák összehasonlításával, azonban a múltban megfigyelt értékek helyett itt a modell előrejelzést hasonlítjuk össze a szinoptikusan mért eredménnyel. Az előző példánál maradva, ha tehát a 2 m-es szint hőmérsékletét szeretnénk előrejelezni, de csak a 850 hPa-os szint modell előrejelzése áll rendelkezésünkre, akkor megvizsgáljuk a múltban előrejelzett 850 hPa-os szint hőmérséklete és a ténylegesen mért 2 m-es hőmérséklet közötti összefüggést, és ezt alkalmazzuk az előrejelzésünkre is.

Az előbb említett két módszer nagy hátránya viszont, hogy nehezen vagy egyáltalán nem követik a modell fejlődését, hiszen ha javul is a modell, az eljárással még mindig a múltbeli, rosszabb modellverzió eredményeit használjuk az összehasonlításhoz, valamint abból a szempontból sem előnyösek, hogy statisztikailag hosszú idősor adataira van szükség az összehasonlításhoz.

2.1.3. Kálmán-szűrő

Ez a módszer egy bonyolult matematikai apparátus segítségével az előző két módszer hátrányait igyekszik kiküszöbölni. Alkalmazásához néhány hetes tanulói időszak is elegendő és gyorsan alkalmazkodik az időjárás változásaihoz is. Hirtelen havazás esetén például néhány nap alatt megtanulja, hogyan korrigálja a módosult időjárási helyzetet egy napsütéses időhöz képest (Izsák, 2001).

2.2. Az EPS előrejelzés kalibrációja

Az utófeldolgozási módszerek közül számunkra legfontosabbak a különböző kalibrációs eljárások. Az ECMWF központ csak nyers, utófeldolgozás nélküli eredményeket szolgáltat, az egyes tagországok ezek után maguk dönthetik el, milyen eljárással végzik el a kalibrációt. Erre többféle módszer állhat rendelkezésre, amelyek különböző eredményességgel alkalmazhatók az egyes meteorológiai paraméterekre. Ilyen például a Bayes becslésen alapuló (*Raftery et al., 2005*), a regressziós (*Hamill et al., 2007*) és az eloszlásfüggvények összehasonlításán alapuló módszer (*Webster, 2007; Ihász and Mile, 2008*)

2.2.1. Regressziós módszer

Az eloszlásfüggvények összehasonlításához hasonlóan ez a módszer is a múltbeli mért és előrejelzett eredmények összevetésén alapul, de itt egy hosszú időszoron vett átlag helyett minden mért értéket egyesével hasonlítunk össze az előrejelzett eredménnyel, ez alapján kalibrálva az aktuális előrejelzést. Ez a módszer esetenként pontosabb korrekciót adhat, mint az eloszlásfüggvényeken alapuló módszer, de azzal szemben nagy hátránya, hogy nem alkalmazható minden meteorológiai paraméterre, valamint rendszerint nem áll rendelkezésünkre megfelelő adatmennyiség az ilyen kalibrálás elvégzéséhez.

2.2.2. Eloszlásfüggvények összehasonlítása

Ez a módszer a leggyakrabban alkalmazott kalibrációs eljárás, mivel nem függ az adott paraméter eloszlásfüggvényének típusától, tehát bármely meteorológiai változóra egyaránt alkalmazható.

Ehhez a módszerhez rendelkezniünk kell a kalibrálni kívánt helyre vonatkozó megfigyelési klíma egy statisztikailag elegendően hosszú időszakra vonatkozó adatsorával, hogy elő tudjuk állítani az adott paraméter megfigyelt értékeinek eloszlásfüggvényét.

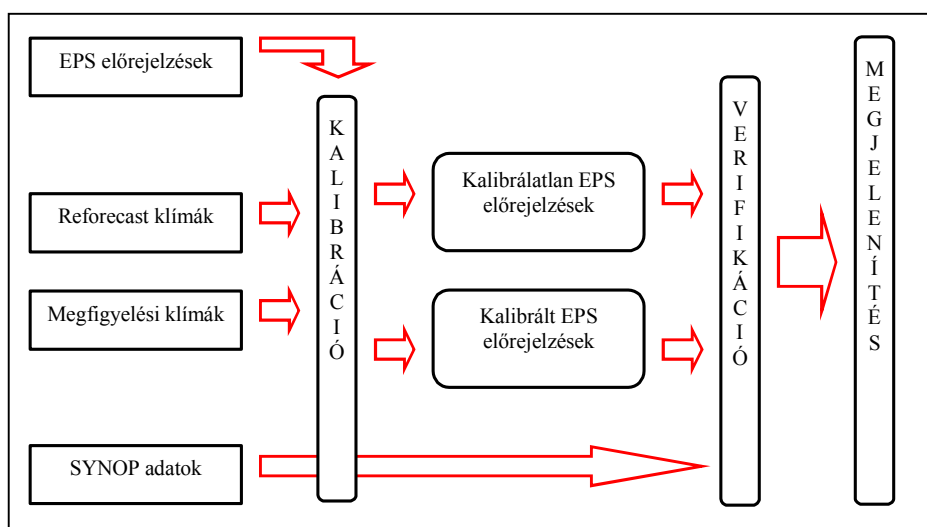
A modellklíma előállításánál néhány szempontot mindenképpen szem előtt kell tartanunk: egyrészt, ha túl hosszú időre visszamenőleg készítenénk modellklímát, már túl nagy eltérés lenne az akkori és a mostani modellek megbízhatósága között, tehát egy jóval régebbi modell által előrejelzett értékek az aktuális modell kalibrációjához már nem használhatók. Másrészt figyelniünk kell arra is, hogy az összehasonlításhoz olyan

múltbeli adatsort (megfigyelési klímát) használjunk fel, amely a modellklímával nagyjából azonos időintervallumot fed le.

Természetesen szükségünk van a kalibrálni kívánt földrajzi helyhez legközelebb eső modell rácspontra vonatkozó ensemble előrejelzésekre is. Ha verifikálni is szeretnénk a kalibrált előrejelzéseket, az előrejelzett időpontokra vonatkozó, kalibrálni kívánt helyeken előrejelzett illetve megfigyelt adatok is nélkülözhetetlenek (2. ábra).

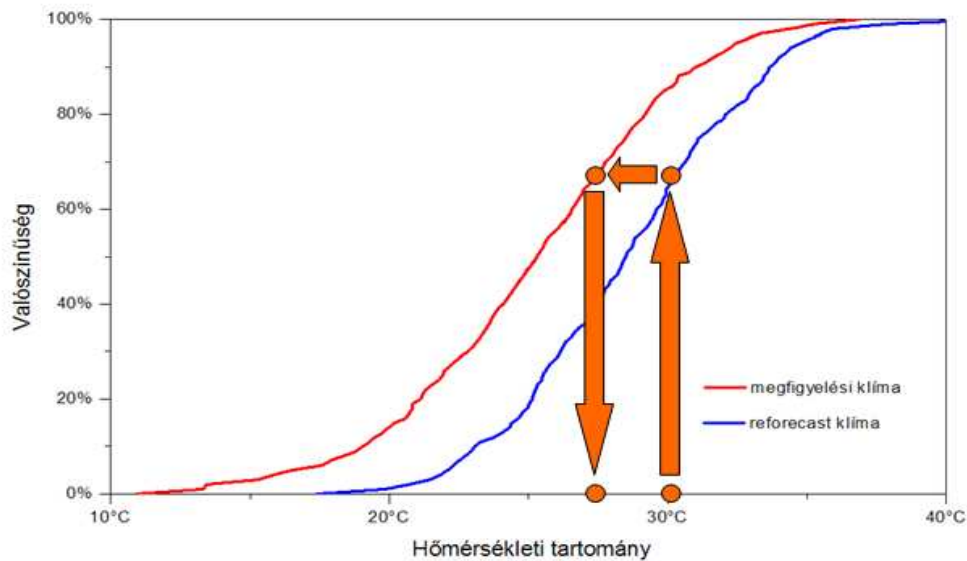
Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál 2006 végén kezdődtek az ECMWF ensemble előrejelzések kalibrációját célzó fejlesztések. Az ECMWF két munkatársa, Horst Böttger és Francois Lalauette ötlete nyomán az eloszlásfüggvények összehasonlításán alapuló kalibrációs eljárást választották, mivel minden meteorológiai paraméterre egyaránt használható és nem igényel bonyolult matematikai apparátust (Mile, 2008). 2008. márciustól – az ECMWF ún. reforecast előrejelzések operatív készítésének megindulásától lehetővé vált az ensemble és a reforecast ensemble előrejelzésekre épülő kalibrációs módszer kifejlesztése (Üveges, 2009).

Üveges Zoltán szakdolgozatában 9 magyarországi meteorológiai állomáson több meteorológiai változóra vizsgálta a kalibráció hatékonyságát. Biztató eredményeit követően 2009 nyarán kidolgozásra került a 70 magyar meteorológiai állomásra épülő ún. rácsponti kalibráció, mely 2009. október közepétől operatíván készít kalibrált előrejelzést a Magyarországot lefedő földrajzi rácshálózat minden pontjára. Szakdolgozatomban ennek a módszernek a verifikációját végzem el a teljes 2009-es évre a rácsponti mezőkből adódó többlet lehetőségek figyelembevételével.



2. ábra: Az utófeldolgozás munkafolyamatának sematikus ábrája (Üveges, 2009)

EPS előrejelzések esetében a kalibrációt az ensemble minden egyes tagjára el kell végezni. Először az adott paraméter előrejelzett értékéhez megkeressük a hozzá tartozó valószínűséget a modellklíma eloszlásfüggvényében, majd ehhez a valószínűséghez hozzárendeljük a megfigyelési klímában ugyanezen valószínűséghez tartozó ténylegesen megfigyelt értéket. Ez lesz az előrejelzésünk kalibrált eredménye (3. ábra).



2. ábra: A kalibrációs eljárás folyamata. Kék színben látható a modellklíma, pirosban a megfigyelési klíma eloszlásfüggvénye (Üveges, 2009).

A kalibráció során tehát azt feltételezzük, hogy a modell múltbeli előrejelzéseiből álló modellklíma eloszlásánál a megfigyelési klíma eloszlása jobban reprezentálja egy meteorológiai paraméter adott pontra vonatkozó előfordulási gyakoriságát (Üveges, 2009). Nem a modellklíma eloszlásának egyszerű eltolásáról van szó a megfigyelési klíma eloszlásának irányába, hanem a kalibráció mértéke a két eloszlásfüggvény azonos valószínűségnél megfigyelhető értékek különbségétől függ.

2.2.1. *SYNOP* adatok

A verifikációhoz szükséges megfigyelési adatok a Szolgálathoz operatíván beérkezett SYNOP táviratokból, tehát a szigorúan még nem ellenőrzött, INDA (INteractive Data Acces) adatbázisából származnak. Ugyanezeket a megfigyeléseket használják a Numerikus Modellező és Légkördinamikai Osztály OVYSIS objektív verifikációs rendszerében is (Üveges, 2009).

2.3. Reforecast előrejelzések használata

Korábban már említettem, hogy egy múltra vonatkozó, régi modellverzióval készített előrejelzés az aktuális modell kalibrálása során már nem reprezentatív. A modellek fejlődésével az előrejelzések is pontosabbá válnak, tehát egy régebbi, kevésbé megbízható modell eredményeit felhasználva az újabb modellt akár még „túl is kalibrálhatjuk”, de semmiképpen sem kapunk megbízható eredményt.

Ennek áthidalására született meg az ún. reforecast eljárás, mely egy múltbeli időintervallumra készít előrejelzést az aktuális modell felhasználásával. A kezdeti- és határfeltételeket az akkori mérési adatok szolgáltatják, az eredmények kalibrálására pedig felhasználhatjuk a tényleges mérési eredményeket. Ennek a módszernek a segítségével tehát képet kaphatunk a modell szisztematikus hibáiról, a modell- és a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényeit összehasonlítva pedig kalibrálhatjuk a jövőbeli előrejelzéseinket is.

Az ECMWF 2008 márciusa óta – hetenként – készít reforecast előrejelzéseket minden csütörtökön, az aktuális napot követő második csütörtök dátumáról 18 évre visszamenőleg. A két hetes különbségre azért van szükség, mert a későbbi kalibráció során az aktuális dátumhoz képest +/- 2 hetes időintervallumot alkalmaznak, így szükség van a két héttel későbbi időpontra készített reforecast előrejelzésekre is.

Egy-egy év adott dátumára vonatkozó reforecast előrejelzés 5 EPS tagot tartalmaz, ez 18 évet tekintve összesen 90 tagot jelent, ami önmagában még nem elég egy stabil modell eloszlásfüggvény előállításához. Ezért a +/- 1 illetve 2 hétre készített előrejelzés tagjait is figyelembe veszik a modellklímához, ami így már $5 \cdot 90$, azaz 450 tagot számlál. Ez az eloszlásfüggvény már stabilabb, de még mindig nem elég megbízható egy pontos kalibrációs eljárás alkalmazásához. Ezen 2009-ben Üveges Zoltán meteorológus hallgató úgy próbált javítani, hogy az aktuális dátumhoz képest +/- 72 óráig, 24 óránként 7 nap adatait is felhasználta, így már $7 \cdot 450$, tehát 3150-re emelte a tagok számát. Ezzel a módszerrel már kellően megbízható modellklímát tudott előállítani.

3. A valószínűségi előrejelzések verifikációja

3.1. Verifikáció

A kalibrációs folyamat során megpróbáljuk korrigálni a mérési hibából, vagy a kezdeti értékek interpolálásából származó szisztematikus hibákat, tehát egy-egy kalibrációs eljárás nagy mértékben javíthat az előrejelzések pontosságán. Ez azonban nem minden módszer esetében van így, ezért fontos, hogy mindig megvizsgáljuk az alkalmazott kalibrációs eljárás megbízhatóságát.

Ez több szempontból is hasznos információt nyújt a meteorológiai fejlesztők számára: egyrészt képet ad arról, hogy a kalibrált előrejelzés milyen mértékben tér el a nyers modell előrejelzéstől, másrészt megmutatja, mely meteorológiai paraméter esetében fordulnak elő szisztematikus hibák (*Tajti, 2009*).

Megkülönböztetünk objektív és szubjektív verifikációt. Objektív verifikáció esetében a modell- és a megfigyelési értékekből egy elegendően hosszú időintervallum adatainak felhasználásával statisztikai vizsgálatokat végzünk, míg a szubjektív verifikáció során az egyes meteorológiai paramétereket térképen ábrázoljuk, és ezeket vizuálisan hasonlítjuk össze (*Tajti, 2009*).

Determinisztikus előrejelzések esetében csak egy előrejelzett (kalibrált vagy kalibrálatlan) értéket hasonlítunk össze a megfigyelt értékkel. Ilyenkor legkézenfekvőbb az előrejelzett és a megfigyelt értékpárok különbségeiből átlagot számolni, így kapjuk meg az ún. *átlagos hibát*.

3.2. Ensemble előrejelzések verifikációja

A valószínűségi előrejelzések verifikációja meglehetősen eltér a determinisztikus előrejelzések bevalásának vizsgálatától, ugyanis itt nem egyetlen előrejelzés értékét szembesítjük a megfigyelési értékkel, hanem előrejelzések együttesét (*Jolliffe and Stephenson, 2003*). A legmegfelelőbb verifikációs módszer megválasztása természetesen függ a verifikálni kívánt meteorológiai paramétertől is, hiszen a különböző eloszlásfüggvényekre alkalmazható kalibrációs és verifikációs eljárások nagyon eltérőek lehetnek. Az ensemble előrejelzések verifikálása gyakran úgy történik, hogy azokat valamilyen szempont alapján kategorikus (ún. igen-nem) előrejelzéssé

alakítják át (*Persson and Grazzini, 2007*). Egy precíz megbízhatósági vizsgálathoz azonban általában többféle verifikációs módszerre is szükség van (*Szépszó, 2004*).

3.3. Folytonos meteorológiai változók verifikációja

3.3.1. Négyzetes középhiba

Az *átlagos négyzetes hiba* (MSE) számszerű információt ad az előrejelzés megbízhatóságáról. Determinisztikus előrejelzésnél ez az érték az előrejelzett és a mért értékek különbségeinek négyzetével egyenlő, EPS előrejelzés esetében pedig ugyanezzel a módszerrel az 51 tag átlagát kell megadni az alábbi képlet segítségével (*Nurmi, 2003*):

$$\text{MSE} = (1 / N) \cdot \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2,$$

ahol N az esetek száma, f_i a paraméter előrejelzett értéke, o_i a megfigyelt érték. A négyzetre emelésnek köszönhetően sokkal érzékenyebb a nagy hibákra és a kiugró értékekre, mint a sima átlagoláson alapuló verifikáció, így pontosabb információt adhat az előrejelzés pontatlanságáról.

A tökéletes előrejelzés átlagos négyzetes hibája nullával egyenlő, tehát egy kalibrációs eljárás akkor tekinthető sikeresnek, ha a kalibrált előrejelzés MSE értéke kisebb, mint a kalibrálatlané.

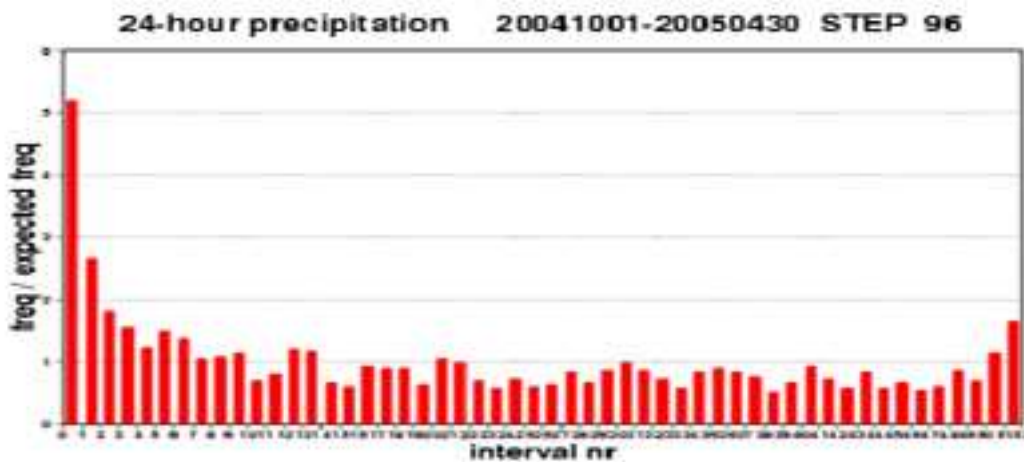
3.3.2. Talagrand diagram

Ez a diagram grafikus információval szolgál az EPS előrejelzés szórását, az ún. *ensemble spread*-et illetően. A vízszintes tengelye 51 intervallumot tartalmaz, amelyből 49 zárt, a két végén pedig 1-1 nyílt található. Az előrejelzett ensemble értékek nagyság szerint növekvő sorrendbe rendezve alkotják a diagram vízszintes tengelyét, a függőleges oszlopok pedig két-két szomszédos ensemble érték közötti intervallumba eső megfigyelések gyakoriságát jelölik. Megvizsgáljuk, a mért érték melyik két egymást követő ensemble érték közé esik, majd annak az intervallumnak az értékét eggyel megnöveljük. Így kapjuk meg az adott intervallum előfordulásának gyakoriságát.

A szélső, nyílt intervallumokba eső megfigyeléseket outlier eseteknek nevezzük. Egy ideális EPS rendszernél a Talagrand-diagramunk lapos és szisztematikus hibától

mentes lesz (Mile, 2008). Ha a diagram alakja J vagy L, akkor az EPS rendszerben szisztematikus hibát, fölél- vagy alélbecslést jelent. U alakú diagram esetén pedig az ensemble spread nem elég széles (Persson and Grazini, 2007) (4. ábra).

Az outlier esetek száma persze akkor is csökken, ha az ensemble szórását növeljük. Ezzel azonban nő az előjelzés bizonytalansága, így pusztán Talagrand-diagrammal a kalibrációs eljárás sikerességét bizonyítani nem tudjuk, ráadásul számos meteorológiai paraméter verifikációjánál (szél, csapadék) nem alkalmazható (Üveges, 2009).



4. ábra: Példa szisztematikus felélbecslést mutató Talagrand diagramra

3.3.3. „Eyeball verification”

Ez az eljárás tulajdonképpen egy egyszerű vizuális összehasonlítás a mért és az előjelzett értékek között. Szubjektív jellegéből adódóan könnyű és gyors módja az előjelzés kiértékelésének, ugyanakkor kevésbé számszerű és megalapozott. Közös diagramon ábrázoljuk az adott paraméter mért és megfigyelt értékeit és pusztán vizuális alapon következtetünk az előjelzés pontosságára. A diagram fajtája lehet a meteorológia területén gyakran használt fáklya-diagram illetve meteogram.

3.4. Kategorikus előjelzések

A diszkrét eloszlású meteorológiai változók esetében megkülönböztetünk két (igen-nem) – illetve több kategóriás előjelzéseket. Kétkategóriás előjelzéseknél értelemszerűen azt vizsgáljuk, hogy az adott esemény bekövetkezett-e, vagy sem. Tipikusan ilyen előjelzések az eső, a hóesés, az erős szél (ahol különböző küszöb

értékeket adhatunk meg), az éjszaki fagy és a köd (*Tajti*, 2009). Ha az adott esemény bekövetkezik, akkor az előrejelzésünk sikeres (*Hit*), ha pedig nem, akkor téves riasztásról beszélünk (*False alarm*). Természetes mindez fordított esetben is igaz, ha egy olyan esemény következik be, amit a modell nem jelzett előre, akkor is sikertelen az előrejelzés (*Missed*), ha pedig a modell sem jelzi előre, akkor megint csak sikeres előrejelzésről beszélhetünk (*Correct negative*) (I. táblázat).

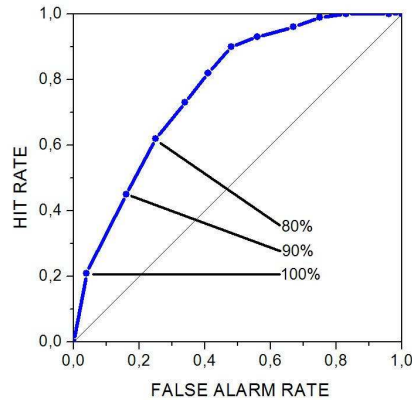
Az ensemble előrejelzések kategorikussá alakítása korántsem olyan egyértelmű, mint a determinisztikus előrejelzések esetében. Utóbbi esetben egyetlen előrejelzett értéket szembesítünk a ténylegesen bekövetkezett eseménnyel, míg EPS előrejelzések során az 51 tag együttesét. Ezért ebben az esetben definiálnunk kell olyan valószínűségi küszöböt, amely fölött az eseményt előrejelzettnek tekinthetjük. Ha például ez a küszöb 60%, akkor az adott eseményt akkor tekintjük előrejelzettnek, ha az EPS tagok közül legalább 30 előre jelezte a bekövetkezését.

Esemény bekövetkezése	Bekövetkezett	Nem következett be
Előrejelzett	Hit (H)	False alarm (F)
Nem jelzett előre	Missed (M)	Correct negative (CN)

1. táblázat: Esemény besorolása kategorikus előrejelzéseknél (*Üveges*, 2009).

3.4.1. ROC-diagram

A fenti esetek számából számolható a hibás riasztások aránya, $FAR = F / (F + CN)$ és találatok aránya, $HR = H / (H + F)$. Ezekből állíthatjuk elő az ún. ROC (Relative Operating Characteristic) diagramot oly módon, hogy megvizsgáljuk 0 és 100% között az egyes küszöbértékekhez tartozó FAR és HR számpárokat. A diagram vízszintes tengelyét az FAR értékek, függőleges tengelyét pedig a HR értékek adják, a görbe maga pedig az egyes küszöbértékekhez tartozó számpárokat köti össze. Az előrejelzésünk annál pontosabb, minél nagyobb a görbe alatti terület, azaz küszöbönként a FAR minél kisebb, a HR minél nagyobb (*Persson and Grazzini*, 2007) (5. ábra).



5. ábra: ROC diagram

3.4.2. Brier Score

Ezzel a módszerrel számszerű értéket adhatunk az előbb említett kategorikus előrejelzésekhez. A képlet egy diszkrét paraméterekre alkalmazható négyzetes középhiba számítás, ahol a kategorikus előrejelzésekre jellemzően egy-egy meteorológiai esemény bekövetkezését vizsgáljuk a következő képlet felhasználásával:

$$BS = (1 / N) \cdot \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 ,$$

ahol p_i egy adott esemény bekövetkezésének valószínűsége az ensemble előrejelzésben, o_i pedig az esemény megfigyelt valószínűségét jelenti (1 értéket vesz fel, ha az esemény valóban bekövetkezett, nullát, ha nem). A négyzetes hibához hasonlóan a tökéletesen sikerült prognózis Brier Score értéke is nullával egyenlő (Persson and Grazzini, 2009).

3.4.3. Brier Skill Score

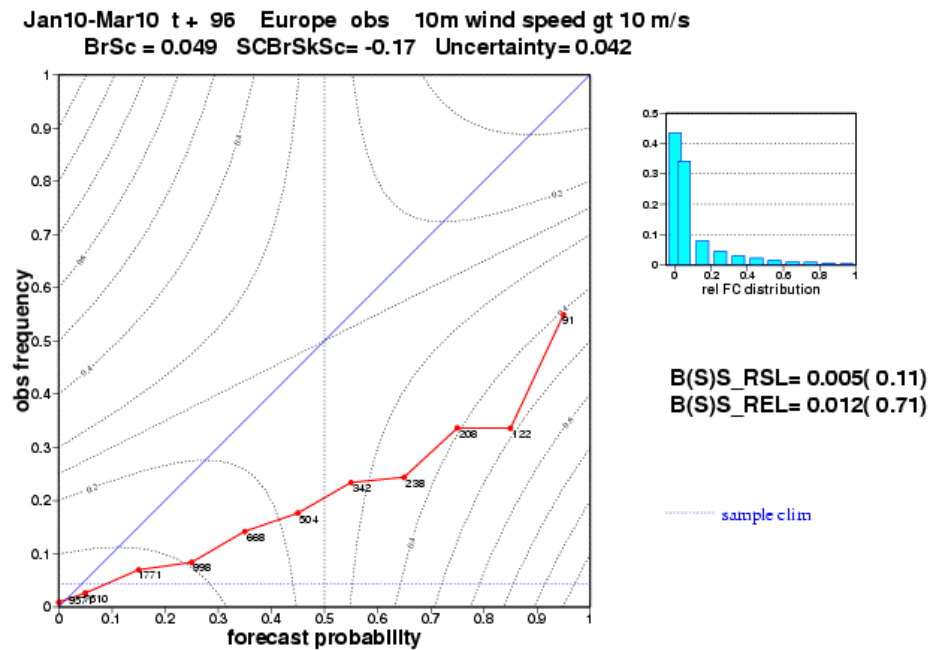
A Brier Skill Score módszerrel a verifikálni kívánt előrejelzést egy referencia előrejelzéshez hasonlíthatjuk az alábbi képlet segítségével:

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} ,$$

ahol BS a verifikálandó előrejelzés Brier Score-ja, BS_{ref} pedig a referencia előrejelzésé. Értéke $-\infty$ és 1 között lehet, ha 0-nál kisebb, akkor azt mondhatjuk, hogy az előrejelzés nem jobb, mint a referencia prognózis (Persson and Grazzini, 2007).

3.4.4. Megbízhatósági diagram

A *reliability* – megbízhatósági – diagram intervallumonként összegzi az átlagos előrejelzett valószínűség és az esemény bekövetkezésének relatív gyakoriságának négyzetes eltérését. Jó Brier Score értéket akkor kapunk, ha ez az érték is a lehető legkisebb, azaz az előrejelzett valószínűségek és a bekövetkezések gyakorisága közel van egymáshoz. Értéke 0 és 1 között lehet (Szépszó, 2004) (6. ábra). Az x-tengelyen az előrejelzett valószínűségek, az y-tengelyen pedig az intervallumokra vonatkozó megfigyelt esemény-gyakoriságok vannak feltüntetve. A tökéletes reliability vonala – perfect reliability – az átló, ekkor minden intervallumban pont annyiszor következett be az esemény, amennyinek a valószínűségét előrejeleztük. Ennek a tagnak a jósága szemléletesen azt jelenti, hogy a görbénk az átlóhoz közel húzódik. Ha az átló alatt halad a vonal, akkor fölébecsléssel, ha felette, akkor alábecsléssel van dolgunk. (A fölébecslés azt jelenti, hogy túl nagy valószínűséget adtunk, az esemény ritkább volt.)



6. ábra: 2010. január–március időszak adatai alapján a 10 m/s-es szélsősebesség a +96 órás ensemble előrejelzésének megbízhatósági diagramja ($w > 10\text{m/s}$ esetében)

4. Rácsponi kalibrált ensemble mezők objektív verifikációja

4.1. Célkitűzés

Szakedolgozatom célja egy OMSZ által kifejlesztett új – rácsponi – kalibrációs eljárás verifikálása volt, amely az eddig kidolgozott módszerek pontosítására született.

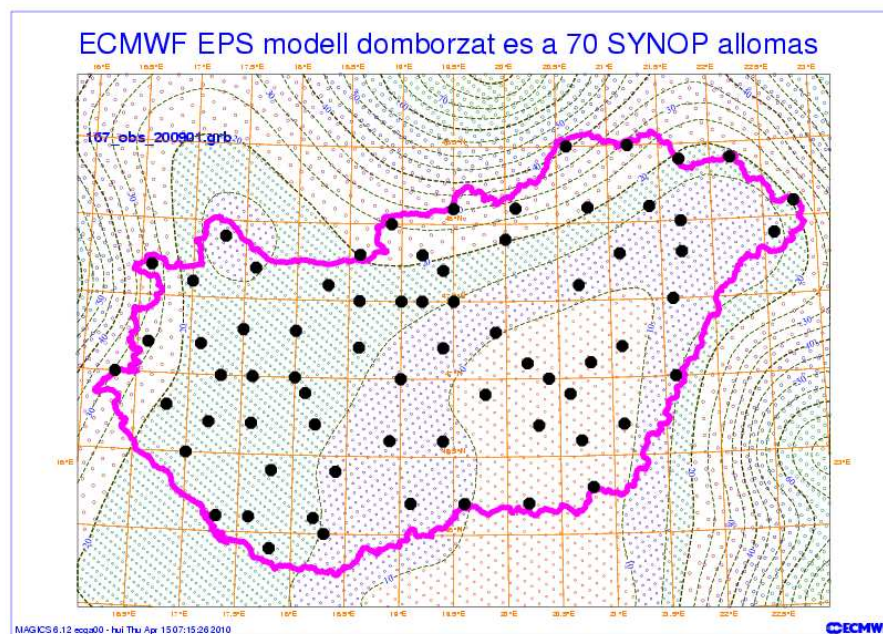
Mile Máté 2008-ban végzett meteorológus hallgató dolgozta ki az eloszlásfüggvények összehasonlításán alapuló kalibrációs eljárást (Mile, 2008). A megfigyelési- és modellklíma előállításához az 1971-2000-ig tartó 30 év adatait használta fel, akkor még csak két meteorológiai paraméterre (csapadék és hőmérséklet). A modellklíma az ECMWF által 2006-2007-ben készített első reforecast előrejelzések felhasználásával készült, ami az aktuális modell szerint készített előrejelzéseket tartalmazta az adott 30 évre, akkor még csak egyetlen (perturbálatlan) kezdeti feltétellel.

Ebből a szempontból sikerült tovább lépnie 2009-ben Üveges Zoltán meteorológus hallgatónak (Üveges, 2009), mivel attól az évtől kezdve már rendelkezésre álltak 18 évre visszamenőleg EPS reforecast előrejelzések is. Ezzel a módszerrel először az 1991-2000-ig tartó modellklímát hasonlította össze a Mile Máté által használt 30 éves megfigyelési időszorral, de ez a kísérlet nem hozott jó eredményeket, az időbeli eltérés miatt a kalibráció több esetben is rosszabb eredménnyel szolgált, mint a sima, kalibrálatlan előrejelzés. Emiatt a megfigyelési klímát is módosítani kellett ugyanarra a 18 éves periódusra, amivel viszont már megbízható eredmények születtek, sokszor jobbák is, mint a Mile Máté által készített kalibrációnál. Az ő dolgozatában továbbá az is újításnak számított, hogy a hőmérséklet és a csapadék mellett 3 új paraméterre is elvégezte a kalibrációt: minimum- és maximum hőmérséklet, valamint a szélsőesség esetében is (Üveges, 2009).

Mindkettőjük adott mérési állomásokon végezte a kalibrációt, az állomáshoz legközelebbi rácsponi előrejelzését felhasználva. Ez megkönnyíti a szinoptikus előrejelző munkáját, ha arra a településre készít előrejelzést, ahol az állomás található, hiszen nem kell interpolálni a rácsponi pontokból, arra viszont nem alkalmas, hogy az adatokból megfelelően pontos térbeli térképet lehessen rajzolni. Ehhez ugyanis módszeresen kellene elhelyezni a mérési pontokat, és több állomás adataira is szükség lenne.

Munkámban először pontbeli verifikációval foglalkoztam, készítettem EPS előrejelzésre Talagrand-diagramot, majd EPS átlagra átlagos és átlagos négyzetes hibát. A későbbiekben állomások helyett rácspontokra történő kalibráció verifikációját végeztem, az eredeti 9 állomás helyett 70 állomás adatainak felhasználásával. Egy-egy rácspont értékét a hozzá legközelebb eső állomás előrejelzéséből származtattam, interpolálás helyett egyszerű térbeli eltolást alkalmazva. Így sokkal több, egyenletesen elhelyezkedő pont állt rendelkezésemre egy grafikus térkép rajzolásához.

Az Üveges Zoltán féle 9 állomást tartalmazó pontbeli kalibrációs eljárást továbbfejlesztve 2009 nyarán elkészült egy 70 magyar állomás (a napi jelentésben szereplő állomások) adatait felhasználó szabályos földrajzi rácshálózatot lefedő kalibráció (7. ábra), amely 2009 év októberétől fut operatíván az Országos Meteorológiai Szolgálatban (Ihász *et al.*, 2009). Ahhoz, hogy munkámban egy teljes év adatait felhasználhassam, szükség volt a januártól októberig tartó időszak 70 állomásos havi modell- és megfigyelés klímájára is, amelyet visszamenőleg a MARS adatbázis adatait felhasználva készítettünk el, számszerű és grafikus formában is.



7. ábra: A kalibráció során felhasznált 70 magyar, ún. napijelentés állomás (fekete pontok) valamint az EPS modell 0,5*0,5 fokos földrajzi rácshálózata /narancssárga vonalak/, valamint az ECMWF TL399L62 EPS modell domborzata /izovonalak./

4.2. Verifikáció

Verifikációs munkám során a kalibrációs eljárás megbízhatóságát vizsgáltam havi- és évszakos átlagokra vonatkozóan, majd az eredményeket különböző térképeken ábrázoltam. Mivel az új módszer már 70 állomás adatait használja fel a 9 helyett, ezért az állomások egyesével történő, számszerű kiértékelése helyett a grafikus, térképes ábrázolás mellett döntöttem. A verifikációt 4 fő lépésben végeztem el:

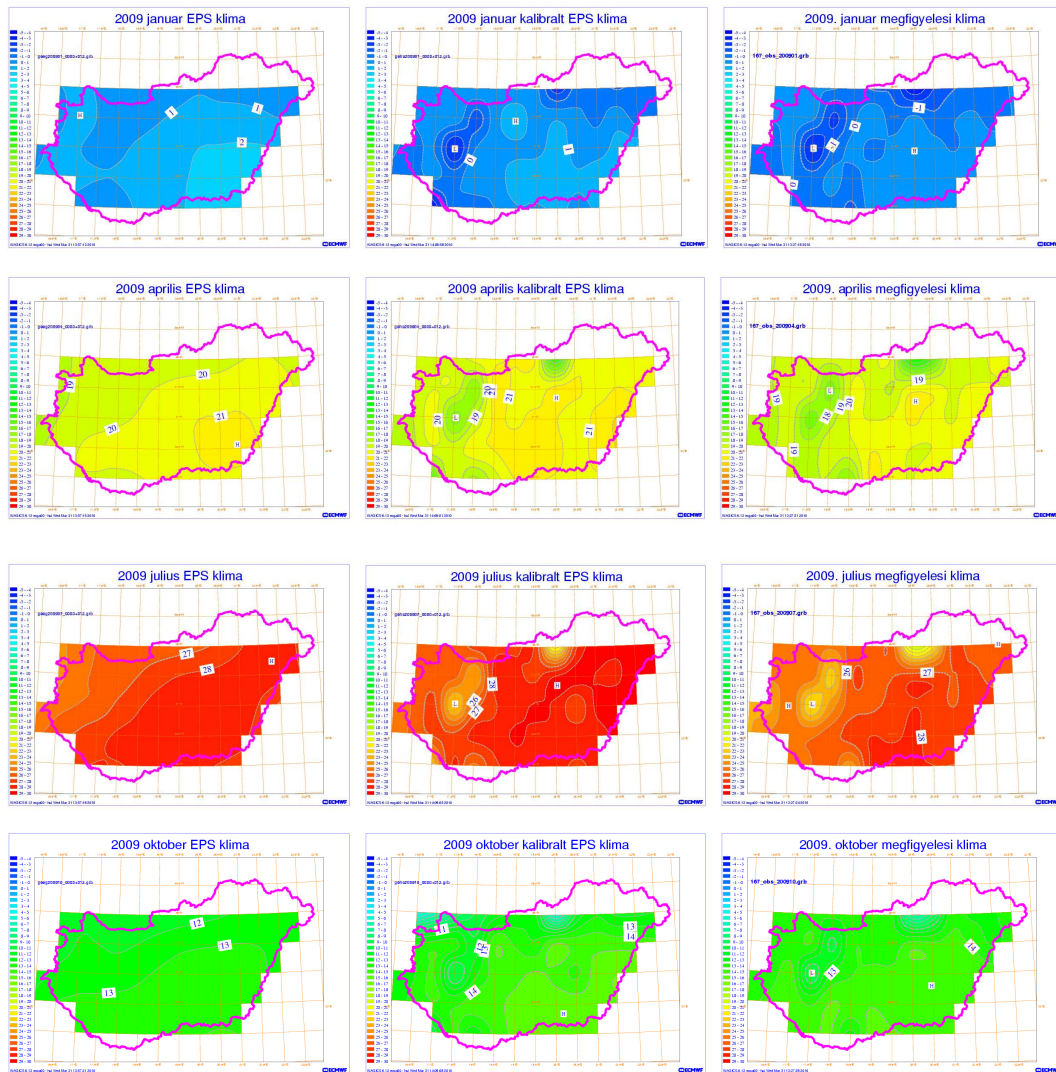
- első lépésben összehasonlítottam az EPS, a kalibrált EPS és a megfigyelési értékek havi átlagaiból készített térképeket;
- ezután grafikusan ábrázoltam az EPS és megfigyelés, valamint a kalibrált EPS és megfigyelés különbségeit is;
- harmadik lépésben az RMSE (átlagos négyzetes hiba) értékeit is megjelenítettem térképesen;
- végül pedig a kilógó értékeket ábrázoltam térképes Talagrand-diagram segítségével.

Az objektív verifikációhoz használt 2009. évi naponkénti megfigyelési adatokat az OMSZ Távközlési és Informatikai Főosztály Szoftverfejlesztési Osztály bocsátotta a rendelkezésünkre. A térképek és grafikonok előállítását az ECMWF által kifejlesztett MAGICSS++ programcsomag alkalmazásával végeztem (*Lamy-Thépaut, 2009 Siemen, 2010*).

4.3. Havi EPS, kalibrált EPS és megfigyelés térképek

Az előrejelzett- és megfigyelési klíma eloszlásfüggvényeit felhasználva térképen is megjelenítettük az előrejelzett, a kalibrált és a megfigyelt értékeket. Jól látszik, hogy a kalibráció után az orografikus okokból adódó eltérések jobban kirajzolódnak, pontosabban előrejelezve a Bakony, Mátra és a Mecsek területének hőmérsékleti viszonyait.

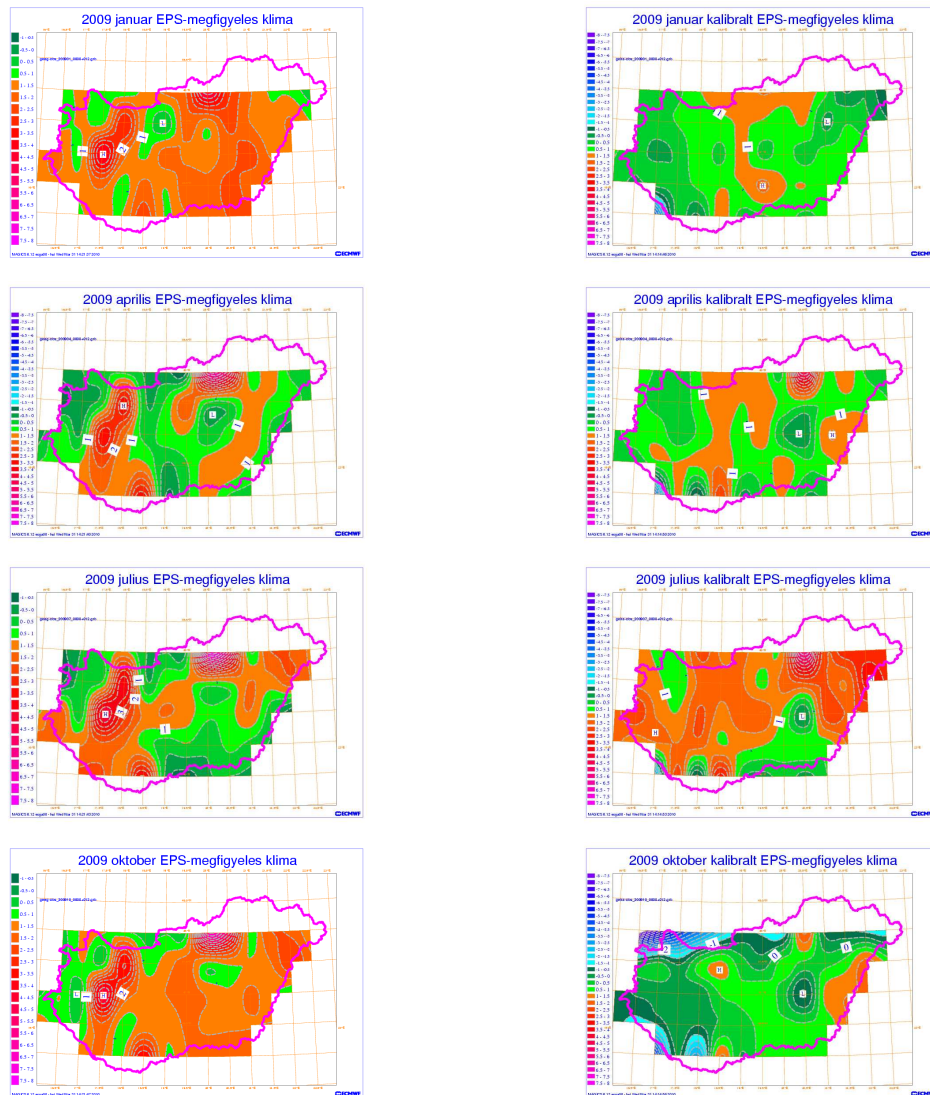
A kiértékelés során azt tapasztaltam, hogy a kalibráció elsősorban a hegyvidékeken eredményezett látványos javulást, de a síkvidéki területek előrejelzései is jobbá váltak. A téli hónapok térképein jóval kisebb mértékű hiba látható, mint a nyári hónapokén, mivel télen a sok borult nap és a rövid nappalok miatt a hőmérséklet napi ingása körülbelül 3-szor kisebb, mint a nyári hónapokban.



8. ábra: 2009. január, április, július és október EPS-, kalibrált EPS- és megfigyelés havi átlag térképek

4.4. Átlagos hiba (ME) különbségtérképek

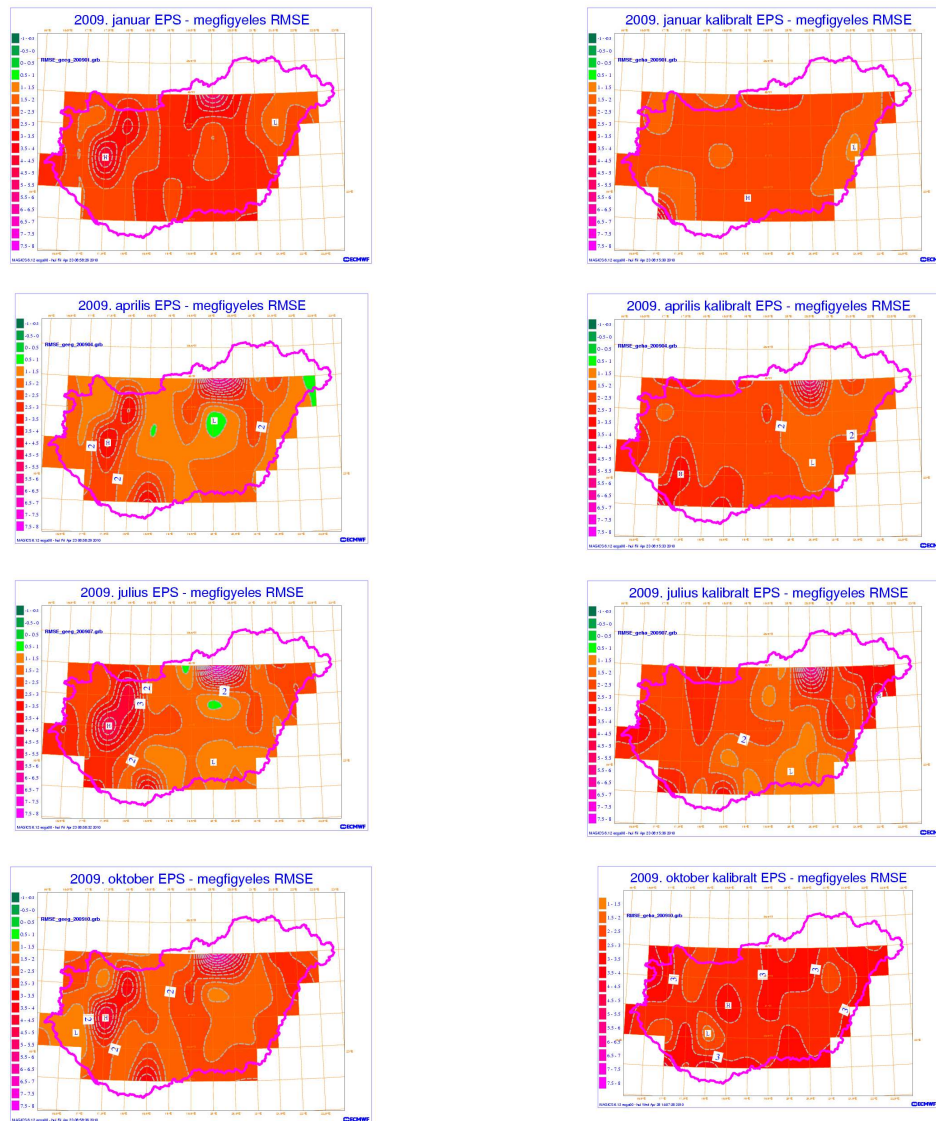
A havi EPS térképek esetében vizuálisan hasonlítottuk össze az EPS és a kalibrált EPS térképeit a megfigyelési klímáéval. A különbséget számszerű formában is megadtam és a kapott eredményeket különbségtérképeken jelenítettem meg. A havi EPS térképekhez hasonlóan itt is egyértelműen látszik a kalibráció pozitív módosító hatása.



9. ábra: 2009. január, április, július és október EPS-megfigyelés és kalibrált EPS-megfigyelésre vonatkozó átlagos hibák térképe

4.5. Átlagos négyzetes hiba (RMSE) különbségtérképek

Ez a módszer ugyanazon az elven alapul, mint az átlagos hiba ábrázolása különbségtérképen, de a négyzetre emelésnek köszönhetően sokkal erősebben bünteti a durva hibákat, mint az egyszerű átlagos hibák különbségei.



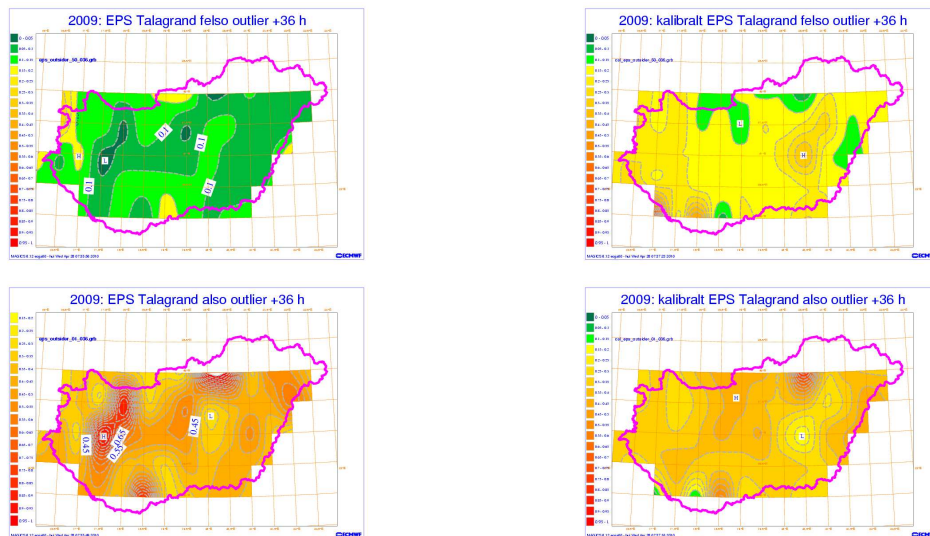
10. ábra: 2009. január, április, július és október EPS-megfigyelés és kalibrált EPS-megfigyelésre vonatkozó átlagos négyzetes hibák térképe

4.6. Talagrand-diagram

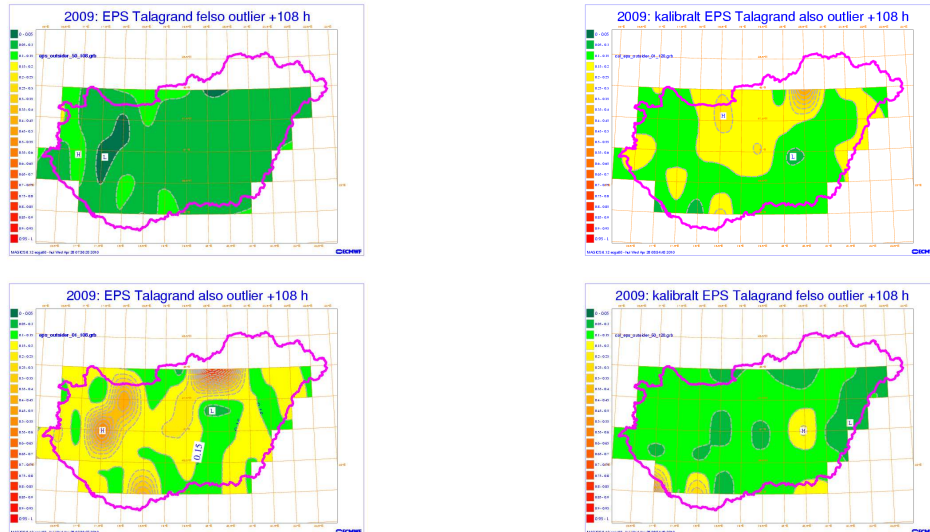
A kalibrált és a kalibrálatlan előrejelzéseket térképes Talagrand-diagramon is ábrázoltam, mivel az átlagos- és az átlagos négyzetes hibával ellentétben ez nem csak az ensemble átlag, hanem a teljes ensemble szórás verifikációját is lehetővé teszi. A kilógó értékeket a +12 órás előrejelzéstől kezdődően +180 óráig 24 órás bontásban megjelenítettem, amely teljes terjedelmében megtalálható a függelékben. Alább illusztrálom a korai, középső és későbbi időpontra vonatkozó térképeket, három kiválasztott időpont, +36, 108 és 180 órás előrejelzés bemutatásával.

A térképes megjelenítéshez egy év adatait használtam fel, mivel egy-egy hónap által szolgáltatott 30 adat nem elegendő egy megbízható Talagrand-diagram készítéséhez. A kiértékelésnél három fő következtetést tudtam levonni:

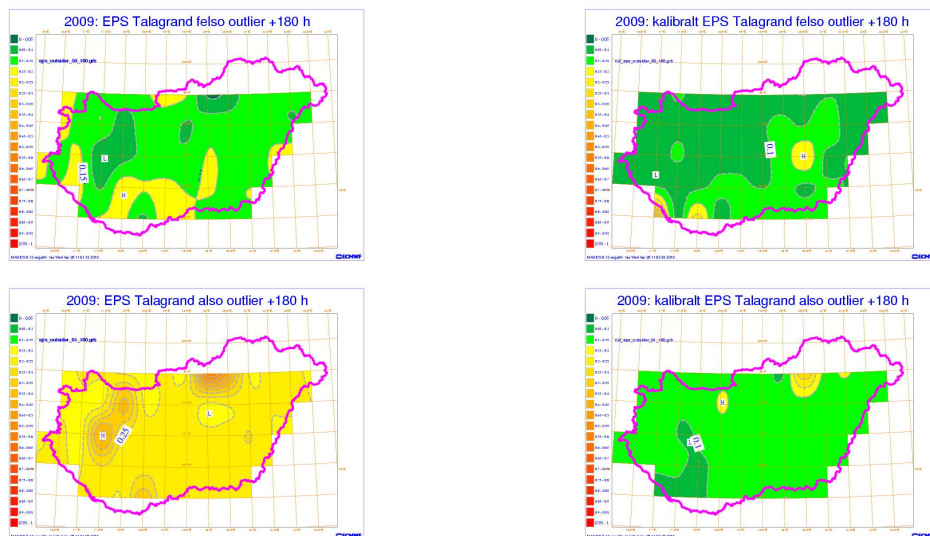
- a hegyvidéki területeken jelentkező szisztematikus hiba a kalibráció után szinte teljesen eltűnik, így azokon a területeken megbízhatóbbá vált az ensemble előrejelzés;
- a modell eredetileg szisztematikus felülbecslést mutatott, amelyet a kalibráció során sikerült korrigálni. Az y tengely 0 vonala a felülbecslés mértékével arányosan feljebb került, így (bár a felső outlier esetek számában látszólag romlás látható) az alsó és felső kilógó értékek hibája azonos mértékűvé vált;
- a magasabb időlépcsőknél a nagyobb ensemble szórás miatt kisebb a kilógó értékek száma, ez a kalibráció után is megmarad, tehát a kalibráció megőrzi az előrejelzés megbízhatóságát.



11. ábra: 2009 teljes év: +36 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



12. ábra: 2009 teljes év: +108 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



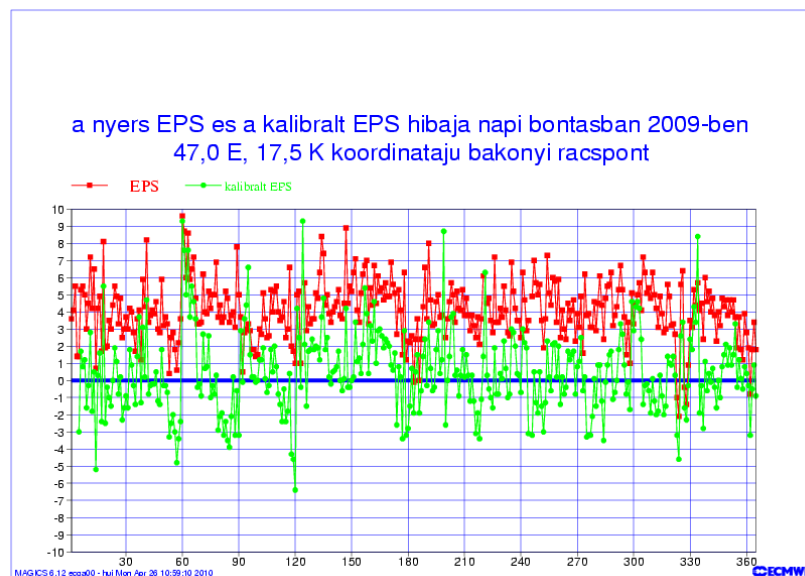
13. ábra: 2009 teljes év: +180 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier

4.7. Bakonyi rácspont vizsgálata

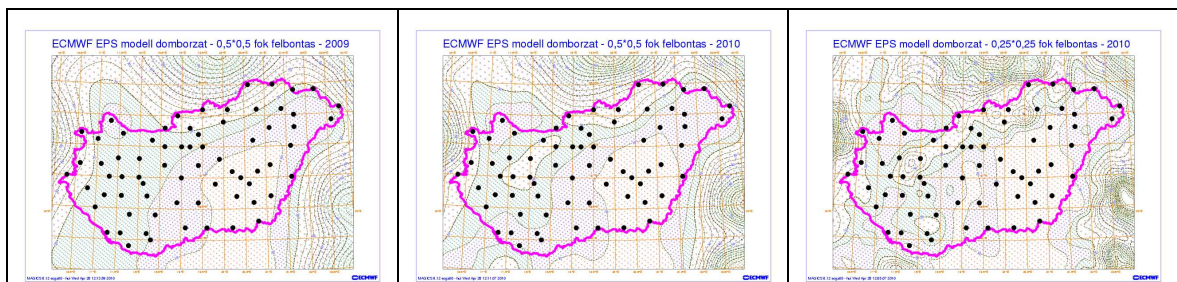
A havi- és különbségtérképeken jól látszik, hogy a kalibrálatlan EPS előrejelzések nem reprezentálják kellő pontossággal a domborzati viszonyokat. A kalibráció első ránézésre javít a hegyvidéki területek előrejelzésein – ennek verifikálására kiválasztottam egy magasabb területen fekvő pontot (a bakonyi rácspontot), amit napi bontásban egy teljes évre visszamenőleg megvizsgáltam, összehasonlítva a kalibrált és a kalibrálatlan előrejelzés különbségeit a megfigyelési értékhez képest.

A kalibráció során nagy segítséget jelentett a reforecast előrejelzések használata, mivel ezt már az új, 32x32 km-es ensemble rácsfelbontáson futtatták, amely így sokkal megbízhatóbban adta vissza a domborzati viszonyokat.

Jól látszik, hogy a kalibrált előrejelzés jóval közelebb van a tökéletes előrejelzéshez (0 vonala), mint a kalibrálatlan EPS, tehát a kalibráció erre a rácspontra sikeresnek bizonyult (14. ábra). Az ensemble modell horizontális felbontása 2010 elején 50 km-ről 32 km-re nőtt (Marbouty, 2010), (15. ábra). A modell domborzati térképek alapján jól látszik, hogy a reforecast előrejelzéseken alapuló ensemble kalibrációs technika alkalmas a megváltozott modell felbontás és domborzat megfelelő kezelésére, míg a dolgozatban korábban említett utófeldolgozási módszerek a Kálmán filter kivételével nem.



14. ábra: 2009. január 1. - december 31. között a kalibrálatlan és a kalibrált ensemble előrejelzésből készült ensemble átlag átlagos hibájának menete a 47,5 É ; 17 K koordinátájú bakonyi rácspontban (piros vonal – kalibrálatlan előrejelzés, zöld vonal – kalibrált előrejelzés)



15. ábra: ECMWF EPS modell domborzat:

baloldalon 2009-ben /0,5*0,5 fokos felbontással/, középen 2010-ben /0,5*0,5 fokos felbontással/, jobbra 2010-ben /0,25*0,25 fokos felbontással/

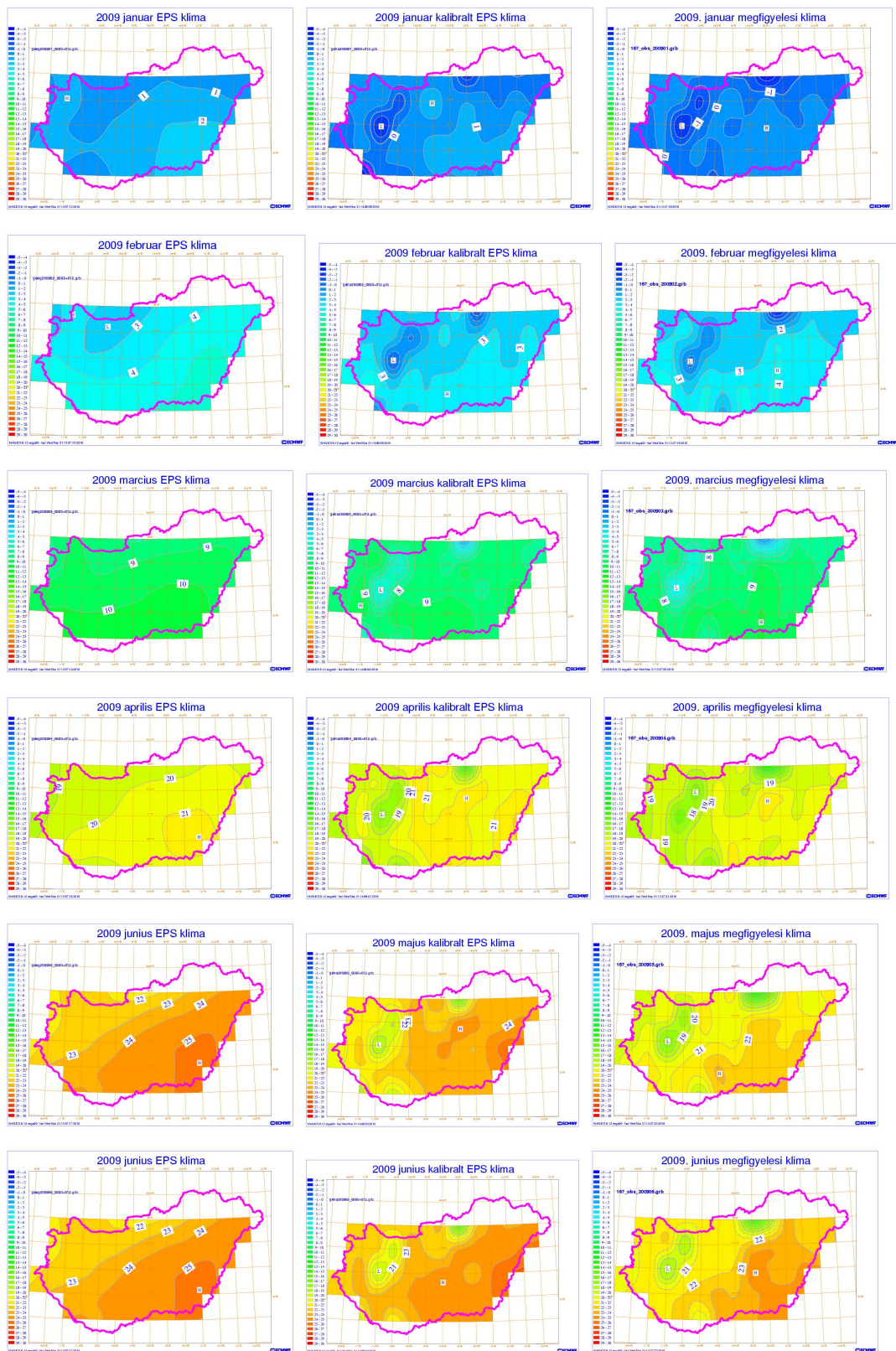
Összefoglalás

Szakedolgozatomat az Országos Meteorológiai (OMSZ) Szolgálat Numerikus Modellező és Léggördinamikai Osztályán készítettem. A dolgozat céljainak ismertetése után az első fejezetben bemutatam a numerikus előrejelző módszerek elméletét, gyakorlatát és történelmi háttérét, azon belül is különös figyelmet szentelve az ensemble előrejelzési technikának, amelyre a dolgozatom alapját képező kalibrációs eljárás is épül. Kitértem továbbá az ECMWF – Európai Középtávú Előrejelző Központ – előrejelző rendszerére is, ahonnan a dolgozatomban felhasznált ensemble előrejelzések származnak. A 70 magyar ún. napijelentés állomásra vonatkozó megfigyelési klíma eloszlásfüggvényeket és az objektív verifikációhoz használt 2009. évi naponkénti adatokat az OMSZ Távközlési és Informatikai Főosztály Szoftverfejlesztési Osztály bocsátotta a rendelkezésünkre.

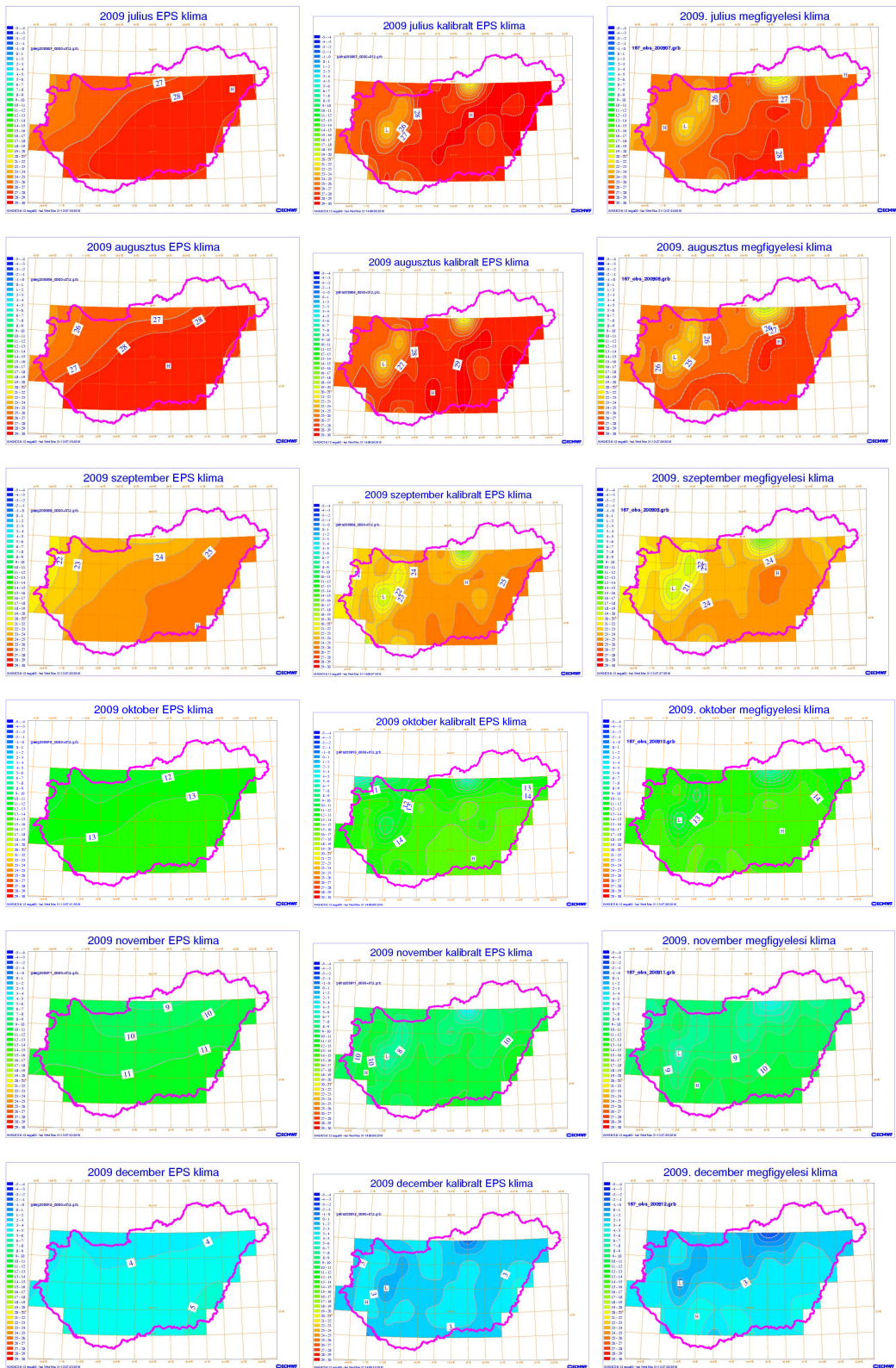
A második fejezetben ismertettem a különböző utófeldolgozási módszereket, amelyekkel javítható az előrejelzés pontossága, kiemelve azokat a kalibrációs eszközöket, amelyek az ensemble előrejelzési technika pontosítására is alkalmazhatóak. A harmadik fejezetben a numerikus előrejelzések esetében alkalmazható verifikációs eszközöket tekintettem át. A negyedik fejezetben az új rácsponti kalibrációs eljárás komplex verifikációját végeztem el háromféle verifikációs eszköz alkalmazásával. Az ensemble átlag átlagos és négyzetes hibamezők havi térképeinek vizsgálata mellett a teljes EPS verifikációjára alkalmas Talagrand diagrambeli alsó és felső kilógó (outlier) értékek gyakoriságából rajzolt térképeket is tanulmányoztam. A háromféle verifikációs eredmény egybehangzóan és egyértelműen mutatja, hogy az ensemble-kalibráció a domb és hegyvidéki területeken megszünteti a modell alábecslését, s a síkvidéki területeken is növeli modell előrejelzés megbízhatóságát.

További terveink között szerepel a 2m-es hőmérséklet mellett egyéb fontos meteorológiai paraméterek, mint a csapadékmennyiség és a szélesség rácsponti kalibrációja és verifikációja.

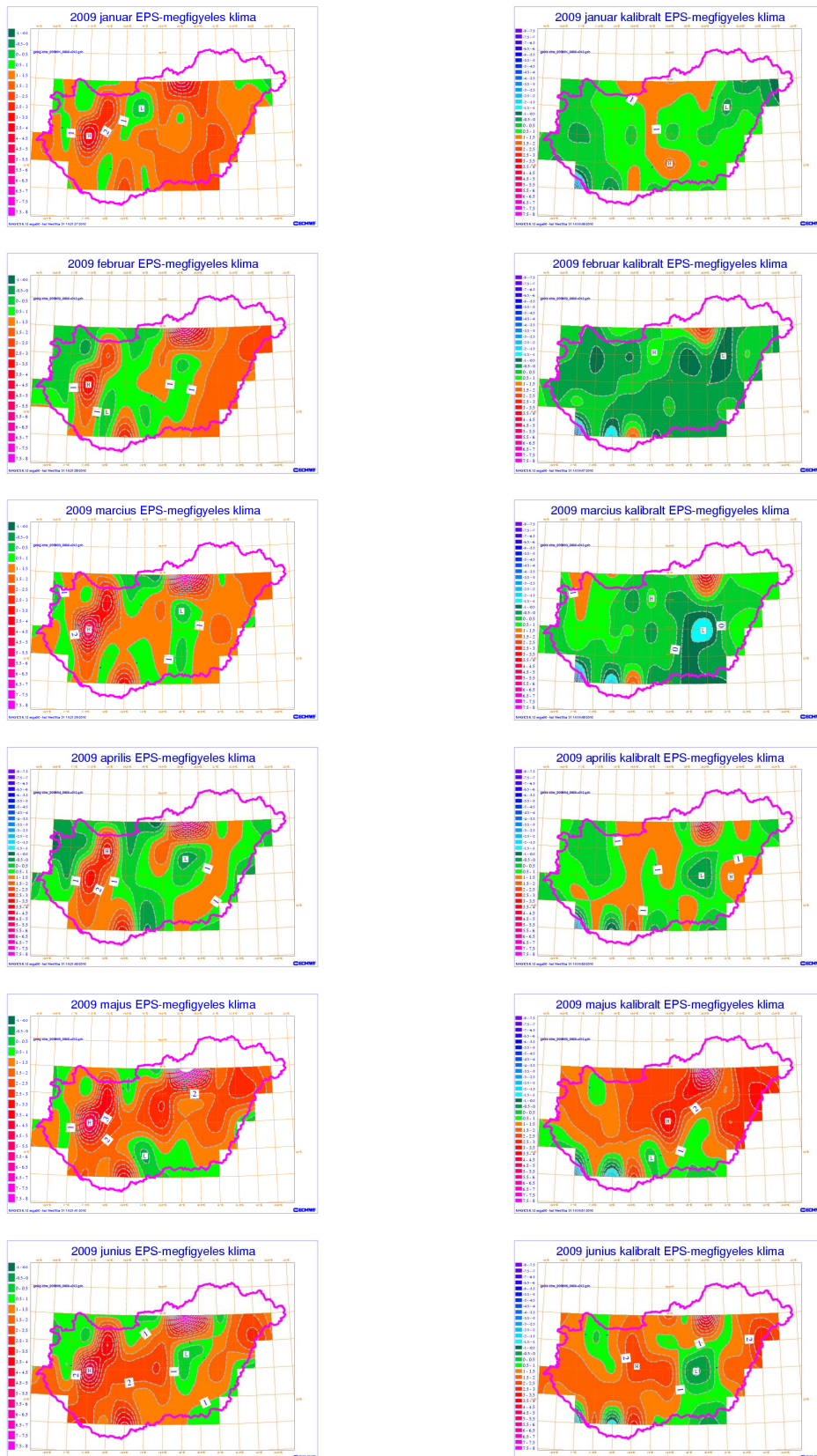
Függelék



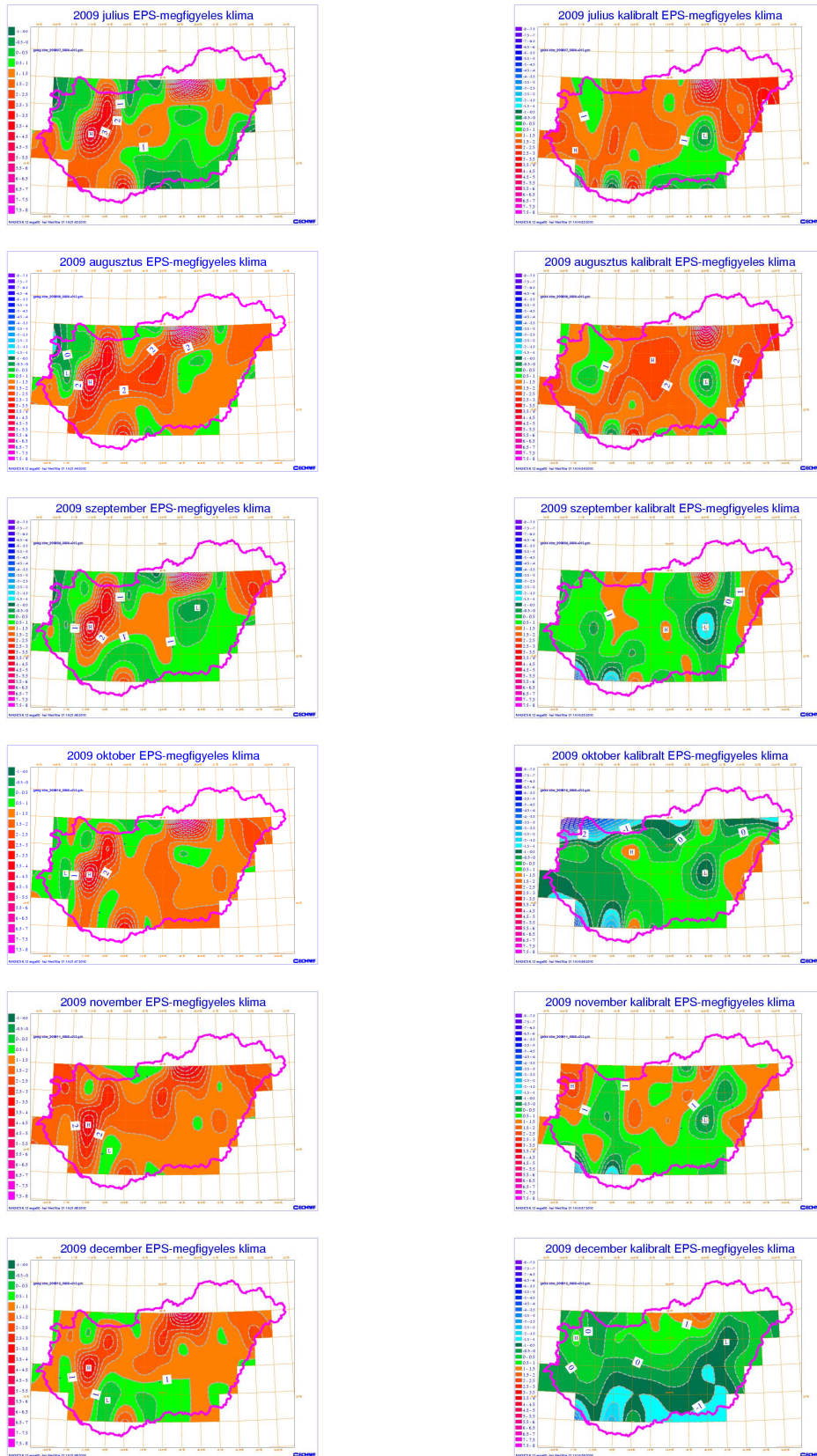
1. ábra: 2009. január-június havi átlagtérképek: (balról jobbra) EPS, kalibrált EPS és megfigyelés



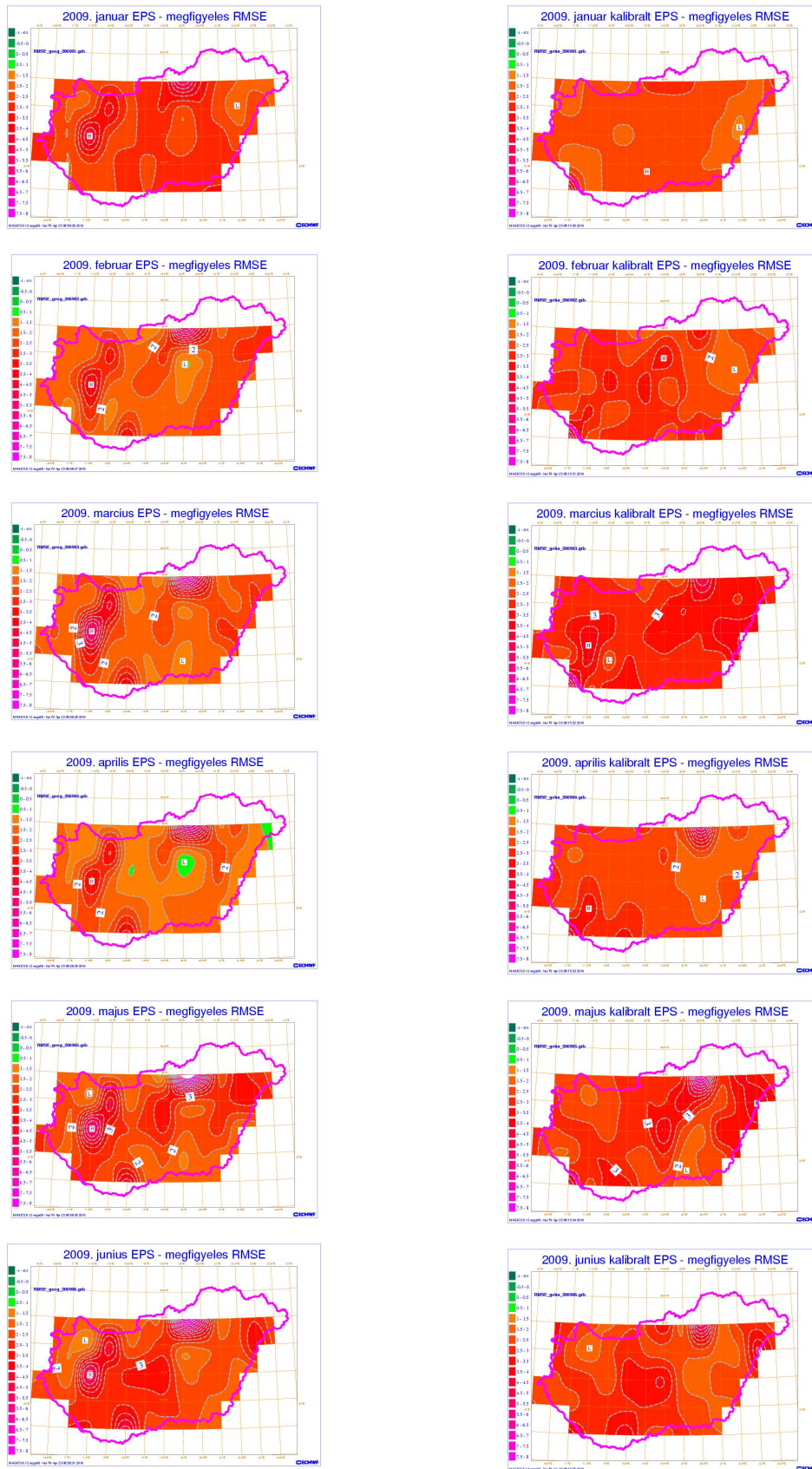
2. ábra: 2009. július-december havi átlagtérképek:
(balról jobbra) EPS, kalibrált EPS és megfigyelés



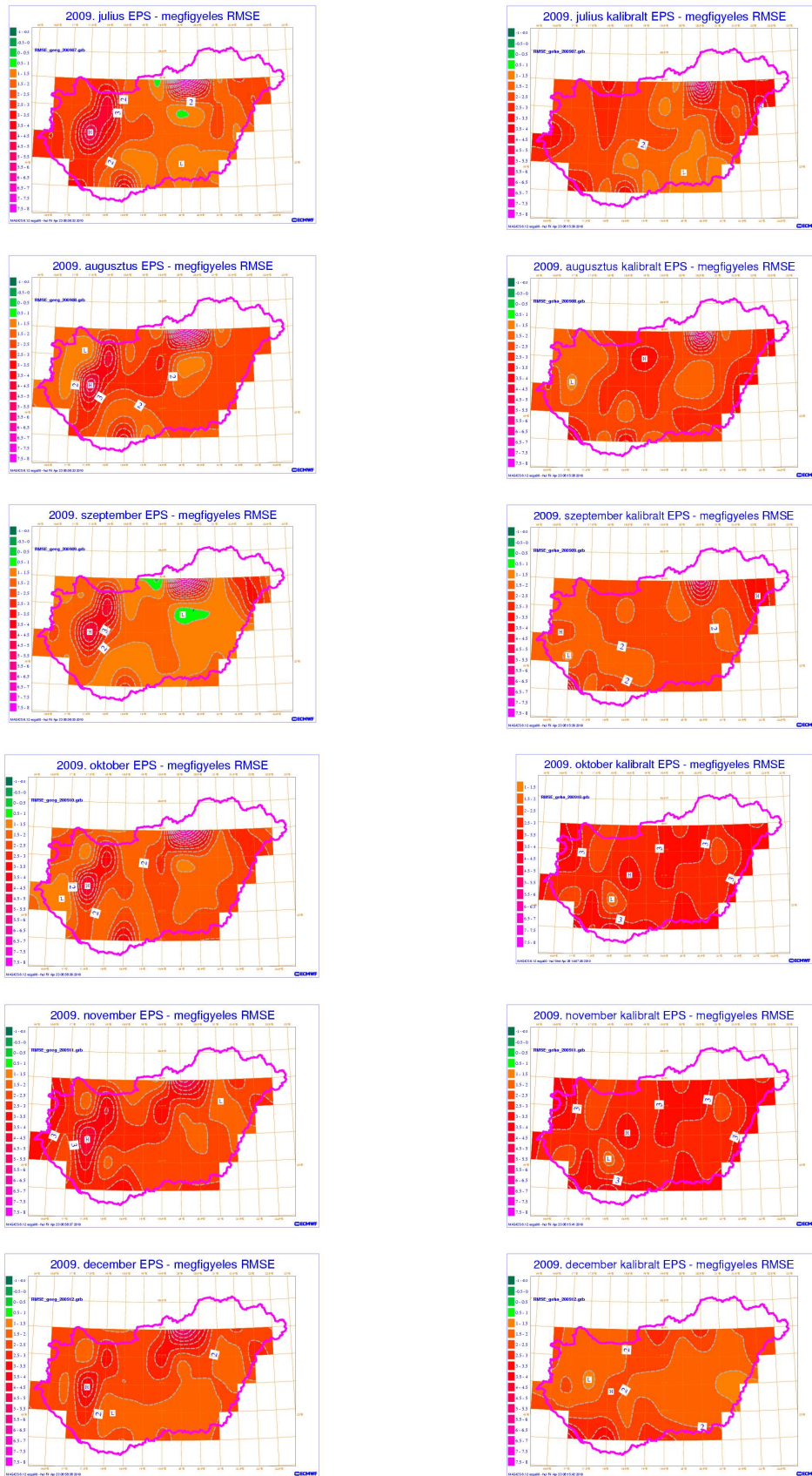
3. ábra: 2009. január-június havi átlagos hiba térképek:
(balról jobbra) EPS és kalibrált EPS



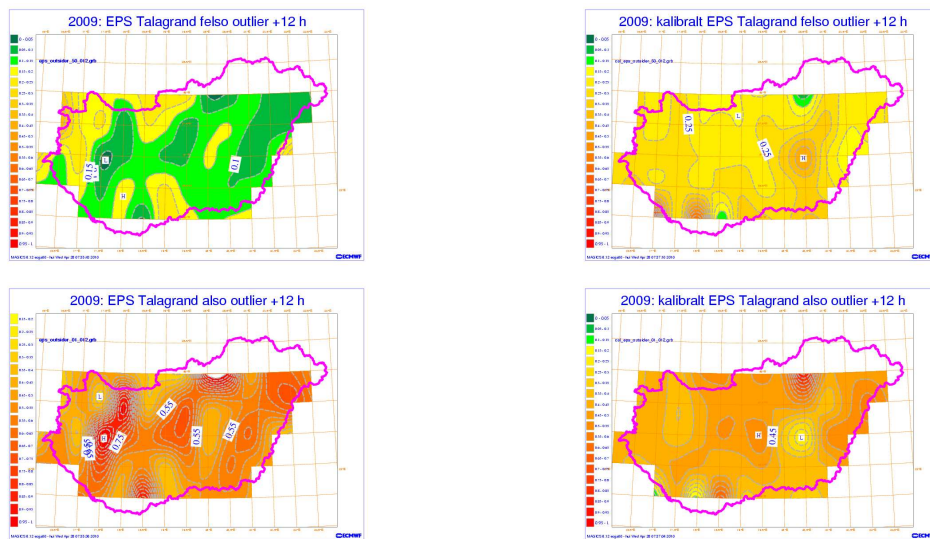
4. ábra: 2009. július-december havi átlagos hiba térképek:
(balról jobbra) EPS, kalibrált EPS



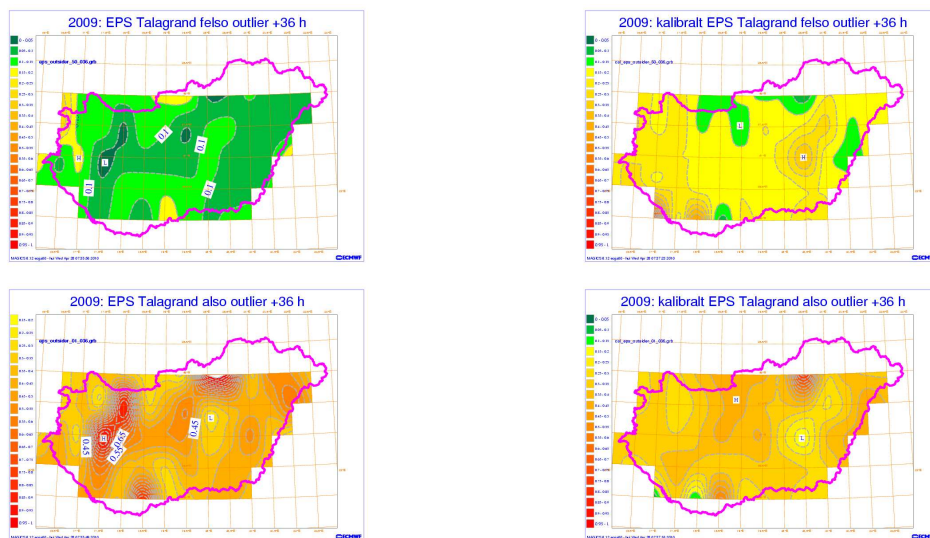
5. ábra: 2009. január-június havi négyzetes hiba térképek:
(balról jobbra) EPS, kalibrált EPS)



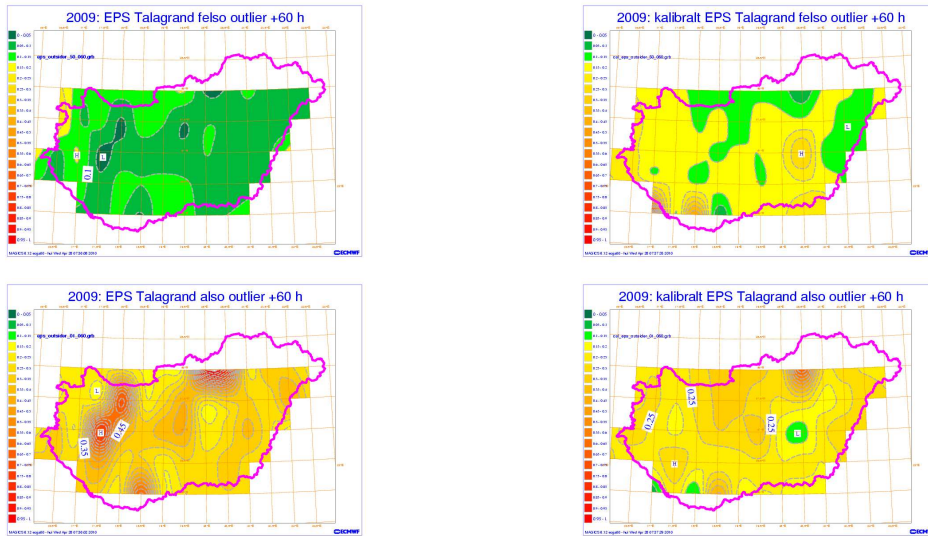
6. ábra: 2009. július-december havi négyzetes hiba térképek:
(balról jobbra) EPS, kalibrált EPS



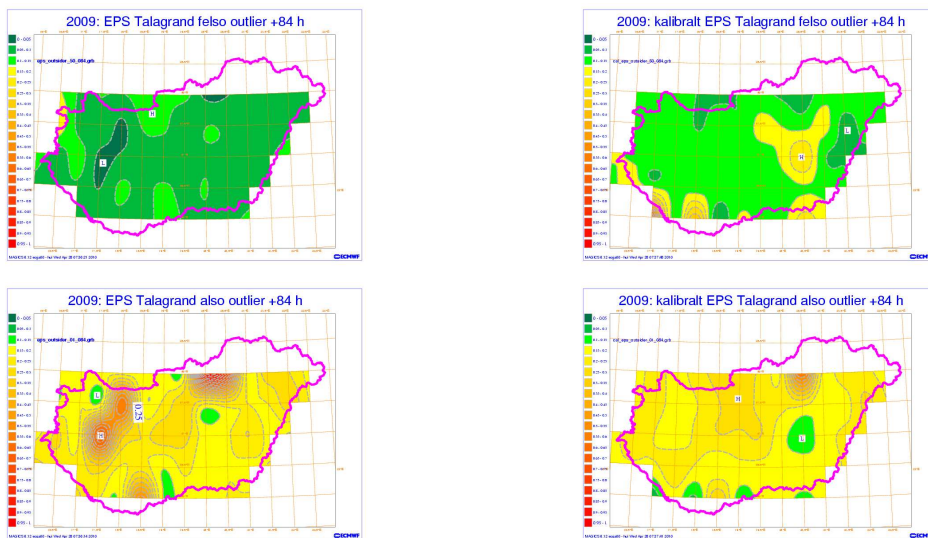
7. ábra: 2009. +12 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



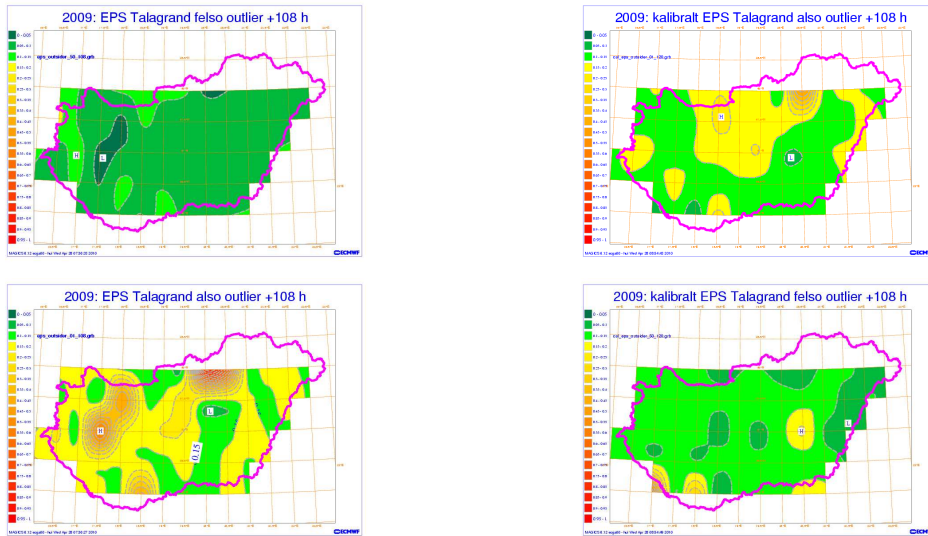
8. ábra: 2009. +36 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



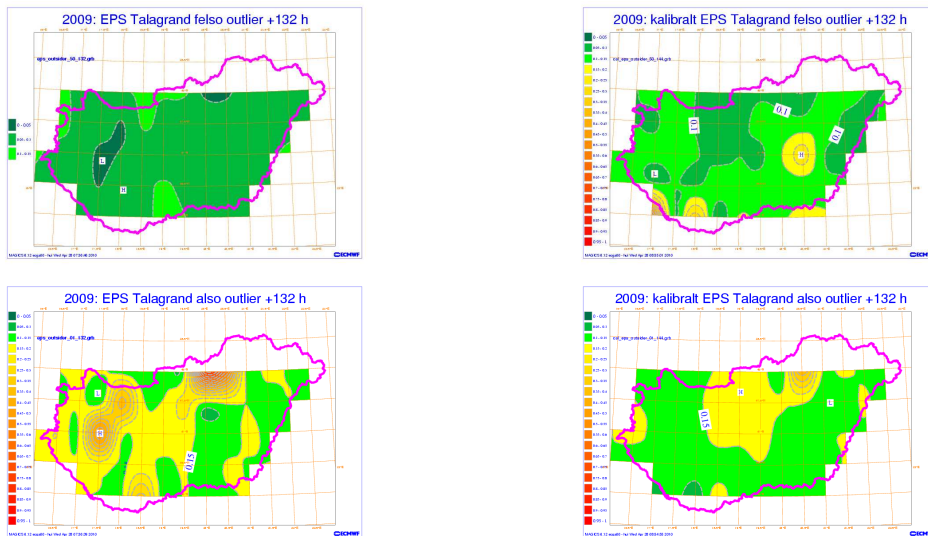
9. ábra: 2009. +60 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



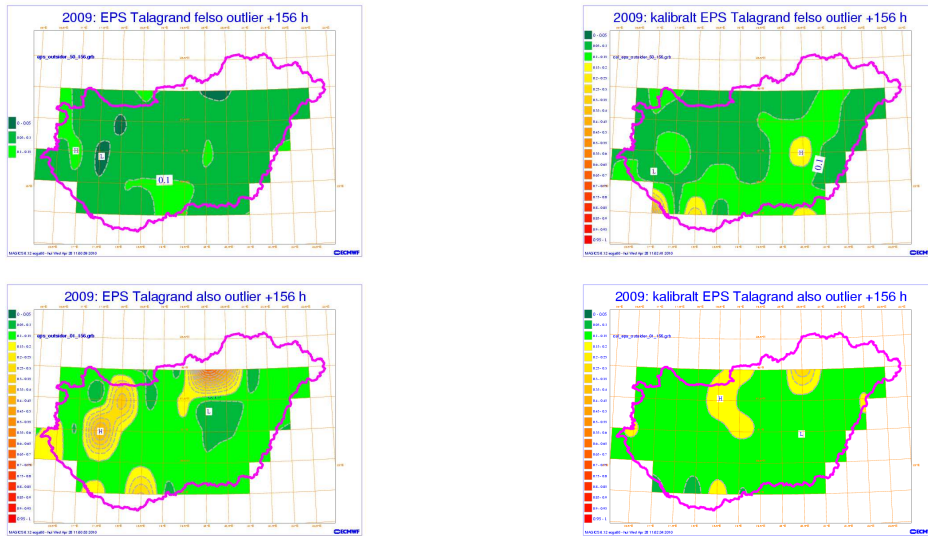
10. ábra: 2009. +84 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



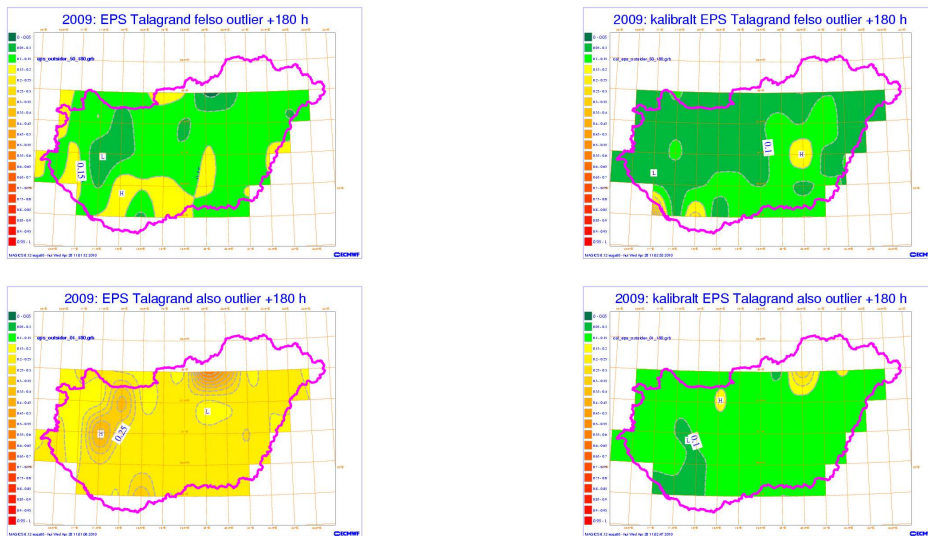
11. ábra: 2009. +108 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



12. ábra: 2009. +132 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



13. ábra: 2009. +156 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier



14. ábra: 2009. +180 órás előrejelzésre vonatkozó Talagrand outlier térképek: bal oldalon EPS, jobb oldalon kalibrált EPS, alsó sorban alsó outlier, felső sorban felső outlier

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, Ihász Istvánnak, a munkámban nyújtott rengeteg segítségéért, a témában szerzett ismereteim elmélyítéséért és a sok kellemes percért, amit az Országos Meteorológia Szolgálatban tölthettem, amíg a dolgozatom elkészült. Köszönöm neki, hogy mindvégig sikerült fenntartania bennem az érdeklődést a témám iránt, valamint hogy mindig kellően tudott motiválni a dolgozat írásában is.

Köszönöm továbbá Üveges Zoltánnak, hogy a témámmal kapcsolatos kérdéseimre mindig készségesen válaszolt, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat előrejelzőinek a remek hangulatért, és a munkám során nyújtott nélkülözhetetlen segítségükért.

Köszönöm még Barcza Zoltán belső konzulensemnek is a témavezetőmmel való szoros együttműködést, és a felém támasztott szigorú követelményeket, amik hozzájárultak a dolgozatom precíz és időben pontos elkészültéhez.

Köszönetem szeretném kifejezni továbbá Hercsényi Lászlónak is, aki a verifikációhoz szükséges megfigyelési adatokat biztosította.

5. Irodalomjegyzék

- Molteni, F.R., Buizza, T.N., Palmer, T.N., Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 122, 37-119,
- Buizza, R., Bidlot, J-R. Wedi, N., Fuentes, M., Hamrud, M., Holt, G., Palmer, T., Vitart F., 2006: The ECMWF Variable Resolution Ensemble Prediction System (VAREPS) *ECMWF Newsletter*, 108. 14-20.
- Charney, J.G. , Fjortoft, R., Neumann, J. 1950: Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2. 237-254.
- Csima G., 2002: A numerikus előrejelzés során alkalmazott utófeldolgozási és verifikációs eljárások. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, Budapest*, 89-97.
- Götz, G., 2001: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest
- Hagedorn, R., 2008: Using the ECMWF reforecast dataset to calibrate EPS forecasts. *ECMWF Newsletter 117*, 8-13.
- Hágel, E., 2008: Ensemble előrejelzések elméleti és gyakorlati háttere. 34. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa.*
- Horányi, A., Ihász, I. és Radnóti G., 1998: Az időjárás számszerű előrejelzése, *Természet Világa*, 129. I. különszám 39-42.
- Horányi, A., 2009: Az időjárás (éghajlat) számszerű előrejelzése (bevezetés). <http://nimbus.elte.hu/~numelo>
- Ihász I., 2003: Operatív középtávú időjárás előrejelző modellezés az ECMWFben. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*, 119-128
- Ihász, I., 2007: Experiences using VarEPS products at the Hungarian Meteorological Service: *Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading UK, 12-16 November 2007, 130-135
- Ihász I., 2008: Közép és hosszútávú előrejelzési modelltermékek és alkalmazási lehetőségeik. 34. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa.*

- Ihász, I. and Mile M., 2008: Calibration of ECMWF ensemble precipitation forecasts for hydrological purposes at the Hungarian Meteorological Service. *Proceedings of the XXIV Conference of the Danubian Countries*. 2-4 June 2008, Bled, Slovenia
- Ihász, I., Mile, M., Üveges, Z., 2009: Comprehensive study of calibrated ECMWF products. *Proceedings of the Twelfth ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading UK, 2-6 November 2009, accepted for publication
- Izsák, B., 2001: A Kalman-szűrő statisztikai adaptációs eljárás alkalmazása a felszínközeli hőmérséklet rövidtávú előrejelzésének javítására. *Diplomamunka. ELTE Meteorológiai Tanszék. Budapest*
- Jolliffe, I.J. and Stephenson, B., 2003: Forecast verification. A practitioner's guide in atmospheric science. *John Wiley and Sons*. Chichester
- Kaba, M., 1995: Csatlakozásunk a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központjához, *Légtér* 1995/4. 34.
- Lamy-Thépaut, S., 2009: MAGICSS++ meteorological graphics library generating weather maps and graphics for web. *Proceedings of the Twelfth ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading UK, 2-6 November 2009, 64-69.
- Marbouty, D., 2010: ECMWF's plan for 2010. *ECMWF Newsletter* 122. 4-5.
- Mile, M. 2008: Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja. *ELTE TTK, Diplomamunka, Budapest*
- Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. *ECMWF Technical Memoranda* 430.
- Richardson, L.F. 1922: Weather prediction by numerical process. Cambridge University Press, London
- Palmer, T., Buizza, R., Hagedorn, R., Lawrence, A., Leutbecher, M. and Smith, L: 2006: Ensemble prediction: A pedagogical perspective: *ECMWF Newsletter* 106. 10-17.
- Persson, A., and Grazzini, F. 2007: User Guide to ECMWF forecasts products: *Meteorological Bulletin*, 3.2 (version 4.0), ECMWF Reading, UK
- Raftery, A.E., T. Gneiting, F. Balabdaoui and M. Polavszki, 2005: Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133. 1155-1174.
- Raoult, B., 2001: MARS on the Web: a virtual tour. *ECMWF Newsletter* 90, 9-17
- Siemen, S., Lamy-Thépaut, S., 2010: MAGICSS++ 2-8 – New developments in ECMWF's meteorological graphics library. *ECMWF Newsletter*, 122. 32-33.

- Szépszó, G. 2004: Valószínűségi előrejelzések verifikációja. *OMSZ kézirat*, Budapest
- Tajti, D., 2009: Az ECMWF determinisztikus és ensemble előrejelzések összehasonlító verifikációja. *ELTE TTK, Diplomamunka, Budapest*
- Üveges, Z., 2009: Az ECMWF havi ensemble előrejelzéseinek kalibrációja. *ELTE TTK, Diplomamunka, Budapest.*
- Vissy, K., 2006: Meteorológiai iskola <http://www.met.hu>
- Vitart, F., 2004: Monthly forecasting at ECMWF. *Monthly Weather Review* 132., 2761-2779.
- Vitart, F., Bonet, A., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bidlot, J.R., Buizza, R., Fuentes, M., Hofstadler, A., Molteni, F., Palmert, T., 2008: Merging VarEPS with the monthly forecasting system: a first step towards seamless prediction. *ECMWF Newsletter* 115., 35-44.
- Webster, P., 2007: Extended probabilistic hydrological forecasts of Ganges and Brahmaputra using ECMWF ensemble products. *Proceedings of 11th Workshop on Meteorological Operational Systems*, 12-16 November 2006, Reading
- Woods, A. 2005: Medium-Range Weather Prediction The European Approach. *Springer* 270 pp.