

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja



KÉSZÍTETTE:

Mile Máté
Meteorológus

Témavezető:

Ihász István
(*Országos Meteorológiai Szolgálat*)

Tanszéki konzulens:

Bartholy Judit
(*ELTE Meteorológiai Tanszék*)

Budapest, 2008.

Tartalomjegyzék

| | |
|--|----|
| Tartalomjegyzék | 2 |
| Bevezetés | 3 |
| 1. Numerikus Prognosztika | 4 |
| 1.1. Numerikus előrejelzés elmélete | 4 |
| 1.2. Numerikus előrejelzés gyakorlata | 5 |
| 1.3. Az ECMWF előrejelzési rendszere | 7 |
| 1.4. Az ensemble előrejelzési technika | 9 |
| 1.5. Az ensemble előrejelzések utófeldolgozása, megjelenítése | 11 |
| 2. A valószínűségi előrejelzések kalibrációja | 13 |
| 2.1. A kalibrációs eljárás | 13 |
| 2.2. Nemzetközi kitekintés | 14 |
| 2.3. Felhasznált adatok, források | 15 |
| 2.4. Eloszlásfüggvények (mért és modell klímák) | 16 |
| 3. Verifikáció | 19 |
| 3.1. Programozási feladat, vizsgált paraméterek | 19 |
| 3.2. Verifikációs eszközök | 20 |
| 3.3. A nyers előrejelzés verifikációja | 23 |
| 3.3.1. A kalibrálatlan 2m-es hőmérséklet előrejelzés verifikációja | 23 |
| 3.3.2. A kalibrálatlan 24 órás csapadék előrejelzés verifikációja | 27 |
| 3.4. A kalibrált 2m-es hőmérséklet előrejelzés verifikációja | 29 |
| 3.5. A kalibrált 24 órás csapadékösszeg előrejelzés verifikációja | 33 |
| 3.6. 1997-99-es modellklíma kalibrálás kísérlet | 36 |
| 4. Összefoglalás | 38 |
| Függelék | 40 |
| 1. Függelék | 40 |
| 2. Függelék | 42 |
| 3. Függelék | 43 |
| 4. Függelék | 44 |
| Irodalomjegyzék | 46 |
| Köszönetnyilvánítás | 48 |

Bevezetés

A XXI. század elején az időjárás előrejelzés az emberek mindennapjainak részévé vált és gyakran olyan természetességgel vesszük tudomásul a prognózisokat, mintha csak egy közönséges menetrend lenne. Pedig a hétköznapi emberhez eljutó végleges meteorológiai információ mögött megannyi bonyolult feladat és munka rejtőzik. Ez a hosszadalmas folyamat több részfeladatból tevődik össze, kezdve a precíz mérésektől egészen a szinoptikus előrejelzés elkészítéséig. A numerikus előrejelzés talán a legdinamikusabban fejlődő részfolyamata ennek a komplex rendszernek és a szakdolgozatom témáját tekintve ebbe a tárgykörbe sorolható, azon belül a numerikus előrejelzés eredményeinek egyfajta utó-feldolgozási eljárásai közé.

A különböző numerikus előrejelzési modellek által szolgáltatott produktumokat széles körben alkalmazzák a meteorológiai gyakorlatban, legyen az egy rövidtávú előrejelzés vagy egy szennyezőanyag terjedését megadó szimuláció. Éppen ezért a modellfejlesztések folyamatosan ösztönözve vannak, hogy jobb és pontosabb eredményeket szolgáltatassanak ezen felhasználói réteg számára. A fejlesztések megvalósulhatnak egy jobb kezdeti feltétel előállításában, a modell felbontásának vagy parametrizációjának finomításában vagy jelen esetben utó-feldolgozási módszer kidolgozásában.

Az európai régióban a readingi központú ECMWF (European Center of Medium Range Weather Forecast) az egyik legnagyobb előrejelző központ, amely operatívan előállít jó minőségű egész Földet lefedő determinisztikus és valószínűségi előrejelzéseket. A legtöbb európai országban az előrejelzések alapvetően az ECMWF produktumaira épülnek. Magyarország 1994-ben elsőként csatlakozott – társult tagként – a kelet-közép európai országok közül az ECMWF-hez és ennek következtében a központ előrejelzéseire teljes mértékben hozzájutunk.

A valószínűségi vagy más néven ensemble előrejelzések 1992 óta operatívan készülnek az ECMWF-ben. Napjainkban a közép ill. hosszútávú előrejelzések alapvetően már a valószínűségi előrejelzésekre épülnek. Az Országos Meteorológia Szolgálat (OMSz) is ezeket az előrejelzéseket használja az előrejelzői gyakorlatban.

A munkám során az ECMWF EPS (Ensemble Prediction System) valószínűségi előrejelzéseire egy un. kalibrációs eljárást dolgoztam ki, amely utó-feldolgozási módszerrel az előrejelzés bevalásának javulását kívántam elérni.

1. Numerikus Prognosztika

1.1. Numerikus előrejelzés elmélete

A numerikus időjárás-előrejelzés a meteorológiai prognosztikának az a speciális ága, amely a feladatot a légkör viselkedését kormányzó egyenleteknek az ismert kezdeti és határfeltételekből kiinduló megoldását kezeli. Noha a fizikának az egyenletek matematikai felírásához alapul szolgáló folytonos megmaradási törvényei a XIX. század közepén már ismertek voltak, alkalmazásuk lehetőségének gondolata a meteorológiai prognosztika feladatának objektív megoldásában csak a XX. Század elején vetődött fel (Götz, 2003). Richardson volt az első, aki megpróbálkozott tényleges számszerű előrejelzést készíteni egy általa alkotott dinamikai modellel 1922-ben. A modelljében a légköri folyamatokat adiabatikus, nemviszkózus közelítésben konstruálta meg. A differenciálhányadosokat véges különbségekkel közelítette, majd az így kapott egyenletrendszert kézi számítás útján oldotta meg. A kísérlet katasztrofális eredményt szült és nemzetközi visszhangja miatt jó ideig senki nem foglalkozott az időjárás számszerű előrejelzésével. Az első sikeres előrejelzés 1950-ig váratott magára, Neumann és Charney nevéhez valamint az akkor nagy teljesítményűnek számító ENIAC számítógéphez fűződött. Ettől kezdve az időjárás numerikus előrejelzése ugrásszerű fejlődésnek indult.

A levegő a meteorológiai folyamatok során összenyomható, de nem viszkózus gáznak tekinthető. Az ilyen gázokban végbemenő, egymással kölcsönhatásban álló hidrodinamikai és termodinamikai folyamatokat egyértelműen meghatározza a kormányzó egyenletek rendszere. A Newton-féle mozgásegyenletek, a tömegmegmaradás egyenletek, a termodinamikai energiaegyenlet és – kiegészítve az állapothatározók összefüggését leíró állapotegyenlettel – teljes rendszert alkot. A légkörben térben és időben változó mennyiségben jelen lévő vízgőz eloszlását a vízgőz tömeg-megmaradási törvénye szabályozza. Az említett fizikai törvények matematikai formuláit (differenciális alakban) együttesen a légkörben lejátszódó hidro-termodinamikai folyamatok meghatározó vagy kormányzó egyenletrendszerének, ill. egyszerűen a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének nevezzük (Práger, 1982). Ahhoz, hogy az előrejelzés fizikai szempontból megoldható legyen ismernünk kell a légkört környező közegek (óceán, szárazföld, világűr) irányából érkező hatásokat.

Továbbá nagyon fontos a kiinduló feltételek minél pontosabb ismerete. A hidro-termodinamikai egyenletrendszer nem tükrözi, tükrözheti a légköri folyamatok során fellépő összes kölcsönhatást, mivel csak hidro-termodinamikai kölcsönhatásokat ír le. Számunkra viszont nem is szükséges minden folyamat ismerete az időjárás előrejelzéséhez és megelégszünk az egyenletrendszer 5 (ρ sűrűség, p nyomás, T hőmérséklet, v áramlási sebesség, q specifikus nedvesség) prognosztizált változójával.

A légköri folyamatokat kormányzó ezen hidro-termodinamikai egyenletrendszer matematikai szempontból egy kezdeti érték és határfeltétel problémát leíró vegyes feladat, amelynek még erős egyszerűsítésekkel sem ismeretes analitikus megoldása. Ennek ellenére bizonyos megfontolásokkal, egyszerűsítésekkel és elhanyagolásokkal jelentősen egyszerűsíthető a matematikai feladat (*Radnóti, 2003*). Az 5 prognosztizált állapothatározók az áramlási sebességet kivéve, amely vektormennyiség, mind skalár mennyiségek. Továbbá ezen állapothatározók a légkörben térben és időben változnak, azaz függvényei a helyvektornak és az időnek. A hidro-termodinamikai egyenletrendszer egyenletei, az állapotegyenletet kivéve, parciális differenciálegyenletek, melyekben a deriváltak szorzatai nem fordulnak elő, tehát kvázilineárisak. Az egyenletrendszer zárt rendszert alkot, ugyanis a független változók száma megegyezik az egyenletek számával. A zártságához mindezek mellett szükség van a vegyes feladat miatt kezdeti ill. peremfeltételek megadására.

1.2. Numerikus előrejelzés gyakorlata

Az előző fejezetben megfogalmazott absztrakciók gyakorlati alkalmazásához, a hidro-termodinamikai egyenletek különböző koordinátarendszerekben felbontott alakja szükséges a numerikus előrejelzés egyes céljaira. Az előrejelző modellek elkülönülnek attól függően is, hogy milyen méret és időskálán kívánunk vizsgálni. Ami a modellezésben leginkább megnehezíti a gyakorlati megvalósulást az a számításigénye az egyes numerikus modelleknek. A számításigény illusztrálására tekintsük az alábbi egyszerű példát: egy globális modell, amely 31 vertikális szinttel írja le a légkört és 60 km-es horizontális felbontást alkalmaz, az 5 prognosztikai változót tekintve időlépcsőként mindösszesen kb. 5 millió adattal való számolást jelent, s akkor még nem beszéltünk arról, hogy az egyhetes előrejelzés készítéséhez kb. 700-szor kell a fenti

időlépcsőt végrehajtani. Egy 50 tagú ensemble előrejelzésekhez pedig 50 ugyanilyen előrejelzést kell elkészíteni (Horányi, 2003).

A példa egy globális modellre vonatkozik, amely az egész Földet lefedő rácshálózattal számol. Ez rengeteg adatot jelent és az ilyen típusú modellekkel végzett szimulációkat csak szuperszámítógépek segítségével lehet megoldani. A globális modell eredmények nagyon fontosak egyrészt a nagy skálájú szinoptikus helyzet analíziséhez, valamint a beágyazott vagy korlátos tartományú modellek peremfeltételeinek a biztosításához. Mivel nem szükséges minden országnak külön globális modellt futtatnia, ezért gyakran nemzetközi összefogással oldják meg a nagy számítógépes kapacitást igénylő feladatot. Az ECMWF is egy ilyen együttműködés révén jött létre és manapság az európai régióban egyre több ország csatlakozik a szervezethez.

A korlátos tartományú modellek a Földnek csak egy kisebb régiójára vonatkozóan készítenek előrejelzéseket, ezzel csökkentve a számításokat. A kisebb tartományon lehetőség van finomabb felbontás alkalmazására úgy, hogy a költségek ne növekedjenek drasztikusan és ezzel a finomítással precízebb prognózisok készülhetnek. Európában több lokális rácshálózattal dolgozó modelleket futtató együttműködés ismert. Jelenleg 4 korlátos tartományú modell-családot fejlesztenek Európában, s ezen modelleszaládok fejlesztésére „konzorciumok” alakulnak.

Az egyik a brit UKMO (United Kingdom Meteorological Office), a második a főként német fejlesztéseken alapuló COSMO (Consortium for Small-Scale Modelling), harmadik a döntően skandináv országok által fejlesztett HIRLAM (High Resolution Limited Area Modelling), végül a francia szolgálat által kezdeményezett ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) modell, az ALADIN együttműködésnek a magyar meteorológiai szolgálat is tevékeny résztvevője.

A felbontás finomodásával egyre kisebb skálájú légköri folyamatok válnak nem elhanyagolhatóvá. A modellezésben talán a legnagyobb egyszerűsítést megadó kvázi-hidrosztatikus közelítés egy bizonyos rácstávolság alatt (kb. 10 km) nem alkalmazható. Az ilyen nagy felbontású modellek már nem alkalmazzák ezt a közelítést és ezek a modellek egy új kategóriát – a nem hidrosztatikus modellek – kategóriáját - képezik a numerikus modellek csoportjában.

A numerikus előrejelzés három fő lépésből tevődik össze. Az első lépés a kezdeti- és peremfeltételek előállítás a numerikus modell bemenő adatai számára. A légkör aktuális állapotát leíró kezdeti feltételeket úgy célszerű megadni, hogy azok a lehető legpontosabbak (a valósághoz legközelebb állók) és egyben az egyenletekkel

konzisztensek (a változók közötti összefüggéseket kielégítő) legyenek. Az előrejelzéseket úgy készítik, hogy az integrálási tartományt lefedik egy háromdimenziós térbeli ráccsal és a meteorológiai paramétereket ezen rácspontokon jelzik előre. A megfigyelések, mérések azonban nem állnak rendelkezésre ilyen térbeli és időbeli szabályossággal ezért interpolációt kell végezni és más, javarészt korábbi modell eredményekkel (first guess) kell kiegészíteni a korrekt kezdeti feltételek előállításához. Ezt az előállítási folyamatot adatasszimilációs eljárásnak hívják (*Horányi et. al., 1998*).

A második fő lépés a numerikus modell integrálása, vagyis az előrejelzési egyenletek megoldása. Ezen folyamat során kell a már korábban részben említett térbeli és időbeli diszkretizációkat alkalmazni. Térbeli diszkretizáció alatt részint az egyenletekben szereplő horizontális differenciál operátorokat véges differenciás közelítésekkel vagy alkalmasan illesztett analitikus függvények deriválásán keresztül számoljuk. Az időbeli diszkretizáció a prognosztikai feladat időbeli integrálásánál nyújt segítséget azzal, hogy véges időlépcső szerinti diszkretizált integrálási sémát alkalmaz.

A harmadik és egyben végső fő lépés a numerikus előrejelzés elvégzése során az utó-feldolgozási feladat. A numerikus modellek által szolgáltatott nyers outputok nem alkalmasak arra, hogy azokat közvetlenül a felhasználók rendelkezésére bocsássuk. Ennek több oka is lehet. Egyrészt a nyers produktumok nem mindig az igényeknek megfelelőek, vagyis más koordinátarendszerben megadott információra, illetve más paraméterek előrejelzett értékeire lehet szüksége a felhasználónak. Másrészt előfordulhat, hogy a számítási eredmények szisztematikus hibával terheltek, és vannak olyan esetek is, amikor a modell felbontása nem felel meg az elvárásoknak, ezért ezt tovább kell finomítani. Ezeket a problémákat próbálják orvosolni a különböző utó-feldolgozási eljárások révén (*Csima, 2003*).

1.3. Az ECMWF előrejelzési rendszere

1994. június 1-jén Magyarország a kelet-közép európai országok közül elsőként csatlakozott az Európai Középtávú Előrejelző Központhoz (*Kaba, 1995; Ihász, 2000*). Csatlakozásunk következtében az elmúlt években a hazai középtávú (2-10 napos) előrejelzések beválása jelentősen megnőtt. Az Európai Középtávú Előrejelző Központ vagyis ECMWF 18 európai ország együttműködésével a COST (European Co-operation in Science and Technology) keretein belül jött létre 1975-ben. Jelenleg Ausztria,

Belgium, Dánia, Franciaország, Görögország, Hollandia, Finnország, Írország, Luxemburg, Nagy-Britannia, Németország, Norvégia, Olaszország, Spanyolország, Svájc, Svédország, Portugália és Törökország teljes jogú tagja a szervezetnek. Napjainkig az ECMWF és 13 ország között született együttműködési megállapodás. A 70-es évek végén Izland, majd a 90-es évek közepén – időrendben - Magyarország, Horvátország és Szlovénia, a közelmúltban Csehország, Szerbia, Montenegró, Románia és Litvánia is csatlakozott (Ihász, 2003).

Az ECMWF és a következő szervezetek között együttműködési megállapodás született: WMO (World Meteorological Organisation), EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites), ACMAD (African Centre of Meteorological Applications for Development), ESA (European Space Agency) valamint több más fontos intézmény.

1979-ben készült el az első real-time középtávú előrejelzés, az ECMWF 1979. augusztus 1-től operatíván futtat középtávú előrejelzéseket. A valószínűségi un. ensemble előrejelzések 1992 végétől operatíván készülnek. Az előrejelző központ alapvető célja jó minőségű, középtávú (2-10 napos időtartamú) numerikus előrejelzések készítése. Az ECMWF numerikus előrejelzési produktumai közvetlenül az RMDCN (Regional Meteorological Data Communication Network) hálózatán – nagysebességű (jelenleg legalább 1 Mbit/s) vonalon – keresztül a tagállamok és a társult tagállamok számára teljes egészében rendelkezésre állnak.

Az ECMWF napjainkban operatíván futtat az egész Földet lefedő determinisztikus és valószínűségi előrejelzéseket. A determinisztikus modell, amellyel az előrejelzés készül, a hagyományos felszíni és magaslégköri megfigyelések mellett felhasználja a tengeri úszó bójják, a repülőgépes mérések és a műholdas megfigyelések adatait is. A modell kezdeti feltételeit a négydimenziós variációs analízis (4D-VAR) eljárással állítják elő. A 4D-VAR-t – napjaink legmodernebb adatasszimilációs technikáját – az ECMWF-ben a világon elsőként vezették be az operatív gyakorlatban. 2006 februártól a determinisztikus modell 91 vertikális szintet tartalmaz és a horizontális felbontása 25 km-es. Az előrejelzési modell naponta 00 és 12 UTC-s kezdeti mezőkből kiindulva 10 napos érvényességű előrejelzést készít az egész Földre vonatkozóan.

Az ECMWF EPS (Ensemble Prediction System) rendszer valószínűségi előrejelzései 1992. decembere óta operatíván készülnek. Az ensemble előrejelzési modell felépítése a determinisztikus modellével megegyezik, csupán a jelentős

számítógép idő csökkentése céljából a térbeli felbontása gyengébb. Az ensemble előrejelző modell térbeli felbontása 50 km, a vertikális szintek száma 62. Naponta kétszer 00 és 12 UTC-kor futtatnak 51 tagból álló ensemble modellt, amelyek 2006 novembertől 15 napos érvényességűek (*Buizza et al., 2006*).

Az ECMWF egy kísérleti évszakos előrejelzési programot indított el 1995-ben. Az első operatív szezonális előrejelzés 1998. júniusban készült el. Az évszakos előrejelzési modell 2007. március óta 41 tagú ensemble előrejelzésből áll, térbeli felbontása 125 km. Napjainkban hetente készül havi előrejelzés, s havonta évszakos előrejelzés. Az évszakos előrejelzési modell egy csatolt légkör-óceán modell, amely hathavi érvényességű előrejelzéseket készít (*Kiss, 2003*).

Az ECMWF 1998-ban az 1999 és 2008 közötti időszakra vonatkozó stratégiai tervet készített, amelyben két fő célt tűztek ki. A legfontosabb stratégiai célkitűzés a középtávú (3-10 napos) előrejelzések bevalásának a növelése, illetve a megbízható évszakos előrejelzések megalapozása és fejlesztése. Továbbá célul tűzték ki a középtávú előrejelzések bevalásának kiterjesztését évtizedenként 1 nappal, a szélsőséges időjárási események megbízható 4-5 napos előrejelzését, valamint a szezonális előrejelzések múltbeli elkészítését.

1.4. Az ensemble előrejelzési technika

A numerikus előrejelzési modell kezdeti feltételeiben rejlő kicsiny pontatlanságok, illetve a légköri folyamatok modellbeli közelítő reprezentációjából adódó eltérések okozzák a numerikus előrejelzések két fő hibaforrását. A számítástechnikai lehetőségek megteremtődésével mintegy 15 évvel ezelőtt lehetővé vált a fenti probléma kezelésére az un. ensemble előrejelzések operatív bevezetése. Az ensemble prognosztika elsődleges célja, hogy reális becslést nyújtson az előrejelzett légköri állapot valószínűségi sűrűségfüggvényére vonatkozóan, mivel az előrejelzések együttese meghatározott valószínűséget rendel minden várható meteorológiai eseményhez (*Persson, 2000*). A determinisztikus alapokon nyugvó valószínűségi előrejelzések ma használatos, elméletileg is jól megalapozott módszereinek a háttérben hosszú évek beható kutatásai állnak.

E kutatások gyökerei évtizedekkel korábbra, a káoszelmélet megjelenését jóval megelőző időkre nyúlnak vissza, hiszen az időjárás előrejelzésének a korlátjait a szakemberek már a nemlineáris dinamika kibontakozása előtti korban is fel tudták mérni (Götz, 2001). Kezdetben a valószínűségi prognózisokat sztochasztikus dinamikai úton próbálták megközelíteni, ám ezt a módszert fokozatosan felváltotta a számítástechnika fejlődésével az ensemble előrejelzési technika. Az ensemble előrejelzések háttérében tehát az a felismerés áll, hogy az időjárás előrejelzése során a megoldandó hidro-termodinamikai egyenletrendszer nagyfokú érzékenységet mutat a kezdeti feltételekre. Ezt a tulajdonságot szem előtt tartva az ensemble előrejelzések készítése során nem egyetlen előrejelzést gyártanak (a legjobbnak ítélt kiindulási állapot felhasználásával), hanem emellett még több másik előrejelzést is, oly módon, hogy ezek kiindulási feltételeit a legjobbnak ítélt kezdeti feltétel hibahatáron belüli módosításával nyerik. Így egy szimpla előrejelzés mellett valószínűségi információt is nyerünk a várható időjárásról és az előrejelzés bizonytalanságáról (Hágel and Szépszó, 2004).

Ensemble előrejelzések készítéséhez több módszer is kínálkozik. A felsorolás alatt a legkevesebb számítást igénylő eljárástól haladunk a legkomplexebb módszer felé. Az első a multi-modell ensemble, amelynek tagjai különböző modellek előrejelzése. Ez nemzetközi együttműködés keretein belül valósulhat meg és szokták „szegény ember” ensemble-rendszerének is nevezni. A szintén hasonló multi-analízis ensemble a különböző előrejelző központok analíziseit használja fel és ezekből kiindulva készül az együttes prognózis. Előállíthatunk több kezdeti feltételt akkor is, ha a megfigyeléseket perturbáljuk. Ennek lényege, hogy az adatasszimiláció során a megfigyelési adatokat véletlenszerűen megperturbáljuk, oly módon, hogy ezek a perturbációk jellemzőek legyenek a lehetséges mérési hibákra. Ha a fizikai paramétereket megváltoztatjuk egy előrejelzési rendszerben akkor is sokasági előrejelzést kaphatunk. Ebben az esetben a modell által használt fizikai parametrizációkat változtatjuk meg.

A legszámításigényesebb módszer a kezdeti perturbációk származtatása, amelyet az ECMWF is használ az EPS rendszerében. Ez a legbonyolultabb eljárás, viszont ez szolgáltatja a legjobb valószínűségi előrejelzést (Horányi, 2002). Jelenleg a gyakorlatban kezdeti perturbációk származtatására két módszer létezik, a breeding módszer és a szinguláris vektorok módszere.

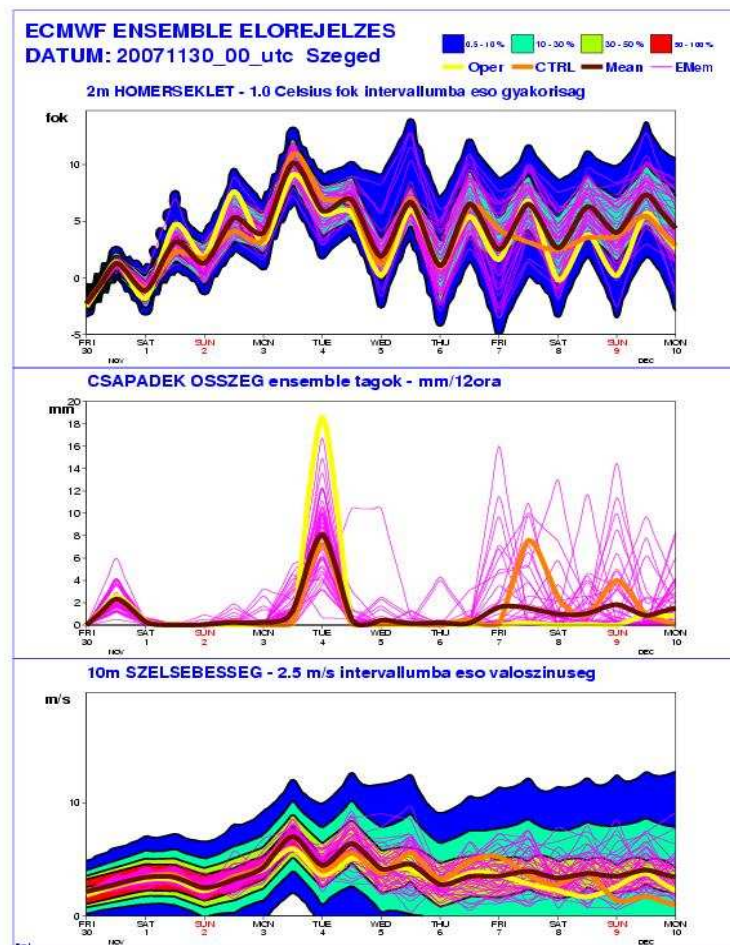
1.5. Az ensemble előrejelzések utófeldolgozása, megjelenítése

Amikor más meteorológiai változó előrejelzésére van szükségünk, mint amit a nyers produktumok szolgáltatnak, akkor azt diagnosztikai egyenletek segítségével, vagy a különböző paraméterek közötti statisztikai összefüggések elkészítésével és felhasználásával határozhatjuk meg. A diagnosztikai összefüggések alkalmazásán túl térbeli interpolációkat is végre kell hajtunk az utófeldolgozások során, mivel a modellek általában más koordináta-rendszerben dolgoznak, mint amelyben a végeredményeket ábrázolni szeretnénk. A különböző hibák statisztikai alapú kiszűrésére alkalmas a modell output statisztika [MOS] (Modell Output Statistics), a perfekt prognózis módszer [PPM] (Perfect Prognosis Method), vagy a két módszer különböző hátrányait együttesen kiküszöbölő tanuló algoritmus a Kálmán-szűrő. Ezek az algoritmusok nemcsak a hibák kiszűrésére használhatók, hanem olyan paraméterek előrejelzésére is, amelyeket a numerikus modellek közvetlenül nem szolgáltatnak (Csima, 2003).

Nem elég elkészítenünk az ensemble előrejelzéseket, azokat alkalmas módon meg is kell jelenítenünk. Az együttes előrejelzések esetében ez a megjelenítés némiképp eltér a klasszikus determinisztikus előrejelzéseknél használt módszerektől, hiszen egy ensemble rendszer esetén egyszerre több előrejelzés adatait kell megjelenítenünk, miközben törekednünk kell arra, hogy a rendszer által hordozott információ minél áttekinthetőbb, tömörebb formában kerüljön az előrejelző szakemberek elé (gondoljunk csak arra, mennyi időbe telne naponta pl. 51 ensemble tag részletes tanulmányozása).

A megjelenítésnek több formáját választhatjuk, célszerű mindig a legmegfelelőbbet, attól függően mire szeretnénk használni az előrejelzést. Lehetőség van az egyes ensemble tagok külön-külön való megjelenítésére, de mint említettük ez igen időigényes és áttekinthetetlen. Informatívabb és áttekinthetőbb lehet, ha például a sokaság átlagát jelenítjük meg, viszont előfordulhat, hogy két eltérő ensemble csoport (cluster) átlaga jellegtelen helyzetet tükröz. Lehetőségünk van egy ún. bélyeg diagram használatára, amely szintén megjeleníti az összes tagját az ensemble előrejelzésnek, egymás mellé és alá rendezve. Ez egy nagyfokú kicsinyítéssel valósul meg és így akár 50 tag is elfér kevesebb helyen. A különbségek így jól összehasonlíthatók az egyes tagok között, viszont a részletek nem figyelhetők meg.

Nagyon gyakori megjelenítési forma a fáklya diagram (1. ábra), melyre az jellemző, hogy egy adott földrajzi hely fölött adja meg például a nyomási vagy geopotenciális magasság időbeli változását. Ez a diagram a legalkalmasabb az előrejelzési rendszerünk bizonytalanságának szemléltetésére, mivel szépen megfigyelhető a tagok szórása. Gyakori megjelenítési segédeszköz az ún. Meteogram, amellyel egy földrajzi pont felett könnyen áttekinthető képet kapunk felhőzetről, 10 m-es szélsőségségről, 2m-es hőmérsékletről és csapadékmennyiségről. További megjelenítési forma a valószínűségi térkép. Ez egyetlen térkép, amelyen egy esemény bekövetkezésének a valószínűsége jelenítődik meg. Létezik még egy gyakran használt ábrázolási mód, a spagetti diagram, amely egy kiválasztott elem egy vagy néhány adott izovonalát ábrázolja az összes ensemble tagra vonatkozóan. Míg a fáklya diagram egy adott helyre és az előrejelzés teljes időtartamára jelzi a bizonytalanság mértékét, addig a spagetti diagram azt mutatja meg, hogy egy adott időpontban mely területen lesz nagy (vagy kicsi) az előrejelzés bizonytalansága.

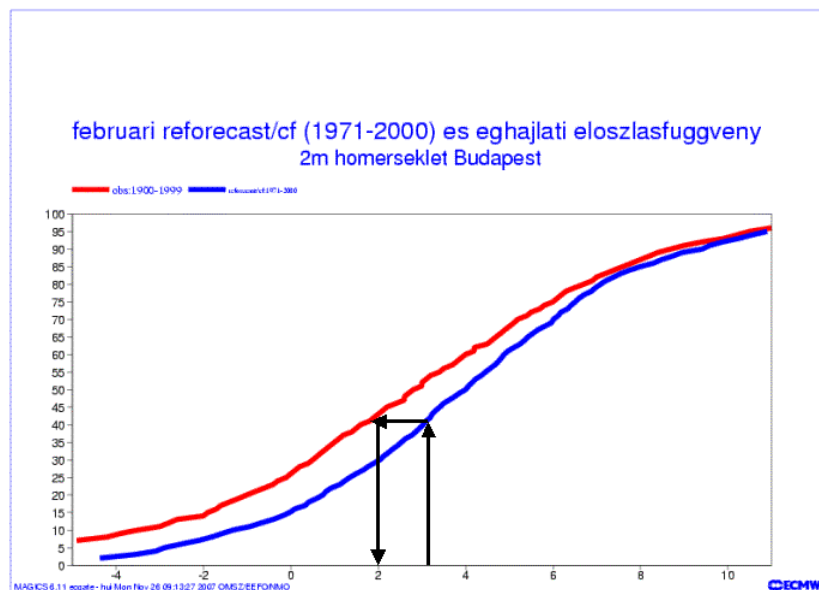


1. ábra: Fáklya diagram - ECMWF EPS előrejelzés Szeged 20071130 + 10 nap (2m hőmérséklet, 12 órás csapadékösszeg, 10 m-es szélsőségség)

2. A valószínűségi előrejelzések kalibrációja

2.1. A kalibrációs eljárás

A kalibráció lényege, hogy az aktuális előrejelzés eloszlásfüggvényét összehasonlítjuk az EPS modell múltbeli előrejelzéseiből készített és a megfigyelésekből előállított eloszlásfüggvényekkel. Az aktuális előrejelzés minden egyes EPS tagjára megnézzük, hogy az adott előrejelzéshez milyen előfordulási valószínűség szerepel a modell klíma eloszlásfüggvényben. Ezután megkeressük, hogy a mért (v. megfigyelési) klíma eloszlásfüggvényben ehhez a valószínűséghez milyen megfigyelési érték tartozik és az aktuális EPS előrejelzés helyett ezt a megfigyelési értéket adjuk. Másképpen mondva tehát a nyers EPS előrejelzést mintegy hozzá kalibráljuk a múltban mért adatokhoz. A kalibrációs eljárás értelemszerűen feltételezi a modell és a megfigyelési éghajlati eloszlásfüggvény meglétét (Mile, 2008) (2. ábra).



2. ábra: A kalibráció folyamata (piros: megfigyelési eloszlásfüggvény, kék reforecast klíma eloszlásfüggvény)

A kalibráció nem azonos például a hidrológiai előrejelzéseknél alkalmazott kalibrációval, ugyanis itt egyfajta utó-feldolgozási módszerről van szó. Az ensemble előrejelzések napjainkban egy nagyon dinamikusan fejlődő ága az előrejelzési gyakorlatnak. Az ezen előrejelzések bevalásának javítására számos módszert dolgoznak ki az egyes országok meteorológiai szolgálatai, köztük több utó-feldolgozási módszert,

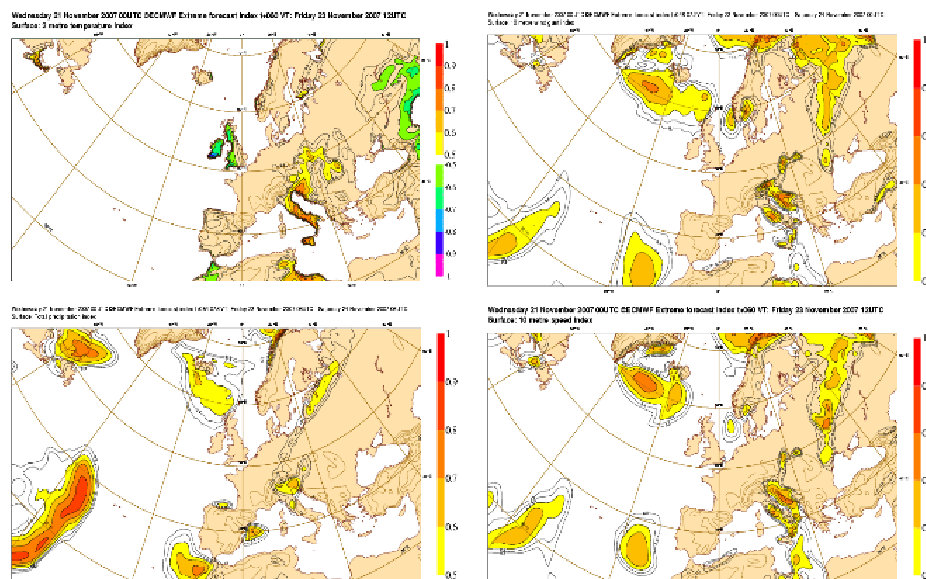
mellyel csökkenteni igyekeznek az ensemble előrejelző rendszer hibáit. A kalibrációs eljárás is egy ilyen módszer, amely a valószínűségi előrejelzés megbízhatóságát igyekszik javítani (*Hagedorn et al.*, 2007, *Hamill et al.*, 2007a).

Ezt az utó-feldolgozási folyamatot az ECMWF közvetlenül nem végzi el, hanem a tagországokra bízta, hogy helyben a saját megfigyelési adataikkal kalibráljanak, amennyiben ezt szükségserűnek látják. A kalibráció opcionális és bár elméleti alapjai ismertek a nemzetközi szakirodalomban, gyakorlati alkalmazása csak mostanában kezd megvalósulni. Magát az eljárást többféleképpen is meg lehet valósítani, viszonylag sok módszer ismert, amelyek bizonyos paraméterekre jobb, másokra kevésbé jó eredménnyel alkalmazhatók. Ilyen módszer lehet például Bayes becslésen alapuló módszer (*Raftery et al.*, 2005), regressziós módszer (*Hamill et al.*, 2007b), vagy az általunk alkalmazott eloszlásfüggvényen alapuló módszer. Azért esett az eloszlásfüggvény kalibrációra a választás, mert ez az eljárás minden meteorológiai paraméterre egyaránt használható és nem igényel bonyolult matematikai műveleteket.

A kalibrációs eljárás, mint általában minden utó-feldolgozási eljárás a modell szisztematikus hibáit igyekszik kiszűrni. Egy ensemble-előrejelzés beválása akkor megfelelő, ha a modell szisztematikus hibáktól mentes, vagyis ha a modell például 50%-os valószínűséggel jelzi előre a fagypont alatti hőmérsékletet 100 esetből, akkor annak 50-szer be is kell következnie. Ez persze a valóságban nem vagy nagyon ritkán teljesül, főként, ha a planetáris határrétegben vizsgálódunk. Elég csak egy fagyzugos völgyre vagy egy kiemelkedő hegycsúcsra gondolni, ahol a modell már nem kellően reprezentatív.

2.2. Nemzetközi kitekintés

Maga a kalibráció ötlete 2000. júniusában Francois Lalaurette-től és Horst Bottger-től származtatható, akik elsőként vetették fel az eloszlásfüggvény kalibrációjának ötletét. Ekkor az ECMWF-nél már a kifejlesztés stádiumában volt egy az Extreme Forecast Index (EFI), amely szintén eloszlásfüggvényeket alkalmaz szélsőséges időjárási események figyelmeztetésére (*Lalaurette et al.*, 2003, *Hágel*, 2003). Az EFI azt vizsgálja, hogy az előrejelzés mennyire tér el a modell klíma eloszlásfüggvényétől, azaz mennyire számít extrémnek az előrejelzett időjárási helyzet (*3. ábra*).



3. ábra: Extreme Forecast Index térképek, 2 m hőmérséklet, 24 órás csapadékmennyiség, 10 m-es szélsősség és szellőkés

2004. márciusától az Országos Meteorológiai Szolgálatnál indult a valószínűségi előrejelzések hasznosítását elősegítő NKFP-3A/051/2004 számú projekt, amelynek részfeladata volt az ECMWF ensemble előrejelzések kalibrációja.

2006. február 2-án az EPS modell horizontális felbontása 50 km-re a vertikális szintek száma 62-re növekedett. 2006. november 28-tól új 15 napos érvényességű operatív VAREPS (VARIABLE Resolution Ensemble Prediction System) modell futtatása kezdődött. Az ECMWF az új modell verziójával új modell klíma előállítását is elkezdte, mivel a régi modell klíma már nem reprezentatív a nagyobb felbontású ensemble rendszerre. 2007 novemberében két ECMWF Workshop keretein belül is szó esett a kalibráció gyakorlati megvalósításáról. A VAREPS előrejelzésekből 2008. márciusától állítanak elő – operatíván - reforecast modell klímát

2.3. Felhasznált adatok, források

Az EPS előrejelzések valamint a modell klíma előállításához szükséges információkat az ECMWF MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) rendszere szolgáltatta. Az ECMWF produktumok az operatív futtatás során azonnal archiválódnak, így rögtön elérhetők a felhasználók számára (Raolt, 2001).

A MARS több évtizedes megfigyeléseket, előrejelzéseket és terabyte nagyságrendű adatmennyiséget archivál. A meteorológiai mezőket főként a gyakorlatban bevált GRIB formátumban tárolja. Az archiváló rendszer a felhasználók számára egy webes felületen nyújt lehetőséget az adatok lekérésére, alkalmazkodva a különleges felhasználói igényekhez. Az ensemble előrejelzések – amelyeken a vizsgálatot elvégeztük – múltbeli előrejelzések, amelyek közel két éves időszakot fednek le. A modell klíma eloszlás függvény előállítását – értelemszerűen – múltbeli EPS előrejelzésekre alapoztuk. Ezeket a múltbeli előrejelzéseket is az ECMWF MARS rendszer szolgáltatta.

A kalibrációs eljáráshoz szükség van a magyarországi észleléseken alapuló havonkénti éghajlati eloszlás függvény előállítására az egyes szinoptikus állomásokon. 10 hosszú idősorú s többszörösen ellenőrzött, megbízható megfigyelési adatokkal rendelkező szinoptikus állomásokra az Országos Meteorológiai Szolgálat Távközlési és Informatikai Főosztály Szoftverfejlesztési Osztály (TIFO/SZFO) munkatársai állították elő az eloszlásfüggvényeket, s készpénzzel bocsátották a rendelkezésünkre.

2.4. Eloszlásfüggvények (mért és modell klímák)

A megfigyelési klíma eloszlásfüggvény előállítása a következő módon történik. A 10 szinoptikus állomásra egyenként el kell készítenünk a valós méréseken alapuló klíma eloszlásfüggvényt. Az OMSZ INDA rendszerében a kiválasztott állomásokra hozzávetőlegesen 90 éves adatsor áll rendelkezésre. Állomásonként összesen 12 darab eloszlásfüggvényt készítünk az egyes hónapoknak megfelelően. Az 1901-től 1990-ig tartó múltbeli mérések összességéből sorba rendezés után megkapjuk az eloszlásfüggvényeket, 1%-tól 99%-ig, 1%-os lépésközökkel.

A modell klíma előállítására többféle lehetőség mutatkozik. Az elsőként alkalmazott módszerünk az ECMWF-ben 2000-ben létrehozott 1997-1999-es időszakra vonatkozó EPS modellklíma használatára épült. Ez a modell klíma az EPS rendszer egyetlen tagját az un. kontroll előrejelzést felhasználva készül. A hároméves időszak naponkénti 10 napos érvényességű 24 órás időbeli bontású előrejelzéseiből készítették el a kiválasztott előrejelzési időpontra jellemző havi modellklíma előrejelzést.

Megemlíthető, hogy az így nyert havi modell klímából időben lineáris interpolációval állíthatjuk elő az adott napra szóló modell klímát, mely révén elsősorban

az átmeneti évszakokban pontosabban közelíthetjük az adott időszakra jellemző klimatológiai eloszlást.

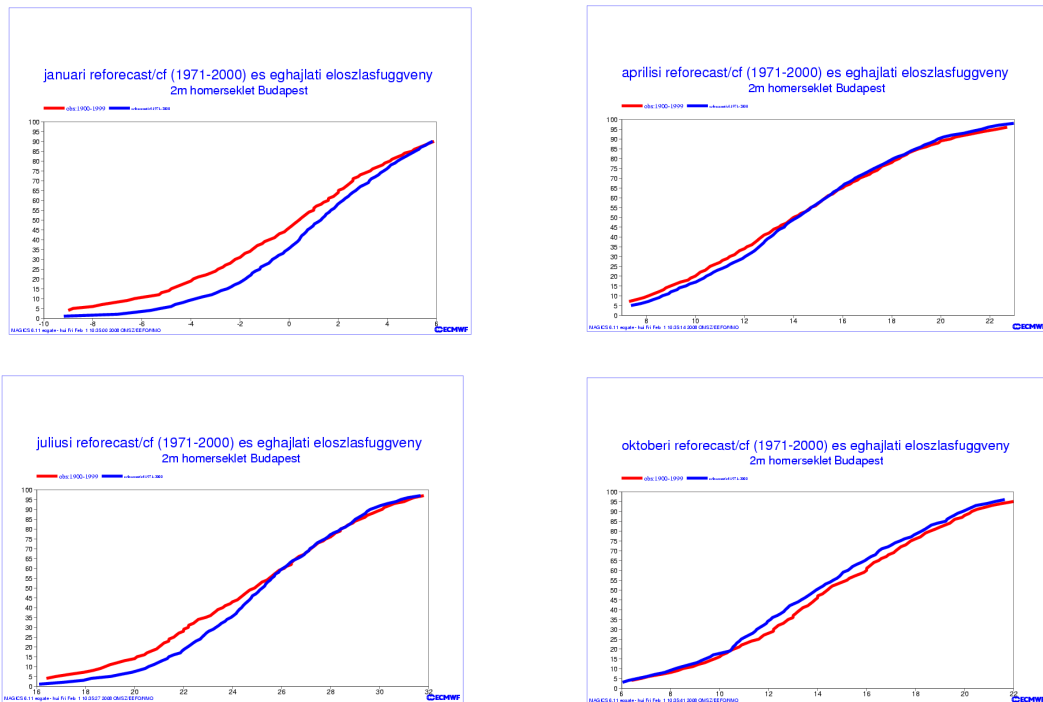
Minden múltbeli modell előrejelzésre épülő statisztikai jellegű utó-feldolgozási módszer hátránya, hogy a modellfejlesztésekből, változtatásokból eredő változásokat nehezen tudja követni. Ezért az 1997-99-es modell klímát, amely már korábban a rendelkezésünkre állt, csak kísérleti jelleggel használtam fel. Az ECMWF – 2006. elejétől operatíván – un. reforecast előrejelzéseket készít, hogy megoldja az új modellfejlesztésekkel járó múltbeli előrejelzések „hiányát”. Ekkor az aktuális operatív modell verzióval múltbeli időszakra az adott nap egy meghatározott időbeli környezetében lévő napokra újból lefuttatják a modellt.

Az ECMWF-ben 2006. február 25-től naponta operatíván fut reforecast előrejelzés az EPS modellel megegyező modell paraméterekkel – térbeli felbontással – un kontroll modellt +48 óra időtartamra az 1971 és 2000 közötti időszakra. A reforecast előrejelzést az adott napot megelőző 30 nap és az utána következő 30 napos időszak minden egyes napjára előállítják. Az ECMWF plusz, mínusz 30 napot alkalmaz a klímakészítéskor, vizsgálatainkban +/- 15 napos időablakot alkalmaztunk. Így kvázi minden napra egyedi modell klímát készíthetünk, vagy csak azt mondjuk, hogy az adott hónap klímája legyen a 15-ei klímájával egyenértékű. 30 év havonként átlagosan 30 napi adata mintegy 900 értéket jelent. Fontos megjegyezni, hogy ezek a reforecast előrejelzések 24 és 48 órás érvényességre is elkészülnek, de mi csak a 48 órás előrejelzést használjuk egyelőre. Tehát mintegy 900 előrejelzési értéket kell sorba rendezni és a szokott módon beszázalékolni.

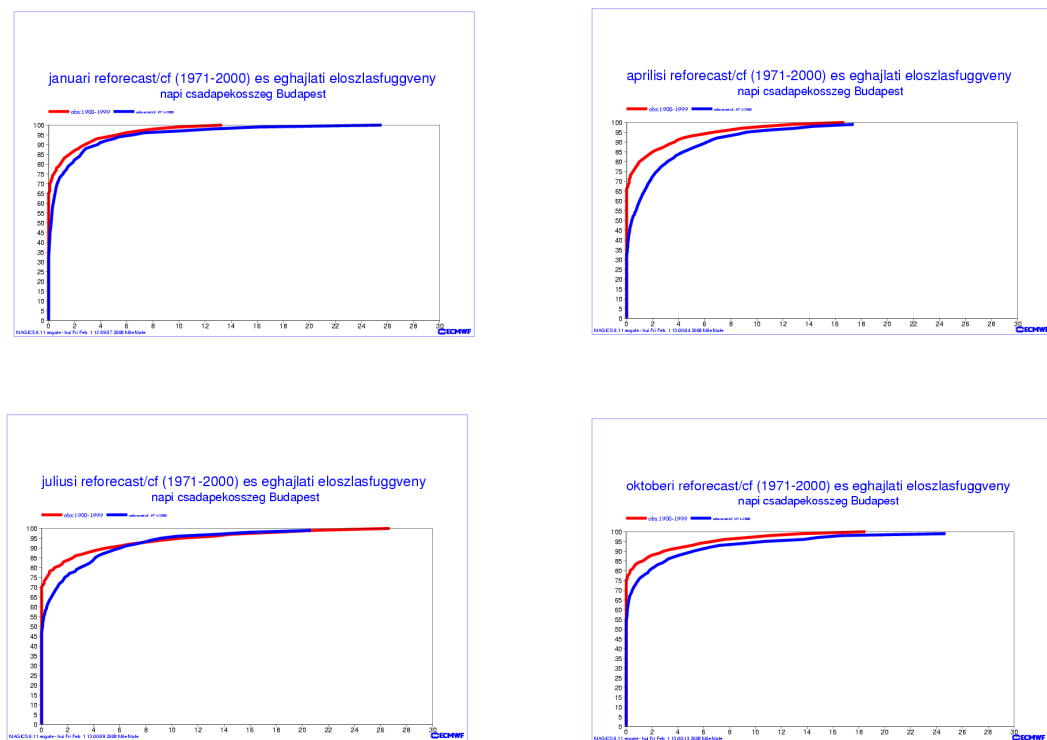
Ezeket a reforecast előrejelzéseket az ECMWF már operatíván felhasználja (Zsótér, 2006) az EFI (Extreme Forecast Index, (Lalurette and van der Grijn, 2003)) előállításához és ezért várhatóan a modell klíma megfelelő lehet egy ilyen kalibrációs eljáráshoz. Az ECMWF célul tűzte ki a reforecast előrejelzések továbbfejlesztését mind az ensemble tagok számának a növelésével, mind a reforecast előrejelzések 2 napról 32 napra történő időbeli kiterjesztésével. A fejlesztő munka eredményeként 2008. március 13-tól 5 tagú EPS-ből készítenek 30 napos érvényességű reforecast előrejelzéseket.

A klíma eloszlásfüggvény a kalibrációs folyamat döntő fontosságú része (mind a megfigyelésre, mind a modellre jellemző), ugyanis egy rossz vagy nem kellően megbízható eloszlásfüggvény esetén a kalibrációs folyamat is eredménytelen lesz. Nyilvánvaló, hogy a minél több és megbízhatóbb adatból készített klíma eloszlásfüggvény reprezentatívabb lesz az előrejelző modellre ill. szinoptikus állomásra.

Néhány tipikus példát szemléltet a 4. és 5. ábra, a 2m-es léghőmérséklet és 24 órás csapadékösszeg eloszlásfüggvényeit ábrázolja Budapestre.



4. ábra: 12 UTC-s 2 m hőmérséklet havonkénti eloszlásfüggvény, piros: megfigyelési, kék: reforecast (Budapest: január, április, július, október)



5. ábra: 24 órás csapadékösszeg havonkénti eloszlásfüggvény, piros: megfigyelési, kék: reforecast (Budapest: január, április, július, október)

3. Verifikáció

3.1. Programozási feladat, vizsgált paraméterek

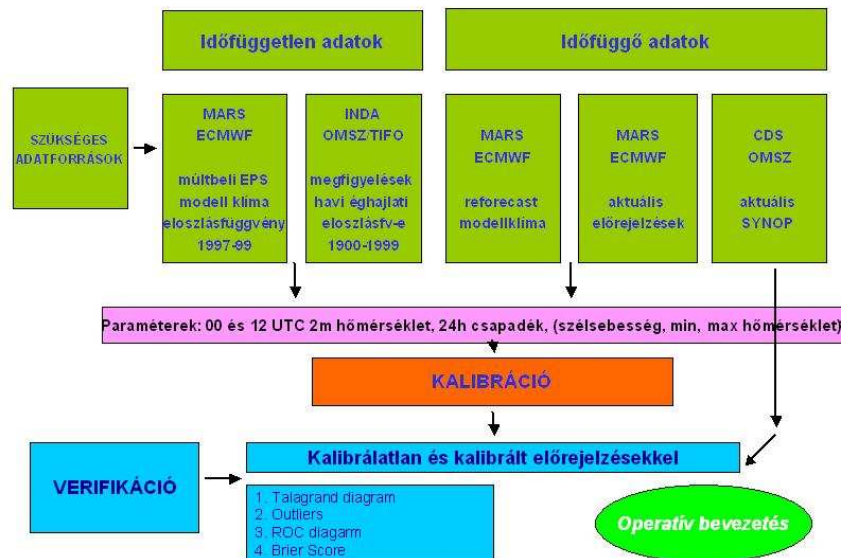
A kalibrációs eljárásra egy tetszőleges meteorológiai paraméter kalibrációjára alkalmas UNIX/FORTRAN programot fejlesztettem ki (2. ábra A kalibráció folyamata). A már korábban említett eloszlásfüggvény típusú kalibráció teszi lehetővé a program felhasználását bármilyen paraméterre. A kalibrációt elsősorban felszín közeli, határreteg paraméterekre érdemes alkalmazni, ahol az ensemble modell kisebb, nagyobb szisztematikus hibával rendelkezik. Nyilvánvaló, hogy az 500 hPa-os geopotenciál magasság előrejelzése nem jelent akkora nehézséget, mint például a minimum hőmérséklet előrejelzése. A kalibrációt a 2 méteres léghőmérsékletre és 24 órás csapadékösszegre végeztem el. A vizsgálat helyszíne az a 10 hazai szinoptikus állomás (6. ábra), melynek a megfigyelési eloszlásfüggvényét megkaptuk az OMSz/TIFO osztály munkatársaitól. A kalibrált múltbeli előrejelzések a 2006. márciusától egészen 2008. márciusáig terjedő intervallumból származnak.



6. ábra: A kalibrációhoz kiválasztott 10 magyar meteorológiai szinoptikus állomás

A kalibrálandó előrejelzések 48, 72, 96, 120 és 144 órás időléptékűek mivel a modell klíma korlátot szab a rövidebb, illetve hosszabb távú előrejelzések kalibrálására. Például egy 48 órás reforecast előrejelzésekből készített modell klíma már lehet, hogy nem kellően mérvadó 5 – 6 napnál hosszabb időtartamú előrejelzésekre.

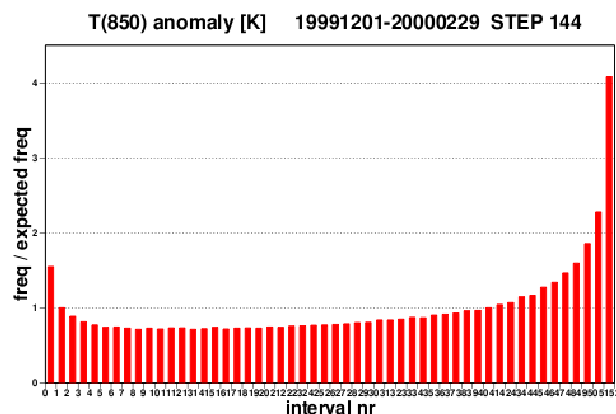
A verifikáció elvégzéséhez - hasonlóan a kalibrációhoz - UNIX/FORTRAN programot fejlesztettem ki, melyeket összeillesztve egy komplex, de nem túl bonyolult lépéseken végigmenő kisebb programcsaládot kaptam (7. ábra).



7. ábra: a kalibráció és a verifikáció folyamatábrája

3.2. Verifikációs eszközök

Az EPS valószínűségi előrejelzéseknél széles körben elterjedt az ún. Talagrand diagram alkalmazása (*Jolliffe and Stephenson, 2003*) (8. ábra). Ez a diagram szemléletesen reprezentálja az EPS modell előrejelzési értéktartományát az ensemble spread-et.



8. ábra: Talagrand diagram: x-tengely összes ensemble tagok, y-tengely relatív gyakoriság; 850hPa-os szint hőmérséklete, hat napra szóló előrejelzés 1999-2000 tele. U-alak figyelhető meg amely a szűk ensemble spread-ről árulkodik, valamint csekély alábecslés J alakja is felismerhető (*Persson, 2003*)

Az ensemble spread nagyon fontos indikátora a kezdeti perturbáció hatékonyságának az EPS rendszerekben. A diagram oszlopai azoknak az eseteknek a gyakoriságát mutatják amelyek – az ensemble sorba rendezése után – a mért érték két szomszédos ensemble tagja közé esnek. Egy 50 tagú EPS-nél 51 intervallumú lesz a diagram, amelyből 49 zárt és a végeken egy-egy nyílt intervallum. Egy ideális EPS rendszernél a megfigyelési érték bármely két szomszédos EPS tag közzé ugyanolyan valószínűséggel eshet, azaz a kezdeti perturbáció okozta szórás nagyjából megegyezik az előrejelzési modell hibájával. Ekkor jó ensemble spread-et kapunk és a Talagrand diagramunk lapos lesz. A lapos diagram továbbá azt jelenti, hogy a valószínűségi előrejelzés szisztematikus hibától mentes.

Ezzel szemben, ha a Talagrand diagram szimmetrikus U alakzatot mutat, akkor az azt jelenti, hogy az ensemble spread nem elég széles. Az U alakú diagramot akkor kapunk, ha a megfigyelés gyakrabban esik az előrejelzési értéktartományon kívül, mint ahogy az előre lett jelezve. Az L alakú Talagrand diagram a szisztematikus fölébecslést, míg a J alak szisztematikus alábecslést tükröz. Elmondható még az is, hogy ha az EPS ideális, akkor az előrejelzési idő előrehaladtával a Talagrand diagram nem lesz szükségszerűen mindig lapos.

Ha ideális ensemble előrejelzési rendszerünk van, akkor minden paraméterre nagyon hasonló Talagrand diagram alak keletkezik, legyen az az 500 hPa-os geopotenciál magasság, a 850 hPa-os léghőmérséklet vagy a 2 méteres léghőmérséklet. Az EPS az előrejelzési tartomány első napján szűk spread-et mutat, ugyanis ekkor még kicsi a rendszer szórása, tehát közel vannak egymáshoz a tagok, U alakú Talagrand diagramot kapunk. A második és a harmadik napon az előrejelzés értéktartománya már jó, azaz lapos diagram lesz. Ez nem meglepő mivel az EPS kezdeti perturbációja célzottan a középtávú tartományra van kialakítva, azaz ekkor a legjobb az ensemble spread és az előrejelzés is a három-hat napos távon a leghatékonyabb. A hosszabb távú előrejelzések közel azonos Talagrand diagramot mutatnak.

A verifikációra használt másik diagram az ún. ROC diagram (Relative Operating Characteristic) diagram. Ha definiálunk egy valószínűségi küszöböt, akkor a valószínűségi előrejelzések átalakíthatók egy kategorikus igen/nem előrejelzéssé. Tehát például egy csapadékos nap előrejelzésénél, ha az ensemble előrejelzés nagyobb valószínűséggel jelezte a csapadék mennyiséget, mint ez a küszöb, akkor azt mondjuk, hogy az előrejelzés sikerült (H - hit). Ha kisebb valószínűséggel jelezte csak előre,

akkor az előrejelzés elmulasztotta az eseményt (M - missed). Továbbá ha nem volt csapadék, de az előrejelzésben szerepelt akkor tévesen riasztott (F – false alarm) ha nem szerepelt, akkor helyesen nem jelzett (Z – zero) (I. táblázat).

| Előrejelzés/Megfigyelés | Bekövetkezett | Nem következett be |
|-------------------------|-----------------|--------------------|
| Előrejelzett | H (hit) | M (missed) |
| Nem jelzett előre | F (false alarm) | Z (zero) |

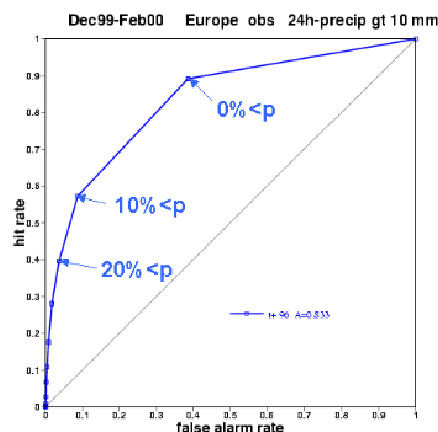
I. táblázat A Relative Operating Characteristic számítása során az egyes események besorolása

Ezek alapján számolható a False Alarm Rate (FAR) és a Hit Rate (HR), amely a ROC diagramhoz szükséges.

$$\text{False Alarm Rate (FAR)} = F / F+Z$$

$$\text{Hit Rate (HR)} = H / H+M$$

Megválasztva az előrejelzés küszöbértékét (vagyis azt, hogy mikor tekintjük az eseményt előrejelzettnek) kiszámítjuk a FAR és a HR értékeit, ezt megismételjük különböző előrejelzési küszöbértékekre, majd az így kapott (FAR,HR) számpárokat koordináta rendszerben ábrázoljuk. Egy tökéletes előrejelzési rendszernél az összes pont a bal felső sarokban lesz, vagyis minden küszöbre a H értéke maximális az F értéke minimális lesz. A valóságban egy konvex görbét kapunk, amely az előrejelzés hatékonyságát tükrözi. Minél nagyobb a görbe alatti terület annál megbízhatóbb az előrejelzési rendszer (9. ábra).



9. ábra: ROC diagram (24 órás csapadékösszeg, 1999/2000 tele, 10 mm-nél nagyobb csapadékküszöb. A görbe pontjai mutatják a relációt a valószínűségi küszöb és a HR, FAR értékek között. Ha például a valószínűségi küszöb 20% akkor a HR 0,4 és a FAR kisebb mint 0,1 (Persson, 2003))

A valószínűségi előrejelzések verifikálásánál nagyon gyakran alkalmazzák az ún. Brier Score (BS)-t, amely hasonló a négyzetes középhibához. A BS az előrejelzési valószínűségek és a bekövetkezés közötti különbséget képezi le egy 0, 1 intervallumba (1), ahol BS a Brier Score, p az előrejelzési valószínűség, x a megfigyelés, n az esetek száma. Hasonlóan a négyzetes középhibához a kis Brier Score értékek a tükrözik a jobb előrejelzést.

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - x_i)^2 \quad (1)$$

3.3. A nyers előrejelzés verifikációja

A kalibráció elvégzése előtt a nyers ensemble előrejelzés objektív verifikációját végeztem el a 3.2 fejezetben ismertetett verifikációs eszközökkel. Mind a nyers mind a kalibrált előrejelzések verifikációját a 2006. márciusától 2008. márciusáig terjedő időszakra vizsgáltam. A 2m léghőmérséklet előrejelzésének verifikációját a Talagrand diagram segítségével valósítottam meg. A 24 órás csapadékösszeg verifikációja a léghőmérséklettől alapvetően más módszert igényel, ezért erre a feladatra a ROC diagram és Brier Score apparátusát alkalmaztam.

3.3.1. A kalibrálatlan 2m-es hőmérséklet előrejelzés verifikációja

Elsőnek vizsgáljuk meg a 2m-es léghőmérséklet verifikációját. A 10 állomásból kiválasztok néhányat, amelyek tipikusnak számító szisztematikus hibával rendelkeznek és megpróbálom ezeknek fizikai magyarázatát megadni.

Vizsgáljuk meg elsőként Budapestre és Sopronra vonatkozó előrejelzések Talagrand diagramjai, amelyek hasonló szisztematikus hibáról árulkodnak. Ugyan a 10. ábrán és 11. ábrán az figyelhető meg, hogy a két szinoptikus állomásra vonatkozó diák hasonlóak, ám a hibát eredményező ok valószínűleg teljesen különböző. Az ábrákon a Talagrand diagram tipikus J-alakja figyelhető meg, ez pedig a már említett rendszeres alábecslést jelenti.

Jól megfigyelhető, hogy az alábecslés mértéke, vagyis az utolsó oszlop magassága az előrejelzési időtáv előrehaladtával csökken. Budapestre vonatkozó 48 órás előrejelzés verifikálásából látható, hogy a vizsgált esetek mintegy 32%-ban az alábecslés intervallumában fordulnak elő. Sopron ezen Talagrand diagramján ugyanez 38%-os gyakorisággal figyelhető meg. A két szinoptikus állomás helyzete sajátos. Fontos, hogy ezek a nem véletlenszerű hibák leggyakrabban a mérési hely szinoptikus klimatológiai sajátosságaiból és az előrejelző modell nem kellő reprezentativitásából erednek.



10. ábra: Nyers EPS Talagrand Diagramok – Budapest (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

Budapest esetében az alábecslést a városi hősziget hatása eredményezheti. Sopron esetében a hibát valószínűleg az okozza, hogy a modell az Alpok közelsége miatt orografikus rácspontokat is figyelembe vesz. Az ensemble előrejelzés felbontása a determinisztikus előrejelzés felbontásának a fele és így a finomabb időjárási jelenségeket még kevésbé tudja figyelembe venni, mint például Sopron esetében.



11. ábra: Nyers EPS Talagrand Diagramok – Sopron (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

Ha a többi állomást végignézzük, akkor találkozunk egy másik jellemző hibával, amikor is a Talagrand diagramunk U alakot formál. Ilyen figyelhető meg Nagykanizsa (12. ábra) és Miskolc (13. ábra) estében is. A diagram mindkét szélén magasabb oszlopok fordulnak elő, amely a szűk ensemble spread problémájára vezethető vissza. Itt nem szisztematikus alá- vagy fölébecslésről beszélhetünk hanem arról, hogy a valós hőmérsékleti értékek pozitív és negatív irányban „kilógnak” az előrejelzés értéktartományából. Ezeket a kilógó értékeket outliers tagoknak nevezzük.

Nyilvánvaló, hogy minél nagyobb az outliers esetek száma annál megbízhatatlanabb a modell előrejelzése. A hiba okának magyarázata nem határozható meg egyértelműen. Talán Miskolc esetében valószínűsíthető, hogy a változatos domborzatú területen a város völgybeli elhelyezkedése okozhatja az enyhe fölébecslést (kicsit magasabb bal oldali oszlop). Továbbá itt szépen követhető az ensemble előrejelzésre jellemző szórás növekedése az idő előrehaladtával.



12. ábra: Nyers EPS Talagrand Diagramok – Nagykanizsa (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)



13. ábra: Nyers EPS Talagrand Diagramok – Miskolc (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

A többi állomás esetében is elmondható, hogy kisebb nagyobb szisztematikus hibával rendelkeznek és az előzőekhez hasonló okok játszanak szerepet ezeknek a hibának a megjelenésében (1. Függelék).

3.3.2. A kalibrálatlan 24 órás csapadék előrejelzés verifikációja

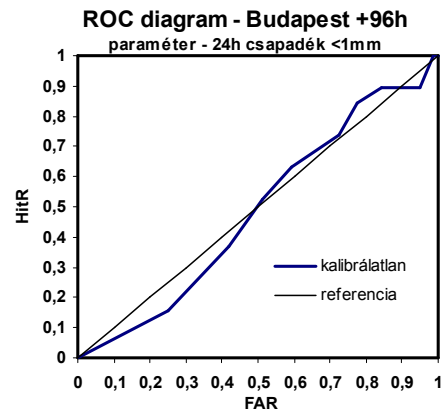
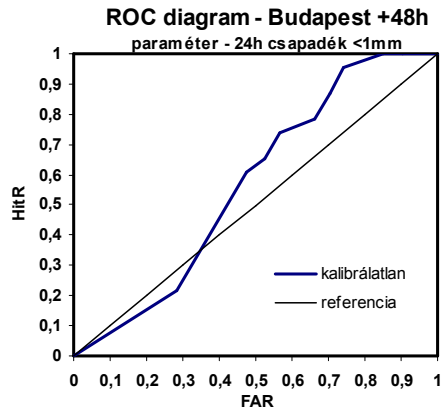
A másik paraméter a 24 órás csapadékösszeg, amelynek a verifikációját áttekintjük. Egy tetszőleges időtartamra összegzett csapadékmennyiség a konvektív és a nagy skálájú csapadék összegéből tevődik össze. Az EPS 50 km-es térbeli felbontása nem kellően precíz egy ilyen változékony paraméter előrejelzésére. Emellett a lokális konvektív csapadékot nem képes megfogni, csupán a nagy skálájú csapadék rendszerekbe ágyazott konvektív jellegű csapadékokra képes elég jó becslést adni. Szisztematikus hibaként jelentkezik az ensemble modell csapadék előrejelzésében, hogy a kis csapadékokat túl gyakran adja a modell. Egy másik probléma jelentkezik a nagy csapadékos eseményeknél, amikor az EPS alulbecsüli a csapadék mennyiségét.

A ROC diagramokat csak a téli évszakra vonatkozóan készítettem el, mivel ebben az évszakban a konvektív csapadék elhanyagolható a csapadékösszegekből és a modell által jobban visszaadott csupán nagy skálájú csapadékokra vizsgáltam. Az így kapott időszakon – mivel csak egyetlen földrajzi pontra, állomásra szorítkozom – nem áll rendelkezésemre annyi nagy csapadékos eset, hogy kellően pontos vizsgálatot végezzek ilyen helyzetekre. Ezért csak 1 mm-es csapadékküszöbre ábrázoltam a diagramokat.

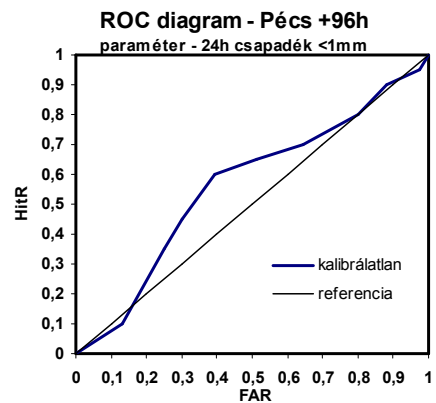
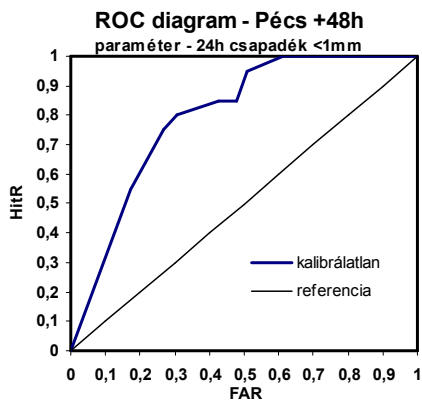
Az állomások közül Budapestet emelném ki elsőként. A verifikáláshoz a korábban ismertetett ROC diagramot használtam. A *14. ábrán* látható az 1 mm-es csapadékküszöb ROC diagramja. Jól megfigyelhető, hogy minél hosszabb az időtáv annál kevésbé megbízható az előrejelzés, annál kisebb a görbe alatti terület. Továbbá a görbe elején a nagy FAR értékek utalnak arra, hogy a modell gyakran ad kis csapadék értékeket miközben nincs csapadék hullás.

Egy másik szinoptikus állomáson, Pécsen az figyelhető meg (*15. ábra*), hogy a vizsgált időszakban a csapadékösszeg előrejelzése a rövidtávon nagy görbe alatti területtel, azaz nagy megbízhatósággal rendelkezett. A megbízhatóság Pécs esetében is akárcsak a többi állomáshoz hasonlóan jelentősen csökken a hosszabb távú előrejelzéseknél.

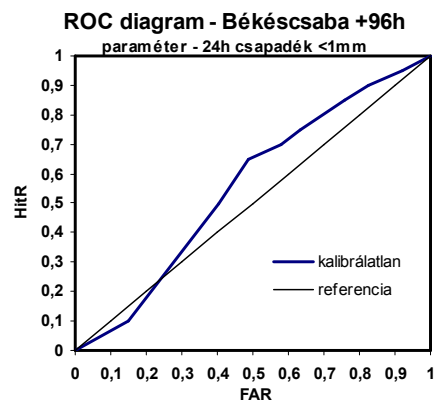
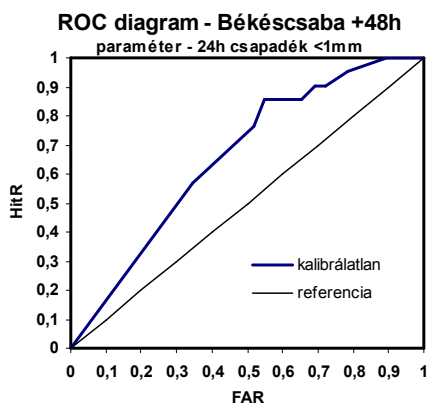
Békéscsaba tekintetében is megfigyelhető a túlzott FAR értékek, bár nem olyan nagy mértékben, mint Budapest esetében. Alapvetően ez a jelenség minden állomás esetében nyomon követhető kis csapadékos eseményeknél.



14. ábra: Kalibrálatlan EPS ROC diagramok – 1mm-es küszöb, Budapest (48 és 96 órás csapadék előrejelzések)



15. ábra: Kalibrálatlan EPS ROC diagramok – 1mm-es küszöb, Pécs (48 és 96 órás csapadék előrejelzések)



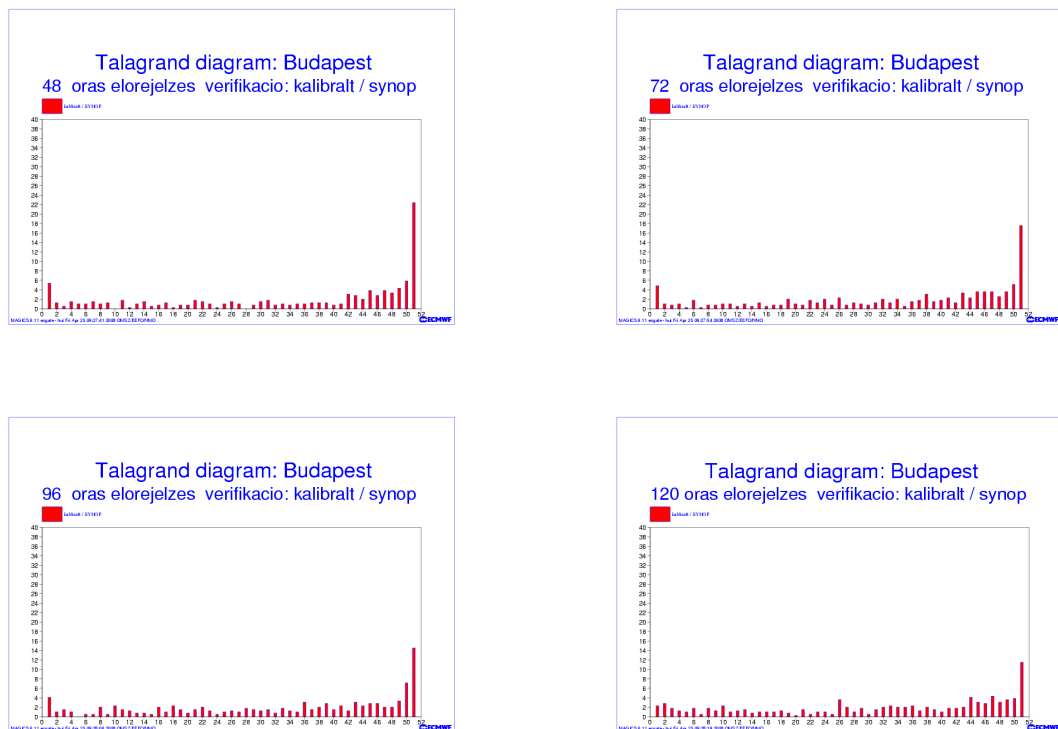
16. ábra: Kalibrálatlan EPS ROC diagramok – 1mm-es küszöb, Békéscsaba (48 és 96 órás csapadék előrejelzések)

3.4. A kalibrált 2m-es hőmérséklet előrejelzés verifikációja

A kalibrációt a már korábban tárgyalt módon és módszerekkel végeztem el. Megemlítendő, hogy az eljárás során használt modellre jellemző eloszlásfüggvény a reforecast modell klíma. Kísérletet tettem egy korábbi, szintén fentebb részletezett – az 1997-1999-es modellklíma – eloszlásfüggvénnyel végzett kalibrációra, de mivel azóta már számos modell verzió frissítés történt, így ez a klíma csak néhány állomásra tudott javítani az előrejelzés beválásán. Külön fejezetben – a 3.6. pontban – említem meg ennek a vizsgálatnak a tapasztalatait.

Tekintsük át a 2m-es léghőmérséklet kalibrációjának azeredményeit a nyers adatokkal összevetve. A verifikációt szintén a Talagrand diagram segítségével végezzük és ugyanazon a néhány példán mutatnám be, amelyeket a nyers előrejelzésnél is kiemeltünk, hogy könnyebb legyen az összehasonlítás.

Budapest és Sopron volt az a két szinoptikus állomás, ahol jelentős alábecslést figyelhettünk meg. Említettem, hogy Budapest esetében 32%-os, Sopron pedig 38%-os gyakorisággal fordultak elő a kétnapos előrejelzésekben az alábecsléses esetek. Ha megnézzük a 16. és 17. ábrákat akkor látható, hogy ezen esetek száma jelentősen – 7-8%-kal – lecsökkent.



16. ábra: Reforecast klíma - Kalibrált EPS Talagrand Diagramok – Budapest (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)



17. ábra: Reforecast klíma - Kalibrált EPS Talagrand Diagramok – Sopron (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

A nyers előrejelzés kalibrációjánál kiemeltém Miskolc és Nagykanizsa esetét, mivel itt tipikus U alakú Talagrand diagrammal találkozhattunk. Főként a 2-4 napos előrejelzésnél volt megfigyelhető ez a hiba, mivel az 5-6 napos előrejelzésben már kellően nagy az előrejelzés szórása ahhoz, hogy a szisztematikus hiba „eltűnjön”. A kalibráció mindenesetre kisebb időtávnál is a kilógó esetek gyakoriságát hozzávetőlegesen – 5-7 %-kal – tudta javítani. Az U alak az öt napos előrejelzésnél már nem figyelhető meg. A 18. és 19. ábrák mutatják a verifikáció diagramjait.

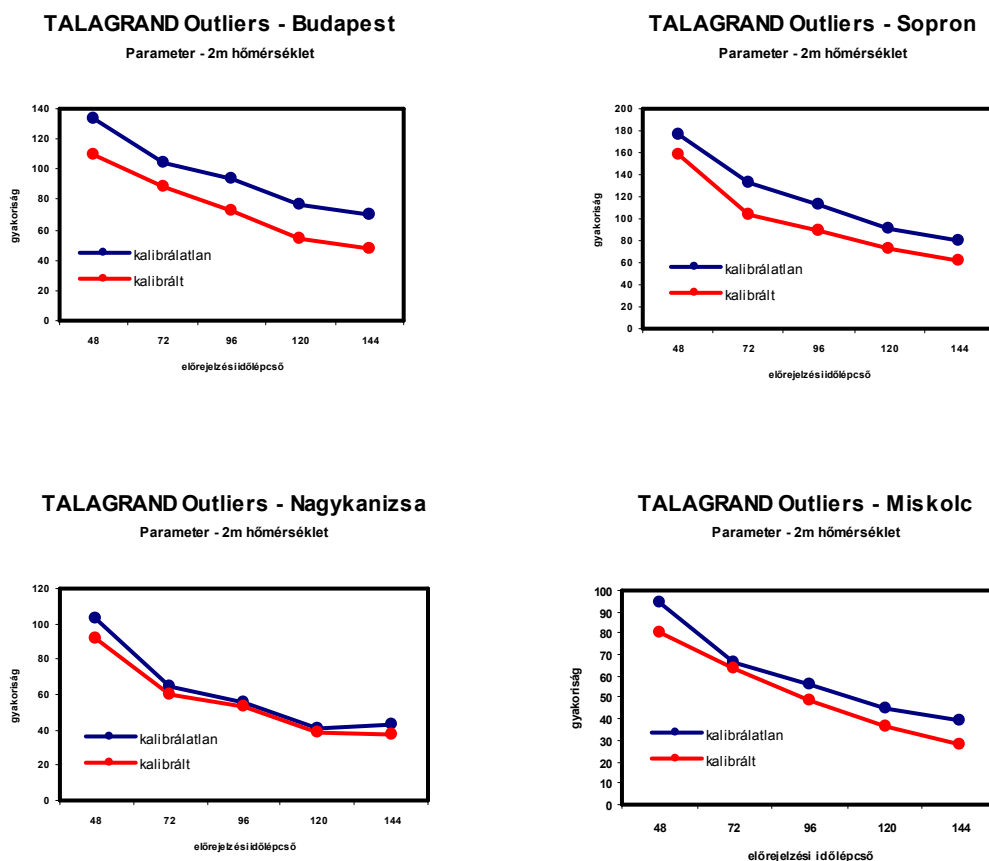


18. ábra: Reforecast klíma - Kalibrált EPS Talagrand Diagramok – Nagykanizsa (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)



19. ábra: Reforecast klíma - Kalibrált EPS Talagrand Diagramok – Miskolc (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

Ha a Talagrand outliers eseteinket ábrázoljuk az idő függvényében, akkor az ensemble szórás időbeli fejlődéséről kaphatunk képet. Az outliers esetek csökkentése elengedhetetlen feladat, ha a valószínűségi előrejelzésünk beválását szeretnénk javítani. Az utófeldolgozás teljesen megszüntetni nem tudja ezen esetek számát, de jelentősen tud rajtuk javítani. A kalibrációs eljárás alkalmazásával helyenként 10%-os javulás vált elérhetővé a 2m-es léghőmérséklet tekintetében. Ismét megjegyezhető, hogy az idő előrehaladtával a nagyobb ensemble spread (értéktartomány) miatt az outliers-ek minden állomás esetében csökkenő tendenciát mutatnak. A 20. ábrán a „kilógó” értékek gyakorisága figyelhető meg a vizsgált esetek arányában arra a négy állomásra, amelyekre a Talagrand diagramokat is szemléltettem. További állomások grafikonjai a 2. Függelékben található. Megállapítható, hogy a kalibráció az egyértelmű alá- vagy fölébecslést jobban tudta kezelni, mint a kis szórású ensemble előrejelzésekhez tartozó hibákat. Budapest és Sopron esetében nagyobb mértékű az outliers-ek gyakoriságának csökkenése mint Miskolc és Nagykanizsa tekintetében.

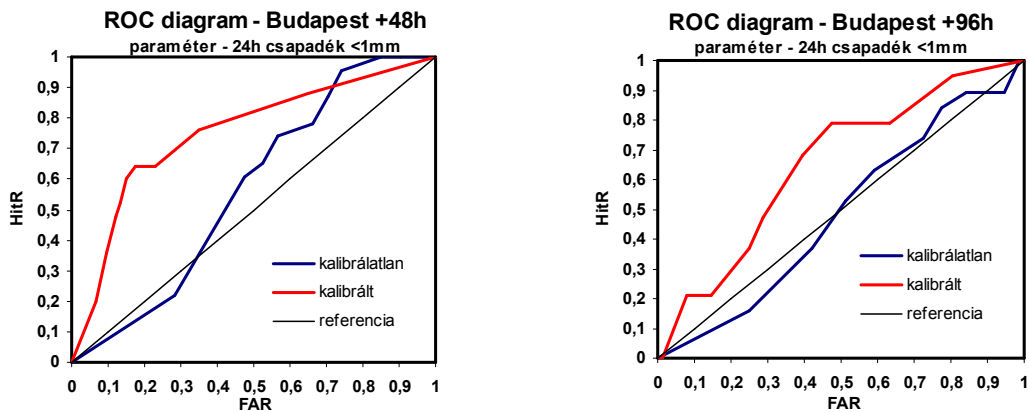


20. ábra: Talagrand Outliers esetek gyakorisága az előrejelzési időlépcső függvényében – 2 m-es hőmérséklet – (Budapest, Sopron, Nagykanizsa, Miskolc)

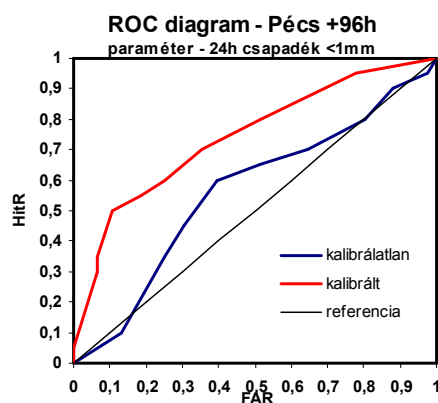
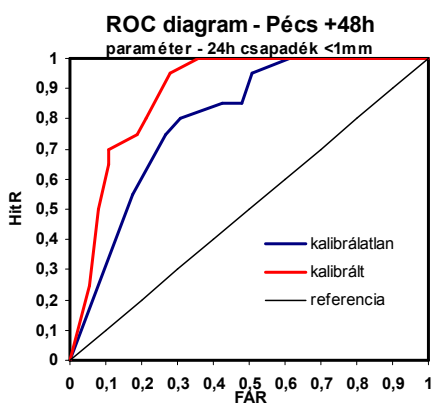
3.5. A kalibrált 24 órás csapadékösszeg előrejelzés verifikációja

A másik kalibrált paraméter a 24 órás csapadékösszeg, amely verifikálását vizsgáljuk meg összehasonlítva a kalibrálatlan és a kalibrált eseteket. A ROC diagramon mutatom be az eredményeket hasonlóan a kalibrálatlan előrejelzés verifikációjához.

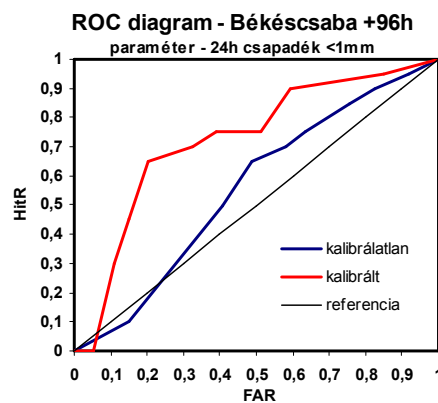
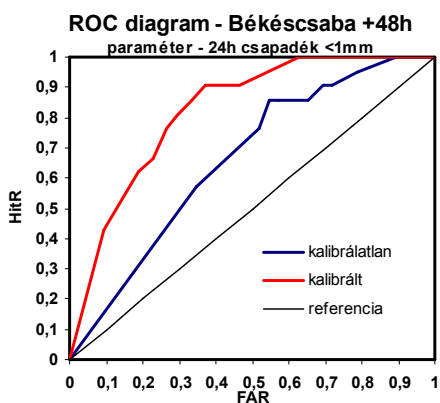
A 21. ábrán Budapestre vonatkozó ROC diagramján látható, hogy a kalibráció nagy mértékben tudta csökkenteni a téves riasztások arányát ezzel javítva az előrejelzés beválásán. Ez várható volt, mivel a csapadék eloszlásfüggvényeken is megfigyelhetjük (5. ábra), hogy a megfigyelési klíma sokkal nagyobb valószínűség felett vesz fel nem nulla értéket. A 22. ábrán Pécs állomás a 23. ábrán Békécsaba állomás ROC görbéi figyelhetők meg. Ebben a két esetben is a FAR értékeket tudta a kalibráció szépen mérsékelni. További állomásokra vonatkozó eredmények a 3. Függelékben találhatóak.



21. ábra: 24 órás csapadékösszeg – ROC diagram kalibrált EPS 1mm-es csapadékküszöb – Budapest (48 és 96 órás időlépcsőkkel)



22. ábra: 24 órás csapadékösszeg – ROC diagram kalibrált EPS 1mm-es csapadékküszöb – Pécs (48 és 96 órás időlépcsőkkel)

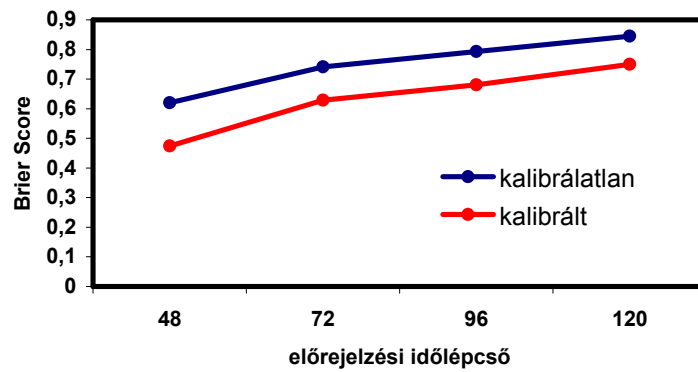


23. ábra: 24 órás csapadékösszeg – ROC diagram kalibrált EPS 1mm-es csapadékküszöb – Békéscsaba (48 és 96 órás időlépcsőkkel)

A csapadék verifikáció során nézzük meg meg a 24 órás csapadékösszeg kalibrálatlan és kalibrált előrejelzésekre vonatkozó Brier Score értékeit. Mint korábban említettem a Brier Score értéke minél kisebb, annál jobb a modell bevalása. Ha a Brier Score-t az idő függvényében ábrázoljuk, mint az ábrákon is látható, akkor azt állapíthatjuk meg, hogy minél hosszabb távú az előrejelzés annál nagyobb hibával, Brier Score-al rendelkezik.

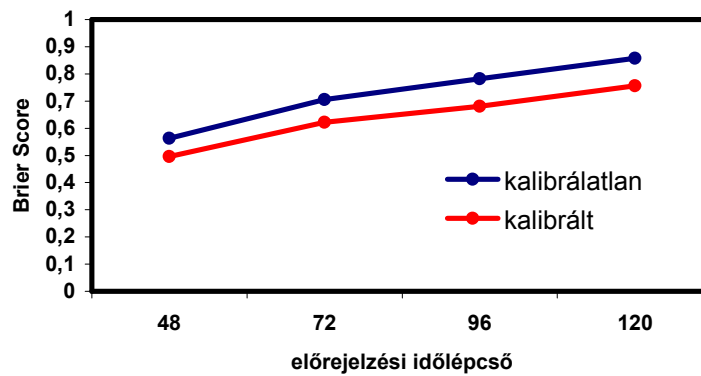
A 24. ábrán láthatók a Budapestre, a 25. ábrán a Pécsre és a 26. ábrán a Békéscsabára vonatkozó Brier Score értékek az időlépcső függvényében. Megfigyelhető, hogy a kalibráció csökkentette az Brier Score-t. Egyes időlépcsőkre igen jelentős, akár 0,15 – ös javulás is megfigyelhető. A Brier Score más állomásra vett eredményei a 4. Függelékben található.

BRIER SCORE - Budapest
Paraméter - 24h csapadék



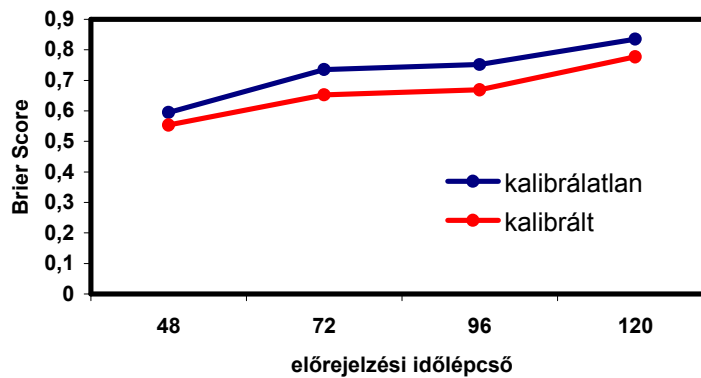
24. ábra Brier Score – kalibrált(piros) és kalibrálatlan(kék) EPS előrejelzésre Budapest (48, 72, 96, 120 órás időtáv)

BRIER SCORE - Pécs
Paraméter - 24h csapadék



25. ábra Brier Score – kalibrált(piros) és kalibrálatlan(kék) EPS előrejelzésre Pécs (48, 72, 96, 120 órás időtáv)

BRIER SCORE - Békéscsaba
Paraméter - 24h csapadék



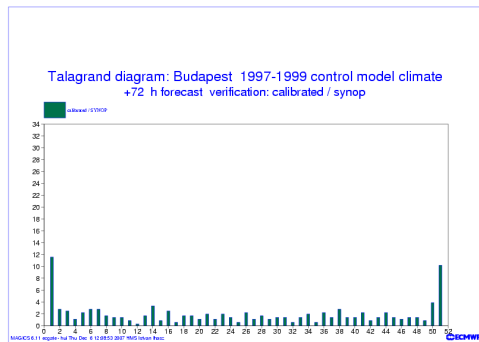
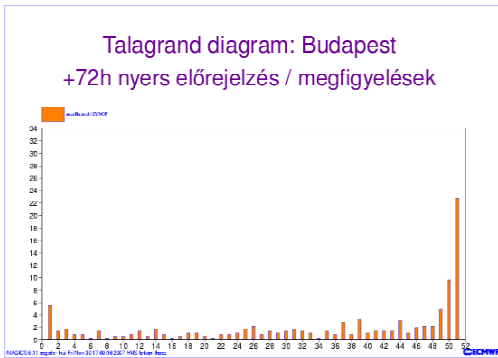
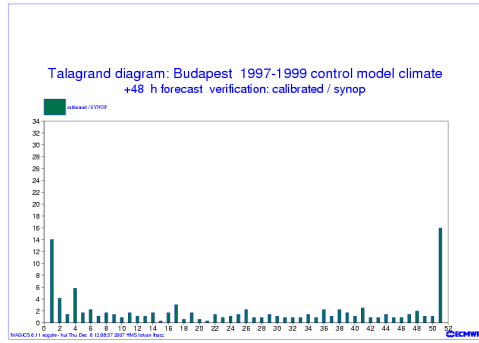
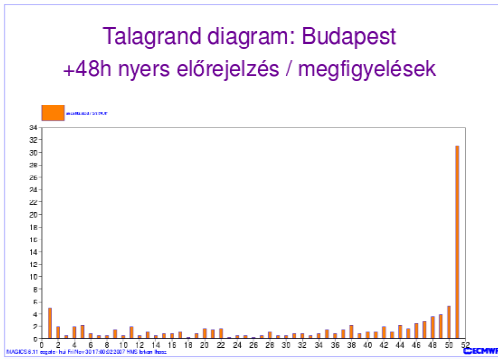
26. ábra Brier Score – kalibrált (piros) és kalibrálatlan (kék) EPS előrejelzésre Békéscsaba (48, 72, 96, 120 órás időtáv)

3.6. 1997-99-es modellklíma kalibrálás kísérlet

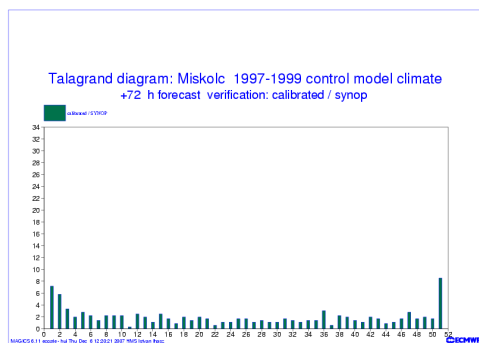
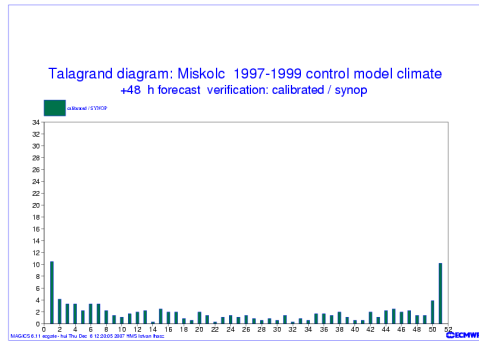
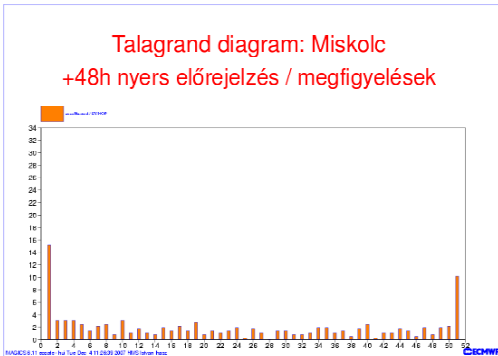
Kísérletünk során az ECMWF-ben 2000-ben létrehozott 1997-1999-es időszakra vonatkozó EPS modellklímára alapozva végeztük a kalibrációt. Ez a modell klíma az EPS rendszer egyetlen tagját az ún. kontroll előrejelzést felhasználva készült. A hároméves időszak naponkénti 10 napos érvényességű 24 órás időbeli bontású előrejelzéseiből készítették el a kiválasztott előrejelzési időpontra jellemző havonkénti modellklímát.

A modell klíma elégedően nagy mennyiségű adatból lett előállítva, ám az évenkénti három, négy alkalommal történő modell verzió frissítés következtében veszített érvényességéből. A 2006. elején, munkám kezdetén ezt a típusú eloszlásfüggvényt is alkalmaztam a kalibráció elvégzésekor. Bizonyos állomások esetében jól tudott segíteni az előrejelzés beválásán. Azokban az esetekben mikor a modell klíma nem segített, nagyon gyakran a kalibráció az alábecslésből fölébecslést eredményezett, vagyis az eloszlásfüggvényt túlzott mértékben „tolta el” az eljárás. Gondoljunk bele a következő jelenségbe, ha egy modell felbontása megnövekszik, az bizonyos területeken, például hegyvidéki területeken az előrejelzések eloszlásfüggvénye más modellklímát eredményez, ugyanakkor a homogénebb földrajzi adottságú területeken elképzelhető, hogy közel ugyanolyan marad a modell klíma. Esetünkben talán ez eredményezhette az eltérő sikerességet a régebbi eloszlásfüggvénnyel végzett kalibráció során.

Néhány ábrán szemléltetem azokat az eseteket, amikor 1997-99-es modell klíma segíteni tudott a szisztematikus hiba csökkentésében. Érdekes megfigyelni a 27. ábrán Budapest esetét, amikor az erős alábecslést ugyan a régi eloszlásfüggvénnyel végzett kalibráció tudta mérsékelni, de megjelent egy kisebb fölébecslés is az első oszlop megemelkedésével. A reforecast modell klímánál ez nem jelenik meg (16. ábra: 48 órás előrejelzés). Továbbá érdekes Miskolc esete is (28. ábra), amikor a kalibráció szintén tudott segíteni a régi modell klíma ebben az esetben is csak gyengébb mértékben, mint a reforecast eloszlásfüggvény (19. ábra: 48 órás előrejelzés). Tehát ebben a két esetben az előrejelző modell fejlesztésével járó változások nem voltak olyan nagy mértékűek, hogy a módszer érvényességét veszítette volna.



27. ábra: Talagrand diagramok Budapest – 1997-99 modell klímával kalibrált EPS +48 és +72 órás előrejelzés (bal oldal: kalibrálatlan EPS, jobb oldal: kalibrált EPS)



27. ábra: Talagrand diagramok Miskolc – 1997-99 modell klímával kalibrált EPS +48 és +72 órás előrejelzés (bal oldal: kalibrálatlan EPS, jobb oldal: kalibrált EPS)

4. Összefoglalás

A szakdolgozatomat az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Légekördinamikai Osztályán készítettem. A dolgozat első fejezetében részletesen ismertettem a téma – az ensemble előrejelzések kalibrációja – fogalomrendszerét és helyét a szakirodalomban. Ebben a részben igyekeztem megvilágítani a numerikus előrejelzés azon pontjait, ahol az előrejelzési feladatot hibák terhelik, terhelhetik. Ezen hibák megértése segíthet abban, hogy modellfejlesztési illetve utó-feldolgozási módszerekkel kiküszöbölhessük őket.

A bevezetés után pontosan kitűztem a feladatot, részletesen bemutatva a kalibrációs eljárás menetét. Említést tettem az ECMWF-ben folyó kapcsolódó fejlesztő munkáról, összefoglaltam a szükséges adatigényt a vizsgálat elvégzéséhez. Ezek után bemutattam az ensemble előrejelző modell eloszlásfüggvény előállítási módszereket. Vizsgálatom során a kalibráció az aktuális ensemble előrejelzés eloszlásfüggvényének a kalibrációját jelenti, mely az ECMWF ensemble előrejelzések beválásán igyekszik javítani a szisztematikus hibák kiszűrésével.

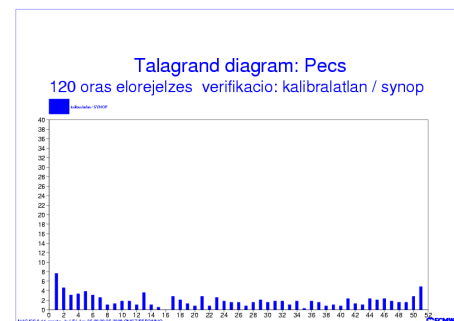
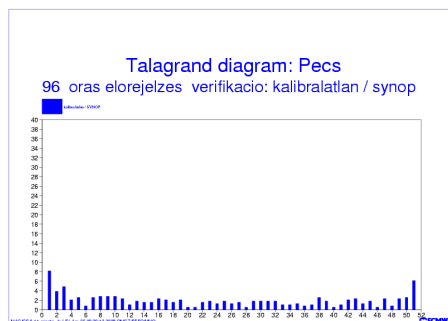
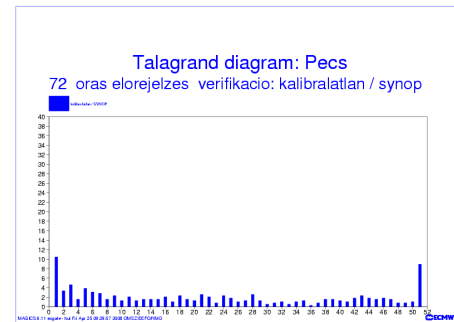
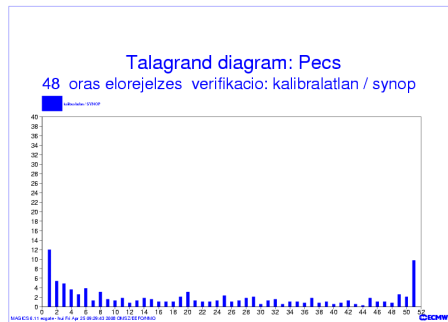
A verifikációt elsőként a kalibrálatlan v. nyers előrejelzésre végeztem el, ezzel igyekezve rávilágítani a valószínűségi előrejelzések szisztematikus hibáira. A vizsgált paramétereim a 2m-es léghőmérséklet és a 24 órás csapadékösszeg volt. A kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzés verifikációját három eszközzel valósítottam meg: a Talagrand diagram (ezen belül az outliers esetek számát is vizsgálva), az ún. ROC diagram, valamint a Brier Score. Ezen eszközök objektív képet adnak az előrejelző modell beválásáról, ám ezek mellett a jövőben érdemes további módszerekkel is elvégezni a verifikációt, hogy még részletesebb információt kaphassunk.

A kalibráció elvégzése után lehetőség nyílt a nyers és a kalibrált előrejelzések összehasonlítására. A 2m-es hőmérséklet szisztematikus hibái a kalibráció révén kisebb, nagyobb mértékben csökkentek, ezzel hozzájárulva a modell jobb beválásához. Megállapítható, hogy egy ilyen felszín közeli meteorológiai paraméter kalibrációjával az előrejelzéseinket szó szerint közelebb hozhatjuk a megfigyelésekhez. A csapadék kalibrációt mivel a téli félévre szorítkoztam, a rendelkezésre álló kétéves mintából eredő alacsony esetszám miatt nem tudtam elvégezni nagy csapadékos esetekre. Ezek vizsgálatát a későbbiekben – a mintanagyság növekedésével – orvosolni lehet. A vizsgált kis csapadékos esetek tükrében elmondható, hogy a kalibráció legnagyobb érdeme az előrejelzésben gyakran megjelenő fals kis csapadékok kiszűrése volt.

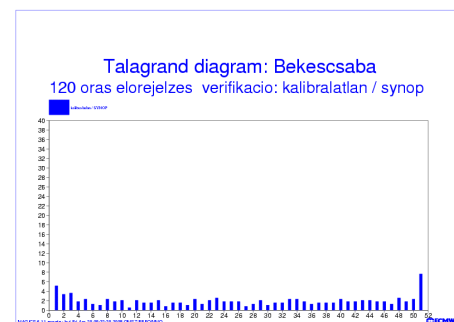
Összegzésképpen elmondható, hogy a kalibrációs eljárás jól tud javítani az ensemble előrejelzés bevéálásának minőségén és a későbbi modell klíma fejlesztések a bevéálást még jobban javíthatják. A jövőben más meteorológiai paraméterek (mint szélsébsesség, minimum és maximum hőmérséklet) kalibrálásával és további verifikációs módszerekkel kívánom bővíteni a vizsgálatot. Az ECMWF 32 napos VarEPS reforecast előrejelzések 2008. márciusi operatív beindulásával mindenképpen további érdemi javulás várható. A módszer továbbá alkalmas az ECMWF-től eltérő EPS rendszerek kalibrációjára is, mint például az OMSZban a közeljövőben operatív bevezetésre kerülő rövidtávú ALADIN EPS rendszer esetében.

Függelék

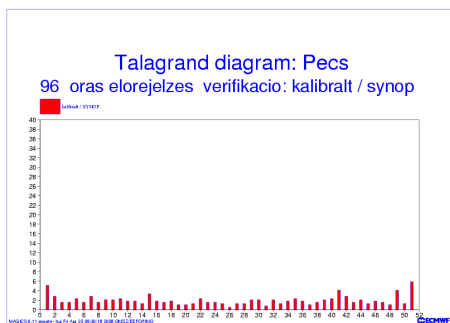
1. Függelék



1.1. ábra: Nyers EPS Talagrand Diagramok – Pécs (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)



1.2. ábra: Nyers EPS Talagrand Diagramok – Békéscsaba (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)



1.3. ábra: Reforecast klíma - Kalibrált EPS Talagrand Diagramok – Pécs (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

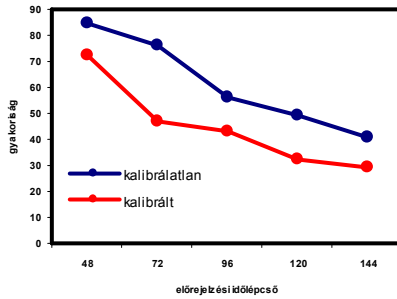


1.4. ábra: Reforecast klíma - Kalibrált EPS Talagrand Diagramok – Békéscsaba (48, 72, 96, 120 órás hőmérséklet előrejelzés)

2. Függelék

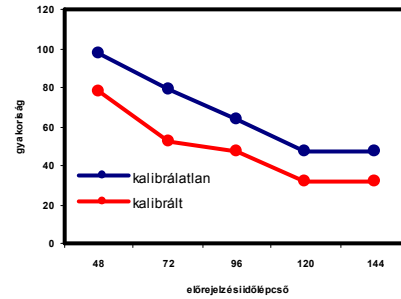
TALAGRAND Outliers - Pécs

Parameter - 2m hőmérséklet



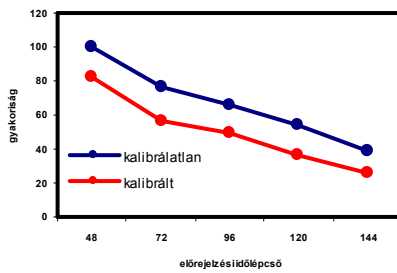
TALAGRAND Outliers -Szeged

Parameter - 2m hőmérséklet



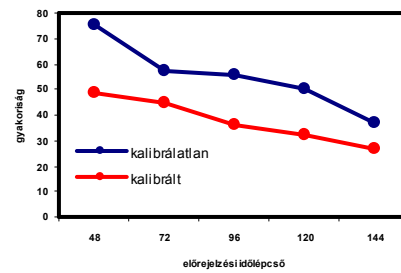
**TALAGRAND Outliers -
Nyíregyháza**

Parameter - 2m hőmérséklet



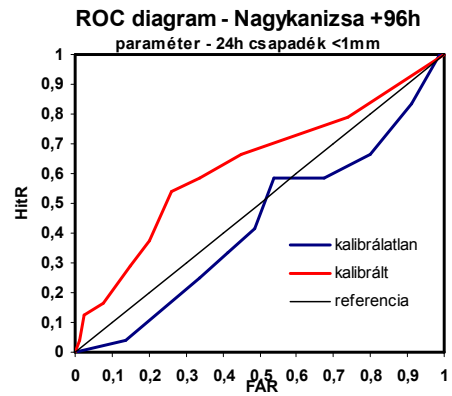
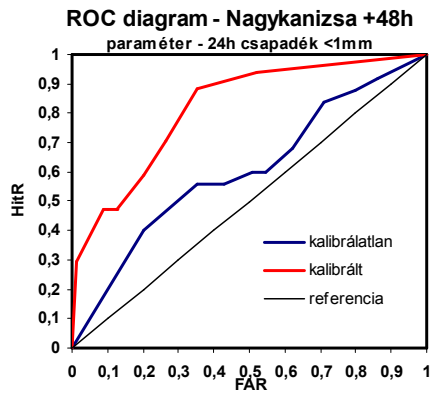
**TALAGRAND Outliers -
Békéscsaba**

Parameter - 2m hőmérséklet

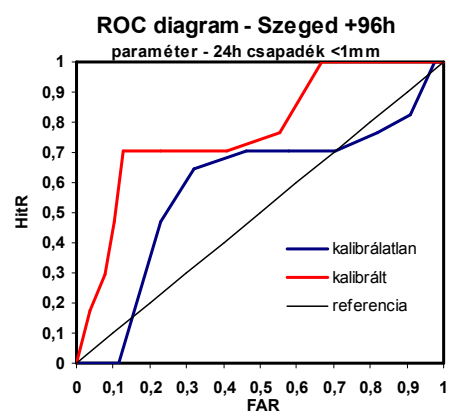
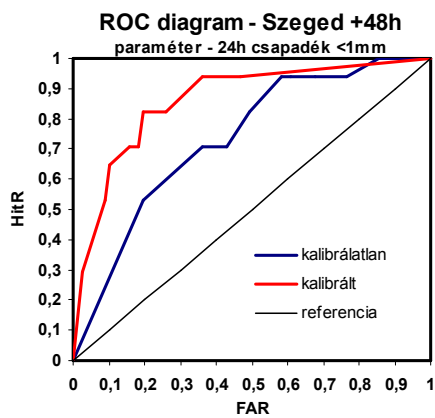


2.1. ábra: Talagrand Outliers esetek gyakorisága az előrejelzési időlépcső függvényében – 2 m-es hőmérséklet – (Pécs, Szeged, Nyíregyháza, Békéscsaba)

3. Függelék

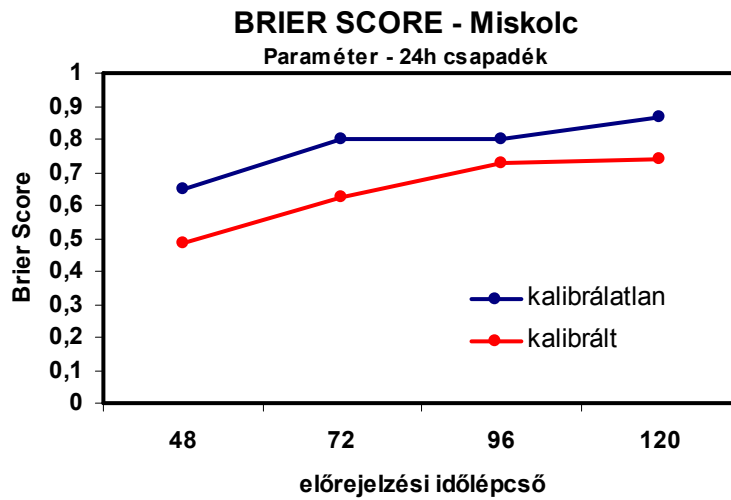


3.1. ábra: 24 órás csapadékösszeg – ROC diagram kalibrált EPS 1mm-es csapadékküszöb – Szeged (48 és 96 órás időlépcsőkkel)

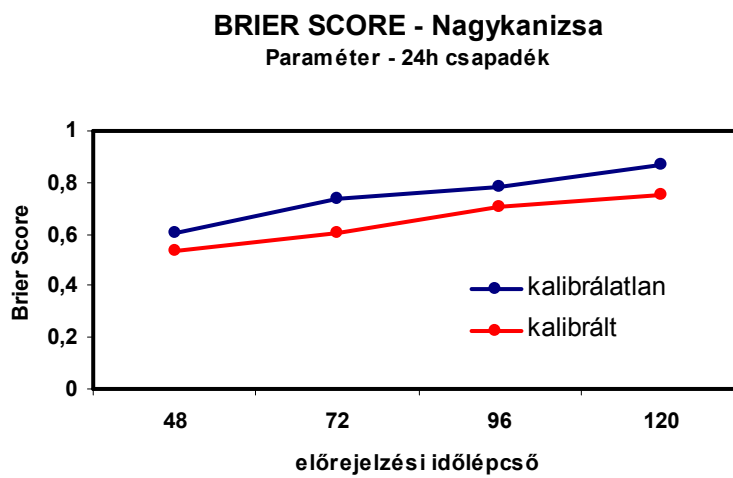


3.2. ábra: 24 órás csapadékösszeg – ROC diagram kalibrált EPS 1mm-es csapadékküszöb – Szeged (48 és 96 órás időlépcsőkkel)

4. Függelék

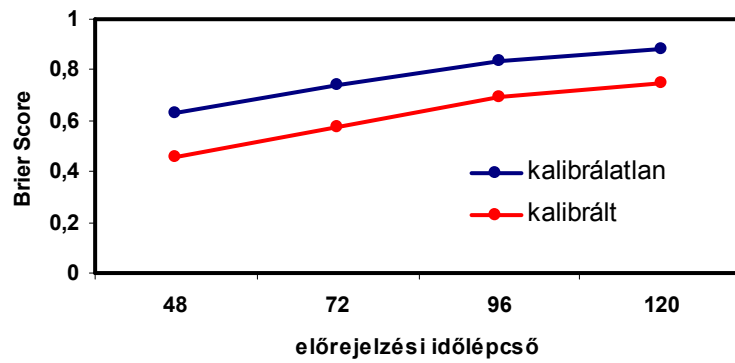


4.1. ábra: Brier Score – kalibrált (piros) és kalibrálatlan (kék) EPS előrejelzésre Miskolc (48, 72, 96, 120 órás időtáv)



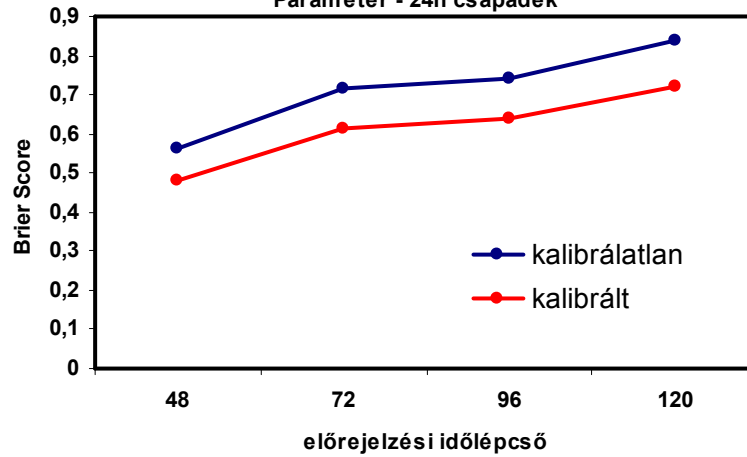
4.2. ábra: Brier Score – kalibrált (piros) és kalibrálatlan (kék) EPS előrejelzésre Miskolc (48, 72, 96, 120 órás időtáv)

BRIER SCORE - Sopron Paraméter - 24h csapadék



4.3. ábra: Brier Score – kalibrált (piros) és kalibrálatlan (kék) EPS előrejelzésre Sopron (48, 72, 96, 120 órás időtáv)

BRIER SCORE - Szeged Paraméter - 24h csapadék



4.4. ábra: Brier Score – kalibrált (piros) és kalibrálatlan (kék) EPS előrejelzésre Szeged (48, 72, 96, 120 órás időtáv)

Irodalomjegyzék

- 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.
- Csima G., 2003: A numerikus előrejelzés során alkalmazott utófeldolgozási és verifikációs eljárások. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, Budapest*, 89-97.
- Csima G., 2003: Utófeldolgozás és verifikáció. *Országos Meteorológiai Szolgálat* (<http://intra.met.hu>)
- Götz G., 2001: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, 411-413.
- Götz G., 2003: A numerikus időjárás prognosztika hőskora. Megemlékezés Neumann Jánosról, születésének századik évfordulóján. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok*, 8-17.
- Hagedorn, R., T.M. Hamill and J.S. Whitaker, 2007: Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble forecasts. Part I: surface temperature. *Mon. Wea. Rev. submitted*
- Hágel E., 2003: Szélsőséges időjárási helyzetek korai felismerése az Extreme Forecast Index használatával. *Szakdolgozat ELTE Meteorológiai Tanszék*
- Hágel, E. and Szépszó, G., 2004: Preliminary result of LAMEPS experiments at the Hungarian Meteorological Service. *ALADIN Newsletters* 26.
- Hamill, T.M., J.S. Whitaker and R. Hagedorn, 2007a: Exploring ensemble forecast calibration issues using reforecast data sets. *11th Workshop on Meteorological Operational Systems, ECMWF 12-26 November 2007, Reading*
- Hamill, T.M., J.S. Whitaker and R. Hagedorn, 2007b: Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble forecasts. Part II: precipitation. *Mon. Wea. Rev. submitted*
- Horányi A., 2002: A légkör számszerű előrejelzésének legfontosabb kutatási területei. 28. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, Budapest*, 27-38
- Horányi A., 2003: Numerikus előrejelzés: Nemzetközi áttekintés. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok*, 18-24.
- Horányi A., Ihász I. és Radnóti G., 1998: Az időjárás számszerű előrejelzése. *Természet Világa* 129., 1. különszám, 39-42.

- Ihász I.*, 2000: Magyarország 5 éve az Európai Középtávú Előrejelző Központ társult tagja. *Légkör*, 45. évfolyam, 16-18.
- Ihász I.*, 2003: Operatív középtávú időjárás előrejelző modellezés az ECMWF-ben. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok*, 119-128.
- Jolliffe, I.J. and B., Stephenson*, 2003: Forecast verification. A practioner's guide in atmosheric science. *John Wiley and Sons*
- Kaba M.*, 1995: Csatlakozásunk a Középtávú Időjárási Előrejelzések Európai Központjához. *Légkör*, 40. évfolyam 2. szám 34.
- Kiss G.*, 2003: Szezonális előrejelzések. *Országos Meteorológiai Szolgálat* (<http://intra.met.hu>)
- Lalurette, F and van G., der Grijn*, 2003: Ensemble forecasts: Can they provide useful early warnings? *ECMWF Newsletter*, 96, 10-18.
- Mile M.*, 2008: Az ECMWF ensemble előrejelzések kalibrációja. *OTDK dolgozat*
- Persson, A.*, 2000: User Guide to ECMWF forecast products. *Meteorological Bulletin* M3.2
- Práger T.*, 1982: Numerikus Prognosztika I. A hidrodinamikai előrejelzés elmélete. *ELTE Tankönyvkiadó*
- Radnóti G.*, 2003: A numerikus előrejelzés alapjai, numerikus módszerek. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok*, 25-40.
- Raftery, A. E., T. Gneiting, F. Balabdaoui, and M. Polakovski*, 2005: Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 1155-1174
- Raolt, B.*, 2001: MARS on the Web: a virtual tour. *ECMWF Newsletter*, 90, 9-17.
- Zsótér, E.*, 2006: Recent development in extreme weather forecasting. *ECMWF Newsletter*, 8-17.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a témavezetőmnek, Ihász Istvánnak az ismereteim megszerzésében és a munkában nyújtott rengeteg segítségért. Továbbá a Meteorológiai Szolgálat azon munkatársainak akik szintén hozzájárultak a dolgozat elkészüléséhez, valamint Bartholy Juditnak egyetemi konzulensemnek.