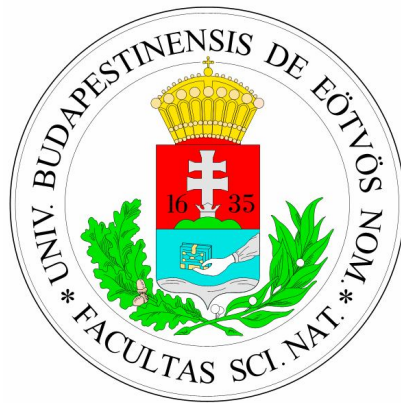


Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Meteorológiai Tanszék

## **Az ECMWF havi ensemble előrejelzéseinek kalibrációja**



**KÉSZÍTETTE:**

**Üveges Zoltán**  
V. éves meteorológus hallgató

**Témavezető:**

**Ihász István**  
(Országos Meteorológiai Szolgálat)

**Tanszéki konzulens:**

**Dr. Bartholy Judit**  
(ELTE Meteorológiai Tanszék)

Budapest, 2009

Bevezetés.....	3
1. Valószínűségi (ensemble) előrejelzések.....	4
1.1. A numerikus előrejelzés elmélete és gyakorlata.....	4
1.2. Az ensemble előrejelzési technika.....	6
1.3. Az ECMWF és ensemble előrejelzései.....	8
2. Az ensemble előrejelzéseken végzett kalibrációs eljárás.....	9
2.1. A kalibrációs eljárás folyamata.....	9
2.1.1. EPS előrejelzések.....	12
2.1.2. Megfigyelési klíma.....	15
2.1.3. Modellklíma.....	16
2.1.4. SYNOP adatok.....	17
3. Verifikációs módszerek.....	18
3.1. Folytonos meteorológiai változók.....	18
3.1.1. Talagrand-diagram.....	18
3.1.2. Négyzetes középhiba.....	19
3.1.3. „Eyeball verification”.....	19
3.2. Kategorikus előrejelzések.....	19
3.2.1. ROC-diagram.....	19
3.2.2. Brier Score és Brier Skill Score.....	21
3.2.3. Megbízhatósági diagram.....	21
4. Klímavizsgálatok.....	22
4.1. A megfigyelési- és a modellklíma összehasonlítása.....	23
4.2. A régi és új típusú modellklíma összehasonlítása.....	28
4.2.1. 12 UTC-kor mért 2m-es hőmérséklet.....	28
4.2.2. Havi csapadékösszeg.....	31
5. Eredmények.....	33
5.1. 12UTC-re előrejelzett 2m-es hőmérséklet.....	33
5.2. Napi minimumhőmérséklet.....	35
5.3. Napi maximumhőmérséklet.....	38
5.4. Napi csapadékösszeg.....	40
5.5. 12UTC-re előrejelzett 10m-es szélesség.....	45
5.6. Esettanulmányok.....	47
Összefoglalás.....	49
Függelékek.....	51
Irodalomjegyzék.....	54
Köszönetnyilvánítás.....	56

## Bevezetés

A XXI. század elejére a numerikus előrejelző modellek által szolgáltatott eredmények felhasználása mindennapos gyakorlattá vált a különféle időjárás-előrejelzések készítése során.

Bár a légkör viselkedését leíró matematikai, ún. kormányzó egyenleteket már több mint 150 éve ismerjük, alkalmazásuk lehetősége a meteorológiai előrejelzések készítésénél csak a múlt század első felében merült komolyabban fel (*Götz, 2001*). Napjainkban az előrejelzés-készítésnek, mint egy összetett, komplex rendszernek a numerikus előrejelzés talán a legdinamikusabban fejlődő részfolyamata.

Az első, sikeres numerikus modellek kifejlesztését a számítógép megjelenése tette lehetővé, de a mai napig maradtak a modellfejlesztők számára olyan feladatok és kihívások, melyek leküzdésével előrejelzéseik még pontosabbá, sikeresebbé tehetők. Ilyenek például a minél pontosabb kezdeti feltételek megadása modellek alapját képező differenciálegyenletek számára, a parametrizált fizikai folyamatok pontosabb leírása, vagy – mint szakdolgozatom esetében is - egy utófeldolgozási módszer kidolgozása.

Manapság a világ fejlettebb területein számos numerikus előrejelző központ működik, közülük a legnagyobb európai az angliai székhelyű ECMWF (European Centre of Medium Range Forecast – Európai Középtávú Előrejelző Központ). A központ determinisztikus és valószínűségi előrejelzéseket készít a Föld egész területére.

Céлом egy, az EMCWF valószínűségi (ensemble) előrejelzéseinek utófeldolgozására (kalibrációjára) kidolgozott eljárás továbbfejlesztése, mellyel reményeink szerint csökkenthető a viszonylag durva térbeli rácsfelbontás miatt fellépő hibák nagysága, s ezáltal elérhető a különféle meteorológiai paraméterekre vonatkozó prognózisok eredményességének további javulása hazánk területén. 2007-2008 során az ensemble előrejelzések kalibrációs lehetőségeit Mile Máté, 2008-ban végzett meteorológus hallgató vizsgálta (*Mile, 2008*). Rendelkezésére az ECMWF 2006 és 2008 márciusa között operatív használatban lévő EPS rendszerével készült, múltbeli előrejelzéseket tartalmazó ún. reforecast klímái álltak. Az ő munkáját folytatva, a következő fontosabb előrelépéseket tudtam megtenni:

- egy teljesen új, 2008 márciustól alkalmazott koncepció szerint készült reforecast klíma bevezetésre került;
- a reforecast- és megfigyelési klímákat alapos vizsgálatnak vetettem alá;

- a megfigyelési klímaadatok felhasználási módjának megváltoztatásával elsősorban az átmeneti időszakokban (tavasz, ősz) pontosabb eredmények születtek;
- a kalibrációt végző programcsomag egységesítése, univerzálissá tétele után több meteorológiai paraméter tágabb körben történő kalibrációs vizsgálata vált lehetővé;
- a kalibráció eredményességének vizsgálatát több új szempont illetve verifikációs eszköz alkalmazásával végeztem;
- foglalkoztam a kapott eredmények operatív előrejelző munkában való felhasználásának lehetőségeivel;
- a kapott eredmények vizuális megjelenítését többféle, a meteorológia területén gyakran használt módszerrel végeztem.

## 1. Valószínűségi (ensemble) előrejelzések

### 1.1. A numerikus előrejelzés elmélete és gyakorlata

Numerikus előrejelzések alatt az időjárásnak egy jövőbeli időszakára vonatkozó előrejelzését értjük, melyben az egyes meteorológiai állapothatározók (hőmérséklet, sűrűség, nyomás) előrejelzett értékét számítások útján, valamilyen matematikai módszer alapján állítják elő. Ezen előrejelzések egyik nagy csoportja az ún. hidrodinamikai módszerek alapján készül, melynek elméleti alapját a légkörben végbemenő változásokat, mozgásokat kormányzó fizikai törvények képezik (*Práger, 1982*).

L.F. Richardson volt az, aki elsőként próbálkozott tényleges számszerű előrejelzést készíteni saját maga által alkotott modellje segítségével 1922-ben. Modelljét a légköri folyamatok adiabatikus, súrlódásmentes közelítésével alkotta meg. Az alkotott többismeretlenes differenciál-egyenletrendszer számítógépek hiányában kézi úton, véges különbséges módszerrel oldotta meg. Eredményei katasztrofálisak voltak, és azok negatív visszhangja miatt utána hosszú ideig senki sem foglalkozott az időjárás számszerű előrejelzésével. Az első sikeres előrejelzés 1951-ben, a Charney, Fjortoft és Neumann által közösen alkotott barotróp örvényességi modellel készült, a sikerhez nagymértékben hozzájárult a Neumann János által 1945-ben konstruált ENIAC

számítógép alkalmazása. Munkájuk eredményessége indította el a numerikus modellek ugrásszerű és azóta is töretlen fejlődését.

A Newton-féle mozgásegyenletek irányonkénti komponensei, a tömegmegmaradás kontinuitási egyenlete, valamint a termodinamikai egyenlet kiegészítve az állapothatározók összefüggését leíró állapotegyenlettel teljes rendszert alkotnak. Ez a rendszer alkotja a numerikus előrejelzési modellek fő vázát. A légkörben jelenlévő, térben és időben változó mennyiségű vízgőz alakulását szintén egy tömegmegmaradási egyenlet szabályozza. Az említett fizikai egyenletek differenciális alakjait együttesen a légkör hidro-termodinamikai egyenletrendszerének vagy kormányzó egyenletrendszernek nevezzük (Práger, 1982).

A kezdeti feltételek minél pontosabb ismerete alapkövetelmény, hiszen ezen értékek az egyenletrendszerrel együtt matematikai szempontból egy kezdeti érték- és határfeltétel problémát leíró vegyes feladatot alkotnak.

A numerikus előrejelzések készítésének gyakorlati szempontból fő szakaszai a következők:

- Az ún. adatasszimilációs folyamat során a kezdeti- és peremfeltételeket határozzák meg a modell számára oly módon, hogy az integrálási tartományt lefedő, 3 dimenziós térbeli rács egyes pontjaiba a lehető legpontosabb, és az egyenletekkel konzisztens értékek kerüljenek. Ehhez szükség van a mérési adatok rácspontra történő interpolációjára és korábbi modelleredmények (ún. „first guess”) felhasználására.
- A következő lépés az egyenletrendszer megoldása, a modell integrálása. Mivel az egyenletek analitikusan nem, csak numerikus módon oldhatóak meg, mely azt jelenti, hogy a folytonos térbeli és időbeli differenciál operátorok helyett véges differenciás közelítésekkel vagy megfelelően illesztett analitikus függvények deriválásával számolunk.
- Az utolsó lépés a nyers modelleredmények utófeldolgozása. Az utólagos feldolgozásra azért van szükség, mert a felhasználók igényeit esetenként a nyers adatok nem elégítik ki (pl. előrejelzők számára fontos paraméterek származtatása szükséges az előrejelzett paraméterekből), továbbá lehetővé válik a modell egyes speciális hibáinak, hiányosságainak orvosolása (Csima, 2003). Az utófeldolgozás szakaszához tartozik az eredmények vizuális megjelenítése is.

A fent említett három fő lépés általánosan jellemző a numerikus modellek készítésére, noha azok egyes jellemzőik, tulajdonságaik alapján meglehetősen eltérnek

egymástól. Például térbeli felbontás alapján megkülönböztetünk globális és korlátos tartományú modelleket. Az előbbiek fontos szerepet töltenek be a nagyskálájú, szinoptikus léggöri folyamatok időbeli alakulásának előrejelzésében, illetve peremfeltételeket biztosítanak a korlátos tartományú modellek számára. Az utóbbiak kisebb (kontinensnyi vagy országnyi) területet fednek le, s az ily módon „megspórolt” számítástechnikai kapacitás a térbeli és időbeli felbontás növelésére fordítható.

A felbontás növekedésével azonban figyelembe kell venni olyan kisebb skálájú folyamatokat (pl. konvekció), melyek már nem hanyagolhatóak el a modellezésnél. A modellezési feladat során hatalmas könnyítést jelentő kvázi hidrosztatikus közelítés néhány kilométeres rácsávolságnál már nem alkalmazható. A térbeli felbontás alapján tehát a modelleket hidrosztatikus és nem hidrosztatikus osztályokba sorolhatjuk.

## **1.2. Az ensemble előrejelzési technika**

A hidro-termodinamikai egyenletrendszer numerikus megoldásához szükséges kezdeti- és peremfeltételek kellően pontos megadását számos hibaforrás gátolja: egyrészt az egyik fő adatforrást jelentő szinoptikus mérések műszerhibára, illetve reprezentációs hibára visszavezethető okokból nem rendelkeznek kellő pontossággal, másrészt – a gyors fejlődés és informatikai kapacitásbővülés ellenére – az előrejelzési modellek a mai napig biztos és állandóan fellépő hibák forrásai a kezdeti- és peremfeltételek megadása során (*Wallace et al.*, 2006). Ráadásul a légkör kaotikus viselkedésű dinamikai rendszer, állapotának előrejelzését különösen közép- illetve hosszabb időtáv esetén sztochasztikus problémaként kell kezelni. Ez azt jelenti, hogy a légkör dinamikai instabilitása következményeként az egymástól csak igen kismértékben különböző kezdeti feltételekkel készített előrejelzések közötti eltérések az idővel rohamosan nőnek. (*Götz*, 2001). Ezen okból kiindulva az ensemble előrejelzések készítésénél egyszerre sok kezdeti feltételt állítanak elő, így gyakorlatilag egy időben több előrejelzést (modellfuttatást) is készítenek. A cél nem egyfajta átlagot képezni az előrejelzett paramétereiből, hanem valószínűségi információt kapni azok eloszlásáról – más szóval képet alkotni az előrejelzés bizonytalanságáról (*Hágel*, 2008).

A kezdeti feltételek előállításának legjobb és egyben legbonyolultabb számítást igénylő módszere a kezdeti perturbációk származtatása, mely történhet véletlenszerű perturbációkból az optimális perturbációk „kitenyésztésével” (breeding módszer), illetve egy sajátérték feladat megoldásával egy adott norma szerinti leggyorsabban

fejlődő perturbációk meghatározására (szinguláris vektorok módszere). Másik lehetőség a megfigyelések, mérések perturbálása, mely az adatasszimiláció során felhasznált mérési adatokra a mérési hibán belüli mértékű perturbáció ültetését jelenti.

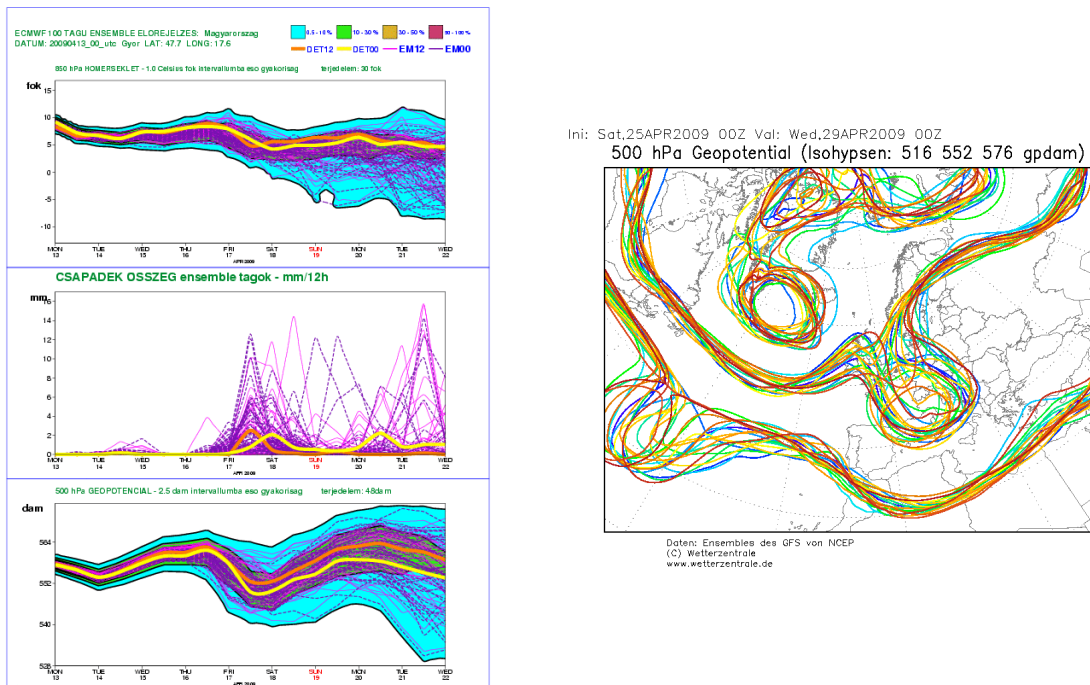
Szükséges megjegyezni, hogy az ensemble készítésére a kezdeti értékek perturbációján kívül más, kevésbé számításgényes, de egyben még kevésbé pontos eredményeket nyújtó módszerek is léteznek. Például különböző modellközpontok determinisztikus futtatásaiból készül a multi-modell ensemble előrejelzés. A multi-analízis módszer során a különböző előrejelző központok által készített, vagy egyazon központban, de különböző technikával előállított analíziseket gyűjtik össze és ezek mindegyikéből egy-egy előrejelzést indítanak.

A több előrejelzés egyidejű készítése természetesen jelentősen, akár sokszorosára is megnövelheti a számítástechnikai erőforrás-igényt, melynek csökkentése érdekében szükséges néhány kompromisszumos megoldást alkalmazni. Az ensemble rendszerben futtatott modell térbeli felbontása éppen ezért durvább, mint a perturbálatlan, eredeti kezdeti feltételekkel alkalmazott (determinisztikus) modellé (Ihász, 2008). A csökkentett rácsfelbontás egyben gyenge pontja is az ensemble technikának. Például az ECMWF ensemble rendszerében a Magyarország területét lefedő rács felbontása zonális irányban kb. 40, meridionális irányban kb. 55km. Ez a felbontás elég durva ahhoz, hogy az adott rácspontra és azok környezetére vonatkozó földrajzi sajátosságok reprezentációja a modellben ne kellő pontossággal történjen. Ennek következtében bizonyos meteorológiai folyamatok, jelenségek előrejelzésének pontatlansága megnő (például a talajmenti fagyok prognosztizálása hazánk délnyugati és északkeleti részében).

Az előbb említett okokból tapasztalható, állandó jelleggel fellépő hibákat nevezzük szisztematikus hibáknak. Az ilyen típusú hibák elsősorban a planetáris határrétegben lépnek fel, így a kalibrálni kívánt meteorológiai paramétereket ennek figyelembe vételével célszerű kiválasztani. A különböző utófeldolgozási eljárások többek között ezeket a problémákat próbálják meg orvosolni. Egy ensemble előrejelzés elméletileg akkor lesz szisztematikus hibától mentes, ha egy esemény bekövetkezését ugyanakkora valószínűséggel adja, mint amekkora relatív gyakorisággal az be is következik.

Az eredményeket sokféle módon lehet szemléltetni. Az egyik legelterjedtebb módszer az ún. fáklya-diagramon történő ábrázolás (**1. ábra**), melyen egy időpontban indított ensemble futtatás egyes tagjainak időbeli alakulása látható a modell egyetlen rácsponjtjában. Hasonló típus a meteogram is, ezen azonban az ensemble tagok

eloszlásának nevezetes statisztikai mérőszámai (kvartilisek, medián, stb.), illetve azok előrejelzési időintervallumon belüli alakulása szerepel. A „spagetti-diagram” (1. ábra) viszont az előrejelzési időszak egyetlen pillanatában ábrázolja az adott meteorológiai paraméter izovonalaira (pl. fő izobárszintekre) vonatkozó ensemble tagok térbeli eloszlását.



1. ábra: Példa fáklya-diagramra (bal) és spagetti-diagramra (jobb)

A bélyeg diagramon szintén egyetlen időpontban láthatjuk az egyes tagok előrejelzéseit egymás mellé- és fölrendezve, 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.

### 1.3. Az ECMWF és ensemble előrejelzései

Egy globális modell futtatása hatalmas számítástechnikai kapacitást igényel, melynek költségvonzata óriási. Ráadásul minden országnak saját globális modellt kifejleszteni és futtatni sürgősszerűen, ezért gyakran nemzetközi együttműködés keretében történik. Hasonló kooperáció eredményeként jött létre az Európai Középtávú előrejelző Központ (ECMWF) is, melyhez egyre több európai ország csatlakozik.



Székhelye London mellett, Readingben található. Az első ECMWF által készített, középtávú előrejelzés 1979-ben készült el. Hazánk elsőként a kelet-közép-európai országok közül, 1994. július 1-én vált társult taggá.

Az ECMWF EPS (Ensemble Prediction System) rendszer középtávú valószínűségi előrejelzései 1992 decembere óta készülnek operatív használatra. 2006 novemberétől naponta kétszer, 00 és 12 UTC-kor készülnek 15 napos középtávú EPS előrejelzések az ún. VaREPS (VARIABLE Resolution Ensemble Prediction System) rendszer keretében (Buizza *et al.*, 2008). Havi futtatások (32 napos előrejelzések) 2004 óta léteznek (Vitart, 2004), ezek kezdetben teljesen függetlenül álltak elő a középtávú EPS rendszertől, viszont egy óceán-légkör csatolt modell alkalmazásával készülnek. Az egyesített középtávú és havi előrejelző rendszer 2008 március 13. óta van operatív használatban (Vitart *et al.*, 2008). Az így „ötözött” új rendszer, mely jelentős erőforrás-megtakarítást, az előrejelzési intervallum első 15 napjában megnövelt térbeli felbontást eredményez, a VaREPS-Monthly elnevezést kapta. Futtatása minden csütörtökön 00UTC időpontban történik, 51 tagból áll: 50 ensemble-tag és egy, ún. kontrollfutás, amely a determinisztikus modell kezdőfeltételeivel fut, de a térbeli felbontása az ensemble futtatásokéval egyezik meg.

Ensemble technikával szezonális (7 hónapos) előrejelzések is futnak az ECMWF-nél, operatív formában 1998 júniusától. 2007 márciusa óta az évszakos EPS rendszer 41 tagú, és havonta állítják elő őket. Ezek a típusú prognózisok szintén egy óceán-légkör csatolt modell segítségével készülnek (Kiss, 2003).

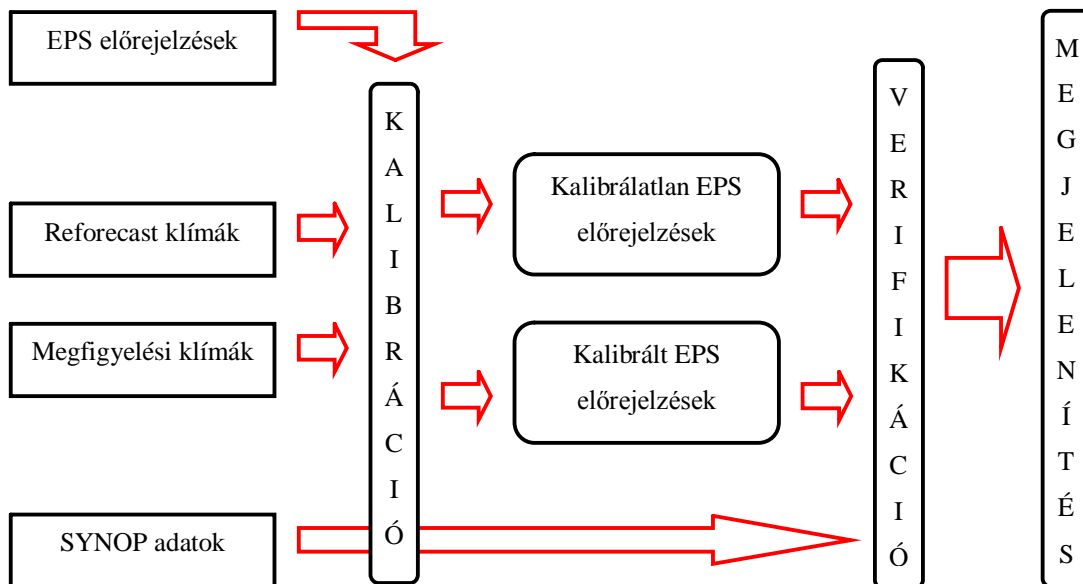
## **2. Az ensemble előrejelzéseken végzett kalibrációs eljárás**

### **2.1. A kalibrációs eljárás folyamata**

Már említettem, hogy az előrejelzések szisztematikus hibáit a modelleredmények utófeldolgozásával bizonyos mértékben orvosolni lehet. Az utófeldolgozást az ECMWF közvetlenül nem végzi el, hanem az egyes tagországok maguk döntenek el, hogy amennyiben szükséges, hogyan alkalmazzák valamelyik módszert. A kalibrációt, mint utófeldolgozási eljárást többféleképpen is meg lehet valósítani, melyek eltérő eredményességgel alkalmazhatóak az egyes meteorológiai paraméterekre. Ilyen módszer lehet például Bayes becslésen alapuló (Raftery *et al.*, 2005), a regressziós (Hamill *et al.*, 2007), vagy az általunk alkalmazott eloszlásfüggvényen alapuló módszer

is. Munkám során azért az ún. eloszlásfüggvény-kalibrációt alkalmaztam, mert ez az eljárás minden meteorológiai paraméterre egyaránt használható, és nem igényel bonyolult matematikai műveleteket (Mile, 2008). Az eloszlásfüggvény-kalibráció ötlete Francois Lalaurette-től és Horst Bottger-től (ECMWF) származik 2000 júliusából. Az eljáráshoz szükséges adathalmaz főbb összetevői a következők:

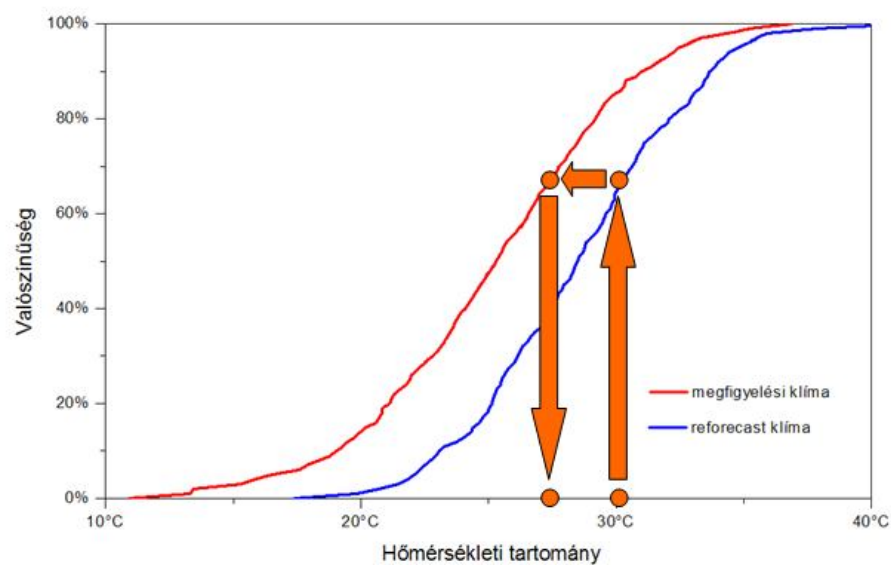
- Elő kell állítani egy adott meteorológiai paraméter megfigyelt értékeinek eloszlásfüggvényeit, így rendelkezünk kell statisztikailag elegendően hosszú időszakra és a kalibrálni kívánt helyre vonatkozó adatsorral (megfigyelési klíma eloszlásfüggvénnyel).
- Szintén rendelkezünk kell a paraméternek ugyanarra a konkrét helyre és lehetőleg hasonló hosszúságú időszakra vonatkozó, az aktuális modellverzió múltbeli előrejelzéseit tartalmazó (ún. reforecast előrejelzésekből alkotott) havi eloszlásfüggvényével (a modellklímával).
- Természetesen szükségünk van a kalibrálni kívánt földrajzi helyhez legközelebb eső modellrácspontra vonatkozó ensemble előrejelzésekre.
- Ha verifikálni is szeretnénk a kalibrált előrejelzéseket, az előrejelzett időpontokra vonatkozó, kalibrálni kívánt helyeken mért illetve megfigyelt adatok is nélkülözhetetlenek.



2. ábra: Az utófeldolgozás munkafolyamatának sematikus ábrája

Az általam végzett utófeldolgozási munkafolyamat szemléltetéséhez egy sematikus ábrát is készítettem, feltüntetve annak főbb fázisait, valamint az előbb felsorolt adatbázis komponenseit (**2. ábra**).

Egy aktuális ensemble előrejelzés szűkebb értelemben vett kalibrációja úgy történik, hogy az ensemble minden tagjára megvizsgáljuk: egy adott időpontra előrejelzett paraméter értékéhez milyen előfordulási valószínűség tartozik a modellklíma-eloszlásfüggvényben, és ehhez a valószínűséghez hozzákeressük a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényében szereplő azonos valószínűséghez tartozó megfigyelési értéket (**3. ábra**). Ez az érték lesz előrejelzésünk kalibrált értéke.



**3. ábra:** A kalibrációs eljárás folyamata. Kék színben látható a modellklíma, pirosban a megfigyelési klíma eloszlásfüggvénye.

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. Ebből kiindulva pedig kísérletet teszünk arra, hogy a modell szisztematikus hibáit csökkentsük. A kalibrálni kívánt ensemble előrejelzés minden egyes tagját külön kalibráljuk, és minden értékhez külön-külön keresünk valószínűségeket a két klíma eloszlásfüggvényeiben (**1. függelék**). Így 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.

A következőkben részletesen ismertetem a kalibrációhoz szükséges adathalmazok tulajdonságait és főbb sajátosságait, valamint azokat a rajtuk végrehajtott szükséges változtatásokat, amelyeket alkalmaznunk kellett ahhoz, hogy az ECMWF-nél 2008 márciusában bevezetett új modellverzióval készült előrejelzések kalibrálása széles körben, felhasználóbarát módon lehetővé váljon.

### **2.1.1. EPS előrejelzések**

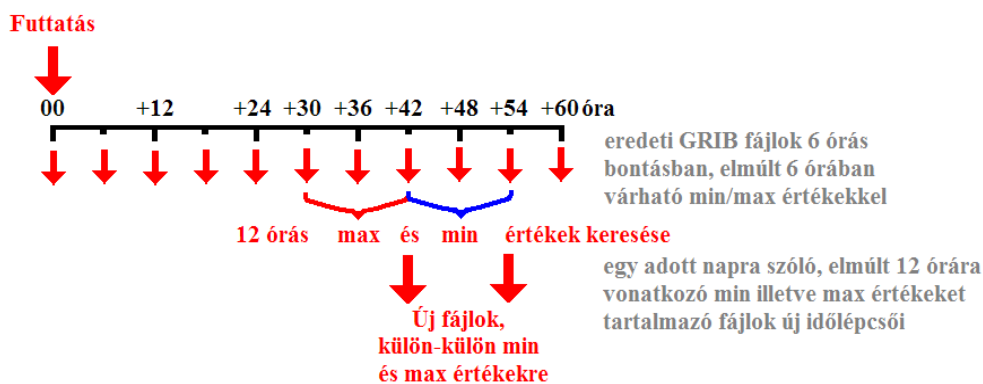
Az előrejelzések az ECMWF MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) rendszeréből származnak, mely az adatokat a gyakorlatban jól bevált GRIB fájlformátumban tárolja. A fájlokat az óriási adatmennyiséget tároló rendszerről akár webes felületen keresztül, akár UNIX script segítségével le lehet kérni. A lekért GRIB fájlok kezelése, dekódolása, valamint a vizsgált mérőállomásokhoz legközelebb eső rácsponti értékek kinyerése az OMSz-ban, UNIX scriptek és GRIBEX dekódoló program használatával történt.

A munkám hatékonyságát nehezítő körülmények közül az egyik legjelentősebb az volt, hogy a kalibrációs eljárást lebonyolító programcsomag nem volt felkészítve különböző meteorológiai paraméterekkel való futtatásra. A UNIX rendszer alatt futó scriptek és FORTRAN programok átdolgozásával mostanra lehetővé vált, hogy öt meteorológiai paraméter (2m-es hőmérséklet, minimum- és maximumhőmérséklet, szélesség és csapadék) vizsgálatára az eljárás univerzálisan használható lett.

Az egyes paraméterekre vonatkozó előrejelzések fájljainak előállítására és a kalibráció a következő módon valósult meg:

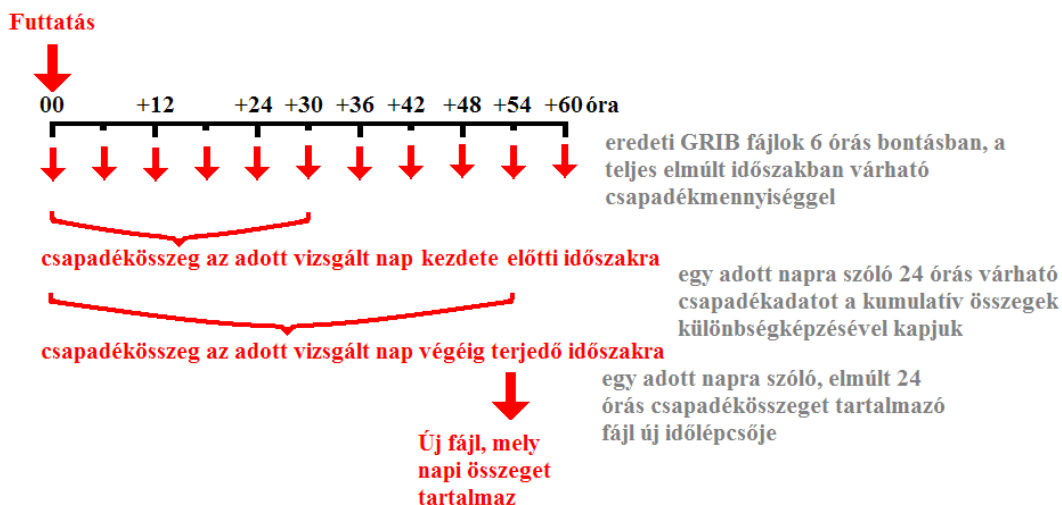
- 12UTC-kor mért 2m-es hőmérséklet: mint minden paraméterre vonatkozó előrejelzés esetében, itt is a 00UTC-kor indított előrejelzéseket kalibráltam, ez esetben +60 és +324 óra közötti időlépcsőkben (futtatást követő 2-13. napra szóló előrejelzések). Ahogy azt korábban említettem, ennél hosszabb, azaz havi előrejelzések csak csütörtökönként készülnek, így ilyen időtávú előrejelzések verifikációja a kis esetszám miatt – csak 52 heti futtatás – nem volt lehetséges.
- 2m-es minimum- és maximumhőmérséklet: az előrejelzések 6 órás bontásban álltak rendelkezésemre (00, 06, 12, és 18UTC-s időpontokban). Minden fájl tartalmazott az elmúlt 6 órában várható maximum és minimumhőmérsékletre vonatkozó információkat, de ha mi naponkénti kalibrációt szeretnénk elvégezni, akkor 4 lekért fájlból kell kiszámítani a megfelelő értékeket. A számítás az OMSz-ban készülő Napijelentés c. kiadványban megadott időintervallumokkal

összhangban készült el, azaz a maximumhőmérséklet egy adott napra a 06 és 18 UTC között bekövetkező maximális értéket jelenti, míg a minimumhőmérséklet a 18UTC és másnap 06UTC között előforduló legalacsonyabb értéket reprezentálja. Így, az egyesített fájlokban egy 00UTC-kor indított modellfutásnál a futtatás napját követő első nap esetén +42 óra lett a maximum-, és +54 óra a minimumhőmérséklet időlépcsője, és ezekre vonatkozó fájlok tartalmazták az előző 12 órában mért legmagasabb, illetve legalacsonyabb értékeket. Az alkalmazott időlépcsők könnyebb áttekintését teszi lehetővé a **4/a. ábra**. Az általam kalibrált maximumhőmérsékleti előrejelzések időlépcsői +66 és +330 óra közöttiek, míg a minimumhőmérsékleteké +78 és +342 óra közöttiek voltak, tehát a kalibrációt ebben az esetben is a futtatást követő 2- 13. napra vonatkozó előrejelzéseken végeztem.



**4/a. ábra:** A minimum és maximum előrejelzéseket tartalmazó fájlok előállítás

- Csapadék: külön fájlok vonatkoznak a nagyskalájú folyamatokból származó, illetve a konvektív csapadékokra vonatkozó adatokra. Mivel a szinoptikus mérések során nem tesznek ezek között különbséget, a két fajta adat értékét összegezni kellett az adott időpontokra a lekérést követően. Speciális tulajdonság, hogy kumulált összegeket tartalmaznak a fájlok, tehát például egy +342 órás előrejelzésben a teljes addig eltelt időszakra prognosztizált mennyiség szerepel. Így, ha napi csapadékösszegeket szeretnénk kalibrálni, akkor különbséget kell képezni az adott nap és az azt megelőző nap kumulált csapadékmennyiségéből. A két kumulált összeg különbségét tartalmazó értékek azután egy új fájlban lettek tárolva. A többi paraméternél is alkalmazott szemléletet követve, a kalibrált előrejelzések időlépcsői +78 és +342 óra közöttiek voltak (lásd **4/b. ábrát**).



**4/a. ábra:** A csapadék-előrejelzéseket tartalmazó fájlok előállítás

- 12 UTC-kor, 10m-en mért szélesség: a MARS adatbázisban a szélre vonatkozó adatok u és v vektorkomponensként, külön azonosítószám alatt tárolódnak, így lekérés után először a két szélvektor nagyságából kellett szélességet számolni és egy új fájlban eltárolni. Ezt követően kalibráció a 2m-es hőmérséklettel teljesen azonos módon történt, a kalibrálás intervalluma +60 órától +324 óráig terjedt ki.

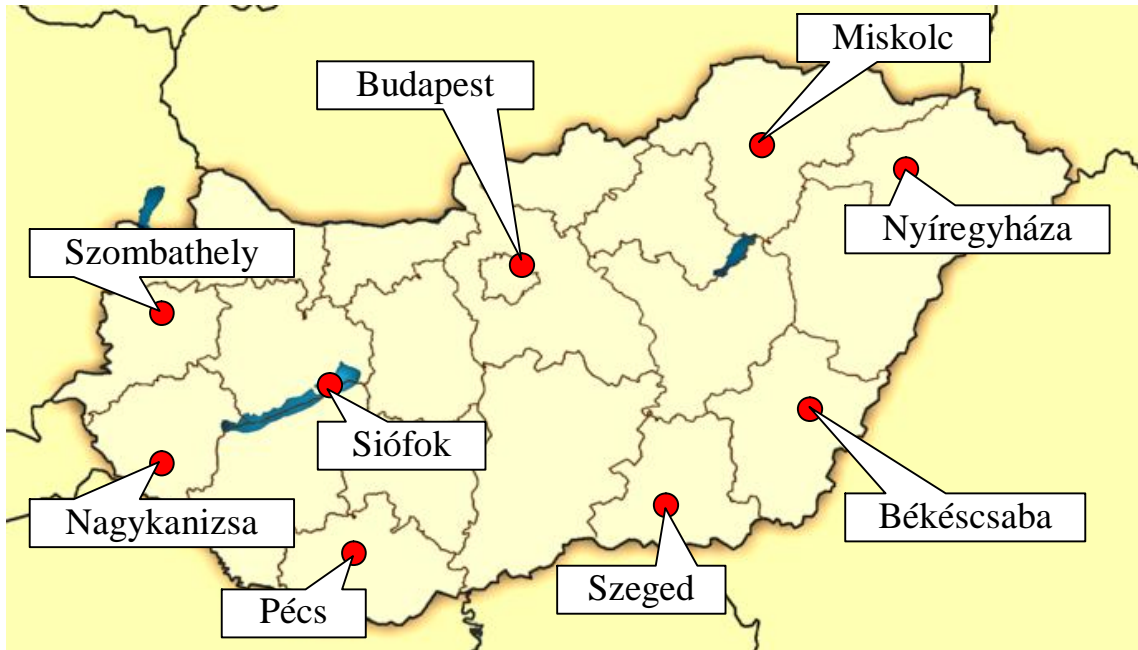
A **1. táblázatban** szereplő példával rövid összefoglalást szeretnék nyújtani az egyes paramétereknél alkalmazott időléptékek szemléletmódjáról.

Meteorológiai paraméter	Megfigyelés időpontja	Előrejelzés időlépcsője
<b>2m-es hőmérséklet</b>	01.03. 12UTC	+60 óra, konkrét érték
<b>Maximumhőmérséklet</b>	01.03. 18UTC	+66 óra, előző 12 óra adataiból
<b>Minimumhőmérséklet</b>	01.04. 06UTC	+78 óra, előző 12 óra adataiból
<b>10m-es szélesség</b>	01.03. 12UTC	+60 óra, konkrét érték
<b>Csapadékösszeg</b>	01.04. 06UTC	+78 óra, előző 24 órás összeg

**1. táblázat:** Január 1-én 00UTC-kor futtatott, január 3-ára, azaz az első kalibrált napra vonatkozó előrejelzések és a hozzájuk tartozó megfigyelések tulajdonságai

### 2.1.2. Megfigyelési klíma

A megfigyelési klíma többszörösen ellenőrzött, megbízható megfigyelési adatokkal rendelkező szinoptikus állomásokra az eloszlásfüggvényeket az Országos Meteorológiai Szolgálat Távközlési és Informatikai Főosztály Szoftverfejlesztési Osztályán (TIFO/SZFO) állították elő. 2009. év eleji állapot szerint 9 magyar város megfigyelési klíma eloszlásfüggvénye áll rendelkezésemre (**5. ábra**).



**5. ábra:** A 9 magyar város, melyre a megfigyelési klíma rendelkezésre állt

A munkába való bekapcsolódásomkor a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényei a 1990-2007-es referenciaidőszak alapján készültek, havi bontásban. Tehát, ha a vizsgálandó napunk például március elseje, paraméterünk pedig a hőmérséklet, akkor az eloszlás a márciusi hőmérsékleti mérésekből készült el. Ez nyilvánvalóan torz eredményeket ad, hiszen március az úgynevezett átmeneti időszak hónapja, azaz nagy a hőmérséklet-különbség a hónap eleje és vége között (júliusban, januárban nincs akkora jelentősége). Ezért egy új módszert vezettem be: a vizsgált időszak adott napjára két hónapot veszünk figyelembe úgy, hogy az aktuális és a legközelebb eső hónap közepétől való távolság függvényében a két szomszédos hónap eloszlásfüggvényeinek értékpárjait súlyozottan vesszük figyelembe.

A megfigyelési klíma referenciaidőszakát munkám során hozzáigazítottam a modellklíma referenciaidőszakához. Szükséges ugyanis, hogy a megfigyelési- és modellklíma lehetőleg azonos időintervallumra vonatkozzon, mert – ahogy az a

modellklímák vizsgálata során kiderült – az egyes referenciaidőszakok éghajlati paramétereit között jelentős eltérések lehetnek.

Az eloszlásfüggvények elsődleges vizsgálatánál kiderült, hogy például a csapadék és a szél eloszlásánál a függvény gráfja nem kellő mértékben folytonos, hanem kisebb-nagyobb ugrások, lépcsők találhatók rajtuk. Előbbi esetében a jelenséget az okozhatja, hogy csapadék nem minden nap fordul elő, így eloszlásfüggvénye relatíve kevesebb értékből készül, mint például az ugyanarra a referenciaidőszakra vonatkozó hőmérsékleti eloszlásfüggvény. A szél eloszlásfüggvényénél pedig a problémát az jelentette, hogy az részben tizedes pontosságú, részben egész értékekre kerekített adatokból készült, így ez utóbbi értékeknél a függvénynek ugrása volt. A jelenséget mindenképp csillapítani kellett, hiszen csillapítás nélkül a kalibrált ensemble értékek az ugrásoknál lévő függvényértéknek megfelelően csupán néhány érték kategóriába csoportosultak volna. A csillapítás tulajdonképpen az eloszlásfüggvények simítása volt oly módon, hogy mozgó átlagolást alkalmaztam az egyes valószínűségekhez tartozó függvényértékeknél a szomszédos 5-5 tag felhasználásával.

### 2.1.3. Modellklíma

A modell (reforecast) klímák készítése az ECMWF-ben az aktuális ensemble előrejelzésekkel párhuzamosan történik, hiszen korábbi modellverziókkal előállított klímák már nem reprezentatívak egy új EPS rendszerre. Az ECMWF EPS rendszerének ismertetésekor már említettem, hogy 2008 márciusa óta egy teljesen új koncepció alapján készülnek az ensemble előrejelzések. Mivel a havi előrejelzések hetente egyszer készülnek, így a modellklímák előállítása is heti egy időpontban történik. Az új modellklíma főbb tulajdonságait, illetve a 2006 és 2008 között operatíván előállított modellklímától való fontosabb eltéréseket az **2. táblázat** mutatja.

	Régi modellklíma	Új modellklíma
<b>Referencia időszak</b>	1971-2000	1990-2007
<b>EPS tagok száma</b>	1 (csak kontroll)	5 (kontroll + 4 EPS tag)
<b>Futtatás (reforecast)</b>	naponta, 12 UTC-kor	csütörtökönként, 00 UTC-kor
<b>Előrejelzési időszak hossza</b>	+48 óra, 6 órás bontás	+760 óra, 6 órás bontás



<p style="text-align: center;"><b>Az OMSz-ban előállított eloszlásfüggvény-fájlok struktúrája</b></p>	<p style="text-align: center;">havi klímaeloszlás-fájlok, 900 adatból készült eloszlásfüggvény (30 év, egy hónapban átlagosan 30 nap, 1 kontroll tag)</p>	<p style="text-align: center;">klímafájlok csütörtöki napoknak megfelelő dátumozással, +/-2 hetes időablakkal, 450 adatból készült eloszlásfüggvény (18 év, 5 csütörtöki nap, 5 tag)</p>
---	---	--

**2. táblázat:** A modellklímák közötti fontosabb különbségek

A VaREPS-Monthly ensemble rendszer keretében gyártott modellklíma referenciaidőszaka csak 18 év, viszont 5 EPS tagot tartalmaz (Raoult, 2001), és az előrejelzési időszak hossza 32 napig terjed ki. Az eloszlásfüggvényeinek előállításához szükséges, múltbeli EPS előrejelzésekből készült modellklíma-adatok szintén a MARS adatbázisból származnak, felépítésük teljesen azonos az előrejelzés-fájlokéval. A lekért meteorológiai paraméterekről, illetve azok felhasználási sajátosságairól az EPS előrejelzéseket bemutató 2.1.1-es pontban már volt szó. A magyarországi megfigyelőállomásokhoz legközelebb eső rácspont adatainak kinyerése a fájlokból ismét az OMSz egyik számítógépén, GRIBEX dekódoló szoftver segítségével történt.

Egy klímaeloszlás-fájl struktúrája a következő módon néz ki: 18 évre visszamenőleg tartalmaz adatokat a futtatás napjának dátumára vonatkozóan, de mivel ily módon csak időlépcsőként  $18 \cdot 5 = 90$  EPS értékből készülne, +/- 2 hetes időablakot alkalmaztam, azaz az aktuális hetit megelőző, illetve azt követő két héten készült, azonos időlépcsőre vonatkozó modellklíma értékeket is felhasználtam a fájlok előállításánál. Így az eloszlásfüggvény már 450 értéket reprezentált, de mint az később a modellklímák vizsgálatánál kiderült, egyes meteorológiai paraméterek esetében még ez a szám sem volt elegendő. Az eloszlásokat alkotó adatok számát úgy próbáltam meg növelni, hogy az adott nap időlépcsőjéhez tartozó értékek mellett a szomszédos 3-3 nap időlépcsőinek értékeit is figyelembe vettem. Tehát például, egy +132 órás 2m-es hőmérsékleti eloszlásfüggvény fájlja a +60, +84, +108, valamint a +156, +180 és +204 órás adatokat is tartalmazza. Ezzel a módosítással az eloszlásfüggvény már 3150 értékből készülhet.

#### **2.1.4. 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 Légekördinamikai Osztály OVYSIS objektív verifikációs rendszerében is.

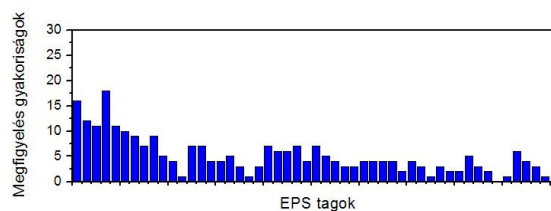
### 3. Verifikációs módszerek

A valószínűségi előrejelzések verifikációja meglehetősen eltér a determinisztikus előrejelzések bevalásának vizsgálatától, ugyanis itt nem egyetlen előrejelzés értékét szembesítjük a megfigyelési értékkel, hanem előrejelzések együttesét. A leginkább megfelelő módszerek kiválasztása ezenkívül függ a verifikálni kívánt meteorológiai paramétertől is. Az ensemble előrejelzések verifikálása gyakran úgy történik, hogy azokat valamilyen szempont alapján kategorikus (ún. igen-nem) előrejelzéssé alakítják át. Az eredmények bevalásáról precízebb képet alkotni általában csak több módszerrel elvégzett vizsgálat után lehetséges. A következőkben részletesen ismertetném az általam használt verifikációs eljárásokat.

#### 3.1. Folytonos meteorológiai változók

##### 3.1.1. Talagrand-diagram

Ez a diagramtípus jól képes szemléltetni az EPS modell előrejelzési tartományának értékeit, annak szóródását, az ún. ensemble spread-et. A diagram vízszintes tengelye 51 intervallumot tartalmaz, melyből 49 zárt, a végeken pedig 1-1 nyílt (**6. ábra**). Az intervallumok – az ensemble sorba rendezése után – együttesen alkotják azt a teljes értéktartományt, melyet az EPS – tagok előrejelzett értékeiből elő lehet állítani. A diagram oszlopai azoknak az eseteknek a gyakoriságát mutatják, amelyek a mért érték két szomszédos ensemble tagja közé esnek. 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, fölé- vagy alábecslést jelent. U alakú diagram esetén pedig az ensemble spread nem elég széles. A szélső, nyílt



**6. ábra:** Szisztematikus felülbecslést mutató Talagrand-diagram

intervallumokba eső megfigyeléseket outlier eseteknek nevezzük, a cél ezek számának minimalizálása. Az előbb említett outlier esetek száma persze akkor is csökken, ha az ensemble szórását növeljük. Ezzel azonban nő az előrejelzés bizonytalansága, így a pusztán Talagrand-diagrammal a kalibrációs eljárás sikerességét bizonyítani nem tudjuk, ráadásul számos meteorológiai paraméter verifikációjánál (szél, csapadék) nem alkalmazható (Üveges, 2008).

### **3.1.2. Négyzetes középhiba**

Az előrejelzés pontosságának mérésére szolgál az átlagos négyzetes hiba (MSE), mely az előrejelzett és mért értékek különbség négyzeteinek átlagával egyenlő (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. Nagy előnye, hogy a nagyobb hibákat szigorúbban „bünteti” (WRCP, 2008).

Tökéletesen sikerült előrejelzés esetén az MSE nullával egyenlő. A kalibrációs eljárás tehát ebből a szempontból akkor tekinthető sikeresnek, ha a kalibrált előrejelzések MSE értéke alacsonyabb, mint a kalibrálatlanoké.

### **3.1.3. „Eyeball verification”**

A statisztikai elméletekre kevésbé épülő, kevésbé alapos, de gyors és egyszerű verifikációs módszer a vizuális kiértékelés (ún. eyeball verification). Ilyen esetekben közös diagramon ábrázoljuk az adott paraméter előrejelzett és megfigyelt értékeit, pusztán szemünket használva következtetünk az előrejelzés jóságára vagy éppen pontatlanságára. A diagram fajtája lehet a meteorológia területén gyakran használt fáklya-diagram illetve meteogram.

## **3.2. Kategorikus előrejelzések**

### **3.2.1. ROC-diagram**

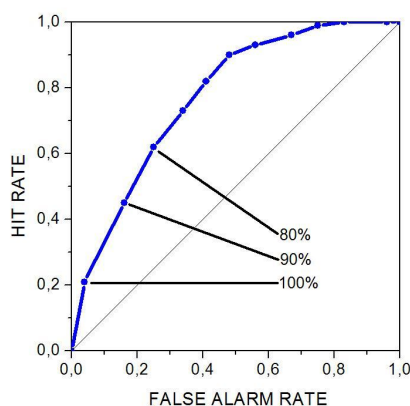
Kétkategóriás (igen-nem) előrejelzések beválását szemléltető diagramtípus, mellyel egy konkrét meteorológiai esemény bekövetkezését tudjuk vizsgálni. Legyen ez az esemény a kánikulai nap ( $T_{\max} > 30^\circ\text{C}$ ) előfordulása. Az ensemble előrejelzés kategorikussá alakításához még definiálnunk kell valószínűségi küszöböt, mely alatt

az eseményt nem előrejelzettnek, felette előrejelzettnek tekintjük. Tegyük fel, hogy a küszöbünket először 60%-ban állapítjuk meg. Ha a bekövetkezett kánikulai meleget az előrejelzésünk 60%-nál nagyobb valószínűséggel jelezte előre (tehát az ECMWF ensemble rendszerénél 50-ből 30 tag 30°C magasabb maximumot adott), akkor az előrejelzés sikeres volt (Hit), ha ennél kisebbel, akkor alábecsülte (Missed). Természetesen, ha nem volt 30°C-nál melegebb, de ezt a tagok több mint 60% jelezte, akkor is sikertelen volt az előrejelzésünk (False alarm), ha pedig 60%-nál kisebb volt az előrejelzési valószínűség, és a kánikula sem következett be, akkor viszont ismét sikeres előrejelzést készítettünk (Correct negative) (3. táblázat).

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

3. táblázat: Esemény besorolása kategorikus előrejelzéseknél

A fenti esetek számából számolható a hibás riasztások aránya,  $FAR = F / (F + CN)$  és találatok aránya,  $HR = H / (H + F)$ . Ha ezeket az értékeket meghatároztuk több valószínűségi küszöbhez, pl. 0 és 100% között 10%-onként, előállíthatjuk az ún. ROC (Relative Operating Characteristic) diagramot. A diagram x értékei a FAR értékek, y értékei pedig a HR értékek lesznek, és az egyes küszöbökhez tartozó (x,y) számpárok egy görbét rajzolnak ki a diagramon. Előrejelzésünk annál jobb, minél nagyobb a görbe alatti terület, azaz küszöbönként a FAR minél kisebb, a HR minél nagyobb (7. ábra).



7. ábra: ROC diagram

### 3.2.2. Brier Score és Brier Skill Score

A négyzetes középhiba számításos módszer és az előbb ismertetett kategorikus előrejelzéssé történő átalakítás ötvözete a Brier Score számítás. Ennél a módszernél is egy időjárási 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.

A Brier Skill Score kiszámolásával az ensemble előrejelzés sikeressége még egyértelműbben megállapítható:

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

ahol  $BS$  a verifikálandó előrejelzés Brier Score-ja,  $BS_{ref}$  pedig egy referencia előrejelzése. Referenciaként a kalibrálatlan előrejelzéseket használtam. Értéke  $-\infty$  és 1 között lehet, ha 0-nál kisebb, akkor azt mondhatjuk, hogy az előrejelzés nem jobb, mint a referencia prognózis.

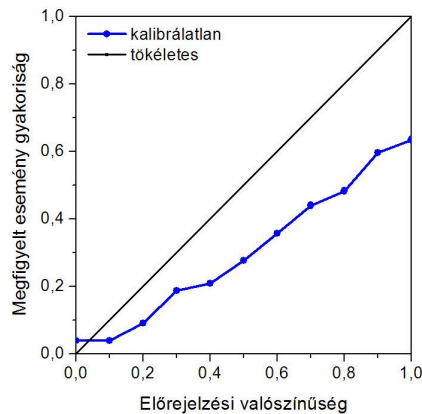
### 3.2.3. Megbízhatósági diagram

E diagramtípus elkészítéséhez először definiálnunk kell a módosított Brier Score fogalmát. Az újabb megközelítés alapján a 0-tól 100%-ig terjedő valószínűségi tartományt fel kell osztanunk részekre, és az eredeti Brier Score-ban szereplő  $p_i$  valószínűségeket e résztartományokba kell sorolnunk, és saját valószínűségeik helyett a résztartományra jellemző átlagos valószínűséget vesszük. A megfigyelésekre vonatkozóan megszámloljuk, hogy az egyes résztartományokba eső előrejelzések esetén hányszor fordult elő egy konkrét időjárási esemény. Így a következő formulát kapjuk:

$$BS = (1 / N) \cdot \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^{N_k} (p_k - o_{ki})^2 ,$$

ahol  $T$  a résztartományok száma,  $N_k$  a  $k$ -adik résztartományba eső előrejelzések száma,  $p_k$  a  $k$ -adik intervallumba eső előrejelzések átlagos valószínűsége,  $o_{ki}$  a  $k$ -adik intervallumban az eső megfigyelések relatív gyakoriságát mutatja. A megbízhatósági diagramon éppen a relatív gyakoriságokat ábrázoljuk ( $y$  tengely) valószínűségi résztartományonként ( $x$  tengely).

A tökéletes előrejelzés megbízhatósági görbéje épp a diagram átlóját alkotja – ebben az esetben pont annyiszor következett be az esemény, amekkora valószínűséggel azt előrejeleztük. Ha a görbe az átló alatt halad, akkor előrejelzésünk fölébecsül, tehát túl nagy valószínűséggel prognosztizálja az esemény bekövetkezését, ha az átló felett húzódik, akkor alábecslésről van szó (**8. ábra**).



**8. ábra:** Fölébecslést mutató megbízhatósági diagram

## 4. Klímavizsgálatok

A kalibrációk megkezdése előtt alapos vizsgálatnak vettem alá a klímaeloszlás-függvényeket. A vizsgálatnak több célja is volt. Az eloszlásfüggvények gráfjának tanulmányozásakor derültek ki az eloszlásfüggvények készítésekor elkövetett hibák, mint például a megfigyelési klíma eloszlásai esetében **2.1.2.** pontban leírt függvényérték-ugrálás jelensége.

A klímák összehasonlításával jobb, nem kevésbé fontos tapasztalatokat gyűjthetünk. A megfigyelési- és modellklímák összevetéséből például képet alkothatunk a modell viselkedéséről az egyes meteorológiai paraméterek és mérőállomások tekintetében, feltárulhatnak azok a szisztematikus hibák, melyek csökkentése érdekében alkalmazzuk az egész procedúrát. Ugyanakkor előzetes információt is kapunk a kalibráció várható eredményességéről.

A **2.1.3.** pontban jellemeztem régi és az általam is felhasznált új típusú modellklímák közötti főbb eltéréseket. Összehasonlításukkal fény derülhet az utóbbi évtizedekben esetlegesen bekövetkezett éghajlat-módosulásokra, mivel a két modellklíma referenciaidőszaka meglehetősen eltér egymástól (1971-2000 illetve 1990-

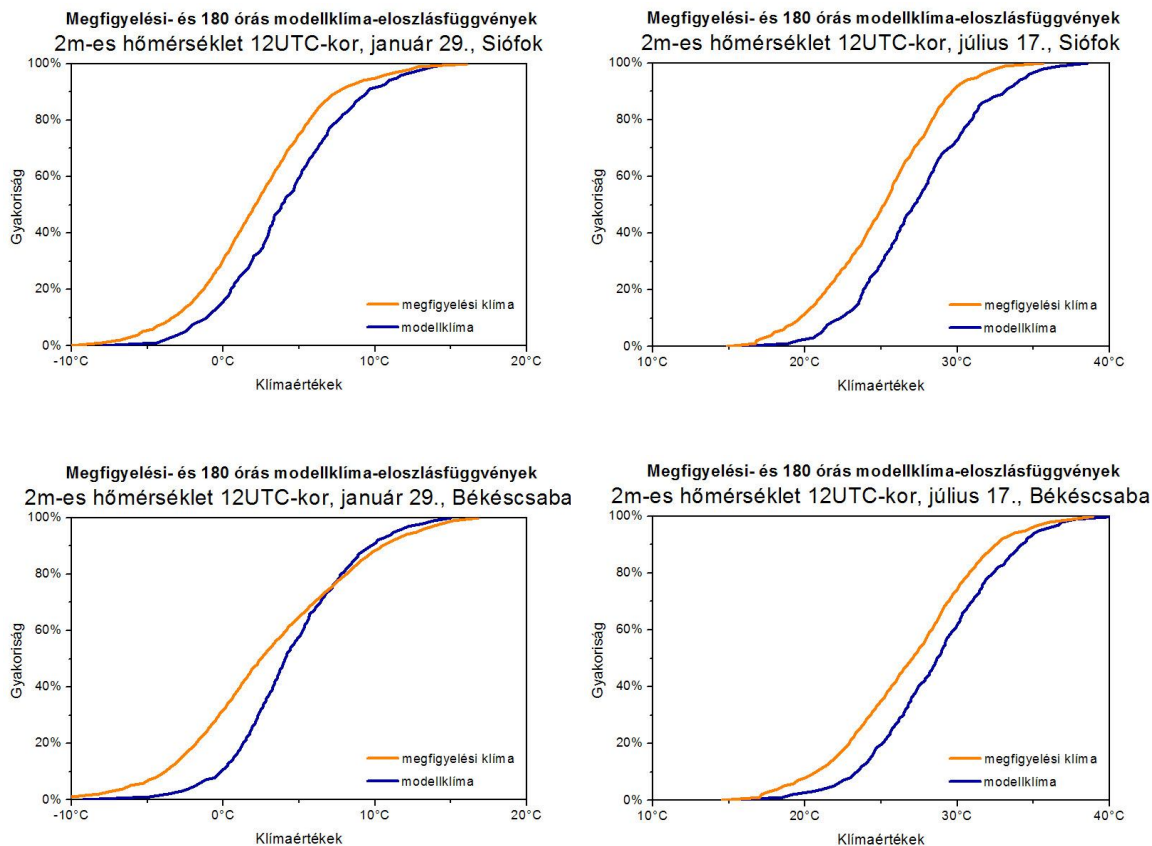
2007). Ha csak a közös referenciadőszakukat (1991-2000) tekintjük, a modellek viselkedése közötti különbségek feltárására nyílik lehetőség.

#### **4.1. A megfigyelési- és a modellklíma összehasonlítása**

Számos esetet megvizsgálva arra a következtetésre jutottam, hogy bármely kalibrált meteorológiai változó (2m-es hőmérséklet, 10m-es szélesség, minimum- és maximumhőmérséklet, valamint csapadékösszeg) esetén lehet találni olyan állomást, illetve időszakot, amikor a mért ill. előrejelzett értékek eloszlásfüggvényei között nagy különbség mutatkozik. Ezeket az eltéréseket dolgozatomban mind az öt paraméter esetében két-két állomásra, az év két napjára vonatkozó megfigyelési- és modellklímák grafikus összehasonlításával szemléltetem. A két időpont minden esetben egy téli (január 29.), illetve egy nyári (július 17.). Azért választottam ki ily módon ezeket a napokat, mert a meteorológiai paraméterek éves viselkedésében rejlő különbségeket is szerettem volna kimutatni.

A 12UTC-kor, 2 méteres magasságban mért hőmérséklet pontos előrejelzését nehezítheti napi menetének fluktuációja (hirtelen ugrásokat okozó (gomoly)felhősödés, záporok, illetve hidegfront átvonulások miatt), a nyári időszakban nagyobb napi hőmérséklet-ingás, de éppúgy a hőmérséklet napi menetének pontatlanabb modellezése is. Természetesen a földrajzi fekvés illetve a felszíni tényezők is szerepet játszhatnak: például, ha az előrejelzés helyszíne nagy hőtehetetlenséggel bír, folyamatosan párologó víztömeg mellett található. Különösen igaz ez akkor, ha a térbeli felbontás nem elég finom ahhoz, hogy a vízfelület, mint sajátos felszínforma reprezentációja megjelenjen a modellben. Az általunk vizsgált állomások közül Siófokon találkozhatunk ezzel a jelenséggel (**9. ábra**).

A júliusi siófoki eloszlásfüggvényen megfigyelhető, hogy elsősorban a 25°C, de még inkább a 30°C körüli értékek jóval ritkábban következnek be - vélhetően a Balaton párolgásának hűtő hatása miatt - mint ahogy azt a modell előrejelzései becsülik. Békéscsaba januári grafikonját szemlélve valószínűleg egy egészen más okból származó eltérést figyelhetünk meg az eloszlások között: a valóságban sokkal több esetben van fagy még 12UTC-kor is, mint ahogy a modell azt előrejelzi. Az ok pedig feltehetően a téli hónapokban gyakorta fellépő, ún. hideg légpárnás helyzetekben keresendő, melyet egy durva felbontással rendelkező modell gyakran nem képes jól előrejelezni.



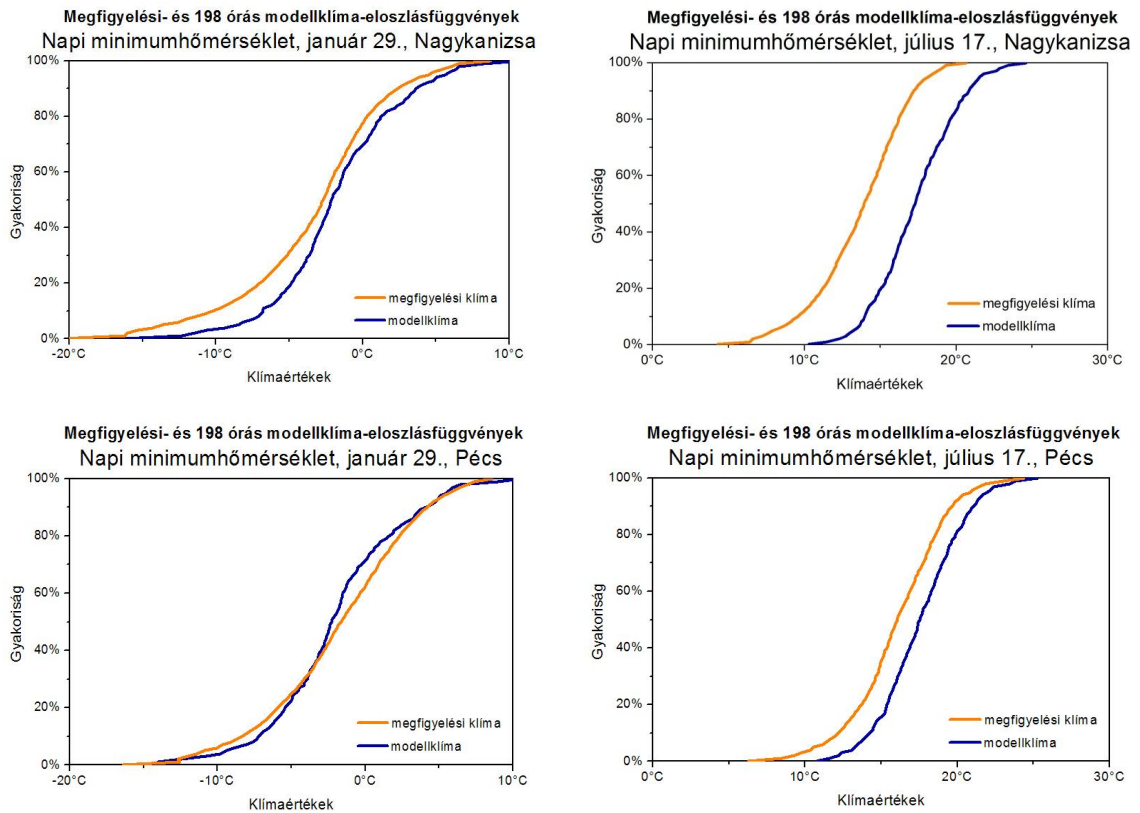
**9. ábra:** A megfigyelési- és modellklíma eloszlásfüggvényei Siófokon és Békéscsabán, 12UTC-s hőmérséklet

Az éjszakai legalacsonyabb hőmérsékletek pontos előrejelzése még a szokásosnál is nagyobb kihívás a modellek számára. A hőmérsékleti viszonyok kialakulását ugyanis alapvetően a felszín közelében található vékony légréteg nedvességi viszonyai és a felszíni, földrajzi adottságok jelentősebb mértékben határozzák meg, amelyek sokkal nagyobb térbeli inhomogenitással rendelkeznek, mint a térség felsőbb rétegeit kitöltő vastagabb légtömeg. Ennek következtében a szisztematikus hibák megjelenése szinte törvényszerű, és különösen igaz ez durvább felbontású modellek esetén. Szép példa erre Nagykanizsa mérőállomása (**10. ábra**), mely egy sekély völgyben helyezkedik el, ennél fogva egyes szélirányok esetén szélvédett helynek minősül. Így derült, szélcsendes éjszakákon a levegő erősebben lehűlhet.

Pécsett eltérő az eloszlásfüggvények egymáshoz képesti viszonya a téli és nyári időpontban. Míg júliusban nagyjából egyenletes szisztematikus felülbecslés tapasztalható, addig a januári görbék esetén a modell enyhe fölébecslése jellemző a zordabb ( $-5$  és  $-10^{\circ}\text{C}$  közötti) értékeknél, és jelentősebb alulbecslése az enyhébb ( $0^{\circ}\text{C}$  körüli) értékek tartományában. Ez a példa jól mutatja, hogy azért szükséges minden



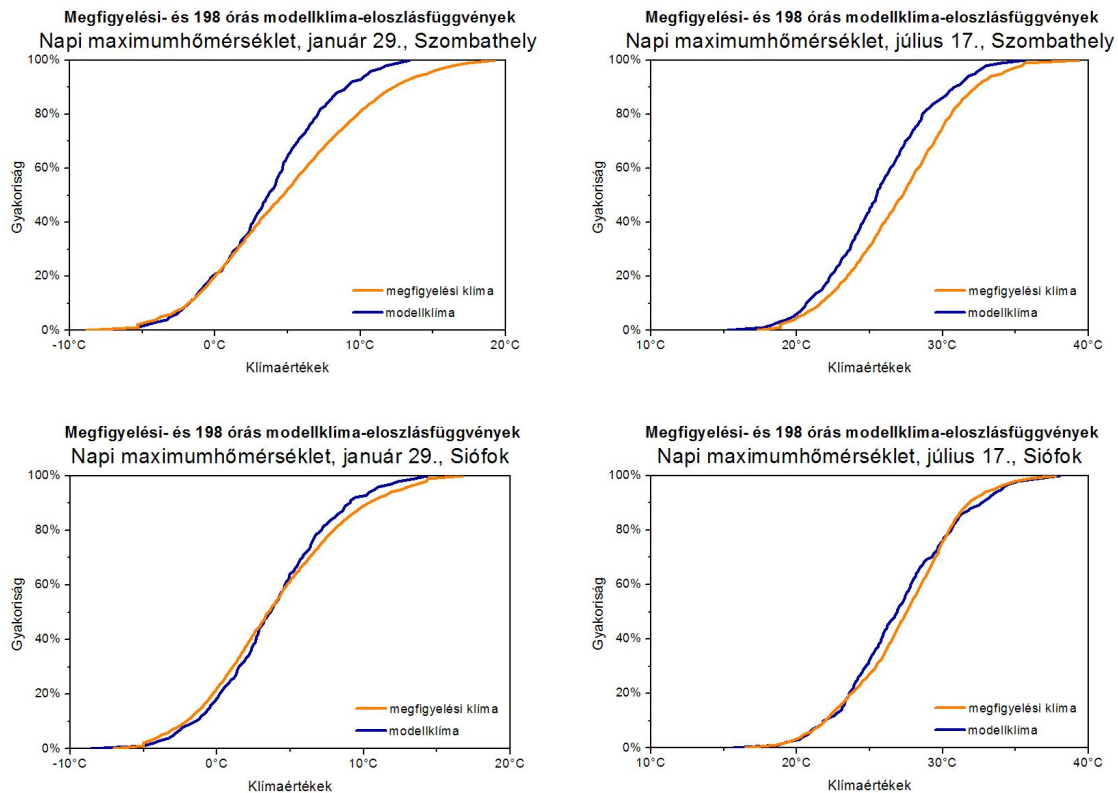
értékhez külön-külön keresünk valószínűségeket a két klíma eloszlásfüggvényeiben, mert a modellklíma eloszlásának egyszerű eltolása a kalibráció pontatlanságát okozná bizonyos értéktartományokban. Figyelemre méltó, hogy Pécs minimumhőmérsékleti értékei mind a téli, mind a nyári esetben jó pár fokkal alacsonyabbak, mint a nagykanizsai értékek, pedig a két mérőállomás között nincs nagy távolság.



**10. ábra:** A megfigyelési- és modellklíma eloszlásfüggvényei Nagykanizsán és Pécsen, napi minimumhőmérséklet

A napi maximumhőmérséklet értékének kialakulását elsősorban a felhőzet, a csapadék és az légtömeg-advekciónak erőssége határozzák meg elsősorban, de alakító szerep jut a földrajzi tényezőknek (pl. vízfelszín közelsége) is. Szombathelyen – és más, az ország különböző részein fekvő állomásokon is - a téli időszakban a magasabb értékeknél durván alábecsül a modell, nyáron az egész értéktartományra jellemző az alábecslés, de mértéke árnyalatnyival kisebb (**11. ábra**). Érdekes módon Siófokon ez alig tapasztalható, valószínűleg ez annak tudható be, hogy a Balaton közelsége, mint hűtő tényező „kalibrálta” a megfigyelt értékeket az előrejelzettekhez egészen közel.

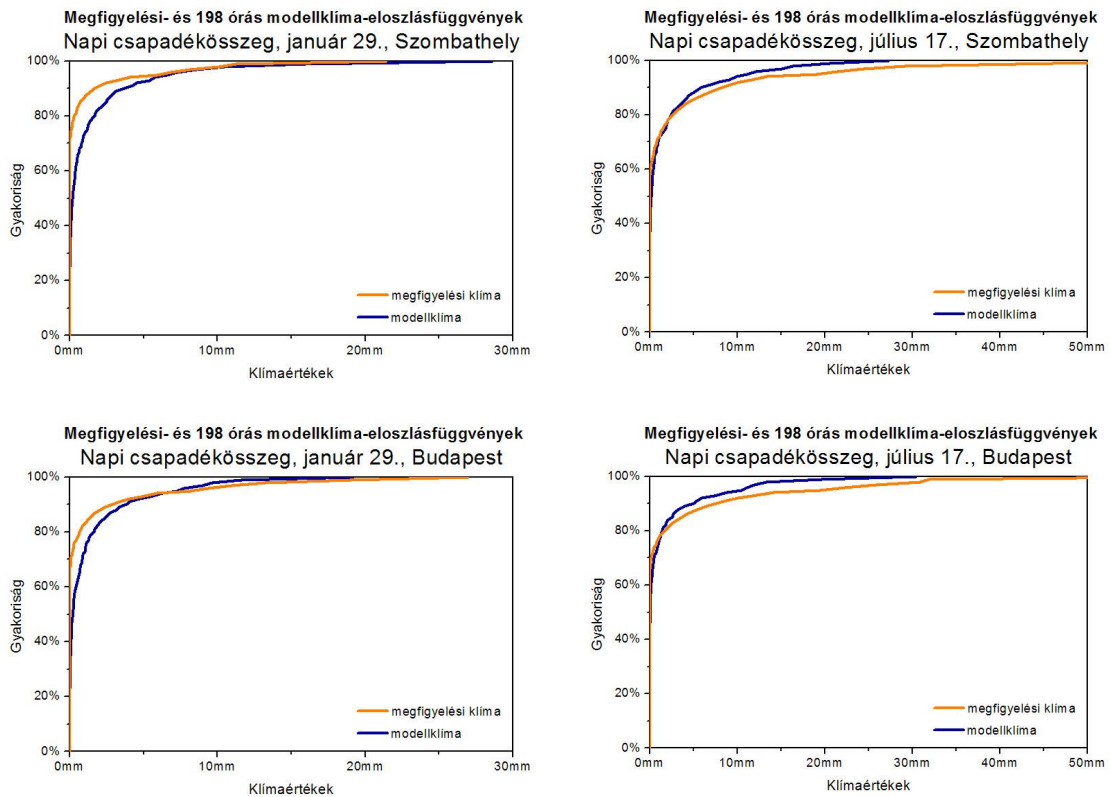
Láttuk, hogy míg a 12UTC-re előrejelzett hőmérsékletet a modell felülbecsüli, addig a maximumokat túl alacsonyra adja. Az ellentmondásra lehetséges magyarázat a már korábban is említett napi hőmérsékleti menet pontatlan modellezése.



**11. ábra:** A megfigyelési- és modellklíma eloszlásfüggvényei Szombathelyen és Siófokon, napi maximumhőmérséklet

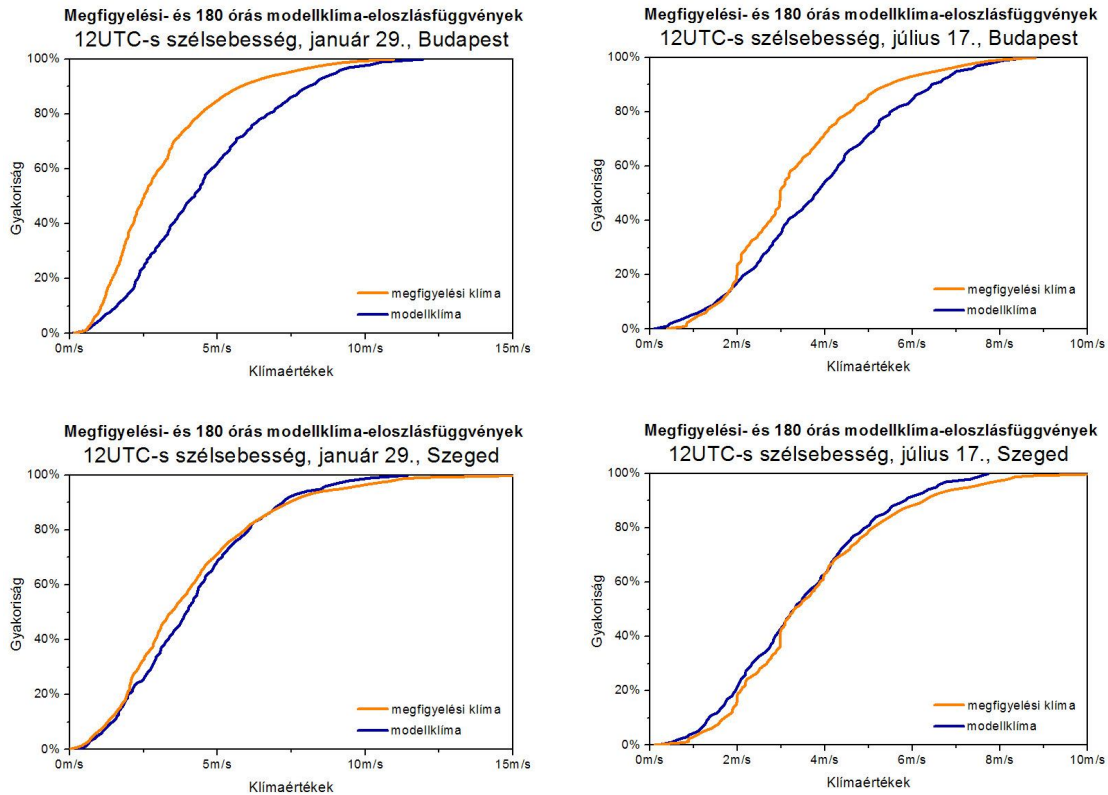
A csapadékmennyiség-előrejelzéseknél általános érvényű, hogy az ECMWF EPS előrejelzései a viszonylag gyakran bekövetkező kis mennyiségű (1mm napi összeg körüli, vagy az alatti) csapadékok gyakoriságát felülbecsli, a ritkábban előforduló nagyobb csapadékösszegeket (10-15mm, vagy annál nagyobb napi mennyiség) alulbecsli. A kis csapadékok gyakoriságának túlbecslése elsősorban a téli félévre jellemző, s feltehetően a csapadék modellbeli parametrizációjának pontatlanságából származik. A nagyobb összegek előfordulásának alábecslése főleg a nyári félévben figyelhető meg, ebben az esetben nagy valószínűséggel fő ok a csapadék konvektív jellege. Záporok, zivatarok kialakulására hajlamos időszakokban az EPS tagok által előrejelzett csapadékmennyiségek a nagy térbeli változékonyság miatt inkább területi átlagnak tekinthetők: jellemző, hogy a terület nagy részén egyáltalán nem hullik csapadék, míg lokális körzetekben nagy mennyiség is lezúdul. A bemutatott két város, Szombathely és Budapest esetén is az mondható el, hogy a kis csapadékok felülbecslése inkább a téli, a nagyobb mennyiségeké inkább a nyári időszakra jellemző (**12. ábra**). Külön említést érdemel, hogy Szombathely januári modellklímájában több mint 20%-al gyakrabban fordul elő csapadékos nap, mint a megfigyelési klímában. Ezzel szemben a

júliusi modellklíma legmagasabb értékei csak 30mm körül vannak, viszont a megfigyelési klímában található 50mm feletti napi összeg is.



**12. ábra:** A megfigyelési- és modellklíma eloszlásfüggvényei Szombathelyen és Nyíregyházán, napi csapadékösszeg

A 10m-es szinoptikus (átlagos) szélesség eloszlásfüggvényeit tanulmányozva azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a szélereősséget a domborzat és a felszíni érdesség befolyásolják leginkább, s a modelleredmények pontosságát is leginkább e két tényező befolyásolja. Budapest – Lőrinc mérőhelyen a szél ereőssége januárban sokkal, júliusban kisebb mértékben gyengébb, mint ahogyan azt a modell előrejelzi. Szegeden viszont alig tapasztalható különbség a két eloszlásgörbe futása között, akár a téli, akár a nyári hónapot nézzük (**13. ábra**). A budapesti állomás beépített, nagy felszíni érdességű környezetben, míg a szegedi nyílt terepen található. Szembetűnő az is, hogy a nagyobb (10m/s feletti) szélességek (nem szélleőkéssek!) viszonylag ritkák hazánkban, munkám során ez problémát okozott a kalibrált eredmények verifikációjánál.



**13. ábra:** A megfigyeltéses- és modellklíma eloszlásfüggvényei Budapesten és Szegeden, 12UTC-s szélesebség

## 4.2. A régi és új típusú modellklíma összehasonlítása

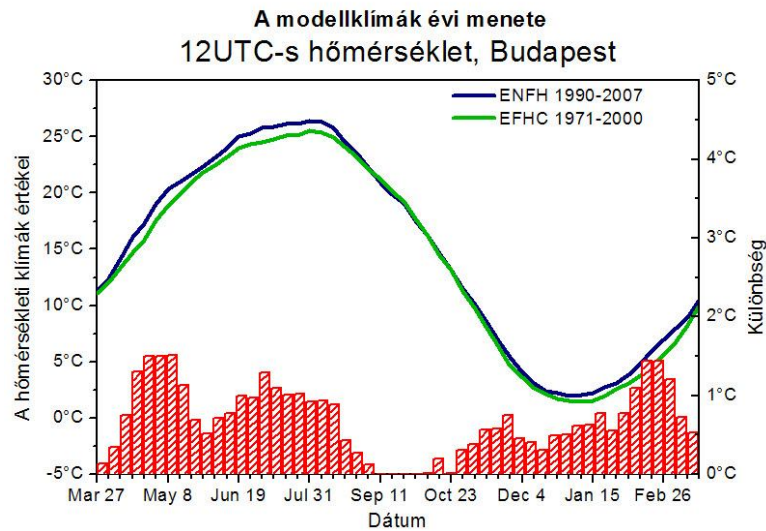
Mint említettem, a 2006 februárjától 2008 március végéig készült régi, illetve az azóta készülő új modellklímák előállítása között alapvető különbségek vannak, és emellett a referenciaidőszakuk is eltérő. Ebből adódóan számítottam különbségekre az egyes meteorológiai paraméterek értékeiben, de az összehasonlítás során olyan mértékű eltéréseket tapasztaltam, melyekből messzemenőbb, az éghajlat módosulására utaló következtetéseket is le lehet vonni. A két vizsgált meteorológiai paraméter a 12UTC-kor mért 2m-es hőmérséklet, illetve a csapadék volt.

### 4.2.1. 12 UTC-kor mért 2m-es hőmérséklet

Az összehasonlítás alapját a régi típusú, mindennap 12UTC-kor készült +48 órás, illetve az általam is felhasznált új típusú, csütörtökönként 00UTC-kor előállított +60 órás reforecast előrejelzésekből készült klímák adták. Természetesen a régi modellklímából is csak a csütörtöki dátumoknak megfelelő napokon előállítottakat használtam fel, így mindkét klíma esetén szombat délre előrejelzett adatokat kaptam. A

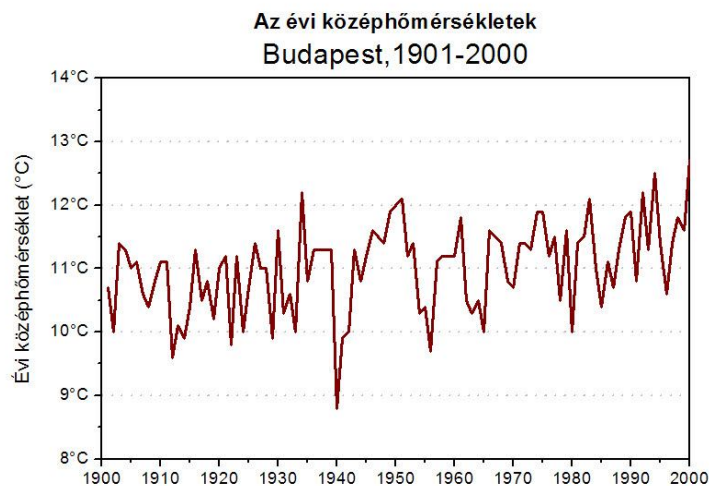
klímafájlok egy Közép-Európát lefedő rács pontjaira tárolnak adatokat, struktúrájuk annyiban tér el a **2. táblázatban** ismertetett fájlokétól, hogy nem az értékekből készült eloszlásfüggvényt tartalmazza adott rácspontra, hanem az értékek pontonkénti átlagait.

Először a Budapest rácspontjára (19°E, 47,5°N) vonatkozó értékeket vizsgáltam. Szembetűnő, hogy az új klíma az őszi időszakot leszámítva számottevő mértékben melegebb. A különbség tavasszal és kora nyáron az 1,5°C-ot is eléri (**14. ábra**).



**14. ábra:** A modellklímák közötti különbség a budapesti rácsponton, 12UTC-s hőmérséklet

Ez a változás, amit a modellklímák mutatnak, sajnos összhangban van a megfigyelt folyamatokkal. Az OMSz internetes honlapján publikált, budapesti évi középhőmérsékletre vonatkozó adatsor alátámasztja a klíma módosulásának tényét. Bár az adatsor nem fedi le az új modellklíma 1990-2007 közötti referenciaidőszakát, a '70-es évek óta tartó, egyre gyorsuló melegedés tisztán kivehető (**15. ábra**).

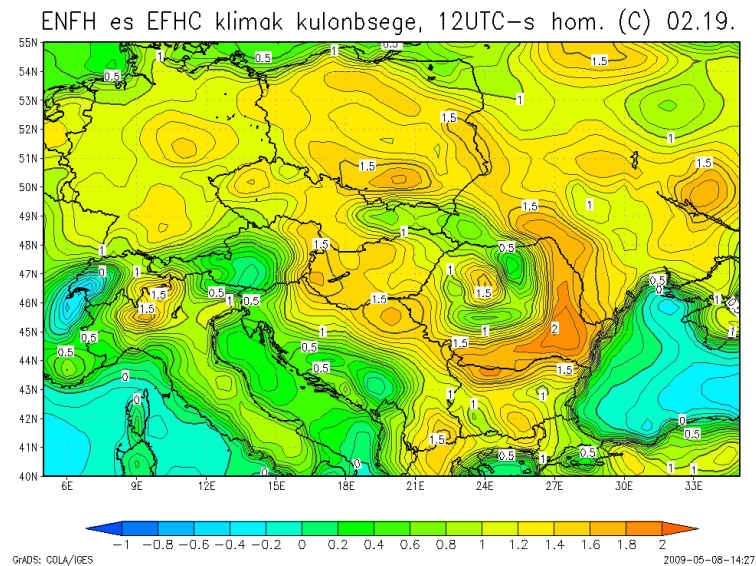


**15. ábra:** A budapesti évi középhőmérséklet megfigyelt értékei, 1901-2000

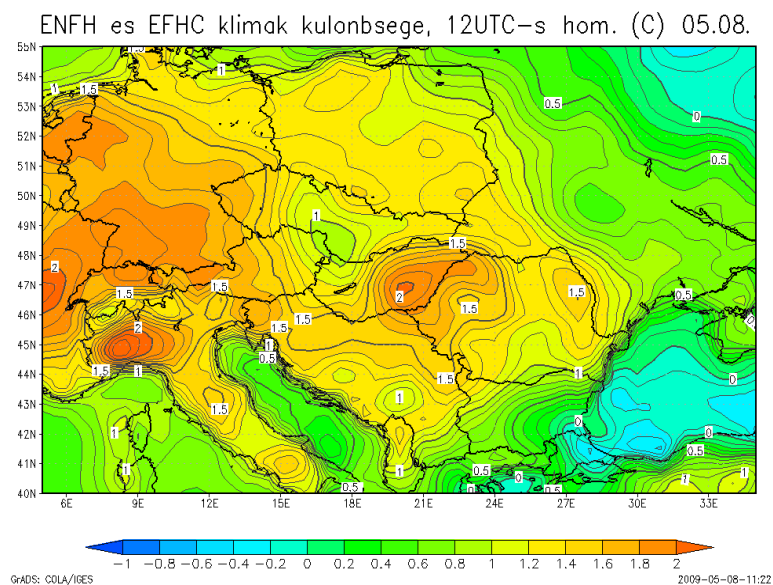


Ezt követően megvizsgáltam az egész térséget két olyan időpontban, amikor a budapesti rácspontban a legnagyobb eltérések tapasztalhatók. A rácsponti értékeket GrADS megjelenítő szoftver segítségével ábrázoltam. A program legújabb, Windows alatt futtatható változatát használtam, ennek ellenére az országhatárok még a 20 évvel ezelőtti állapotokat tükrözik.

Kora tavasszal elsősorban a térség középső és keleti része melegebb számottevően, míg kora nyáron a nyugati rész és az Alföld. Érdekes, hogy a tengerfelszínnek felett csak néhány tizedfokos változás – főként csökkenés – tapasztalható (16. és 17. ábra).



16. ábra: A 12UTC-s hőmérsékleti klímák különbségei Közép-Európában, február 19-én

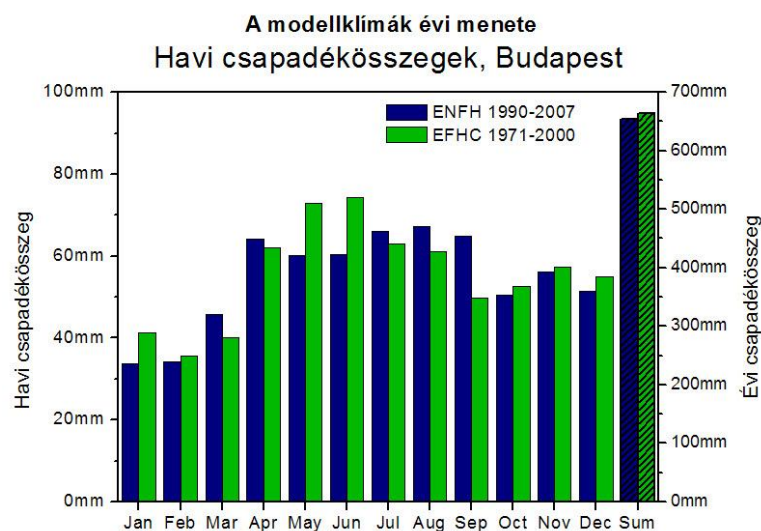


17. ábra: A 12UTC-s hőmérsékleti klímák különbségei Közép-Európában, május 8-án

#### 4.2.2. Havi csapadékösszeg

A csapadéklíma fájlok az előző pontban bemutatott hőmérsékleti klímához hasonló módon készültek, két szempontból azonban eltérnek azoktól. Egyrészt egyetlen előrejelzési időpontra vonatkozó értékek átlaga helyett a csapadékösszegek napi átlagát tartalmazták, másrészt – mivel a csapadék időben és térben jóval változékonyabb éghajlati elem – a megbízhatóbb klíma előállítása érdekében több, 7 egymást követő napra vonatkozó reforecast előrejelzéseket összevonva készültek. A csapadékmennyiségek tanulmányozásakor szemléletesebb, ha havi összegeket vizsgálunk. Ezért a hónapok közepéhez legközelebb eső csütörtöki napra vonatkozó napi átlagokat megszoroztam a hónap napjainak számával.

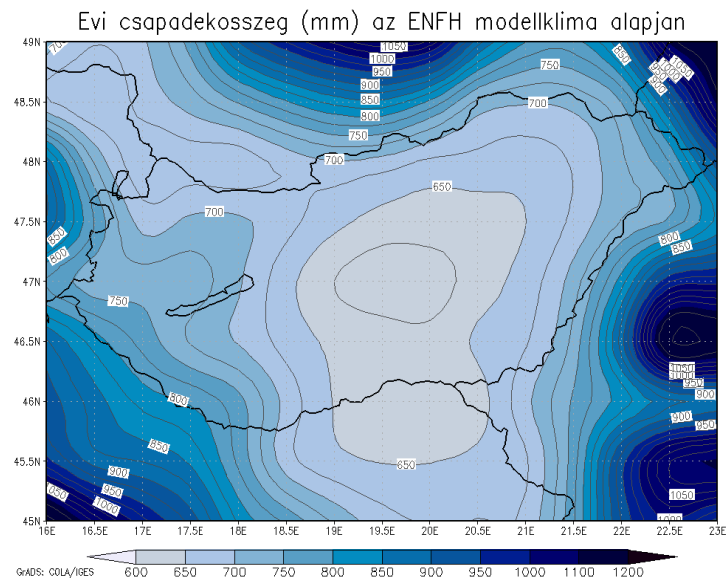
Először ismét a budapesti rácspontot vizsgáltam. A két klíma csapadékösszegei között jelentősebb eltérés kora nyáron, illetve kora ősszel mutatkozik, az új klíma előbbi esetben szárazabb, utóbbiban valamivel nedvesebb a réginél. Az éves mennyiségek tekintetében nincs számottevő változás, mindkét érték 650mm körül van (**18. ábra**).



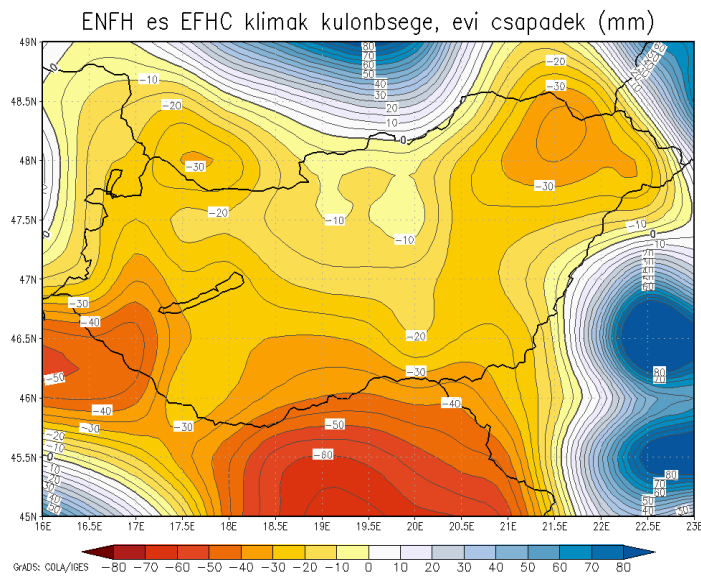
**18. ábra:** A modellklímák havi csapadékösszegei Budapesten

Másodsorban a Kárpát-medence területére vonatkozó csapadék-modellklímát tanulmányoztam. Az éves mennyiségeket térképen ábrázolva azonnal feltűnik, hogy azok a megfigyelésekhez képest általában magasabbak: hazánk területén az értékek mindenhol 600 mm felett vannak, pedig ismert, hogy a valóságban az Alföld középső vidékein az 500 mm-t is alig éri el. A csapadék térbeli eloszlását tekintve a délnyugati országrész magasabb értékei szépen látszódnak, feltűnő, hogy középhegységeink hatása a modellklímában nem mutatkozik meg (**19. ábra**).

A két modellklíma éves mennyiségeinek összehasonlítása azt mutatja, hogy az alacsonyabban fekvő területeken csökkentek, a hegyvidékieken nőttek az értékek. Hazánk területén átlagosan 5% a csökkenés mértéke, de határainktól délre a 10%-ot is meghaladja. Ellenben ugyanakkora növekedés figyelhető meg a medencét körülövező hegyvidéki területeken (**20. ábra**). A változások okainak kiderítésére a jövőben további vizsgálatra lesz szükség.



**19. ábra:** Az új modellklíma évi csapadékoszegei a Kárpát-medence területén



**20. ábra:** A modellklímák évi csapadékoszegei közötti különbség a Kárpát-medence területén



## 5. Eredmények

Mivel az új koncepció szerint készült EPS előrejelzések, és a velük párhuzamosan készülő reforecast klímák 2008 március közepe óta készülnek, így a kalibrációt pontosan egy évet lefedő előrejelzéseken tudtam végrehajtani, 2008 áprilisától 2009 márciusáig. Ez az egy év bizonyos esetekben kevésnek bizonyult ahhoz, hogy a kalibrált előrejelzésekből készített mintanagyság megfelelő legyen. Így kompromisszumos megoldásként egyes módszereknél az előrejelzések verifikációja több időlépcsőt összevonva történt, valamint két hetesnél hosszabb időtávra szóló (havi) előrejelzéseket nem verifikáltam, mivel azok csak hetente készülnek, így a minta nagysága a töredéke lett volna a naponta készülő középtávú prognózisokból álló mintának.

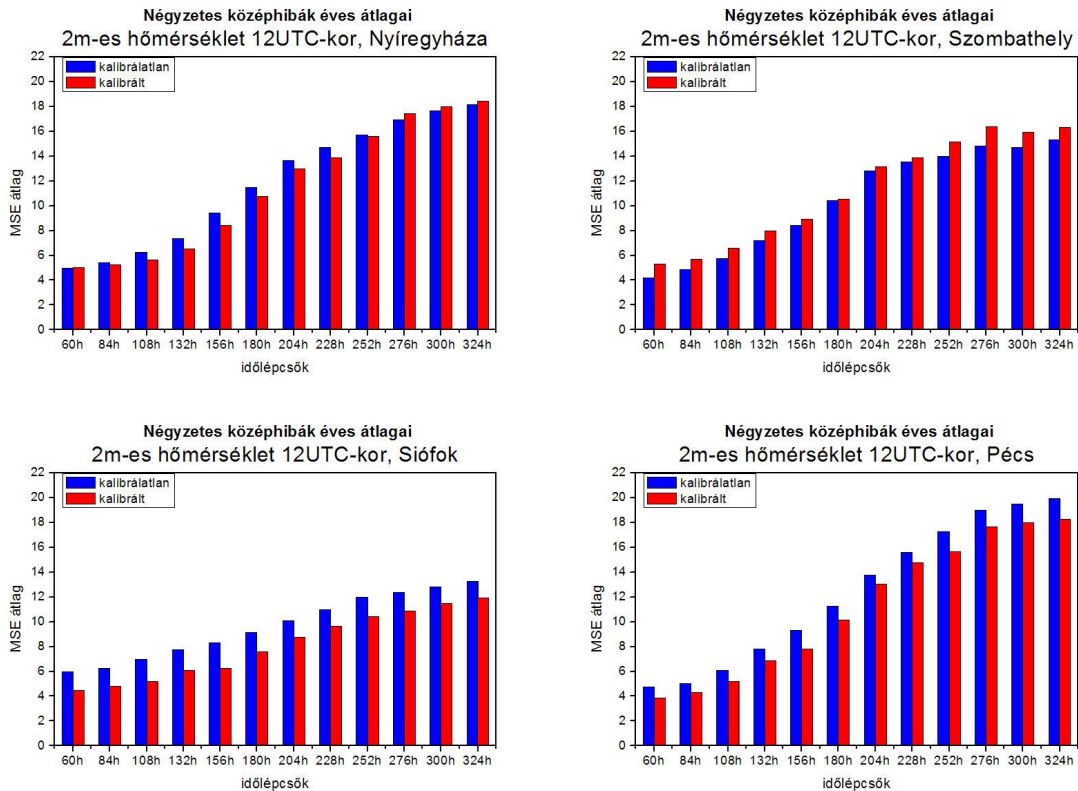
Egyetlen állomás egyetlen meteorológiai paraméterre vonatkozó kalibrált eredményeinek verifikációja több mint 9000 fájl felhasználásával zajlik le, ezért a pontos és gyors lebonyolításhoz FORTRAN programokat készítettem, melyekkel a verifikációhoz szükséges adatok fájlokból pillanatok alatt történő beolvasása és tömbökbe rendezése lehetővé vált. A tömbök **3. fejezetben** leírt verifikációs módszerek szerinti kiértékelése, valamint a szemléltető diagramok elkészítése Excel és Origin szoftverek használatával történt.

### 5.1. 12UTC-re előrejelzett 2m-es hőmérséklet

A verifikáció során megvizsgáltuk az egyes időlépcsőkre vonatkozó, kalibrálatlan és kalibrált ensemble előrejelzések átlagának négyzetes középhibáit (MSE), valamint Talagrand-diagram segítségével az EPS tagok szórását. Az **21. ábrán** 4 állomás kalibrálatlan és kalibrált MSE értékeit láthatjuk. Nyíregyháza, Pécs, és Siófok esetén a hibák nagyságát csökkenteni tudta a kalibráció, elsősorban az előrejelzési időszak közepén. Siófok tekintetében a legjelentősebb, 20-30%-os a csökkenés, s csaknem a teljes előrejelzési időszakban megfigyelhető. Külön érdekesség, hogy itt az amúgy sem túl magas MSE értékeken sikerült számottevően javítani, s figyelembe venni a Balaton hőmérséklet-módosító hatásait (a siófoki meteorológiai obszervatórium közvetlenül a tó partján helyezkedik el).

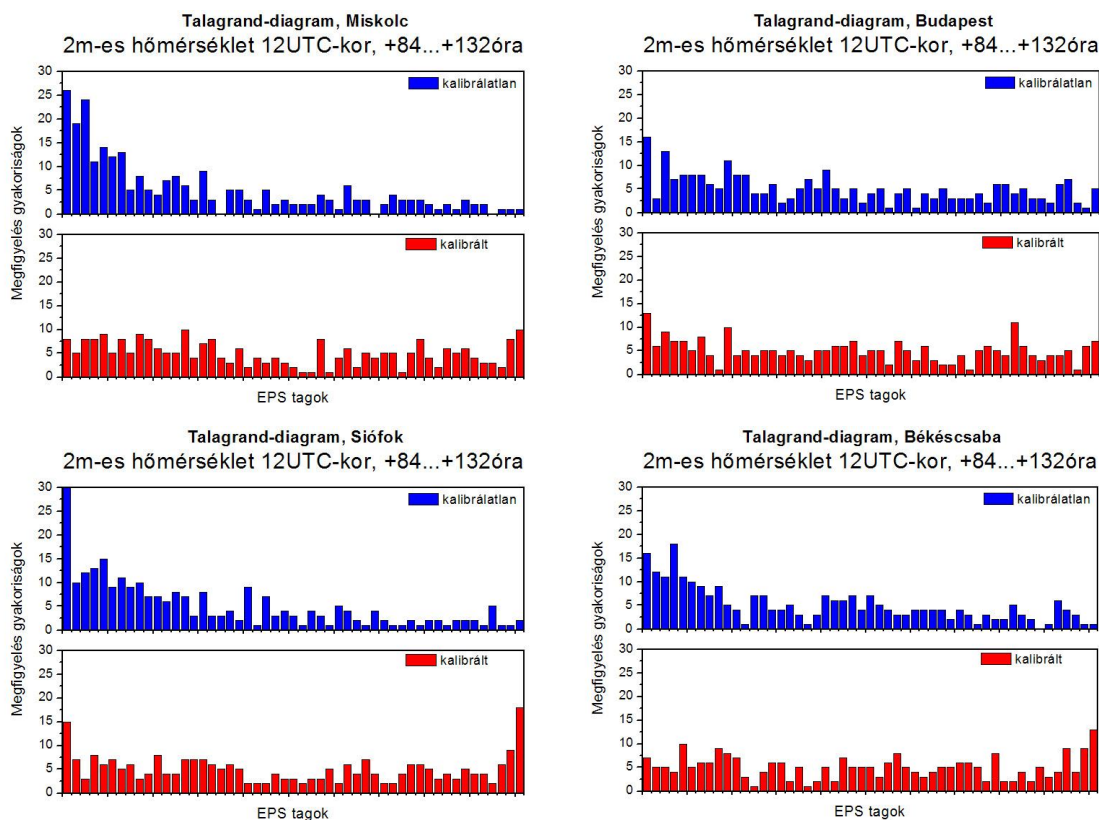
Megfigyelhető továbbá, hogy az előrejelzések pontatlansága a 6-8. előrejelzett napon érezhetően megnő. Ezt a jelenséget a középtávú előrejelzések verifikációjának

nemzetközi tapasztalatai is alátámasztják (Richardson *et al.*, 2008). További MSE értékeket ábrázoló diagramok a **2. függelékben** találhatóak.



**21. ábra:** A 12UTC-s hőmérséklet előrejelzéseinek átlagos négyzetes középhiba-értékei Nyíregyháza, Szombathely, Siófok és Pécs állomásain

Talagrand-diagramok készítésével egyértelműbb következtetéseket vonhatunk le arról, hogy a kalibráció miként kezeli az ennél a paraméternél jelentkező szisztematikus hibákat. 4 olyan várost választottam ki, melyek nagyon eltérő földrajzi környezetben fekszenek: Miskolcot, Siófokot, Budapestet és Békéscsabát. A kalibrációs időszak most nem egy teljes év, hanem a három nyári hónap, azaz június, július és augusztus volt, és csak három időlépcsőt vizsgáltam együtt. Így a verifikáció minden állomás esetében 276 eset alapján készült. Mindegyik helyszín esetén szisztematikus felülbecslés tapasztalható. J-alakúak a diagramok, azaz megfigyelések az alacsonyabb EPS értékeknél lévő intervallumokban torlódnak, és ezen az oldalon magas az outlier esetek száma is (**22. ábra**).



**22. ábra:** A 12UTC-s hőmérséklet előrejelzéseinek Talagrand-diagramjai Miskolcon, Budapesten, Siófokon és Békéscsabán

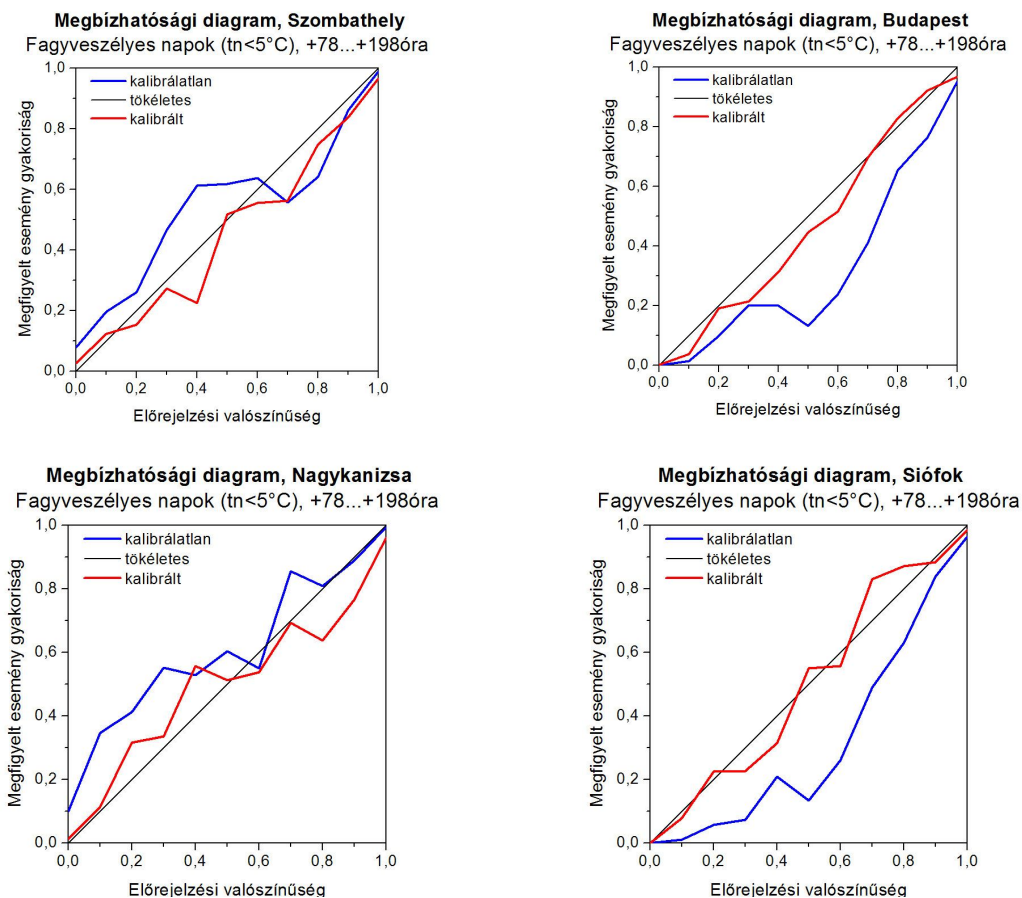
A felülbecslés mértéke Miskolc (hegyvidék) és Siófok (tópart) azonban sokkal jelentősebb. A kalibráció „kisimította” a diagramokat, tehát csökkentette a szisztematikus hibát, de Siófok esetében túl szűk maradt az ensemble szórása, azaz bal- és jobb oldalon is viszonylag magas az outlier megfigyelések száma.

## 5.2. Napi minimumhőmérséklet

A napi legalacsonyabb hőmérsékletekre vonatkozó prognózisok verifikációját kategorikus előrejelzésekké történő átalakítás után megbízhatósági diagramok készítésével, valamint Brier Score illetve Brier Skill Score számolásával végeztem. A verifikáció hitelességét úgy kívántam erősíteni, hogy a 12 napot lefedő előrejelzési időszakot két, 6-6 napos intervallumra bontottam, illetve olyan esemény bekövetkezését vizsgáltam, mely a kalibrált időszak legnagyobb részében előfordulhatott. A fagyveszélyes napok (minimumhőmérséklet kisebb, mint 5°C) száma így elegendő mintanagyságot biztosított a verifikációhoz.

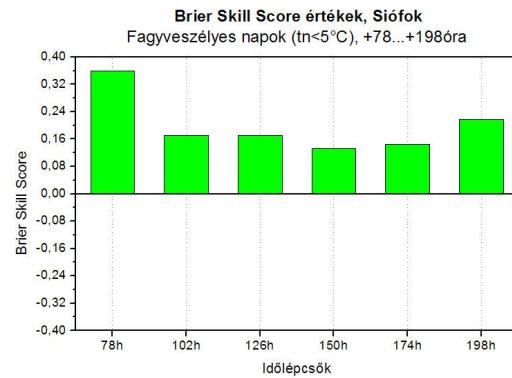
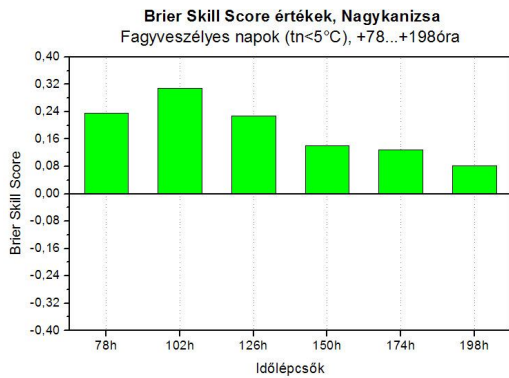
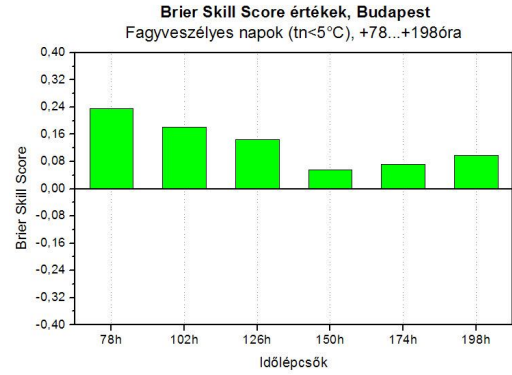
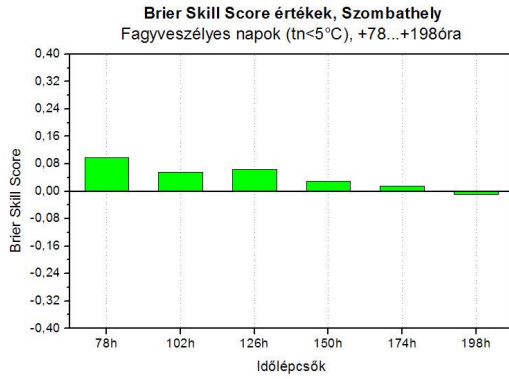
Az első 6 napra szóló megbízhatósági diagramokat szemlélve azt tapasztaljuk, hogy a kalibrálatlan előrejelzések elsősorban azon állomások esetén voltak pontatlanabbak,

amelyek környezetében a felszíni-földrajzi adottságok nagy inhomogenitással rendelkeznek (**23. ábra**). Ilyen állomás a Bükk keleti lábánál fekvő miskolci, a beépített területen elhelyezkedő budapesti, vagy a vízparti siófoki állomás. Ezen városok előrejelzéseit a kalibráció egyértelműen javította. A sík területen, homogén terepviszonyok között elhelyezkedő állomások (pl. Szombathely) megbízhatóbb előrejelzésein viszont nem tapasztaltam jelentős változást a kalibráció után.



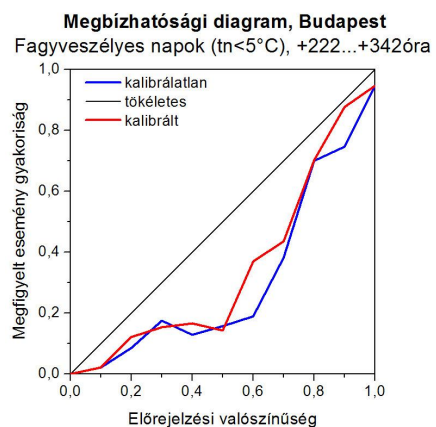
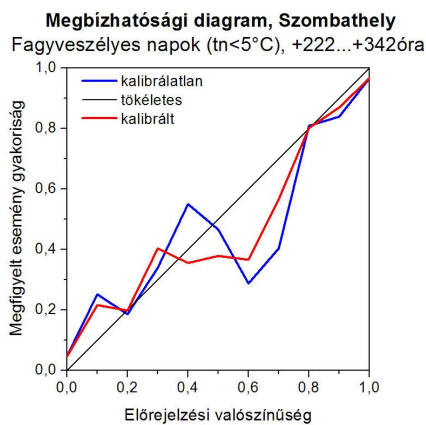
**210. ábra:** A napi minimumhőmérsékletek előrejelzéseinek megbízhatósági diagramjai Szombathelyen, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, rövidebb időtávok

A Brier Skill Score (BSS) értékek hasonló eredményeket mutattak, mint a megbízhatósági diagramok (**24. ábra**). A nyers előrejelzésekhez, mint referenciához viszonyítva a változatos földrajzi környezetben fekvő városok esetében a kalibrált előrejelzések jóval pontosabbak, hisz a BSS értékek minden időlépcsőnél pozitívak.

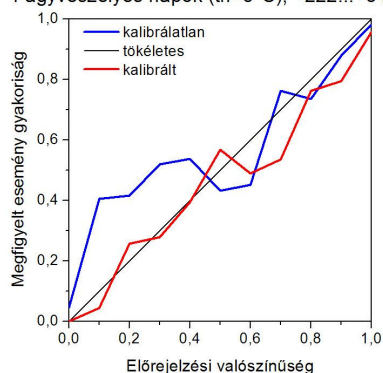


**24. ábra:** A napi minimumhőmérsékletek előrejelzéseinek Brier Skill Score értékei Szombathelyen, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, rövidebb időtávok

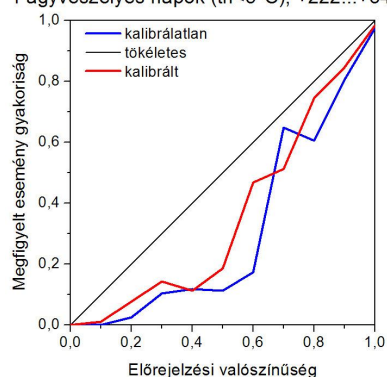
Az előrejelzési időszak második felét tekintve a javulás itt is megfigyelhető, de mértéke általában valamivel kisebb, mint a rövidebb távra szóló prognózisok esetén, akár a megbízhatósági diagramokat (**25. ábra**), akár a Brier Skill Score értékeket tekintjük (**26. ábra**).



**Megbízhatósági diagram, Nagykanizsa**  
Fagyveszélyes napok ( $t_n < 5^\circ\text{C}$ ), +222...+342óra

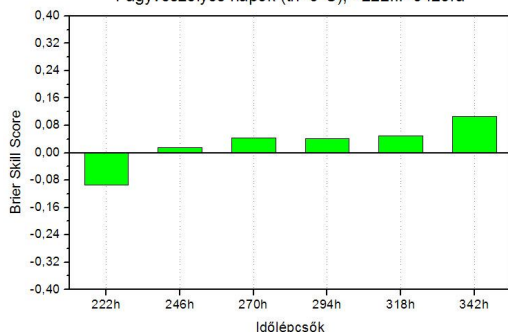


**Megbízhatósági diagram, Siófok**  
Fagyveszélyes napok ( $t_n < 5^\circ\text{C}$ ), +222...+342óra

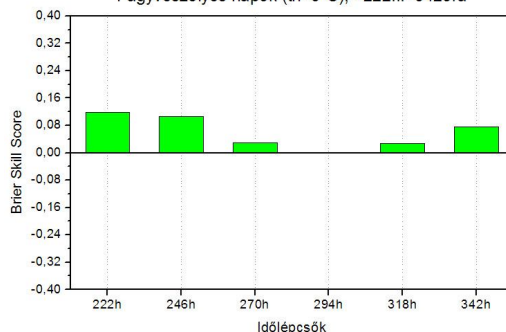


**25. ábra:** A napi minimumhőmérsékletek előrejelzéseinek megbízhatósági diagramjai Szombathelyen, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, hosszabb időtávok

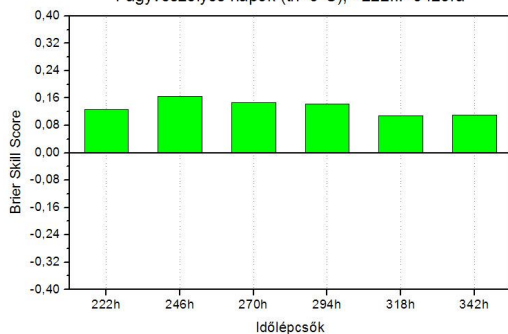
**Brier Skill Score értékek, Szombathely**  
Fagyveszélyes napok ( $t_n < 5^\circ\text{C}$ ), +222...+342óra



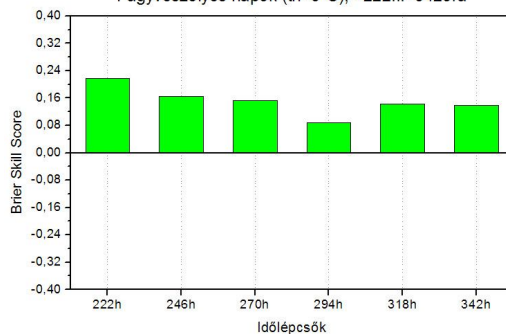
**Brier Skill Score értékek, Budapest**  
Fagyveszélyes napok ( $t_n < 5^\circ\text{C}$ ), +222...+342óra



**Brier Skill Score értékek, Nagykanizsa**  
Fagyveszélyes napok ( $t_n < 5^\circ\text{C}$ ), +222...+342óra



**Brier Skill Score értékek, Siófok**  
Fagyveszélyes napok ( $t_n < 5^\circ\text{C}$ ), +222...+342óra



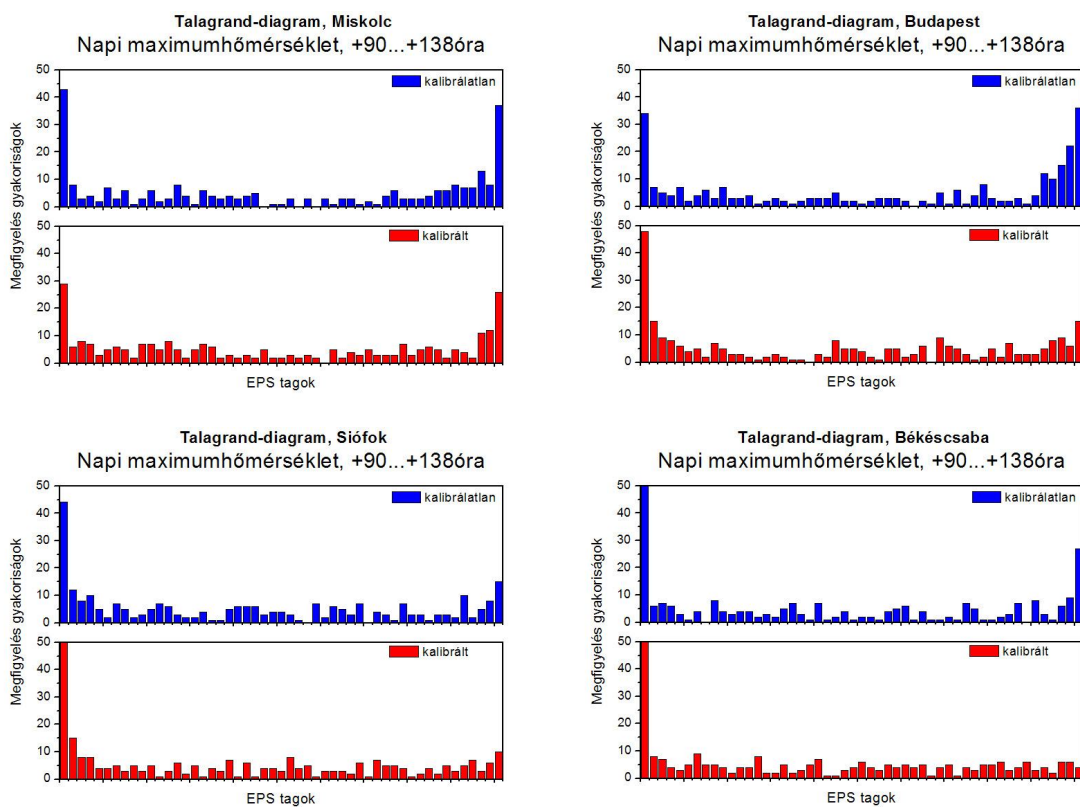
**26. ábra:** A napi minimumhőmérsékletek előrejelzéseinek Brier Skill Score értékei Szombathelyen, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, hosszabb időtávok

### 5.3. Napi maximumhőmérséklet

A vizsgálatoknak alávetett öt meteorológiai paraméter közül a maximumhőmérséklet esetében nem tudtam kimutatni, hogy a kalibráció egyértelműen hatású lenne. Először Talagrand-diagramokon tanulmányoztam a három téli hónap (december, január és február) ensemble előrejelzéseinek szórását, a 12UTC-s

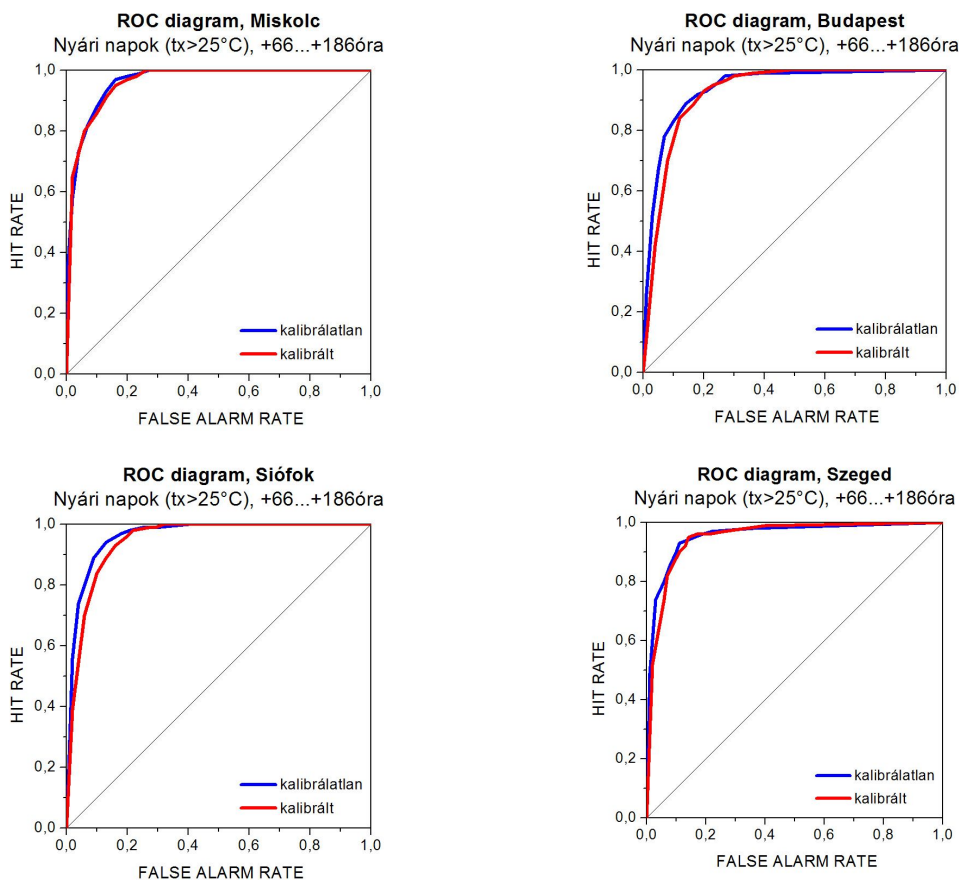


hőmérséklethez hasonlóan megint három egymást követő időlépcsőre. A kalibrálatlan előrejelzésekkel itt inkább nem a fölé- vagy alábecslés, hanem a túl szűk ensemble spread okozta a fő problémát. A **27. ábrán** látható 4 állomás közül csak Miskolc esetében jelenthető ki, hogy a kalibrált értékek eloszlása jobb, mint a kalibrálatlanoké. A többi esetben sajnos a kalibrációt követően az értékekre a felülbecslés lett a jellemző. A klímaeloszlás-függvények összevetésekor láthattuk, hogy a téli időszakokban a görbék futásában nagy különbség lép fel. Az értékek ennek megfelelő módosulása a kalibráció során azonban csak az előrejelzés hibájának jellegén változtatott.



**27. ábra:** A napi maximumhőmérséklet előrejelzéseinek Talagrand-diagramjai Miskolcon, Budapesten, Siófokon és Békéscsabán

ROC-diagramokon egy, inkább a nyári félévre jellemző esemény bekövetkezését vizsgáltam meg. Elmondható, hogy a kalibrálatlan előrejelzések viszonylag pontosan becslik előre a 25°C-os hőmérsékleti küszöb átlépését, hiszen a görbék alatti terület nagy. Ez a tény és az ensemble spread túlságosan szűk mérete nem mondanak ellent egymásnak. Sajnos azonban az állomások többségén a kalibrált előrejelzések gráfja alatti rész kicsit kisebb lett (**28. ábra**). Az ensemble szórásának szűk természetét az Esettanulmányok c. fejezetben bemutatott meteogramon is tapasztalhatjuk. További 4 állomás ROC-diagramjait tartalmazza a **3. függelék**.



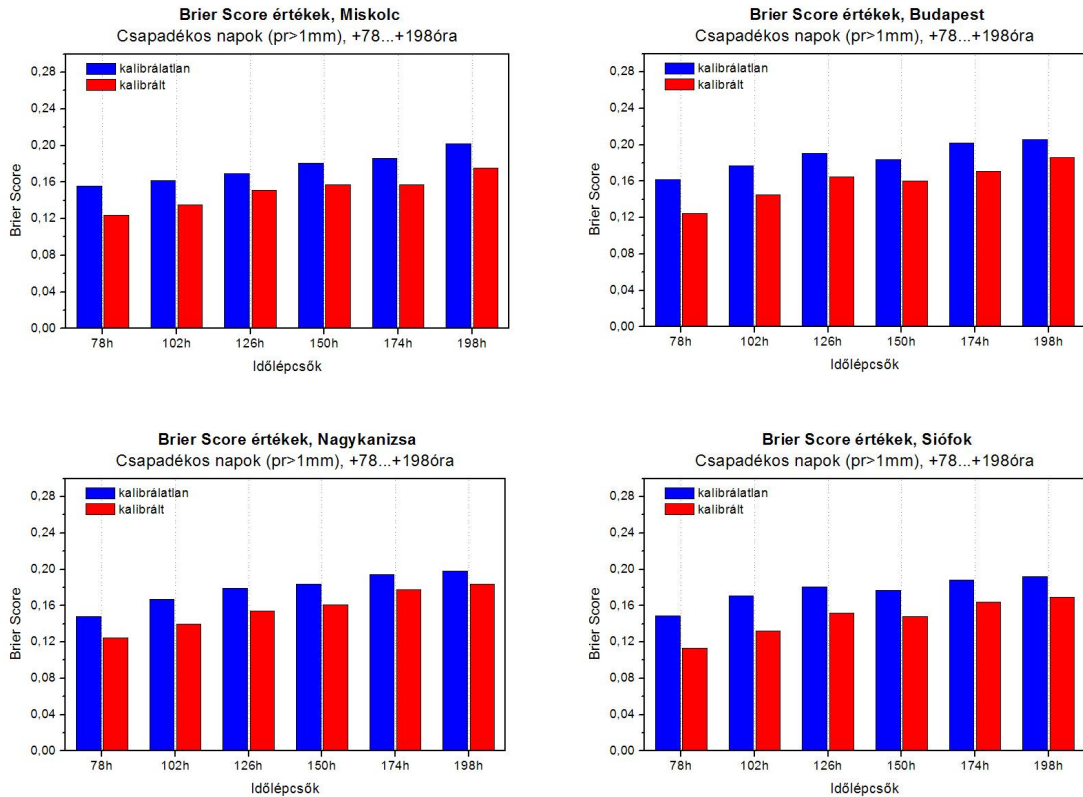
**28. ábra:** A napi maximumhőmérséklet előrejelzéseinek ROC-diagramjai Miskolcon, Budapesten, Siófokon és Szegeden

## 5.4. Napi csapadékösszeg

A csapadéokra vonatkozó megfigyelési- és modellklímák összevetésekor már szó esett arról, hogy e meteorológiai paraméter térbeli- és időbeli változékonysága igen nagy, illetve az előrejelzések pontossága erősen függ a csapadék mennyiségétől is.

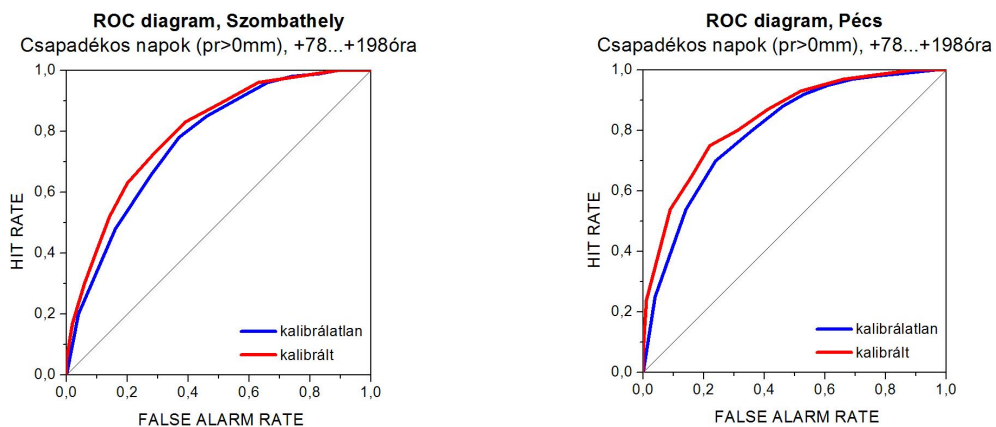
Az eredmények verifikációját az előbb említett tényező mellett nehezítette az is, hogy a SYNOP adatok egyes állomások esetében hiányosak voltak, csökkentve ezzel az amúgy is szűkösen elegendő elemből álló minta nagyságát. A kalibrált előrejelzéseket ezért igyekeztem minél több szempont alapján, több módszerrel is verifikálni. A hőmérsékleti szélsőértékek vizsgálatához hasonlóan az előrejelzési intervallumot két 6-6 napos részre bontottam. A 2-7. nap vizsgálata Brier Score számítás, ROC-diagramok és megbízhatósági diagramok segítségével történt, ezért kategorikus előrejelzésekké kellett átalakítani az EPS előrejelzéseket. A Brier Score (BS) számításnál a vizsgált esemény az 1mm-t meghaladó csapadékos napok bekövetkezése volt.

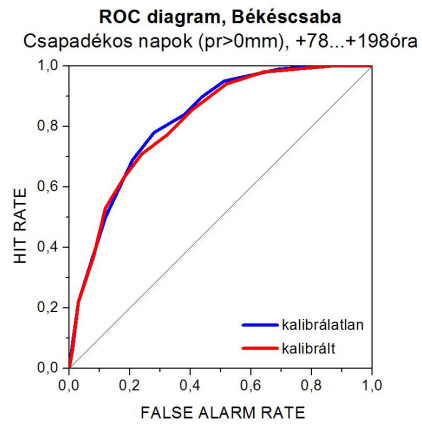
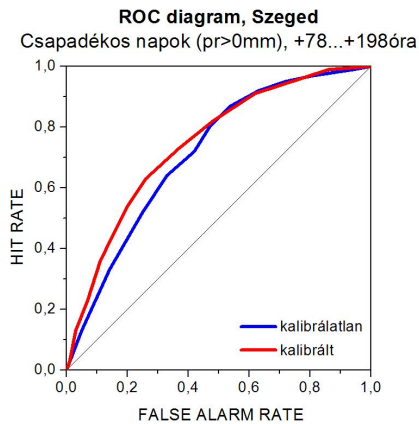




**29. ábra:** A napi csapadékösszegek előrejelzéseinek Brier Score értékei Miskolcon, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, rövidebb időtávok

A **29. ábrán** látható, hogy minden állomás esetében a BS értéke időlépcsőtől függetlenül kb. 20%-al csökkent. A kalibráció tehát csökkenti a nyers EPS előrejelzések azon hibáját, hogy túl nagy gyakorisággal adnak kis mennyiségű csapadékot egy adott helyszínre. Ugyanezt tanúsítják – Békéscsaba kivételével - a ROC-diagramok is (**30. ábra**), melyeknél a definiált esemény a csapadékegzisztencia (napi összeg nagyobb, mint 0mm) előrejelzésének beválása volt, így a lehetséges legnagyobb esetszámú mintát tudtam verifikálni.

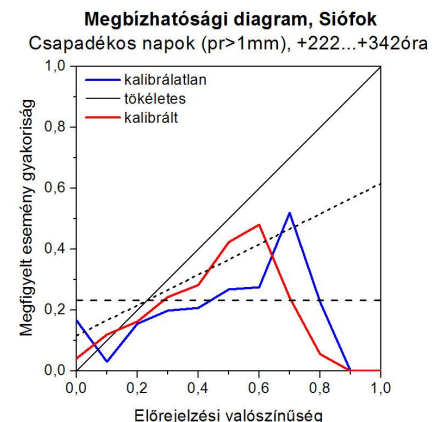
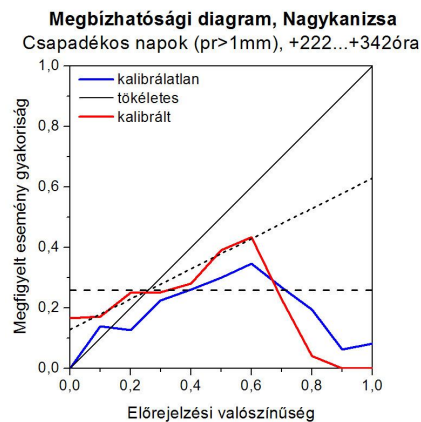
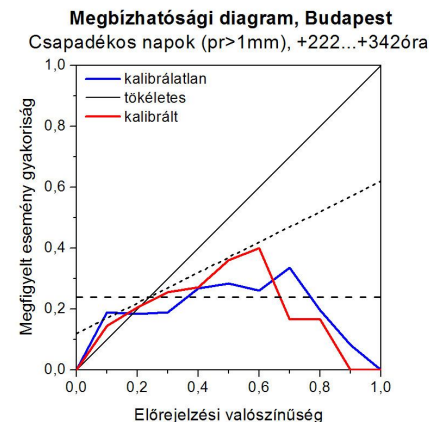
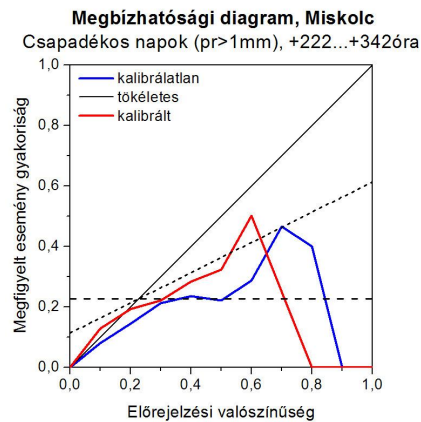




**30. ábra:** A napi csapadékösszegek előrejelzéseinek ROC-diagramjai Szombathelyen, Pécsen, Szegeden és Békéscsabán, rövidebb időtávok

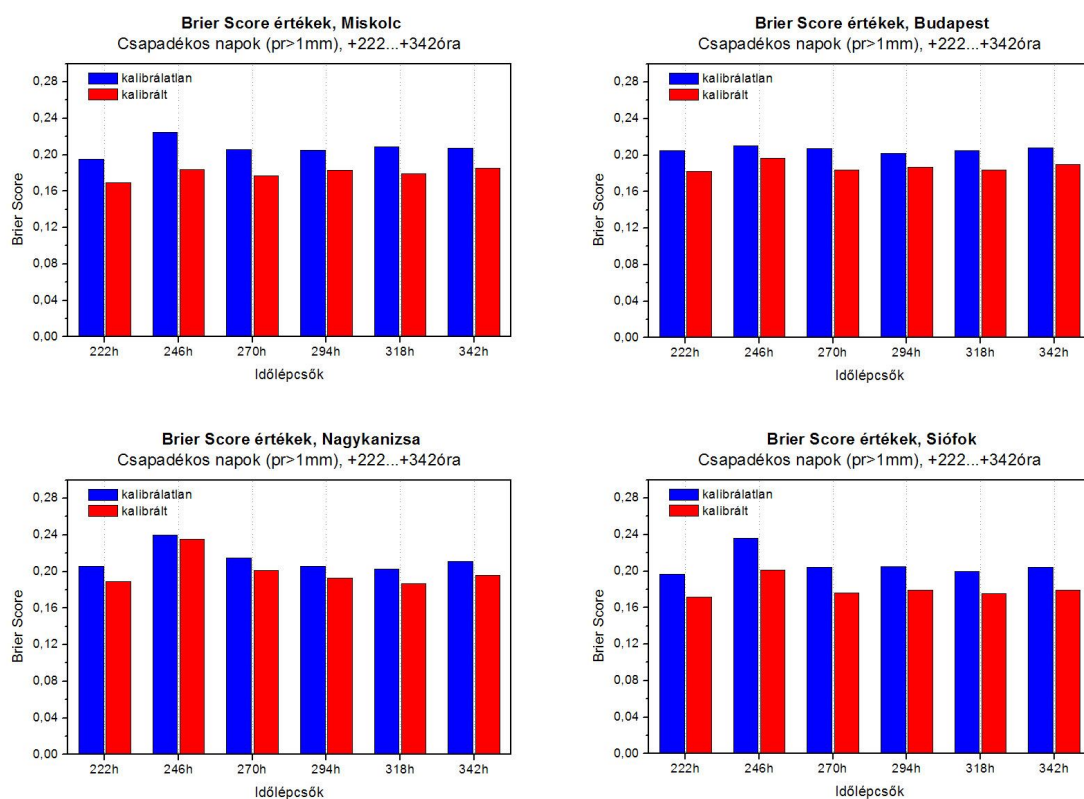
Az **4. függelékben** további grafikonok (Brier Skill Score, megbízhatósági diagram) találhatóak a 2-7. npra szóló csapadék-előrejelzésekre vonatkozóan.

A második 6 nap verifikációja alapján a kalibráció sikeressége már kissé ellentmondásos. A **31. ábra** megbízhatósági diagramjait tekintve látható, hogy a görbék futása eltér a hőmérséklet és a csapadék rövidebb távú előrejelzéseinél jellemzőtől.



**31. ábra:** A napi csapadékösszegek megbízhatósági diagramjai Miskolcon, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, hosszabb időtávok

A diagramokon ezért további, az előrejelzés megbízhatóságáról még átfogóbb képet nyújtó információkat tüntettem fel. A vízszintes vonal az esemény adott időszak során mutatott gyakoriságát mutatja, tehát a vizsgált egy évben az esetek valamivel több, mint 20%-ában fordult elő 1mm-t elérő csapadékmennyiség. Ha a görbék a vonal mentén futnak, azt jelenti, hogy bármekkora valószínűséggel adta az előrejelzés az esemény bekövetkezését, az mindig ugyanazzal a gyakorisággal következett be (Szépszó, 2004). Ha a ferde pontozott alatt fut az előrejelzés megbízhatósági görbéje, az azt jelenti, hogy az előrejelzés kevésbé megbízható, mintha az esemény klimatológiai előrejelzését használtuk volna fel. Mindezek alapján elmondható, hogy a modell futtatásától számított 8-13. napok előrejelzéseinek beválása igen gyenge, és ezen a kalibráció sem tudott érdemben változtatni. A Brier Score értékeket tekintve a helyzet annyiban jobb, hogy a kalibráció javító hatása egyértelműen kimutatható (32. ábra).

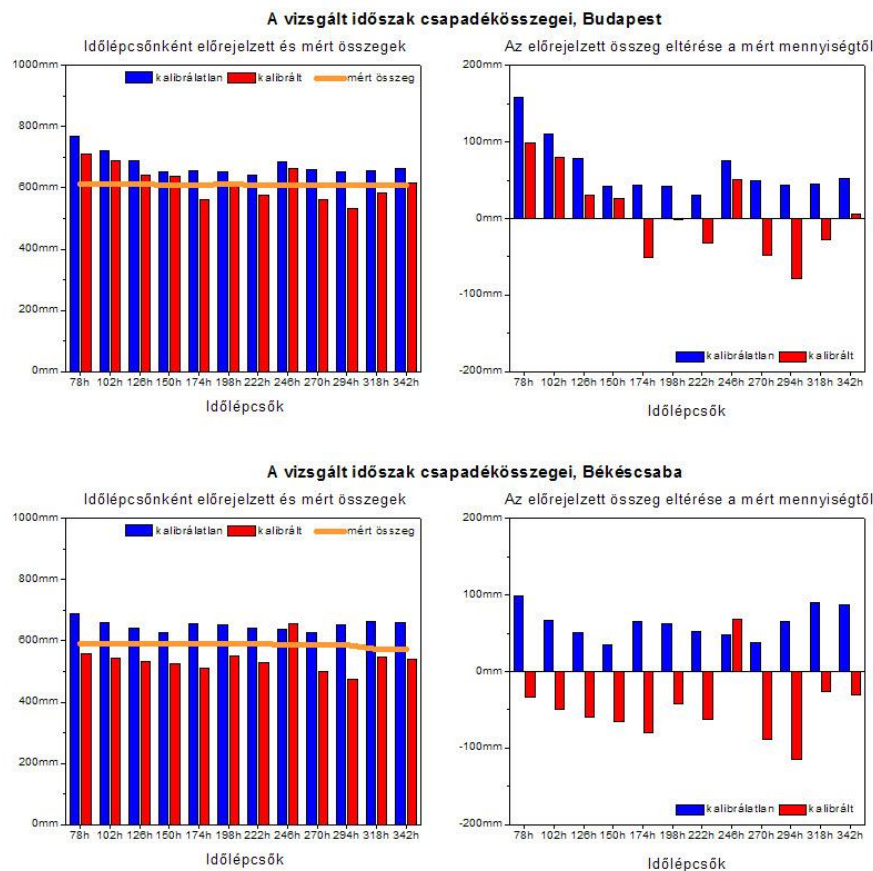


**32. ábra:** A napi csapadékösszegek Brier Score értékei Miskolcon, Budapesten, Nagykanizsán és Siófokon, hosszabb időtávok

Összességében az állapítható meg, hogy egy hétnél hosszabb időtáv esetén a csapadék-előrejelzések prognosztikai értéke alacsony, ha napi összegeket vizsgálunk. Ehelyett célra vezetőbb több napos összegeket tekinteni, s azon vizsgálni az előrejelzések beválását.

A csapadék verifikációjához egy saját magam által „kifejlesztett” módszert is felhasználtam. Időlépcsőnként összegeztem az előrejelzésekben szereplő napi csapadéokra vonatkozó ensemble átlagokat a rendelkezésemre álló teljes időszakban, és a megfelelően összegzett mérési adatokhoz hasonlítottam az értékeket. Így gyakorlatilag a modell által időlépcsőnként előrejelzett éves csapadékmennyiségeket tudtam vizsgálni. Természetesen az összegzésből kimaradtak azok az ensemble átlagok, amelyekhez a megfigyelési érték nem volt hozzáférhető.

Ahogy a modellklíma tanulmányozása során már láthattuk, a vizsgált állomások mindegyikén az előrejelzési időszak minden időlépcsőjében a modell jócskán felülbecsli a csapadékösszeg nagyságát. Érdekes módon a becslési hiba mértéke az időlépcső növekedésével általában csökken (**33. ábra**). A kalibráció csökkenti a felülbecslés mértékét, van, ahol elfogadható mértékben, (Budapest), míg másutt túlságosan (Békéscsaba).



**33. ábra:** Az időlépcsőnként előrejelzett éves csapadékösszegek Budapesten és Békéscsabán

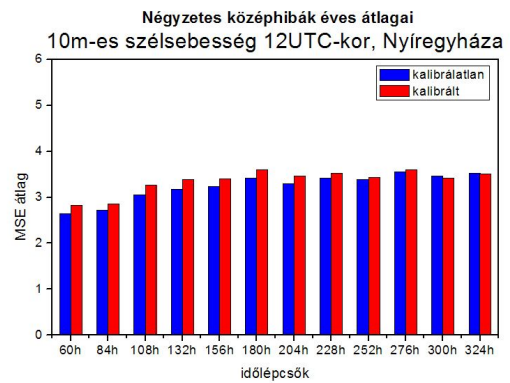
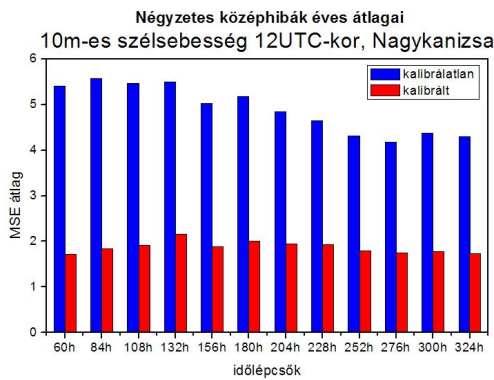
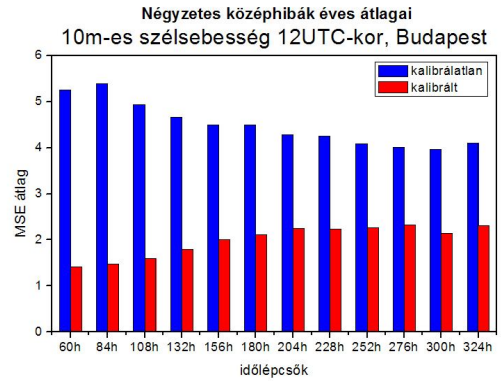
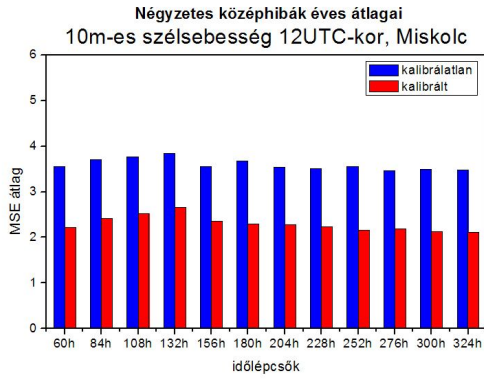
## 5.5. 12UTC-re előrejelzett 10m-es szélesség

Korábban láttunk rá példát, hogy 10 méteres magasságban mért szél erősség megfigyelési- és modellklíma adatokból készült eloszlásfüggvényei között több állomás esetén nagy eltérések tapasztalhatók. A kalibrációs eljárás tehát elméletileg jelentős mértékben korrigálja a nyers előrejelzett szélesség-értékeket.

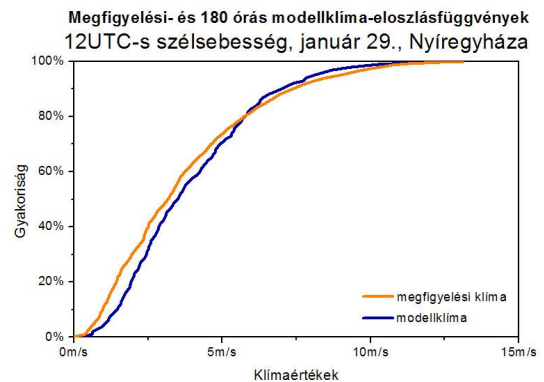
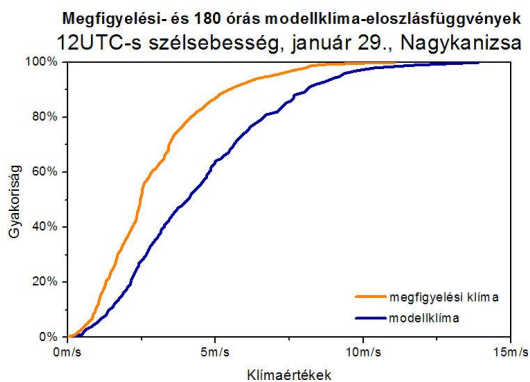
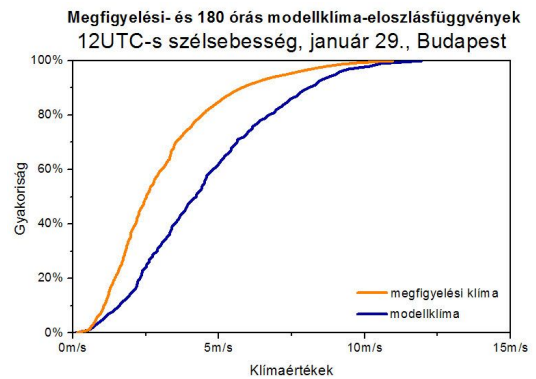
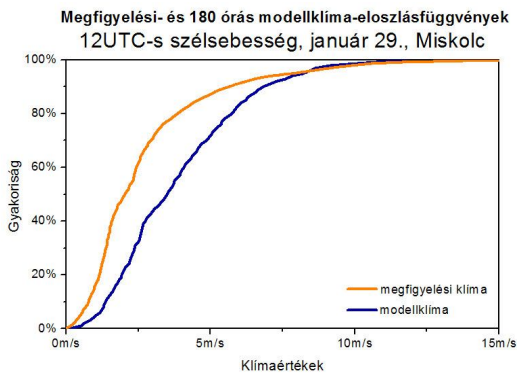
Az eredményesség igazolását azonban nehezítette több tényező is. Egyrészt hazánkban az átlagos szélesség az esetek 90%-ában nem haladja meg a 6m/s-os sebességet, az eloszlásfüggvény ezért szűk intervallumból származó értékekből áll. Ez önmagában még nem is jelentene akkora problémát, azonban a verifikációhoz szükséges SYNOP adatok csak egész értékekre kerekítve álltak rendelkezésemre. A két tényező együttes fellépése miatt bizonyos esetekben előfordulhat az, hogy a kerekítés miatt bekövetkező hiba nagyobb mértékű, mint amekkorát a kalibráció módosít a nyers szélesség-értékén. Ennek következtében a csapadék- és hőmérséklet-előrejelzések verifikációjánál használt kategorikus előrejelzéssé történő átalakítás és az ezt szemléltető diagramtípusok alkalmazása nem volt lehetséges. A verifikációnál ezért elsősorban a négyzetes középhiba számítását alkalmaztam, mely nem a legtöbb információt szolgáltatja ugyan az előrejelzések pontosságáról, de alkalmazható jelen feltételek mellett is. Az eredmények alátámasztására esettanulmányokat is készítettem, meteogramon és fáklya diagramon szemléltetve a kalibráció hatását.

A négyzetes középhibákat bemutató **34. ábrán** 4 város értékeit tüntettem fel. Miskolc, Budapest és Nagykanizsa állomásokon a kalibrált előrejelzések hibaértéke töredéke a kalibrálatlanokénak, míg Nyíregyháza esetén alig tapasztalható változás. A fent említett okok miatt óvatosan kell kezelni ezeket az eredményeket, de ha megvizsgáljuk a klímaeloszlás-függvényeket ugyanezen városoknál (**35. ábra**), láthatjuk, hogy a javulás és az eloszlásfüggvények gráfja közötti különbség mértéke között szoros kapcsolat van.

A három állomás kalibrálatlan előrejelzéseinek magas MSE értéke feltehetően annak köszönhető, hogy Miskolc és Kanizsa esetén a domborzat, Budapestnél pedig a változatos felszíni érdesség figyelembe vétele az 50km-es rácsfelbontású EPS modellben nem megfelelő pontossággal történik.



34. ábra: A 12UTC-s 10m-es szélesség előrejelzéseinek átlagos négyzetes középhiba-értékei Miskolc, Budapest, Nagykanizsa és Nyíregyháza állomásain



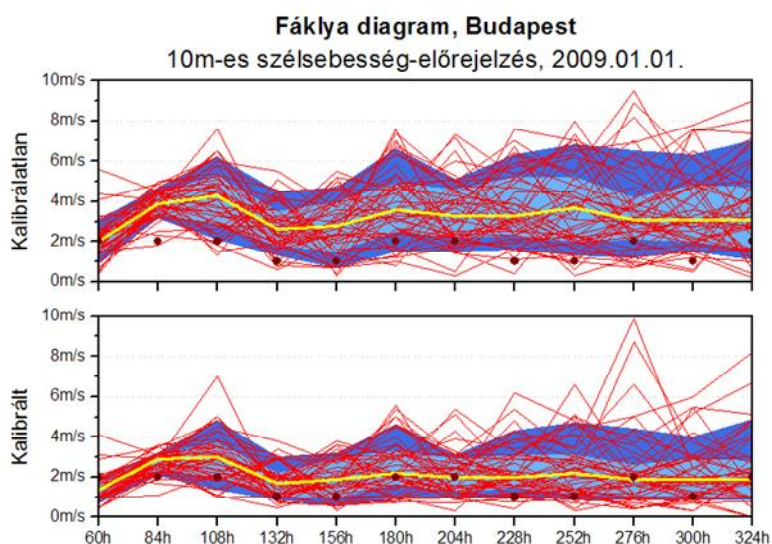
35. ábra: A megfigyelési- és modellklíma eloszlásfüggvényei Miskolcon, Budapesten, Nagykanizsán és Nyíregyházán, 12UTC-s szélesség



## 5.6. Esettanulmányok

A következőkben néhány esettanulmánnyal szeretném alátámasztani az egyes meteorológiai paraméterek kalibrációjának verifikálása során tett megállapításaimat.

Elsőként tekintsük egy 2009 január 1-én indított budapesti szélesség-előrejelzés fáklya-diagramjait (**36. ábra**). Mint ahogy a klímáknál láttuk, a szélességet több állomáson is, különösen a téli időszakban felülbecslik az EPS tagok.

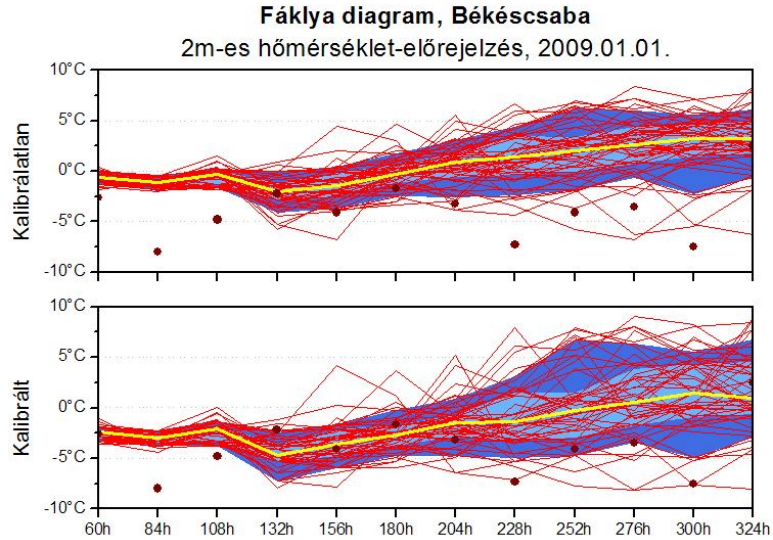


**36. ábra:** 2009.01.01-én előrejelzett 12UTC-s szélesség fáklya-diagramja Budapestre

A kalibrálatlan előrejelzések fáklyáján a tagok zöme jóval nagyobb értéket vesz fel, mint a megfigyelt sebességeké (piros pontok a diagramon). A kalibrációt követően az ensemble görbeserege sokkal jobban illeszkedik a megfigyelt értékekre, sikeresebben előrejelzve ezt a több mint 10 napos, gyengén szeles időszakot. Az ensemble szórása is kisebb lett, csökkentve a prognózis bizonytalanságát.

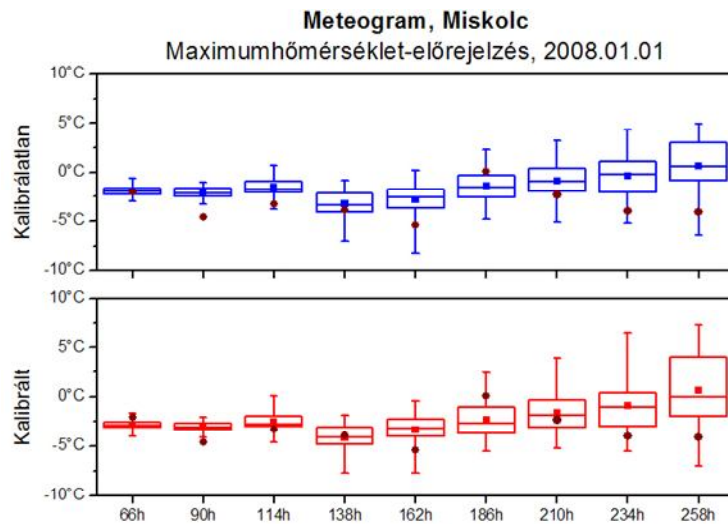
A második fáklya-diagram a 12UTC-s hőmérsékleti előrejelzés sajátosságait mutatja be, szintén a január eleji időszakban, de ezúttal a békéscsabai rácspont előrejelzését ábrázolva (**37. ábra**).

A szélességhez hasonlóan itt is túl magas értékeket jeleznek előre az EPS tagok, illetve magas az ensemble intervallumán kívüli, ún. outlier megfigyelések száma is. Ahogy a klímaeloszlás-függvények összehasonlításánál láttuk, Békéscsaba esetén elsősorban a 0°C alatti tartományban jellemző a fölébecslés. A kalibráció amellet, hogy mérsékelte ennek mértékét (azaz csökkentette az egyes tagok értékét), valamelyest bővítette az ensemble szórásának túl szűk intervallumát.



**37. ábra:** 2009.01.01-én előrejelzett 12UTC-s hőmérséklet fáklya-diagramja Békéscsabára

A harmadik esettanulmány a maximumhőmérsékletre vonatkozó előrejelzéseknél tapasztalt kis ensemble szórásra mutat példát. Jóllehet a **38. ábrán** látható meteogramon csak egy napon fordult elő outlier eset, az ensemble értékek intervalluma nagyon szűk, a kezdeti időszakban 1,5-2°C, s a nagyobb időlépcsők esetén is csak maximum 6-8°C. A kalibráció az EPS előrejelzés ezen tulajdonságán nem módosított.



**38.ábra:** 2009.01.01-én előrejelzett maximumhőmérséklet meteogramja Miskolcra



## Összefoglalás

Diplomamunkámat az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező és Léggördinamikai Osztályán készítettem. Feladatom célkitűzéseinek felsorolását követően a dolgozat első részében ismertettem a numerikus modellek elméleti és gyakorlati hátterét, majd a valószínűségi (ensemble) előrejelzések készítésének tulajdonságait. Ennek során igyekeztem hangsúlyozni az ensemble technika azon hiányosságait, melyek az ilyen típusú előrejelzéseknél pontatlanságok, szisztematikus hibák fellépését eredményezhetik, és szükségessé teszik a nyers modelleredményeken végrehajtott utófeldolgozási eljárások alkalmazását. A fejezet végén bemutattam az Európai Középtávú Előrejelzési Központ (ECMWF) ensemble rendszerét.

A második fejezetben összefoglaltam az általam használt utófeldolgozási (kalibrációs) eljárás lényegét, melynek célja az ECMWF ensemble előrejelzései beválásának javítása. Ezt követően került sor az eljáráshoz szükséges adatforrások, valamint a folyamat fő pilléreinek részletes ismertetésére, különös tekintettel azon területekre, melyeken munkám során változtatásokat, fejlesztéseket hajtottam végre. Ezek közül a leglényegesebbek:

- új, a korábbtól teljesen eltérő koncepció alapján készült reforecast klíma adaptációja a kalibrációs eljárásban;
- a megfigyelési klíma pontosabb felhasználása a kalibráció során;
- a 6 órás felbontással készülő előrejelzések fájljaiból 24 órás (napi) értékek előállítás;
- a folyamatot megvalósító programcsomag átdolgozása, lehetővé téve több meteorológiai paraméteren történő univerzális alkalmazást.

A harmadik fejezetben a modelleredmények verifikációs módszereit mutattam be az egyes meteorológiai paramétereknél való alkalmazhatóság szerint csoportosítva.

A kalibráció eredményeinek kiértékelés előtt alapos vizsgálatokat végeztem az ECMWF ensemble múltbeli előrejelzéseiből készített reforecast klímákon. Ennek célja az volt, hogy előzetes képet alkothassak az ensemble modell viselkedéséről, a megfigyelt és a modellezett klíma közötti különbségekről, s ezáltal előzetes információhoz jussak a kalibráció várható hatásáról. A vizsgálat eredményeit a 4. fejezet mutatja be.

Az ötödik fejezetben ismertetem a kiválasztott 5 meteorológiai paraméterre vonatkozó kalibrálatlan és kalibrált modelloutputok verifikációs eredményeit, az azok

közötti eltérések lehetséges okait, magyarázatait. A kalibráció legtöbb esetben egy teljes évnyi előrejelzéseken történt, és a verifikációt is igyekeztem minden esetben a lehető legnagyobb elemszámú mintán végrehajtani. Végül néhány esettanulmány keretében tettem kísérletet az eljárás hatékonyságának alátámasztására.

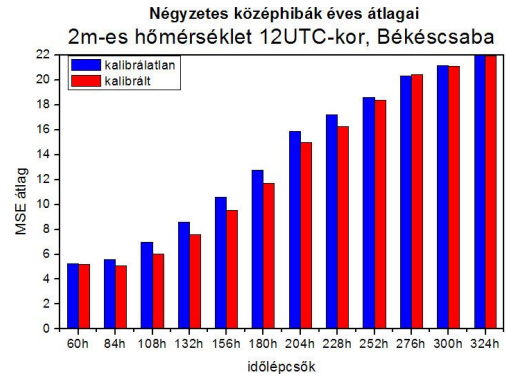
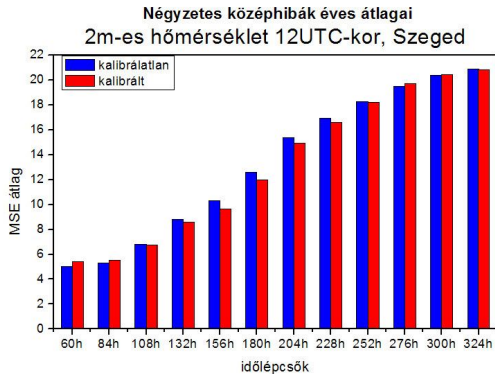
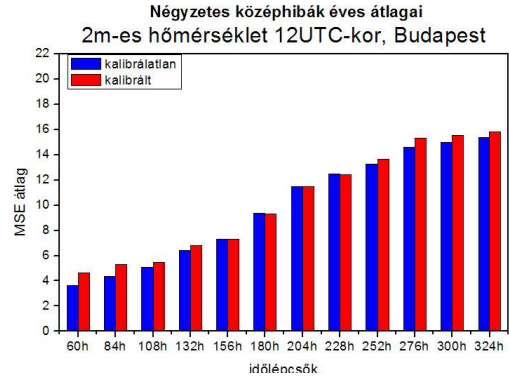
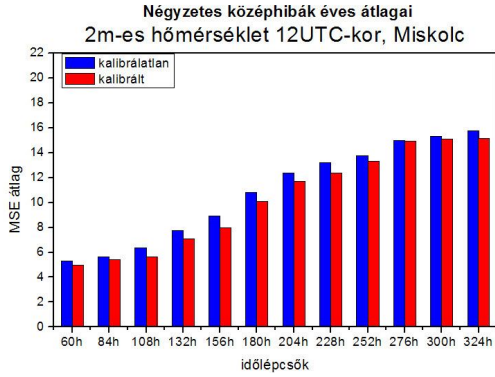
Összegésképpen az állapítható meg, hogy - a maximumhőmérséklet kivételével – a kalibráció kisebb-nagyobb mértékben javít az ensemble előrejelzések beválási mutatóin, csökkentve a szisztematikus hibák miatt fellépő pontatlanságokat. Külön említést érdemel, hogy azokban az esetekben, ahol javulás nem kimutatható, a kalibrálatlan eredményekhez képest romlást általában nem tapasztaltam.

Jövőbeli feladatnak tekintem a kalibrált modelleredmények operatív előrejelzői munkában való felhasználásának kidolgozását. Ennek érdekében az eddigi 9 állomáson történő alkalmazás helyett tervezem a rácsponti kalibráció bevezetését, mellyel lehetőség adódna az egész országra vonatkozó eredmények mezőszerű vizuális megjelenítésére a HAWK meteorológiai szoftver segítségével.

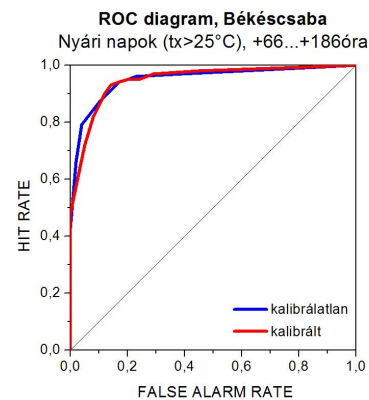
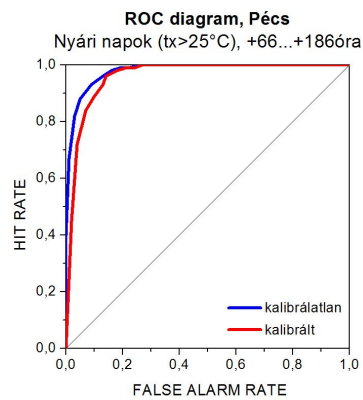
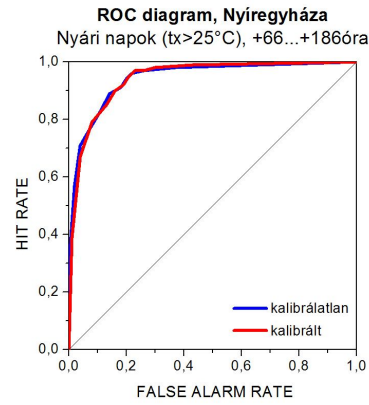
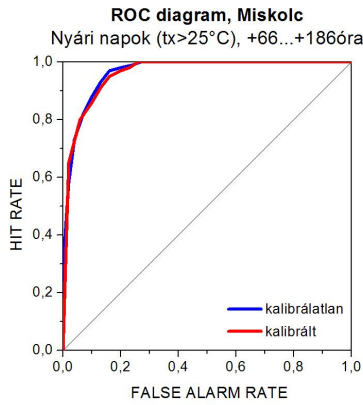
## Függelékek

	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>		<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>
2009	2	1	0	78	1		2.9		88	1.8	-1.1
2009	2	1	0	78	2		5.8		96	8.8	3.0
2009	2	1	0	78	3		1.9		82	0.8	-1.2
2009	2	1	0	78	4		1.8		82	0.8	-1.1
2009	2	1	0	78	5		0.4		57	0.0	-0.4
2009	2	1	0	78	6		7.3		97	10.4	3.1
2009	2	1	0	78	7		3.0		88	1.8	-1.2
2009	2	1	0	78	8		0.4		57	0.0	-0.4
2009	2	1	0	78	9		4.6		95	7.6	3.0
2009	2	1	0	78	10		0.2		46	0.0	-0.2
2009	2	1	0	78	11		0.3		52	0.0	-0.3
2009	2	1	0	78	12		6.7		97	10.4	3.7
2009	2	1	0	78	13		5.0		95	7.6	2.6
2009	2	1	0	78	14		0.9		71	0.2	-0.7
2009	2	1	0	78	15		4.9		95	7.6	2.7
2009	2	1	0	78	16		1.5		79	0.5	-1.0
2009	2	1	0	78	17		0.3		52	0.0	-0.3
2009	2	1	0	78	18		0.6		65	0.0	-0.6
2009	2	1	0	78	19		3.6		92	3.8	0.2
2009	2	1	0	78	20		4.0		94	5.7	1.7
2009	2	1	0	78	21		0.7		67	0.1	-0.6
2009	2	1	0	78	22		0.5		61	0.0	-0.5
2009	2	1	0	78	23		1.5		79	0.5	-1.0
2009	2	1	0	78	24		0.0		14	0.0	0.0
2009	2	1	0	78	25		1.3		77	0.3	-1.0
2009	2	1	0	78	26		5.1		96	8.8	3.7
2009	2	1	0	78	27		0.1		37	0.0	-0.1
2009	2	1	0	78	28		1.2		76	0.3	-0.9
2009	2	1	0	78	29		3.8		93	4.5	0.7
2009	2	1	0	78	30		1.3		77	0.3	-1.0
2009	2	1	0	78	31		1.5		79	0.5	-1.0
2009	2	1	0	78	32		0.2		46	0.0	-0.2
2009	2	1	0	78	33		3.4		90	2.6	-0.8
2009	2	1	0	78	34		0.0		14	0.0	0.0
2009	2	1	0	78	35		2.2		84	1.0	-1.2
2009	2	1	0	78	36		3.4		90	2.6	-0.8
2009	2	1	0	78	37		0.0		14	0.0	0.0
2009	2	1	0	78	38		4.5		95	7.6	3.1
2009	2	1	0	78	39		0.6		65	0.0	-0.6
2009	2	1	0	78	40		0.5		61	0.0	-0.5
2009	2	1	0	78	41		1.4		78	0.4	-1.0
2009	2	1	0	78	42		3.5		91	3.1	-0.4
2009	2	1	0	78	43		1.7		81	0.6	-1.1
2009	2	1	0	78	44		0.9		71	0.2	-0.7
2009	2	1	0	78	45		4.1		94	5.7	1.6
2009	2	1	0	78	46		2.2		84	1.0	-1.2
2009	2	1	0	78	47		4.0		94	5.7	1.7
2009	2	1	0	78	48		0.0		14	0.0	0.0
2009	2	1	0	78	49		1.5		79	0.5	-1.0
2009	2	1	0	78	50		1.0		73	0.2	-0.8

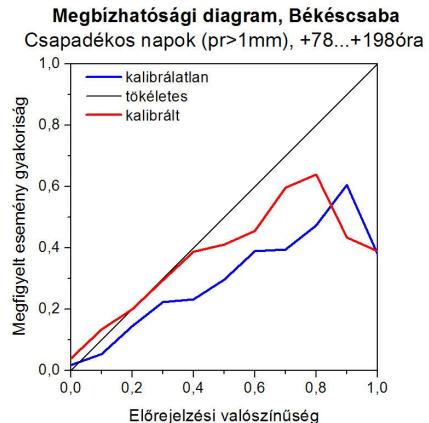
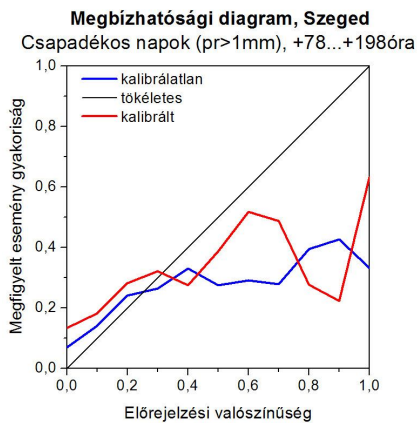
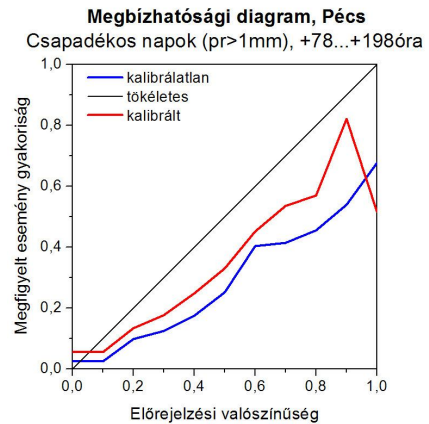
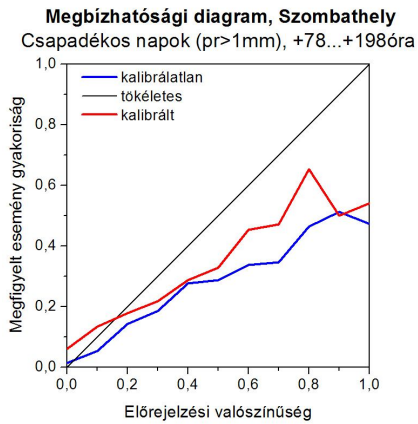
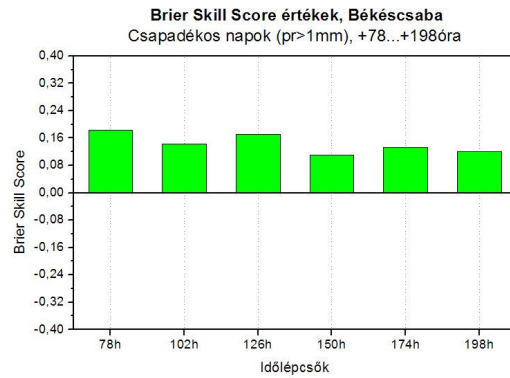
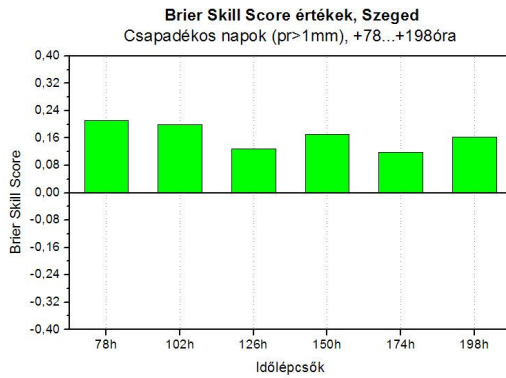
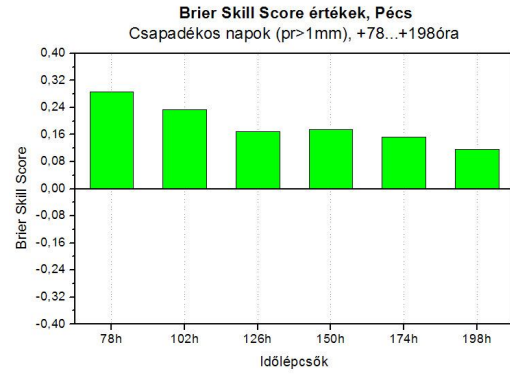
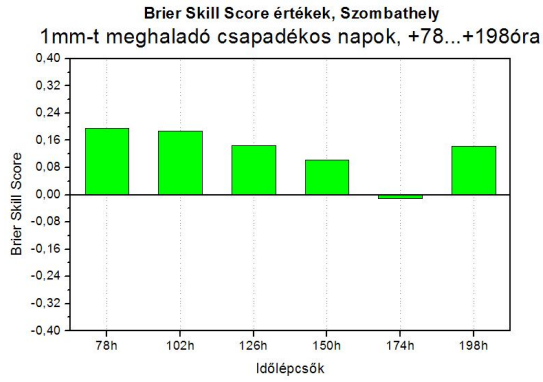
**1. függelék:** Miskolci rácspantra vonatkozó csapadék-előrejelzés. 1-2-3. oszlop: futtatás dátuma (év, hó, nap); 4.: futtatás időpontja (óra); 5.: előrejelzés időlépcsője (óra); 6.: EPS tag száma; 7.: előrejelzett napi csapadékösszeg (mm); 8.: az előrejelzett kalibrálatlan mennyiség valószínűsége a megfigyelési- és modellklíma fájlokban (%); 9.: a valószínűséghez tartozó csapadékösszeg a megfigyelési klímában – a kalibrált csapadékösszeg értéke (mm) ; 10.: a kalibrált mennyiség eltérése a kalibrálatlantól (mm).



**2. függelék:** A 12UTC-s hőmérséklet előrejelzéseinek átlagos négyzetes középhiba-értékei Miskolc, Budapest, Szeged és Békéscsaba állomásain



**3. függelék:** A napi maximumhőmérséklet előrejelzéseinek ROC-diagramjai Miskolcon, Nyíregyházán, Pécsen és Békéscsabán



**4. függelék:** A csapadék verifikációjának Brier Skill Score értékei és megbízhatósági diagramjai Szombathelyen, Pécsen, Szegeden és Békéscsabán, rövidebb időtávok

## Irodalomjegyzék

- Buizza, R., Bidlot, J.R., Wedi, N., Fuentes, M., Holt, G., Palmert, T., Vitart, R., 2006: The ECMWF variable Resolution Ensemble System (VAREPS), *ECMWF Newsletter 108*, 14-20.
- Csima, G., 2003: A numerikus előrejelzés során alkalmazott utófeldolgozási és verifikációs eljárások. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*, 86-96.
- Götz, G., 2001: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, 411-413.
- 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*.
- 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.
- Ihász I., 2008: Közép és hosszútávú előrejelzési modelltermékek és alkalmazási lehetőségeik. 34. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*.
- Jolliffe, I.J. and B., Stephenson, 2003: Forecast verification. A practitioner's guide in atmospheric science. *John Wiley and Sons*.
- Kiss G., 2003: Szezonális előrejelzések. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*, 145-156.
- Mile, M., 2008: Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja. *ELTE TTK, Diplomamunka*.
- Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. *ECMWF Technical Memoranda 430*.
- Práger, T., 1982: Numerikus Prognosztika I. A hidrodinamikai előrejelzés elmélete. *ELTE Tankönyvkiadó*, 7-10.
- Raftery, A. E., T. Gneiting, F. Balabdaoui, and M. Polakovski, 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.

- Richardson, D.S., J. Bidlot, L. Ferranti, A. Ghelli, M. Janousek, M. Leutbecher, F. Prates, F. Vitart and E. Zsótér, 2008: Verification statistics and evaluations of ECMWF forecasts in 2007-2008. ECMWF Technical Memoranda 578.*
- Szépszó, G., 2004: Valószínűségi előrejelzések verifikációja. OMSz kézirat.*
- Üveges, Z., 2008: Az ECMWF havi ensemble előrejelzéseinek kalibrációja. OTDK dolgozat, 15.*
- 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.*
- Wallace, J.M., Hobbs, P.V., 2006: Atmospheric Science. Academic Press, 301-303.*
- WRCP, 2008: Forecast Verification - Issues, Methods and FAQ. World Climate Research Programme.*

## **Köszönetnyilvánítás**

Köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek, Ihász Istvánnak, a témában szerzett ismereteim elmélyítésében és a munkám során nyújtott rengeteg segítségért, továbbá az OMSz Numerikus Modellező- és Éghajlatdinamikai Osztály munkatársainak, hogy rendelkezésemre álltak a felmerülő számítástechnikai problémák megoldásában, valamint Dr. Bartholy Judit tanszéki konzulensemnek.