

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék

Az ECMWF ensemble dekád és havi fáklya előrejelzések verifikációja

BSc Szakdolgozat



Készítette:

Lázár Dóra
Földtudomány BSc III. évfolyam
Meteorológia szakirány

Témavezető:

Ihász István
Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens:
Dr. Barcza Zoltán
ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2011

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF)	5
3. Dekád és havi ensemble előrejelzések	9
4. ECMWF reanalízisek	11
5. Verifikáció módszerek	13
5.1 A determinisztikus előrejelzések verifikációja	13
5.1.1 Folytonos eloszlású változók	13
5.2 A valószínűségi előrejelzések verifikációja	14
5.2.1 Kategorikus előrejelzések	15
6. Verifikációs vizsgálatok	20
6.1 Középtávú előrejelzések verifikációja	20
6.1.1 Hosszabb idősor alapján végzett ensemble verifikáció	20
6.1.2 Gyenge beválású numerikus előrejelzések tanulmányozása	26
6.1.3 Jó beválású numerikus előrejelzések tanulmányozása	29
6.2. Havi előrejelzés verifikáció	31
6.2.1 Havi előrejelzés verifikációja heti felbontásban nézve	31
6.2.2 Havi előrejelzés verifikáció három kiválasztott időpontban	34
7. Összefoglalás	42
Köszönetnyilvánítás	43
Irodalomjegyzék	44
Függelék	46

1. Bevezetés

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

Ehhez újabb és újabb numerikus időjárás előrejelző modellek kidolgozására van szükség, illetve a régi modellek fejlesztése és pontosabbá tétele is alapvető fontosságú. Ehhez pontosabb kezdeti feltételeket kell adnunk az előrejelzési modellt képező differenciálegyenletek számára, illetve ki kell dolgozni a parametrizált fizikai folyamatok pontos leírását és egy minél jobban működő utófeldolgozási módszert.

Manapság a világ fejlettebb területein számos numerikus előrejelző központ működik. Közülük a legnagyobb európai kezdeményezés az angliai székhelyű (1. ábra) Európai Középtávú Előrejelző Központ (European Centre of Medium Range Forecast, ECMWF: *Woods*, 2005). A központ 1979 augusztus óta naponta operatíván készít determinisztikus, valamint 1992 december óta valószínűségi vagy ensemble (Ensemble Prediction System, EPS) előrejelzéseket (*Molteni et al.*, 1996) a Föld egész területére. 1998 óta havonta egyszer készül ensemble évszakos előrejelzés (*Andersson*, 1997; 1998). 2002 óta kéthetenként, s 2004 óta hetenként készül havi előrejelzés (*Vitart*, 2004).

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék és az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) közötti együttműködés keretében készült szakdolgozati munkákban ensemble (valószínűségi) előrejelzés verifikációjával először Hágel Edit (*Hágel*, 2003) foglalkozott. Témája az ún. Extreme Forecast Index alkalmazhatóságának a vizsgálata volt. 2006-ban *Szintai Balázs* az ECMWF ensemble előrejelzésekre clusterezési technika alkalmazásával – dinamikai leskálázással – az ALADIN/HU modellel korlátos tartományú ensemble előrejelzés készítését és verifikációját tűzte ki célul (*Szintai*, 2006). 2008-ben *Mile Máté*, majd 2009-ban *Üveges Zoltán* a 15 napos ún. VarEPS rendszerbeli ensemble előrejelzések kalibrációját dolgozták ki, s ehhez kapcsolódóan több meteorológiai paraméterre végeztek időlépcsőnkénti pontbeli ensemble verifikációt (*Mile*,

2008, *Üveges*, 2009). Szintén 2009-ben *Szűcs Mihály* az évszakos ensemble előrejelzések kalibrációját és verifikációját végezte (*Szűcs*, 2009). A kétszintű egyetemi képzés bevezetése során az első alapképzésbeli szakdolgozatok egyike – *Tajti Dávid* munkája révén – a determinisztikus és ensemble előrejelzések összehasonlító verifikációjával foglalkozott (*Tajti*, 2009). 2010-ben *Németh Csilla* szintén az alapképzés keretében szakdolgozati munkájában az új rácsponti – mezőszerű – ensemble kalibráció verifikációját végezte el (*Németh*, 2010).

Dolgozatom témája az ECMWF ensemble előrejelzések alapján az OMSZ-ben operatíván készülő készült dekád és havi fáklya előrejelzések verifikációjának alkalmazásában rejlő lehetőségek vizsgálata.

Munkám során, illetve a dolgozatban az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg.

- Először a numerikus előrejelzési módszerek elméletét és ezek gyakorlati alkalmazásait ismertetem;
- majd a verifikációs módszereket mutatom be, illetve elemzem mind a determinisztikus, mind a valószínűségi előrejelzés témakörében;
- majd konkrét példákon keresztül vizsgálom a verifikációs technikák segítségével a valószínűségi előrejelzések bevalását.
- Végezetül havi előrejelzésre végeztem verifikációs vizsgálatokat hosszabb időszakokra és konkrét időpont alapján.



1. ábra: Az Európai Középtávú Előrejelző Központ központja Reading városában

2. Az Európai Középtávú Előrejelző Központ (ECMWF)

Az ECMWF, más néven Európai Középtávú Előrejelző Központ 1975-ben nemzetközi összefogásként jött létre (*Woods, 2005*). Fő célja középtávú globális előrejelzések operatív előállítására. Az operatív determinisztikus előrejelzések 1979-es bevezetését követően hosszabb kutató és fejlesztő munka eredményeként 1992 óta ún. EPS (Ensemble Prediction System) valószínűségi előrejelzések is operatív módon készülnek (*Molteni et al., 1996*).

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., 2006*). Havi futtatások (32 napos előrejelzések) 2002 óta készülnek (*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 „ötvözött” új rendszer, mely jelentős erőforrás-megtakarítást, az előrejelzési intervallum első 15 napjában megnövelt térbeli felbontást eredményez, a VarEPS-Monthly elnevezést kapta. Futtatása minden csütörtökön 00 UTC időpontban történik, 51 tagból áll: 50 ensemble-tag és egy, ún. kontrolltag, amely a determinisztikus modell kezdőfeltételeivel fut, de a térbeli felbontása a perturbált ensemble futtatásokéval egyezik meg.

Ensemble technikával szezonális (7 hónapos) előrejelzések is futnak az ECMWF-ben, operatív formában 1998 júniusától (*Andersson, 1998*). Ezek a típusú prognózisok egy óceán-légkör csatolt modell segítségével készülnek.

A determinisztikus modellt tíz napra futtatják 00 és 12 UTC-kor - 2010 januárja óta már – 16x16 km-es a rácsfelbontással (*Marbouty, 2010*). Az EPS esetében a horizontális felbontás 32x32 km, a modell 51 tagból áll és szintén 00 és 12 UTC-kor fut, 2006 vége óta már 15 napig terjedően (*Buizza et al., 2006*).

Magyarország 1994-ben társult tagországgként kötött együttműködési megállapodást az ECMWF-fel (*Kaba, 1995*), az OMSZ középtávú prognózisai döntően az ECMWF által szolgáltatott numerikus előrejelzések alapján készülnek (*Ihász, 2003; 2008; Ihász et al., 2010*).

A légkör állapotát meghatározó fizikai egyenleteknek, ún. hidro-termodinamikai vagy kormányzó egyenletrendszereknek különböző matematikai módszerekkel történő megoldását numerikus modelleknek nevezzük. Tagjai parciális differenciál egyenletek, amelyekhez kezdeti és határfeltételek megadása is szükséges. Ezek meghatározásához rendelkezésre állnak mérési adatok, korábbi modellfutatói eredmények, illetve dinamikai és fizikai törvényszerűségek (Horányi, 2010).

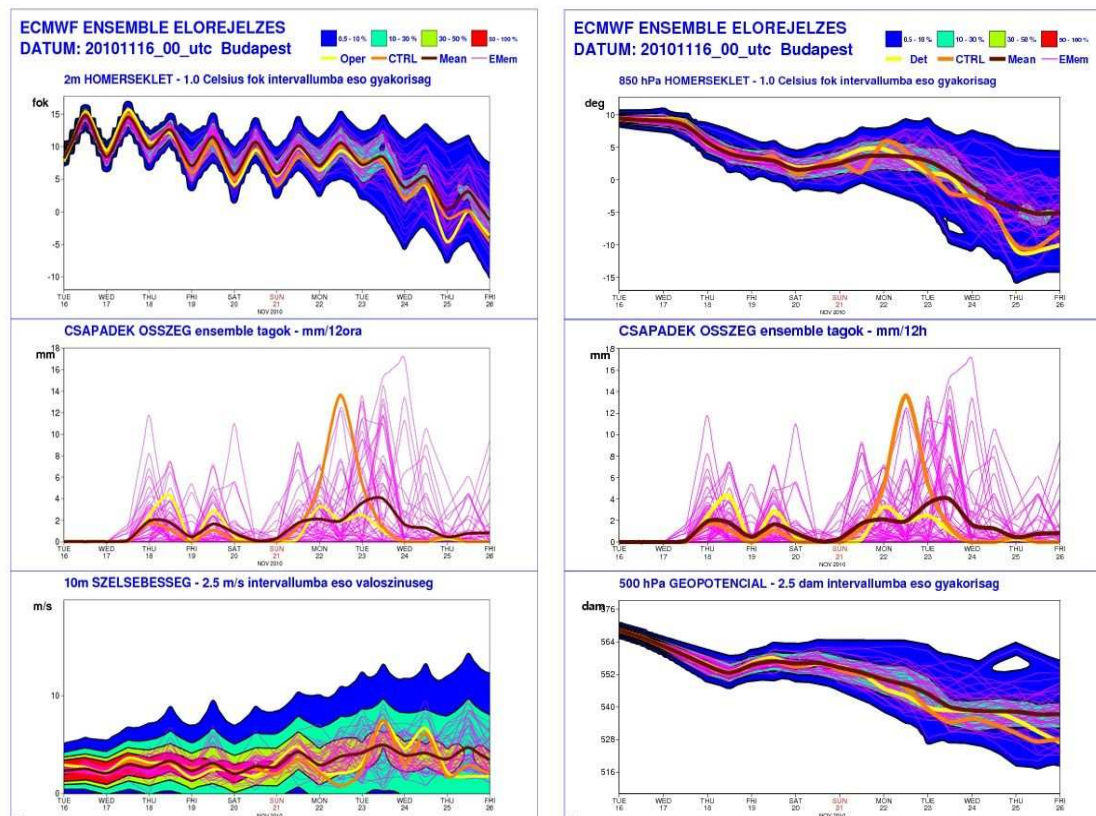
Pontosabban készíthetünk előrejelzést, ha minél pontosabban ismerjük a kezdeti és peremfeltételeket (Palmer *et al.*, 2006). Tehát alapvető fontosságú egy numerikus előrejelzés készítése során, hogy kellően pontosan meg tudjuk adni a kezdeti feltételt. Ennek viszont számos hibaforrása lehet, mint például a domborzati és a területi viszonyok, a szinoptikus mérést végző műszer mérési és műszer hibái, és természetesen maga a modell is rendelkezik hibákkal, amelyek tovább rontják az előrejelzés pontosságát. Ráadásul a légkör nem lineáris dinamikai rendszer, hanem kaotikus viselkedésű, így igen nagy instabilitást mutat kis perturbációkkal szemben is (Götz, 2001).

Ezeket a modelleket főként rövid- és középtávú előrejelzésekhez használják, mert a kis mértékben eltérő kezdeti feltételekkel készített előrejelzések eltérése idővel rohamosan nő, lehetetlenné téve egy pontosabb hosszú távú előrejelzést.

Az EPS előrejelző módszer arra szolgál, hogy a mérések és a modellek pontatlanságából származó bizonytalanságokra számszerű becslést adjon. Futtatása során nem egyetlen kezdeti feltétel van, hanem a mért kezdeti érték mellett több tucat, különböző mértékben perturbált kezdeti érték együttest használnak fel. Az előrejelzések összessége a meteorológiai esemény minden lehetséges értékéhez meghatározott valószínűséget rendel (Persson and Grazzini, 2007),

Az EPS előrejelzés megjelenítésére többféle grafikus módszer is rendelkezésünkre áll, a legelterjedtebb az úgynevezett fáklya diagram, mely egyetlen grafikonon ábrázolja az összes kezdeti feltétellel készült előrejelzést, külön kiemelve a perturbálatlan kezdeti feltétellel készített ún. kontroll előrejelzés görbáját. Terjedelméből az előrejelzés bizonytalanságára következtethetünk és szépen megfigyelhető a tagok szórása is (2. ábra).

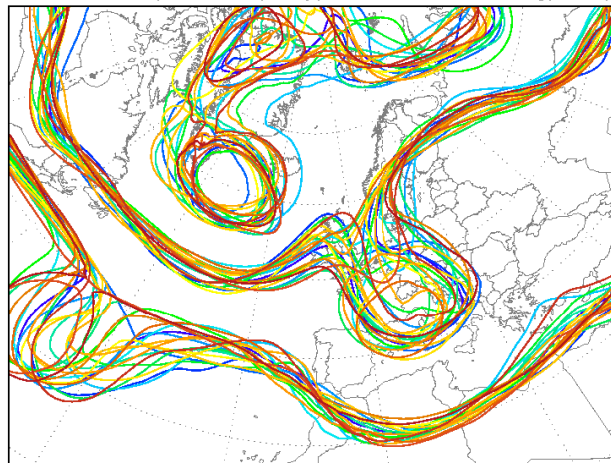
A másik megjelenítő módszer, amelyet gyakran alkalmaznak az a spagetti diagram (3. ábra), mely egy kiválasztott egy vagy néhány adott izovonalat ábrázolja az összes ensemble tagra vonatkozóan. A fáklya diagrammal ellentétben, mely egy adott helyre és az előrejelzés teljes időtartamára jelzi a bizonytalanság mértékét, addig ez a másik ábrázolási mód azt mutatja meg, hogy egy adott időpontban mely területen lesz nagy vagy kicsi az előrejelzés bizonytalansága.



2. ábra: Példa fáklyadiagramra: bal oldali ábrán a Budapestre vonatkozó 2m-es hőmérséklet, csapadékösszeg, 10 m-es szélesség, a jobb oldali ábrán a 850 hPa szinten a hőmérséklet, 12 órás csapadékösszeg és az 500 hPa-os szint geopotenciál előrejelzése látható. Az előrejelzés 2010. november 16-án 00 UTC-kor készült.

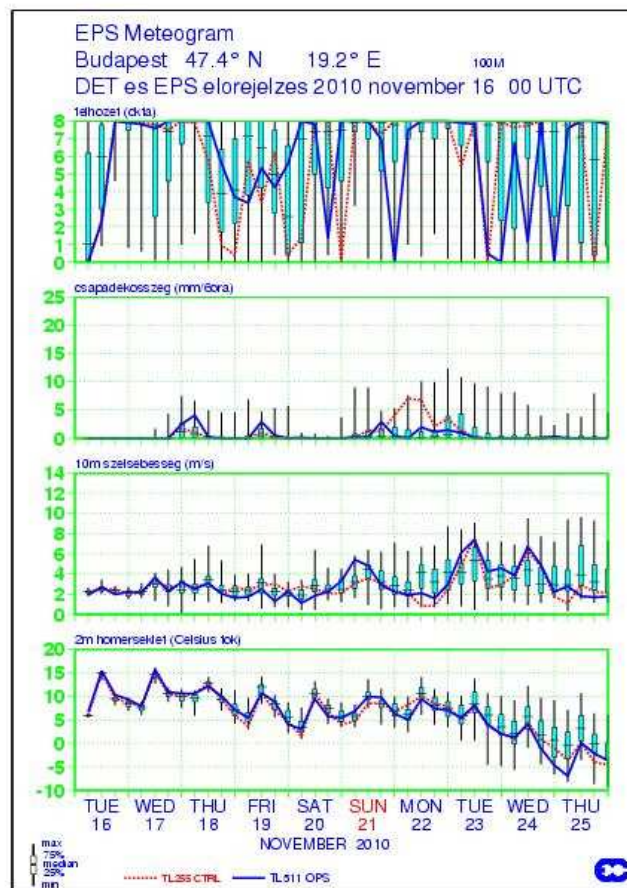
Egy szintén gyakran alkalmazott megjelenítési módszer az ensemble meteogram, amely az 51 tagú ensemble előrejelzésből tetszőlegesen kiválasztott földrajzi pontra a felhőzet, a 6 órás csapadék összeg, a 10 méteres szélesség, a 2 méteres hőmérséklet meteorológiai paraméterekre vonatkozó grafikus előrejelzés. A grafikon tartalmazza a determinisztikus (kék vonal), és az ún. kontroll (piros vonal) előrejelzést, valamint az ensemble terjedelmet (függőleges fekete vonal), alsó és felső quartilist (zöld doboz) és a mediánt (vízszintes fekete vonal) előrejelzést is (4. ábra).

Ini: Sat,25APR2009 00Z Val: Wed,29APR2009 00Z
500 hPa Geopotential (Isohypsen: 516 552 576 gpdam)



Daten: Ensembles des GFS von NCEP
(C) Wetterzentrale
www.wetterzentrale.de

3. ábra: Példa spagetti diagramra: Európára vonatkozó az 500 hPa –os szint geopotenciál előrejelzése látható. Az előrejelzés 2009. április 25. 00 UTC-kor készült.



4. ábra: Példa ensemble meteogramra: Budapestre vonatkozó felhőzet, csapadékosszeg, 10 m-es szélsősebesség, 2 m-es hőmérséklet előrejelzése látható. Az előrejelzés 2010. november 16-án 00 UTC-kor készült.

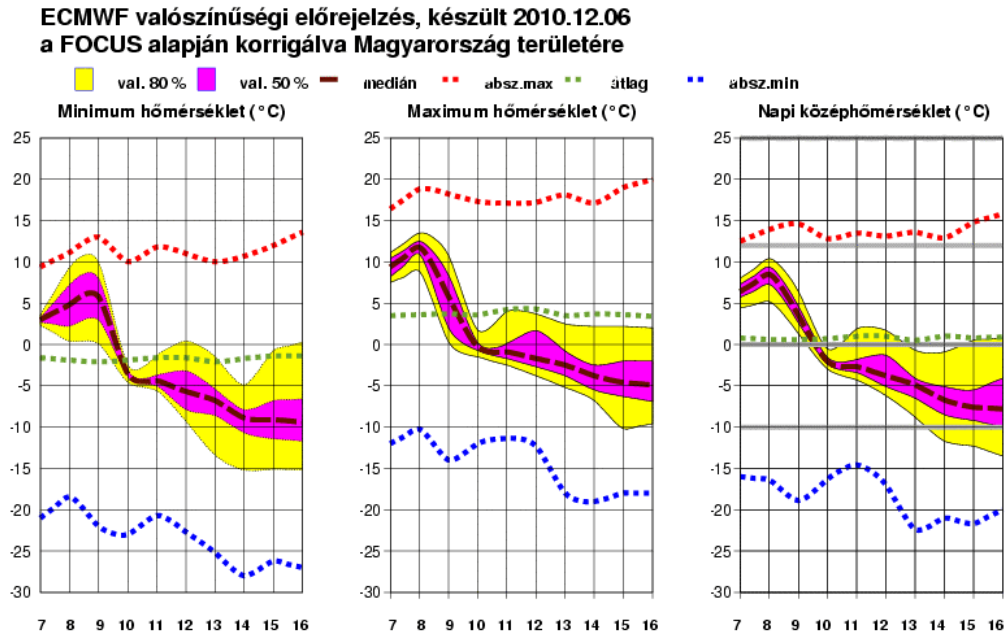
3. Dekád és havi ensemble előrejelzések

Az ECMWF-ben 2002-ben indult a havi ensemble előrejelzések futtatása, eleinte kéthetente csütörtöki napokon, majd pedig 2004-től már hetente. Az egyesített 15 napos és havi előrejelző rendszer 2008. március 13. óta van operatív használatban (*Vitart et al., 2008*). Az így „ötvözött” új rendszer, mely jelentős erőforrás-megtakarítást, és az előrejelzési intervallum első 15 napjában megnövelt térbeli felbontást eredményez, a VarEPS-Monthly elnevezést kapta. Későbbiekben tervezik, hogy a mostani hetenkénti előállítás helyett heti kétszer futtatják a modellt. A csütörtökönkénti modell-futtatásból következően az első négy nap tört naptári hétre esik, viszont a következő négy hét teljes terjedelemben le van fedve. Azaz az 5-11. napok az első hetet, a 12-18. napok a második hetet, a 19-25. napok a harmadik hetet, míg a 26-32. napok a negyedik hetet fedik le. Szakdolgozatomban ezeket a teljes naptári heteket fogom verifikálni pontszerű és szinoptikus vizsgálataim során. A hetenkénti futtatású havi előrejelzéseket a 2007-2010 -es időszakra nézve verifikálom.

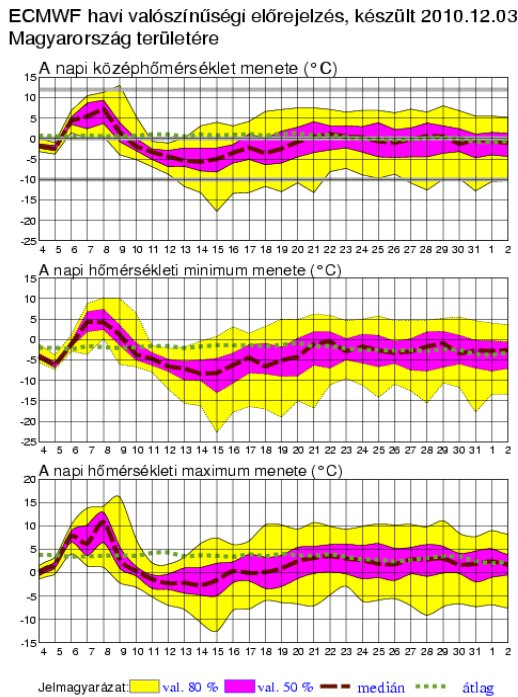
Az Országos Meteorológiai Szolgálat 2010-től a 2. ábrán bemutatott ‘standard’ ECMWF fáklya előrejelzések mellett saját-fejlesztésű fáklyákat (5. és 6. ábra) is operatíván készít külső és belső felhasználók számára az OMSZ-beli egységes FOCUS (Egységes Előrejelző Rendszer – FOreCast Universal System) adatbázisból véve az adatokat. A 2. ábrán bemutatott fáklyához képest a 6. ábrán – a havi fáklya esetében – a szinoptikus az első 5 nap EPS átlag alakulását módosíthatja az időjárás előrejelzéséhez igazítva. A felhasználási lehetőségek közötti különbség, hogy az új típusú fáklya előrejelzés a külső felhasználó által is könnyebben érthető, míg az eredeti ECMWF fáklya használata esetében a meteorológus a modell összetettségéről kap inkább információt.

Az 5. és 6. ábrán egy dekád és egy havi fáklya előrejelzés látható a 2 m-es hőmérséklet értékekre. A dekád fáklya előrejelzés 10 nap hőmérsékleti értékeinek alakulását jelzi előre, feltüntetve még az eddig mért legnagyobb (piros vonal) és legkisebb (kék vonal) értékeket, a zöld vonal az ilyenkor várható klimatológiai átlag. Az előre jelzett hőmérsékleti értékek a minimum-, maximum- és a napi középhőmérséklet, mind a dekád és a havi fáklya diagramnál egyaránt. A havi fáklya előrejelzés, pedig 30 nap alakulását szemlélteti, melyet hetente – péntekenként – frissítenek, míg a dekád fáklyánál ez naponta történik.

Az ECMWF fáklyákkal ellentétben az OMSZ-beli havi és a dekád fáklyáknál a lila térrész a 10-25 illetve a 75-90 %-os valószínűséget, míg a sárga térrész a 25-75 %-os valószínűséget mutatja, míg az ECMWF fáklyáknál a 0-10 % és 90-100 %-os intervallumot is megfigyelhetjük.



5. ábra: 2010. december 6-án készült dekád fáklya hőmérsékleti előrejelzések Magyarország területére (balról-jobbra: minimum-, maximum- és napi középhőmérséklet)



6. ábra: 2010. 12. 03. án készült havi fáklya előrejelzések hőmérsékletre (fentről lefelé: napi közép-, minimum-, maximum hőmérséklet)

4. ECMWF reanalízisek

A tudomány és a technika fejlődésével a mai modern előrejelző rendszerek már jóval bonyolultabb módon használják fel az elmúlt évtizedekből származó megfigyeléseket a reanalízis adatbázisok előállításánál, mint amikor az eredeti analíziseket készítették. Ennek köszönhetően jó minőségű, globális adatbázisok állnak rendelkezésünkre, ezeket széles körben alkalmazza mind a mezőgazdaság, a vízgazdálkodás, a levegőminőségvédelem és az egészségügy egyaránt (Uppala *et al.*, 2008). A reanalízis mezők jó minőségű és időben homogén előállításának érdekében az adatasszimilációs rendszerek korszerű és rögzített változatával dolgoznak, így alkalmasabbá váltak az éghajlat hosszú távú változékonyságának vizsgálatára, mint az operatíván működő analízisek (Simmons *et al.*, 2007).

Az ECMWF 1980-ban készítette az USA-beli Geofizikai Folyadékdinamikai Laboratóriummal (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL) közösen az első reanalízist, melyben az 1979-es megfigyelésekre támaszkodtak. Ugyanis ekkor volt az első Globális Légkörkutató Program (Global Atmospheric Research Programme, GARP) globális kísérlete (First GARP Global Experiment, FGGE). Az adatasszimilációs eljárások gyorsan fejlődtek és a minőségük is sokat javult. Az első kiterjedt reanalízist, az ERA-15-öt az 1990-es évek közepén készítették, melynek eredményeit azután a 2003-ban befejeződött ERA-40 projekt használta fel. Az ERA-15 1979-től 1993-ig, míg az ERA-40 1957-től 2002-ig dolgozta fel az adatokat (Uppala *et al.*, 2004). Az utóbbi már nem csak a légkör, hanem a szárazföldi és az óceáni felszín állapotát is jellemzi az adott időszakra (Uppala *et al.*, 2008).

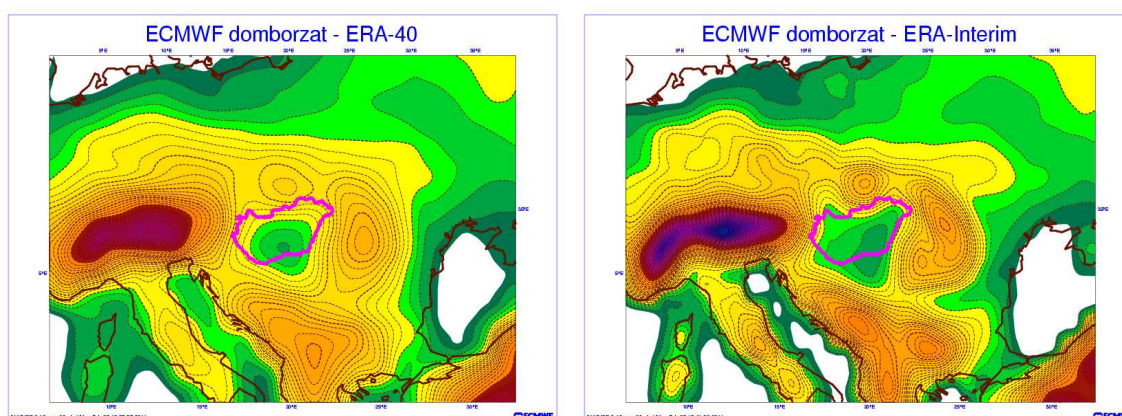
Az ERA-Interim projekten jelenleg is dolgoznak, mely 1989 óta eltelt, adatokban bővelkedő időszakra vonatkozóan becsli a légkör állapotát egészen napjainkig. Ehhez egy 12 órás 4D-Var adatasszimilációs módszert használ, a módszer maga az Integrált Előrejelző Rendszer (Integrated Forecast System, IFS) egy újabb – modern adatasszimilációs technikára és előrejelzési modellre épülő – komplex rendszer. Az itt használt adatasszimilációs folyamat jobb eredményeket produkált az ERA-40 6 órás 3D-Var módszerével szemben, ugyanis néhány problémát sikerült jelentősen csökkenteni vagy teljesen kiiktatni.

Komoly fejlődés mutatkozott például a hidrológiai ciklust illetően, ezáltal sikerült a modell futtatási idejét csökkenteni, emellett pedig a párolgás és a csapadék különbsége globálisan jobban közelített a nullához, mint korábban. Ezeket számos kutatás is igazolta.

Például a leedsi egyetem egyik munkatársa a sztratoszférában vizsgálta a kémiai terjedési modelleket, és így realisabb eredményeket kapott ezzel az eljárással, mint bármely más korábbi módszerrel. De a felszíni szélviszonyok és trópusi ciklonok pályáinak adatai esetén is pozitívak voltak a tapasztalatok.

Amíg nem készül egy újabb, ismételten kibővített reanalízis, addig fogja ezen reanalízis szolgáltatni az adatokat, mint az ECMWF klíma adatasszimilációs rendszere (ECMWF Climate Data Assimilation System, ECDAS) (*Simmons et al., 2007*). Addig viszont több fejlesztést is terveznek, mint például a felhőzettel- és csapadékkal összefüggő sugárzási adatok számításba vételét, vagy pedig a légkör és a szárazföld valamint a szárazföld és a krioszféra kapcsolatának erősítését (*Uppala et al., 2008*).

Tehát az ERA-Interim rendszerében $0,75 \times 0,75$ fokos rácsfelbontással egyrészt napi és havi adatbázisok állnak rendelkezésre 1989. január 1-jétől 2010. december 31-ig (2011. április 1-i állapot szerint), ezen felül, pedig naponta kétszer 10 napos előrejelzések is. Az ERA-Interim egyébként jóval bővebb az elődjénél, hiszen 37 izobárszintet tartalmaz az ERA-40 23 szintjéhez képest, emellett további felhőzeti paraméterrel is kiegészült. Új nedvességi analízis szerepel benne, valamint javítottak a modell fizikai hátterén is, ezzel is növelve a rendszer megbízhatóságát. A megfigyelési adatok pedig többnyire az ERA-40 adatbázisból származnak, kiegészülve a későbbi évekre vonatkozó ECMWF archívumból (*Simmons et al., 2007, Uppala et al., 2008*). A lent mellékelt ábra (7. ábra) az ERA-40 és az ERA-Interim domborzati felbontásának összehasonlítása. Látható, hogy az ERA-Interim felbontása sokkal jobb, mint az elődjéé volt, így pl. a Kárpátok és a Kárpát-medence domborzati viszonyai is jobban reprezentáltak.



7. ábra: az ERA-40 és az ERA-Interim domborzati felbontásának összehasonlítása

5. Verifikáció módszerek

Az operatív előrejelzők és a meteorológiai fejlesztők számára a verifikáció több szempontból hasznos eszköz, hiszen képet ad arról, hogy mely meteorológiai paraméter esetében milyen jellegű hiba fordul elő. A verifikációs eljárások esetében megkülönböztetünk objektív és szubjektív verifikációt. Az utóbbi esetben a meteorológiai elemeket térképesen ábrázoljuk, ezáltal vizuálisan hasonlítjuk őket össze, míg az objektív verifikációkor statisztikai vizsgálatot végzünk a modell- és a megfigyelési értékekből egy elegendő hosszúságú időintervallum adatainak felhasználásával. Különböző verifikációs módszerek léteznek és ezeken belül is megkülönböztetünk folytonos eloszlású és kategorikus paraméterekre alkalmazható eszközöket (Nurmi, 2003).

5.1 A determinisztikus előrejelzések verifikációja

5.1.1 Folytonos eloszlású változók

A folytonos meteorológiai paraméterek verifikációja során arról kapunk információt, hogy a megfigyelt értéktől mennyivel tér el az előrejelzés. Leggyakoribb ilyen paraméterek a 2 m-es méteres hőmérséklet, a minimum, a maximum valamint az átlag hőmérséklet, a szélsősebesség és a szélirány (adott időpontra, vagy átlagot véve), a csapadékösszeg (adott 6, 12 vagy 24 órás időintervallumra összegezve, a felhőborítottság. Ezek viselkedése eltérő lehet, például a hőmérséklet meglehetősen „simán” viselkedik és Gauss eloszlást követ, míg a szélsősebesség tág határok között mozoghat és a csapadék nem folytonos meteorológiai változó (ez utóbbi nem tévesztendő össze a folytonos eloszlású változóval), a felhőborítottság, pedig U-alakú eloszlást követ.

Első megközelítésként először ábrázoljuk a megfigyelt és az előre jelzett értékek eloszlását, így láthatóvá téve a különbségeket és a kiugró értékeket. Ekkor viszont az előrejelzés pontosságáról csak vizuális képet kapunk, számszerű értékeket nem.

Legkézenfekvőbb megoldás a számszerű információ előállítására a szisztematikus más néven átlagos hiba (mean error (ME) vagy bias néven is ismert) számítása, ahol a mért és az előrejelzett értékpárok különbségének átlagát számítjuk:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i) \quad (1)$$

Ahol f_i az i -edik előrejelzés, o_i az i -edik megfigyelést jelöli. Értéke mínusz végtelentől plusz végtelenig terjedhet, tökéletes előrejelzésről akkor beszélünk, ha 0-át venne fel. Hibája, hogy ha a nagy hibák ellenkező előjellel szerepelnek, a kapott érték így is közel lehet a nullához. Ennek érdekében, érdemes bevezetni az átlagos abszolút hibát (Mean Absolute Error - MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - o_i| \quad (2)$$

Értéke nullától végtelenig terjedhet, s megadja az eltérések átlagos nagyságát az adatsorunkban. Másik gyakori mérőszám még az átlagos négyzetes hiba (Mean Squared Error - MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2 \quad (3)$$

Illetve ennek négyzetgyöke, amit Root Mean Squared Errornak (rövidítve RMSE-nek) nevezünk és dimenziója megegyezik a paraméter dimenziójával. Szintén nullától végtelenig terjed az értéke. Négyzetre emelésnek köszönhetően sokkal érzékenyebb a hibákra, mint az átlagos abszolút hiba, különösen a kiugró értékeknél. Tehát jobban „bünteti” a ritkábban előforduló nagyobb eltéréseket, mint a gyakoribb kisebbeket.

5.2 A valószínűségi előrejelzések verifikációja

A determinisztikus előrejelzések verifikációjától meglehetősen eltér az ensemble előrejelzések verifikációja, ugyanis a korábbihoz képest időpontonként nem egyetlen előrejelzés értéket szembesítünk a megfigyelési értékkel, hanem előrejelzések együttesét (*Jolliffe and Stephenson, 2003*). Az adott típusú előrejelzés verifikációjához alkalmazható legmegfelelőbb módszer kiválasztása érdekében meg kell vizsgálnunk milyen meteorológiai paramétert szeretnénk verifikálni, hiszen a különböző eloszlásfüggvényekre alkalmazható verifikációs eljárások nagyon eltérőek lehetnek. A valószínűségi előrejelzések verifikálása úgy történik, hogy azokat valamilyen szempont alapján kategorikus előrejelzéssé alakítják át. Általában többféle verifikációs módszerre is szükség van, hogy komplex és kellően precíz kiértékelési vizsgálatot végezhessünk el.

5.2.1 Kategorikus előrejelzések

Diszkrét eloszlású meteorológiai változók esetében két (igen vagy nem) illetve több kategóriás előrejelzésekről beszélhetünk. Ha azt vizsgáljuk, hogy adott esemény bekövetkezett-e vagy sem, akkor a módszert kétkategóriás verifikációnak nevezzük. Ilyen prognózis például az eső, a hóesés vagy az erős szél, melynél különböző küszöbértékeket adunk meg, de ide tartozik az éjszakai fagy és a köd.

Ha az adott esemény bekövetkezett, akkor az előrejelzésünk sikeres volt (*Hit*), ha pedig nem, akkor téves riasztást (*False alarm*) adtunk. Természetesen, ha a modell nem jelezte előre és mégis bekövetkezett az esemény, akkor is sikertelen az előrejelzés (*Missed*), ha pedig sem a modell nem jelzi előre, sem nem következett be, akkor megint csak sikeres (*Correct negative*) volt az előrejelzés (1. táblázat).

Ahhoz, hogy az ensemble előrejelzéseket kategorikussá tegyük definiálnunk kell egy valószínűségi küszöböt, mely fölött az eseményt előrejelzettnek tekinthetjük. Hiszen ellentétben a determinisztikus előrejelzések esetével, ahol csak egy előrejelzett értéket szembesítünk a bekövetkezett eseménnyel, az EPS előrejelzések során az 51 tag együttesét vizsgáljuk.

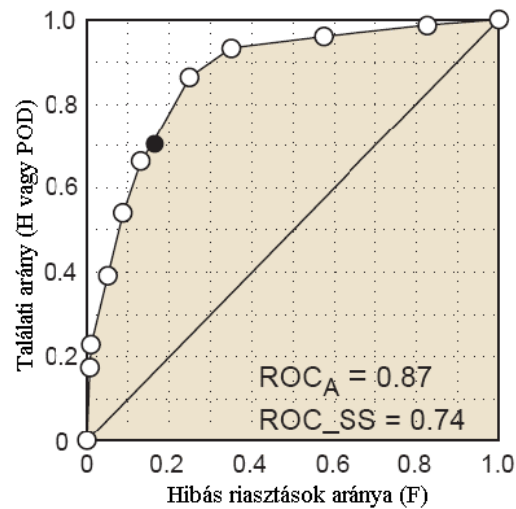
Esemény bekövetkezése	Bekövetkezett	Nem következett be
Előrejelzett	Talált / Hit (H)/	Téves /False alarm (F)/
Nem jelzett előre	Elmaradt /Missed (M)/	Korrektül elmaradt /Correct negative (CN)/

1. Táblázat: Események besorolása kategorikus előrejelzések esetében

5.2.1.1 ROC-diagram

A fenti esetek számából számolható a hibás riasztások aránya, $FAR=F/(F+CN)$ és a találatok aránya, $HR=H/(H+M)$. Ezekből állíthatjuk elő az un. ROC (Relative Operating Characteristic) diagramot (8. ábra) úgy, hogy megvizsgáljuk az egyes küszöbértékekhez tartozó FAR és HR szám párokat 0 és 100 % között. A diagram vízszintes tengelyét a FAR értékek, függőleges tengelyét pedig HR értékek adják, a görbe maga az egyes küszöbértékekhez tartozó szám párokat köti össze. Minél nagyobb a görbe alatti terület

(vagyis küszöbként a FAR minél kisebb, a HR minél nagyobb), annál pontosabb az előrejelzés (Nurmi, 2003).



8. ábra: ROC diagram egy év csapadék valószínűségi előrejelzése, a megfigyelt és az előre jelzett értékek alapján, különböző küszöbértékeket választva, ROC_A és ROC_{SS} feltüntetésével

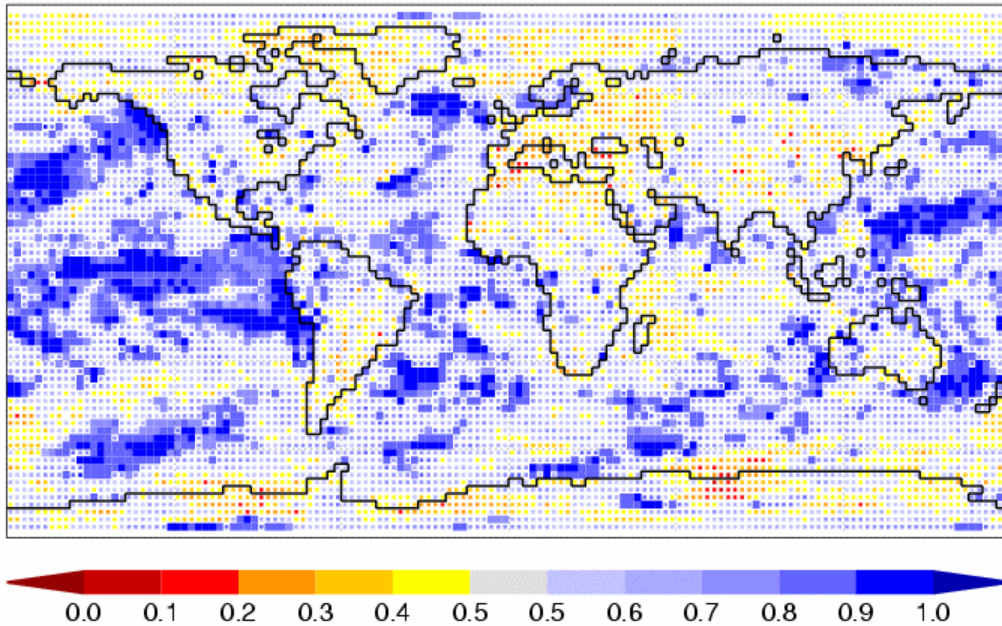
A ROC terület, más néven ROC_A (*ROC area*) széles körben használt relatív index, ami a ROC diagramon alapul, ehhez kapcsolódik még az eredményességi tényező, a ROC_{SS} . ROC_A eredményességi tényezőjét a következő képlet alapján számolhatjuk.

$$ROC_{SS} = 2 * ROC_A - 1 \quad (4)$$

Az átló alatt a ROC_{SS} negatív értéket vesz fel, -1-nél éri el a minimumát, mikor $ROC_A=0$.

A 9. ábrán látható ROC terület térképet az ECMWF az 1987-2001 közötti időszakban készített évszakos előrejelzések verifikációja során készítette. Az alsó, középső és felső tercilisbe eső előrejelzéseket az ERA-40 adatbázissal (Uppala et al., 2004) vetette össze.

ROC Score: EXP(ECMWF_sys2) against ERA-40 and op. analysis
 Event: 2m-Temperature Anomaly in upper tercile
 Forecast start dates: 02/1987-2001, FC period: months 2-4 (MAM), ens: 0- 4



9. ábra: az ECMWF által készített, a felső tercilisbe eső 2-4 hónapos 2 m-es évszakos előrejelzésre vonatkozó ROC terület térkép, az 1987-2001 időszak alapján

5.2.1.2 Brier Score

Ezzel a módszerrel a kategorikus előrejelzésekhez számszerű értékeket adhatunk. Egy diszkrét paraméterre alkalmazható négyzetes középhiba számítás, ahol jellemzően egy-egy meteorológiai esemény bekövetkezését vizsgáljuk. A képlet a következő:

$$BS = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2 \quad (5)$$

ahol p_i az ensemble előrejelzésben egy adott esemény bekövetkezésének valószínűsége és o_i a megfigyelt események valószínűsége pedig 0 vagy 1 értéket veheti fel, attól függően, hogy bekövetkezett vagy sem. A négyzetes hibához hasonlóan Brier Score értéke is nullával egyenlő tökéletesen sikerült prognózis esetén (*Persson and Grazzini, 2007*).

5.2.1.3 Brier Skill Score

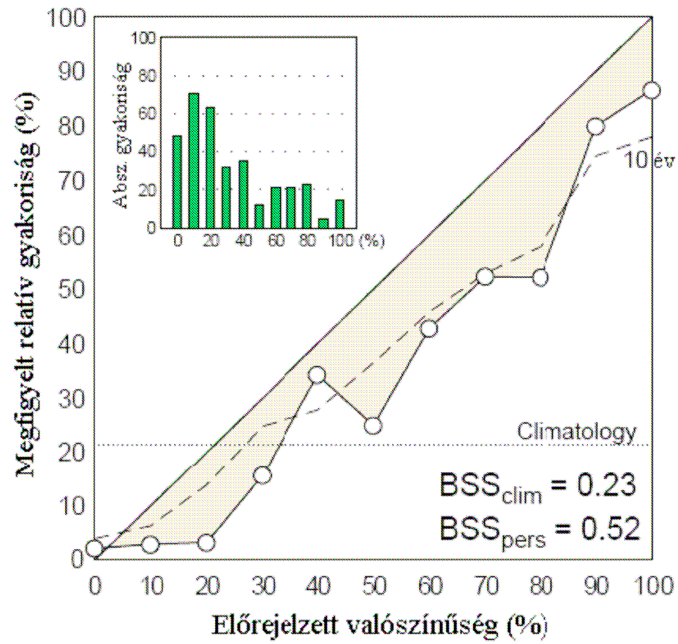
A Brier Skill Score módszerrel egy referencia előrejelzéshez hasonlíthatjuk a verifikálni kívánt előrejelzést a következő képlet segítségével:

$$BSS = 1 - \left(\frac{BS}{BS_{ref}} \right) \quad (6)$$

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

5.2.1.4 Megbízhatósági diagram

Az átlagos előrejelzett valószínűség és az esemény bekövetkezésének relatív gyakoriságának négyzetes eltérését intervallumonként összegzi a megbízhatósági (angolul reliability) diagram (10. ábra). Akkor kapunk jó Brier Score értéket, ha ez az érték a lehető legkisebb, azaz a bekövetkezések gyakorisága és az előrejelzett valószínűségek közel vannak egymáshoz. Értéke 0 és 1 között lehet (Szépszó, 2004). Az előrejelzett valószínűség az x - tengelyen, az intervallumokra vonatkozó megfigyelt esemény gyakoriságok pedig az y – tengelyen vannak feltüntetve. Az átló a tökéletes megbízhatóság (perfect reliability) vonala, ekkor annyiszor következett be az esemény minden intervallumban, ahányszor a valószínűségét előre jeleztük. Szemléletesen ennek a tagnak a jósága azt jelenti, hogy a görbénk az átlóhoz közel húzódik. Ha a vonal az átló alatt halad, akkor fölébecsléssel, ha fölötté, akkor alábecsléssel van dolgunk. Fölébecslésről akkor beszélünk, ha az esemény kevesebbszer következett be, mint amekkora valószínűséget adtunk.



10. ábra: Megbízhatósági diagram egy év csapadék valószínűségi előrejelzése, a beágyazott kis diagram az előre jelzett valószínűségek gyakoriságát mutatja. A megbízhatósági görbe (körökkel) hasonlóan, mint a klimatológiai átlagot jelző görbe (szaggatott vonal) túlbecslést jelez

6. Verifikációs vizsgálatok

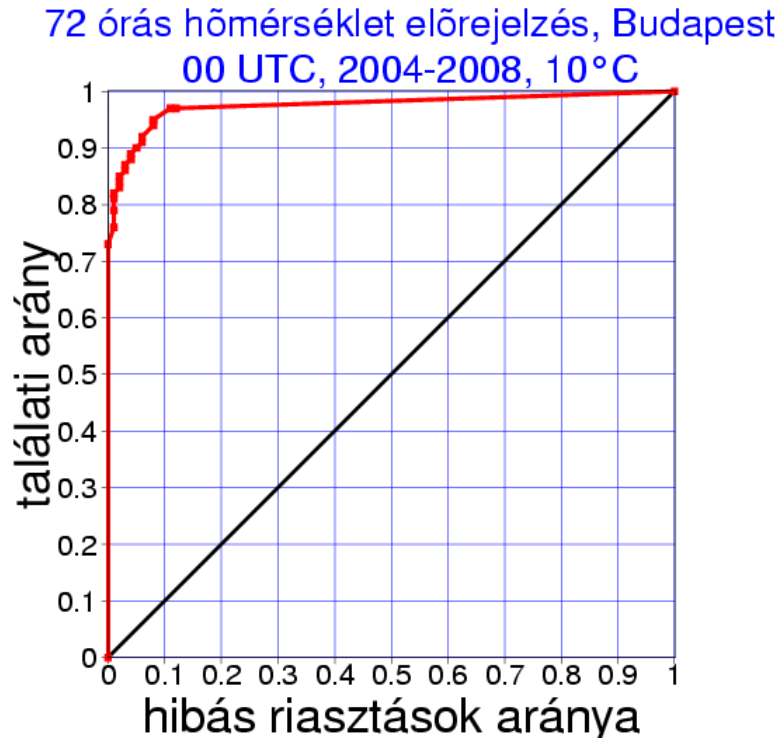
Vizsgálataim során különböző determinisztikus és ensemble verifikációs módszereket próbáltam ki. Elsőként a 2004 és 2008 év közötti ensemble hőmérséklet előrejelzések bevalását vizsgáltam különböző időlépcsők esetében. A verifikációs vizsgálatokhoz UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelven írt programcsaládot fejlesztettem ki. A felhasznált adatok az ECMWF MARS rendszeréből (*Raoult, 2001*) származnak. A verifikációs eredmények grafikus megjelenítéshez – az ELTE Meteorológiai Tanszék nimbus gépén is telepített – Magics++ grafikus programcsomag (*Lamy-Thépaut, 2009, Siemen and Lamy-Thépaut, 2010*) felhasználásával szintén FORTRAN nyelvű programokat készítettem.

6.1 Középtávú előrejelzések verifikációja

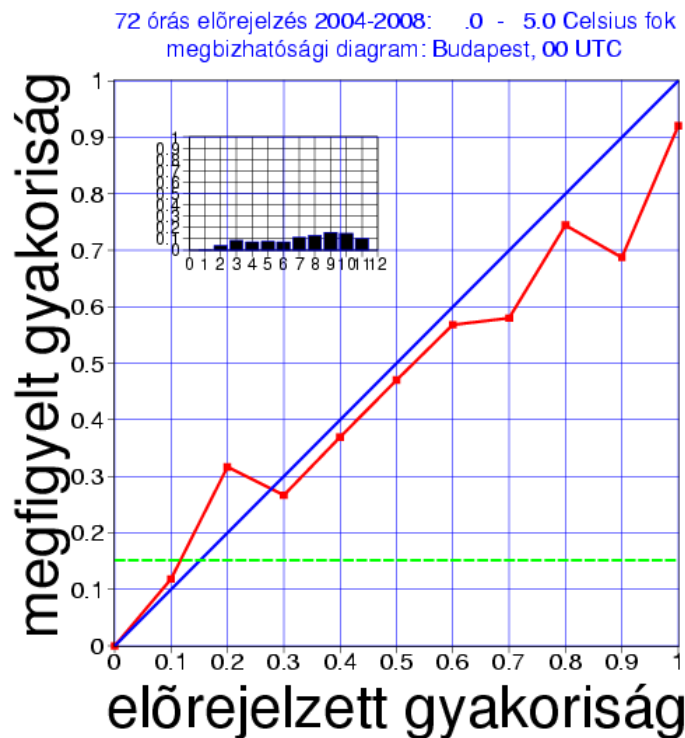
6.1.1 Hosszabb idősor alapján végzett ensemble verifikáció

Elsőként a ROC diagram vizsgálatával kezdtem. A 11. ábrán 10 °C-os hőmérséklet küszöbvel a 00 UTC-es budapesti 72 órás előrejelzés ROC görbáját ábrázoltam. Jól látható, hogy a görbe alatti terület igen nagy, vagyis a 10 °C feletti előrejelzésekre vonatkozó küszöb esetén a FAR (hibás riasztások aránya) értéke kisebb, míg a találatok aránya, a HR nagyobb. Azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az előrejelzés nagyon pontos volt, majdhogynem tökéletes előrejelzés készült.

A következő lépésben a megbízhatósági diagram használhatóságát vizsgáltam. A 12. ábra a 0 és az 5 °C fok közötti küszöbvel az átlagos előre jelzett valószínűség és az esemény bekövetkezésének relatív gyakoriságát mutatja. A megbízhatósági görbe (piros vonal) a tökéletes megbízhatóság (perfect reliability) vonalához (kék átló) közelít a középső szakaszban, alábecslést figyelhetünk meg az első szakaszban, végül pedig fölébecslésről beszélhetünk. A beágyazott kis diagram az előrejelzett valószínűségek gyakoriságát mutatja. Jól látható, hogy a gyakoriságok közel egyformák. A zöld vonal azt mutatja meg, hogy az adott esemény milyen gyakorisággal fordul elő, esetünkben ez megközelítőleg 15%.



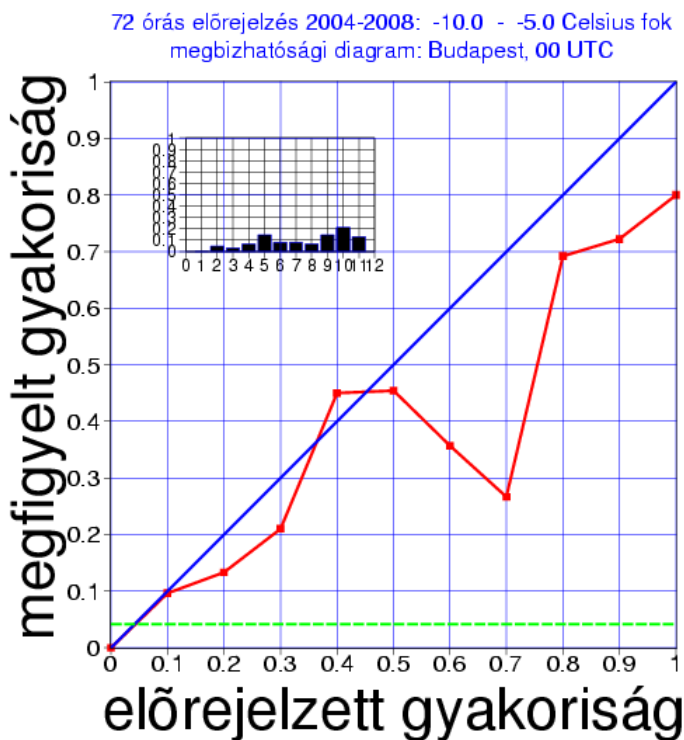
11. ábra: ROC diagram 10 °C feletti hőmérsékleti előrejelzésekre vonatkozó küszöb esetén a 00 UTC-s budapesti 72 órás előrejelzésekre a 2004 és 2008 közötti időszak adatai alapján



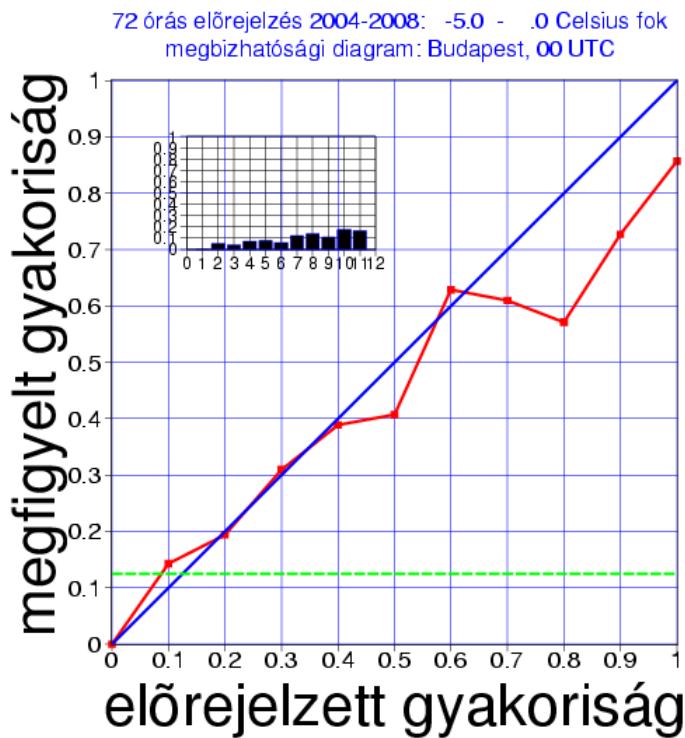
12. ábra: Megbízhatósági diagram 0 és 5 °C közötti hőmérsékleti előrejelzésekre vonatkozó küszöb esetén a 00 UTC-s budapesti 72 órás előrejelzésekre a 2004 és 2008 közötti időszak adatai alapján

Továbbiakban szeretnék néhány megbízhatósági diagramot bemutatni különböző hőmérsékleti küszöbökkel (-10 – -5 °C; -5 – 0 °C; 0 – 5 °C; 5 – 10 °C; 10 – 15 °C; 15 – 20 °C; 20 – 25 °C). A 13. és 14. ábrán a két 0 °C hőmérséklet alatti eset látható. Elmondható, hogy a 2004-2008-as időszakban a 72 órás előrejelzések a -10 és -5 °C közötti előrejelzésekor jórészt alábecslésről beszélhetünk, míg a -5 és 0 °C - os küszöbnél ez az alábecslés jóval kisebb, közelít a tökéletes előrejelzési görbéhez, vagyis a fagyos napoknál az enyhébb eseteket jobban előre tudjuk jelezni. A -10 és -5 °C fokos esetről 4 % - os, -5 és 0 °C fokosnál 12 % - os gyakorisággal fordult elő.

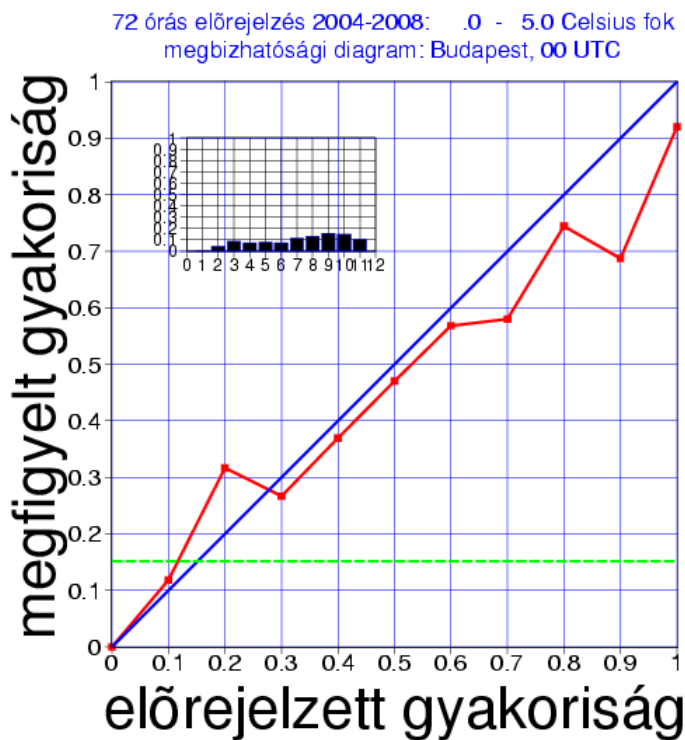
A 15. és 16. ábrán a 0 és 5 °C és 5 valamint az 5 és 10 °C hőmérsékletek közötti esetekre vonatkozó megbízhatósági diagramok láthatók. Elmondható, hogy a 2004-2008-as időszakban a 72 órás előrejelzések a 0 és 5 °C közötti előrejelzések esetében jórészt alábecslésről beszélhetünk, míg az 5 és 10 °C-os küszöbnél az alábecslés és a fölébecslés is szinte egyenlő nagyságú, vagyis ha a két esetet nézzük elmondható, hogy az enyhébb eseteket jobban előre tudja a modell jelezni. A 0 és 5 °C fokos eset 15 %-os, 5 és 10 °C fokos eset 18%-os gyakorisággal fordult elő. Tehát a 0 és a 10 °C közötti eseteknél nincs az a drasztikus eltérés a gyakoriságokban, mint az előző két esetről.



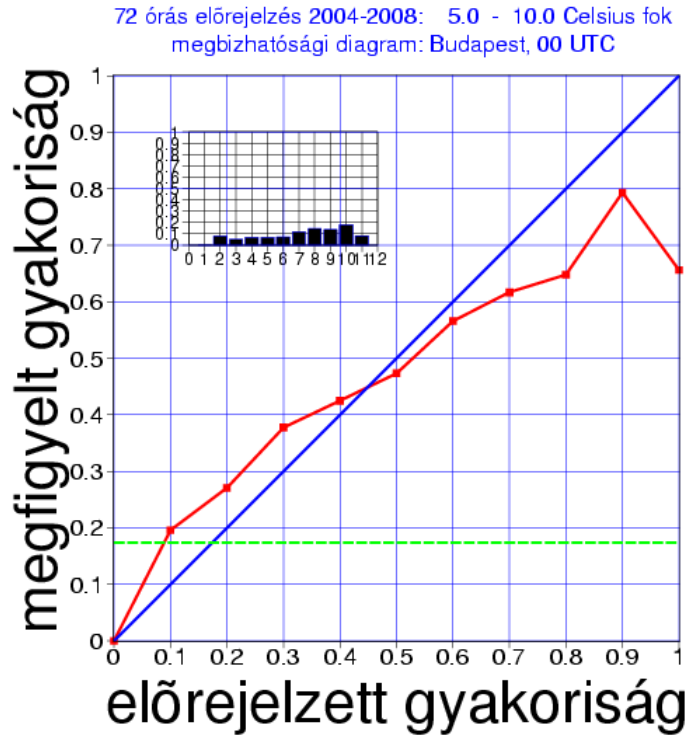
13. ábra: Megbízhatósági diagram 72 órás előrejelzés Budapestre 00 UTC-re -10 és -5 °C fokos hőmérsékleti küszöbvel



14. ábra: Megbízhatósági diagram 72 órás előrejelzés Budapestre 00 UTC-re -5 és 0 °C fokos hőmérsékleti küszöbvel

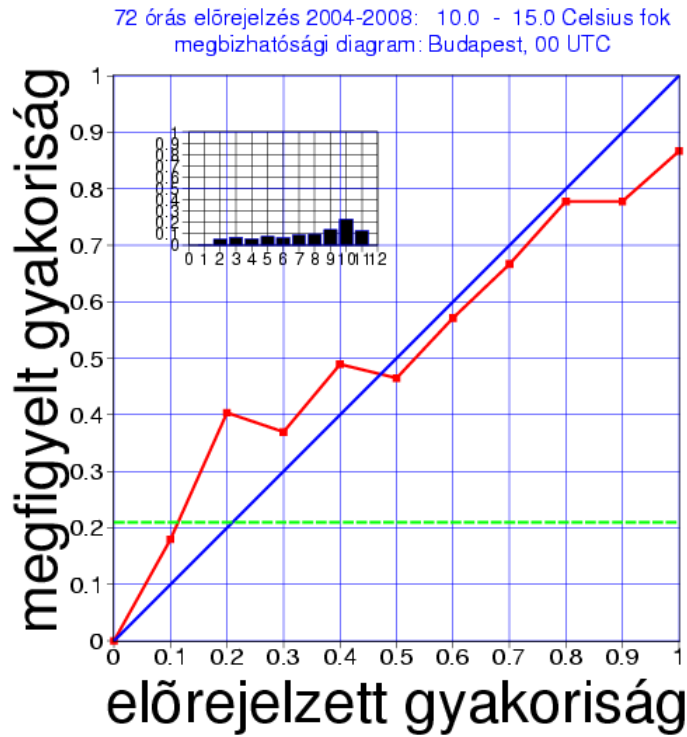


15. ábra: Megbízhatósági diagram 00 UTC-es budapesti 72 órás előrejelzés 0 és 5 °C fokos hőmérsékleti intervallum esetén

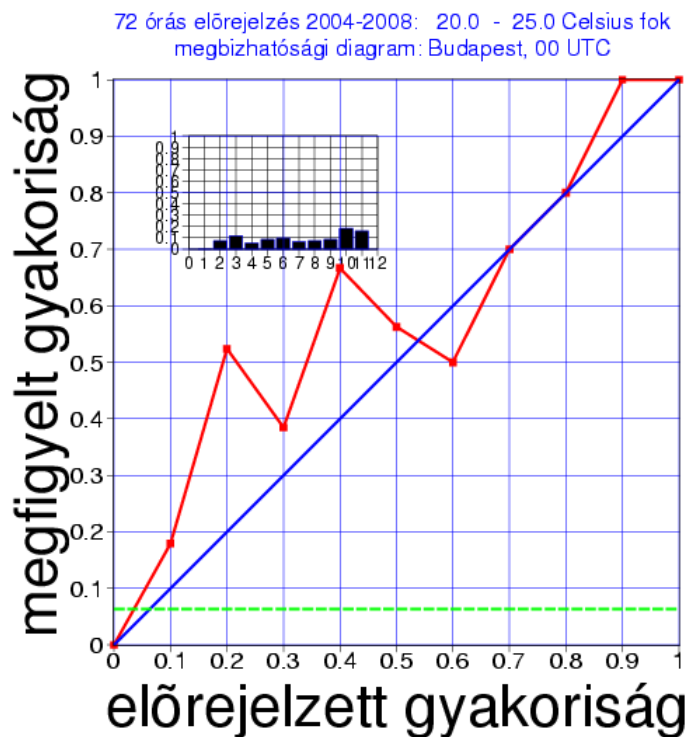


16. ábra: Megbízhatósági diagram 00 UTC-es budapesti 72 órás előrejelzés 5 és 10 °C fokos hőmérsékleti intervallum esetén

A 17. és 18. ábrán a 10 - 15 °C és a 15 - 20 °C hőmérsékletű esetek láthatók. Elmondható, hogy a 2004-2008-as időszakban a 72 órás előrejelzések a 10 és 15 °C közötti előrejelzések esetében az alábecslés kicsivel nagyobb, mint a fölébecslés, míg a 15 - 20 °C esetben a fölébecslésről beszélhetünk inkább, vagyis ha a két esetet nézzük elmondható, hogy minél magasabb a hőmérséklet, annál inkább fölébecsül az előrejelzés. A 10 és 15 °C fokos esetről 21 % - os, 15 - 20 °C fokosnál 19 % - os gyakorisággal fordult elő. Tehát a 10 - 20 °C közötti eseteknél sincs az a drasztikus eltérés a gyakoriságokban, mint az első két esetről.

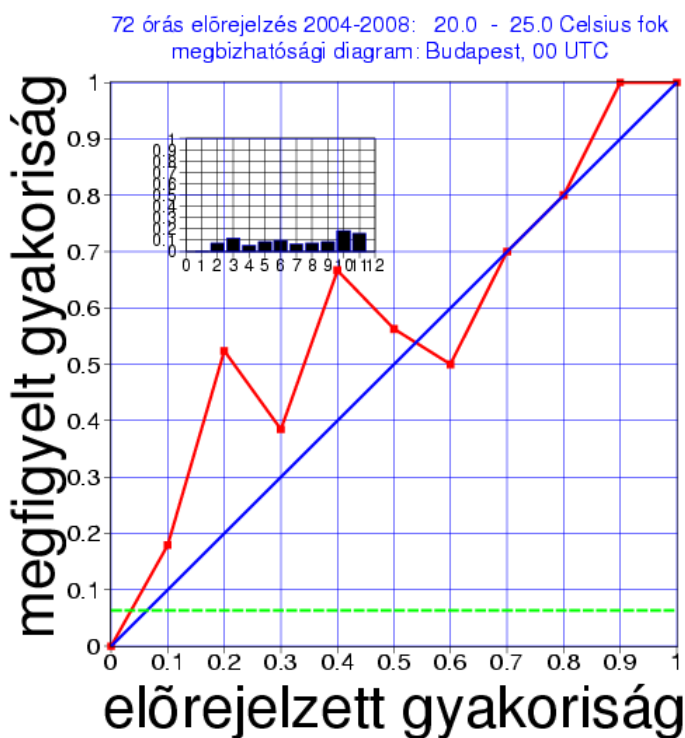


17. ábra: Megbízhatósági diagram 00 UTC-es budapesti 72 órás előrejelzés 10 és 15 °C fokos hőmérsékleti intervallum esetén



18. ábra: Megbízhatósági diagram 00 UTC-es budapesti 72 órás előrejelzés 15 és 20 °C fokos hőmérsékleti intervallum esetén

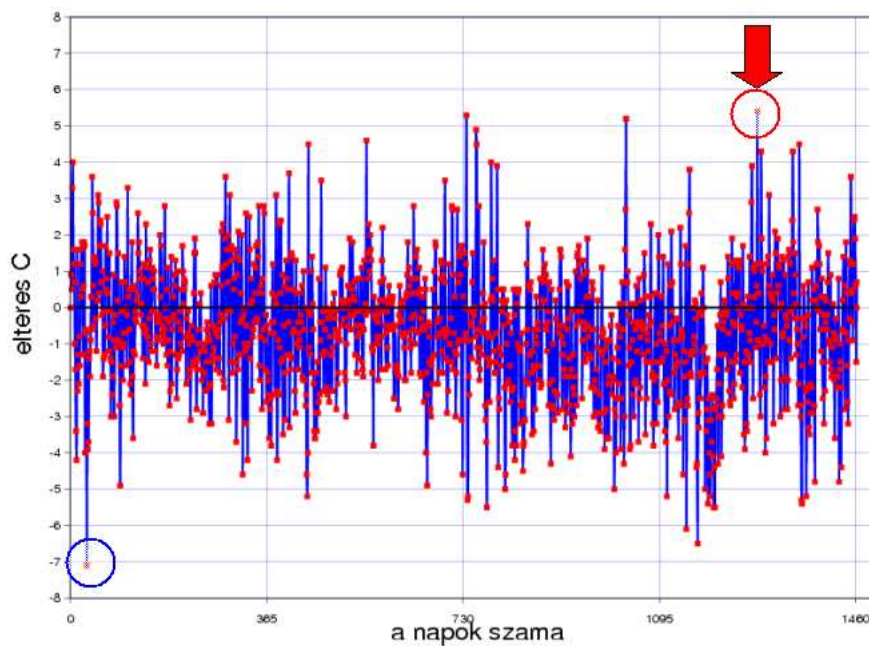
A 19. ábrán a 20 és 25 °C fokos hőmérsékletű esetek láthatók. Elmondható, hogy a 2004-2008-as időszakban a 72 órás előrejelzések a 20 és 25 °C közötti előrejelzések esetében jórészt fölébecslésről beszélhetünk, habár egy ki szakaszon illeszkedik a tökéletes előrejelzési görbére. A 20 és 25 °C fokos esetén körülbelül 6 %-os gyakorisággal fordult elő.



19. ábra: Megbízhatósági diagram 00 UTC-es budapesti 72 órás előrejelzés 20 és 25 °C, hőmérsékleti intervallum esetén

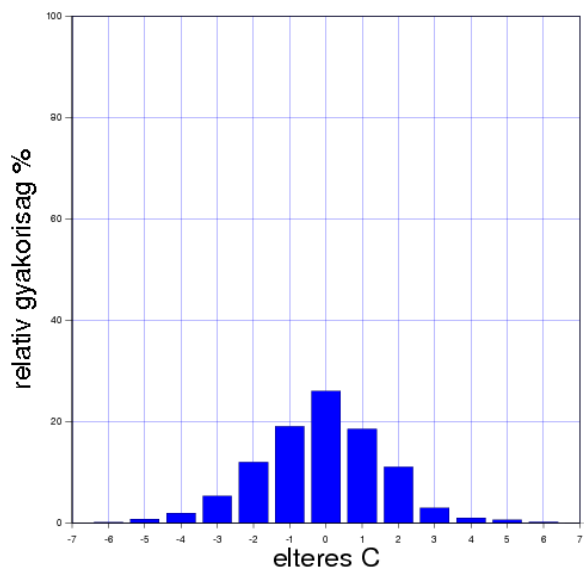
6.1.2 Gyenge beválású numerikus előrejelzések tanulmányozása

Vizsgálatom tárgya a leggyengébb beválású esetek szinoptikus meteorológiai háttere. A leggyengébb beválású esetek vizsgálatakor az ensemble átlag átlagos abszolút hibáját vizsgáltam. FORTRAN program segítségével sorba rendeztem, majd kiírtam az 5-5 legnagyobb negatív illetve pozitív előjelű eltérést és meghatároztam a pontos dátumot. A legnagyobb pozitív eltérés 2007. június 30-án 5,4-es eltéréssel, a legnagyobb negatív eltérés pedig 2004. január 30-án volt 7,2 eltéréssel, mely az 20. ábrán jól megfigyelhető. Az eltérés relatív gyakoriságát hisztogramon ábrázolva jól látható, hogy a görbe harang alakú vagyis szimmetrikus (21. ábra).



20. ábra: 2004 és 2008 között - napi bontásban - a 72 órás budapesti 00 UTC-s ensemble előrejelzés és megfigyelés különbsége

Hisztogram Budapest

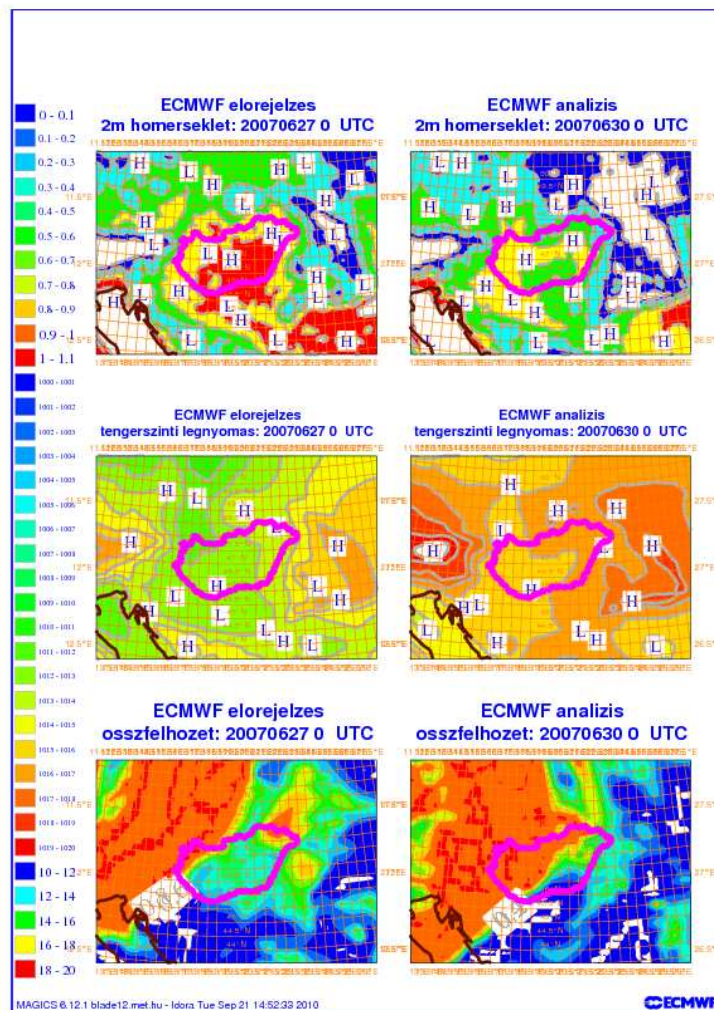


21. ábra: Az előrejelzés és a megfigyelés közötti eltérés relatív gyakorisága hisztogramon ábrázolva Budapesten

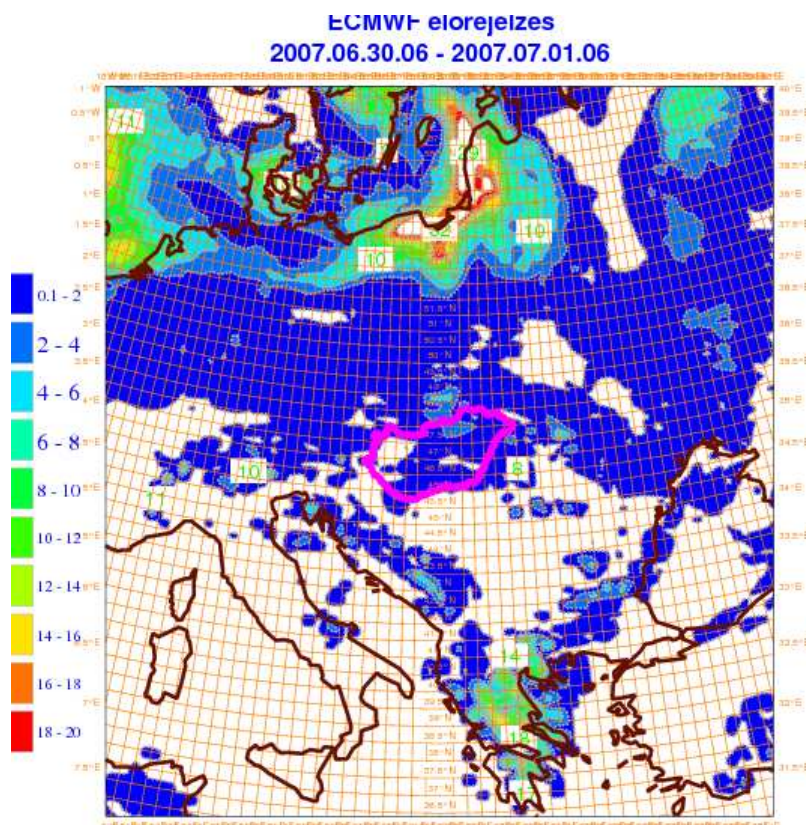
A két időpont közül a 2007. június 30-i időpontot választottam és megvizsgáltam az eltérés szinoptikai hátterét. A 22. ábrán térképes formában ábrázoltam a 2007. június 27-i 72 órás előrejelzést és a 2007. június 30-i analízist a 2 méteres hőmérsékletre, a

tengerszinti légnyomásra és a felhőborítottságra nézve. Jól megfigyelhető, hogy míg a prognózis jóval magasabb hőmérsékletet jelzett előre szám szerint 24 °C - ot, mint amit valójában mértek (19 °C fok). Ennek oka, hogy a modell – térségünkben – nem kellő pontossággal jelezte előre a nagyskálájú nyomási képződményeket.

A 22. ábrán a középső térképen a tengerszinti légnyomás értéke nem 1010 és 1014 hPa nyomásérték között mozog, hanem 1016 és 1018 hPa között és a magasnyomású terület elhelyezkedése is megváltozott. Ennek következtében a térbeli felhőzet helyzete is megváltozott, míg a 72 órás modell előrejelzés csak az Alpokalja területére adott felhőzetet, 3 nappal későbbi analízis szerint viszont a felhőzet a fél országot beborította. 23. ábrán lévő csapadék előrejelzés azt mutatja, hogy ezen a napon 06 UTC-re várható csapadék, míg a valóságban nem ekkor, hanem 00 UTC-kor következett be. Vagyis a probléma fő oka az volt, hogy a modell 6 órát késett és csapadékhullás volt (23. ábra).



22. ábra: 2m-es hőmérséklet, tengerszinti légnyomás és felhőborítottság térkép a 2007. június 30. 00 UTC-ra vonatkozó 72 órás ECMWF előrejelzés (bal oldal) és analízis (jobb oldal) alapján

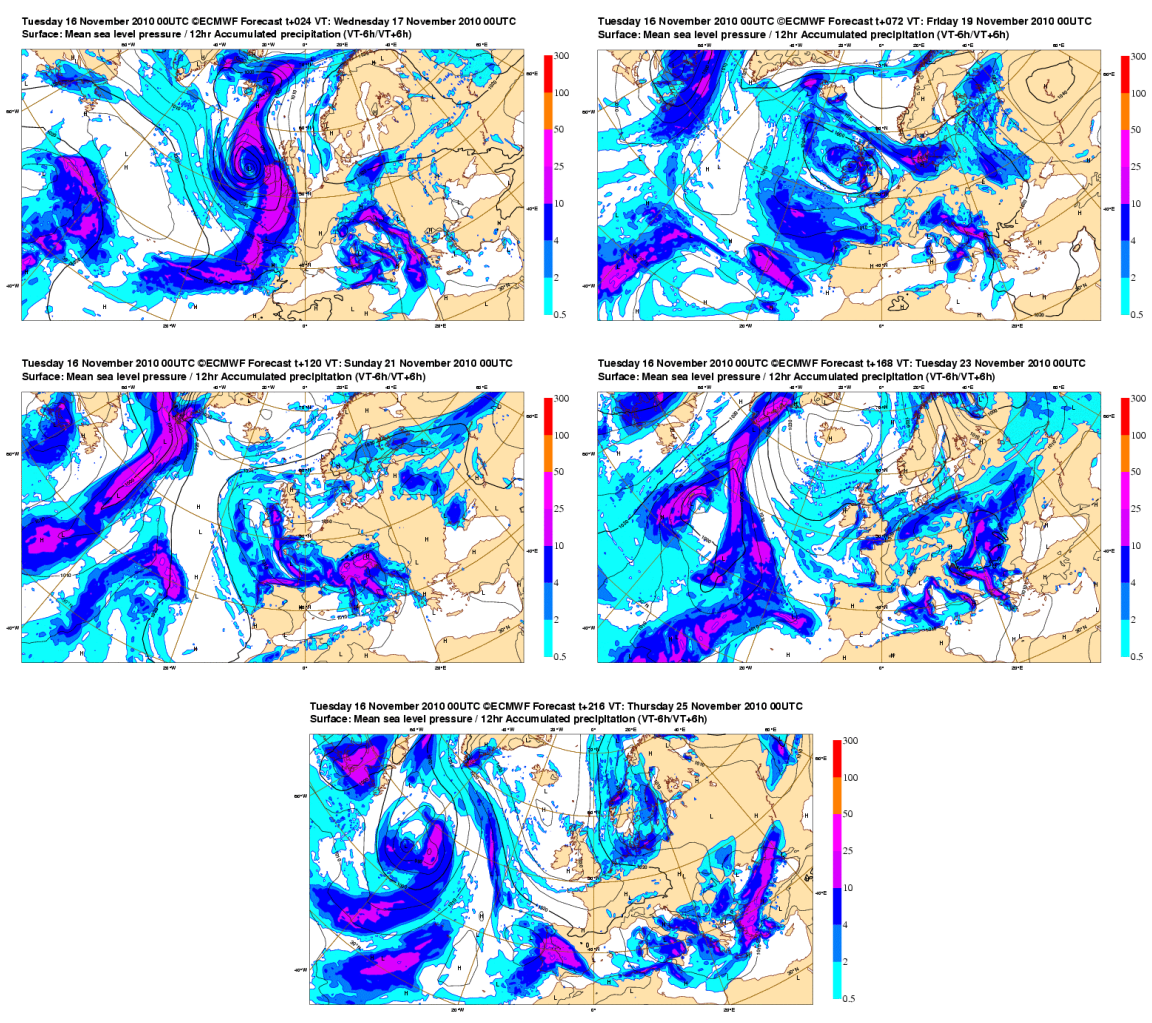


23. ábra: 2007. június 30. 06 UTC-re szóló csapadék előrejelzés Közép-Európa térségére.

6.1.3 Jó beválású numerikus előrejelzések tanulmányozása

A 2010. november 22-i nagycsapadékú időjárási helyzet előrejelezhetőségét vizsgáltam a megelőző hét nap előrejelzései alapján.

Az 2. pontban a 2. ábrán bemutatott, 2010. november 16-án kiállított fáklyadiagram elemzésénél 2010. november 22-re jelentős csapadékot jelzett Budapest területére. A mellékelt térképsorozaton (24. ábra) megvizsgáltam a 12 órás intervallumra összegzett csapadék összeg alakulását november 16-ától kezdődően +24, +72, +120, +168, +216 órás időléptékekkel. A 24. ábra 4. altérképén megfigyelhető, hogy a 2010. november 16-án készített +168 órás előrejelzés 12 órás csapadék összegtévkép „kiadós” csapadékot adott egy mediterrán ciklonnak köszönhetően a Kárpát-medence térségére, mely valóban bekövetkezett nem csak Budapest, hanem az egész ország területén. 2010. november 25-re a ciklon tovább vonult Dél-Kelet Európa felé.



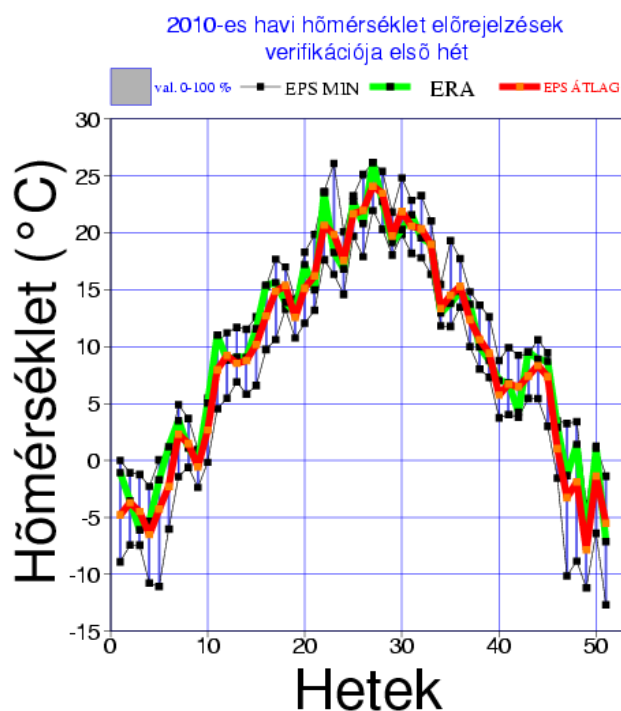
24. ábra: +24, +72, +120, +168, +216 órás ECMWF csapadék előrejelzés
2010. november 17. 00 UTC-től kezdődően, Európa térségére

6.2. Havi előrejelzés verifikáció

6.2.1 Havi előrejelzés verifikációja heti felbontásban nézve

A következőkben a havi előrejelzésekre végzett verifikációs vizsgálatokat szeretném bemutatni. Először megvizsgáltam a 2010-es év havi hőmérséklet előrejelzéseinek bevalását különböző hetekre, az analizált ERA-Interim adatokat viszonyítottam az EPS átlagokhoz, valamint az ensemble terjedelemhez. Az ábrákon zölddel a megfigyelési értékek, pirossal pedig az EPS látható, szürke boksok pedig az EPS minimum és maximum értékek közötti terjedelmet jelentik.

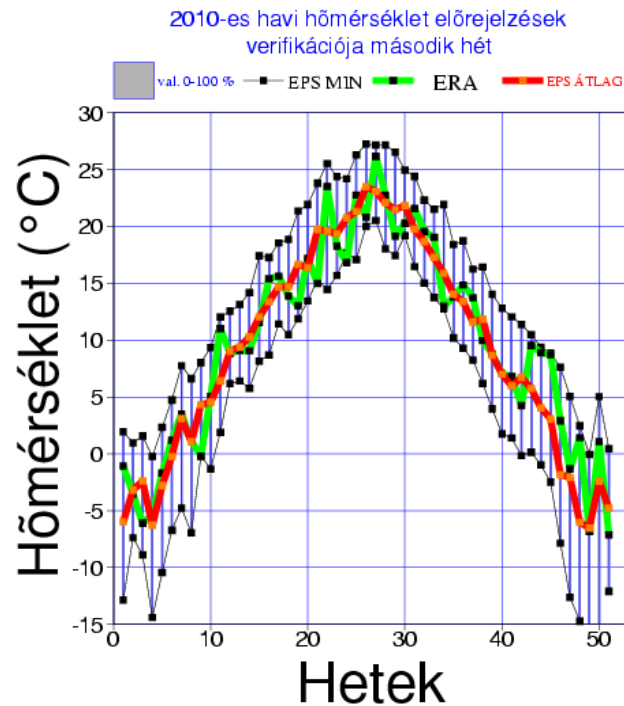
25. ábrán az első előrejelzett naptári hétre vonatkozó grafikon látható. Látható, hogy a narancssárga görbe jól követi a zöld görbét és elmondható, hogy az előrejelzés az első héten szinte tökéletes előrejelzés készül és az előrejelzés majdnem beleesik az EPS terjedelembé. Jól látható még, hogy előrejelzési hőmérséklet görbe a 0°C és a -6°C értékekre nem jelzett előre olyan pontosan. A továbbiakban a második, harmadik és negyedik naptári hetekre vonatkozó előrejelzés bevalását vizsgáltam meg.



25. ábra: 2010-es év havi hőmérsékleti előrejelzések első hetének verifikációja

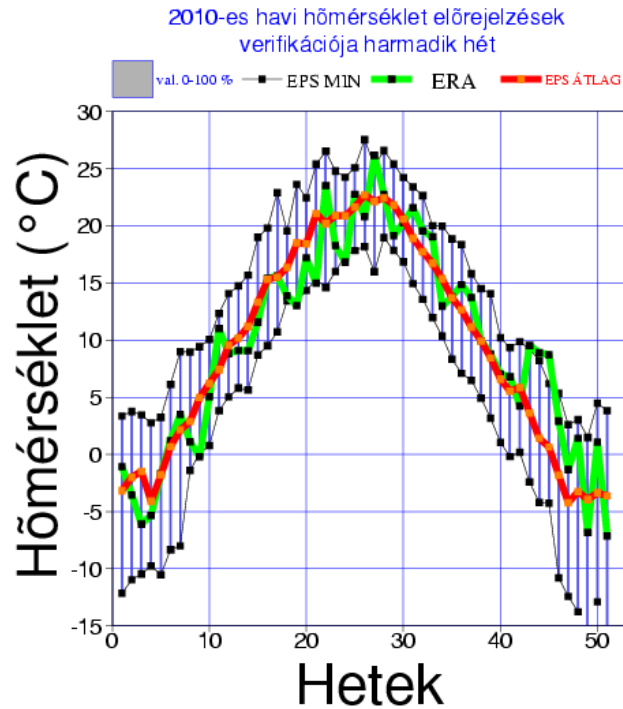
A második előrejelzett naptári hétre vonatkozó előrejelzés esetében már jóval nagyobb hibák láthatók (26. ábra), míg az első hét esetében az előrejelzés még elég közel

helyezkedett el a megfigyeléshez (25. ábra). A tavaszi időszaktól kezdődően már az előrejelzés jóval eltérőbb, ugyanez vonatkozik az őszi hónapokra is. Viszont meglepően a januári és februári hónapokban egész szépen követik az megfigyelési görbét az EPS előrejelzési értékek, addig a decemberi hónapokban ez nem figyelhető meg. Másik érdekes megfigyelés, hogy a szeptember eleji úgynevezett vénasszonyok nyarát a modell szinte tökéletesen előre jelezte. Másik eltérés az első héthez képest az EPS valószínűség sokkal nagyobb terjedelmű.



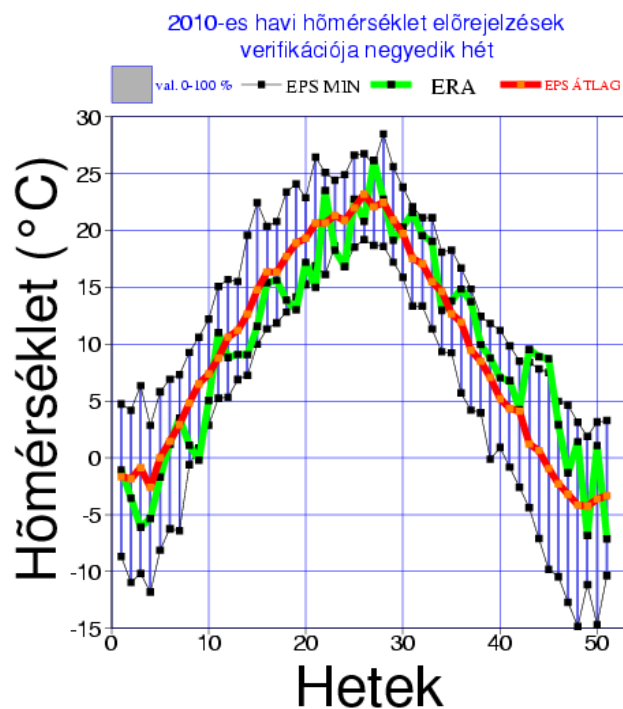
26. ábra: 2010-es év havi hőmérsékleti előrejelzések második hetének verifikációja

27. ábrán már az EPS előrejelzési görbe időbeli menete jóval simább és már kezd a klimatológiai átlag értékekhez hasonlítani. A tavasz végi és nyári hónapokban ez a különbség már jóval nagyobb, mint a második héten. Emellett a második hétnél megfigyelt év végi különbség még jobban megfigyelhető, 43. héten még az EPS terjedeleminél is magasabb, kiugró értékeket figyelhetünk meg.



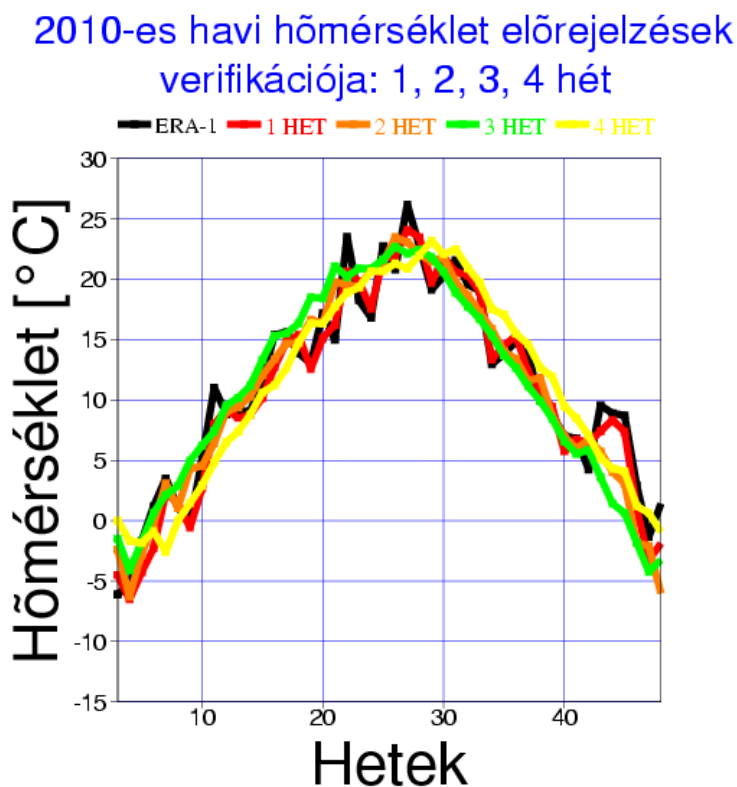
27. ábra: 2010-es év havi hőmérsékleti előrejelzések harmadik hetének verifikációja

A negyedik előrejelzett héten a görbe időbeli menete még simább lett (28. ábra). Megfigyelhető, hogy az első félévben szinte alulbecslésről beszélhetünk, míg az év második félévben a második héten is megfigyelt fölébecslést figyelhetünk meg. Az EPS terjedelem most is nagy, de nem annyira, mint amit a második héten láthattuk (26. ábra).



28. ábra: 2010-es év havi hőmérsékleti előrejelzések negyedik hetének verifikációja

Végezetül készítettem egy összehasonlító hetenkénti hőmérséklet előrejelzési verifikációs görbét, melyen feltüntettem az ERA-Interim értékeket és az előzőekkel ellentétben most a nem csak az egyes hetek és EPS terjedelmet, hanem az EPS előrejelzési értékeket mind a négy hétre nézve. Így nem csak külön hetes felbontásban tudtam következtetéseket levonni, hanem az egész havi előrejelzés együttes beválásának alakulását is megfigyelhettem. Fekete görbével az ERA hőmérsékleti értéket, míg a piros, narancssárga, zöld, sárga görbékkel a hetenkénti EPS átlag előrejelzési értékeket ábrázoltam. Láthatjuk, hogy a görbék menete egyre simább lesz és a klimatikus átlaghoz egyre jobban közelít. Elmondhatjuk azt is, hogy a 2010-es év első felében inkább fölébecslést tapasztalunk, míg a másodikban inkább alábecslést figyelhetünk meg (29. ábra).



29. ábra: 2010-es év havi hőmérsékleti előrejelzések verifikációja egész hónapra nézve

6.2.2 Havi előrejelzés verifikáció három kiválasztott időpontban

A továbbiakban szeretném néhány havi előrejelzés beválásának szinoptikus meteorológiai háttér vizsgálatát bemutatni. A napi négy időponthoz tartozó ERA-Interim analíziseket és EPS előrejelzéseket hetenkénti GRIB fájlba rendeztem, majd ezeket heti

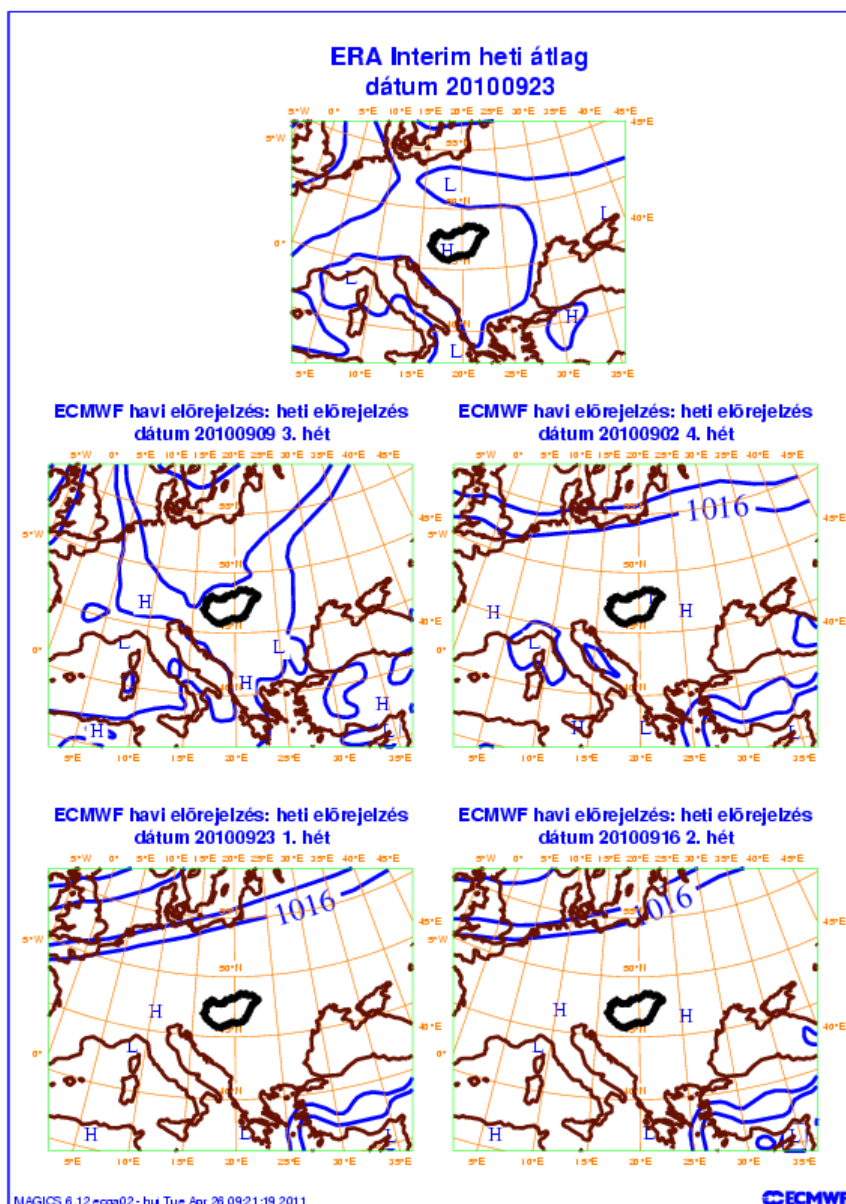
adatokat kiátlagoltam és ezeket az adatokat térképen ábrázoltam mind 2 méteres hőmérsékletre, mind a tengerszinti légnyomásra (30-35. ábra).

A 30-35. ábrákon legfelül a heti ERA Interim átlagmező, alatta az egy, kettő, három illetve négy héttel korábban készült havi előrejelzésekből az adott hétre átlagolt térképek látszanak. Vagyis például a 2010. szeptember 27. - október 3-i hétre vonatkozó ERA Interim térképhez a 2010. szeptember 2-án futott 4. heti előrejelzési átlag térkép tartozik, ez látható a négyes blokk jobb felső sarkában (30-31. ábra). A bal felső térkép a 2010. szeptember 9-én készült 3. heti előrejelzést mutatja. A jobb alsó ábrán a 2010. szeptember 16-án futott 2. heti előrejelzési átlag térkép látszik. Végül a bal alsó ábra a 2010. szeptember 23-án futott 1. heti előrejelzési térképet mutatja.

Ezen módszer alapján készítettem el a térképeket, melyek közül most a véges terjedelem miatt csak két gyenge beválású és egy jó beválású eset szinoptikus meteorológiai vizsgálatát ismertetem. Az elkészített többi térkép megtalálható a Függelékben.

Ellentétben az előző alfejezetben használt módszertől, ahol a verifikációs vizsgálatot csak egy kiválasztott rácspontra néztem, ennél a módszernél lehetőségem nyílik egy nagyobb térségben, esetünkben Közép-Európára megvizsgálni a havi előrejelzések beválását egy adott időszakban. A két gyengébb beválású esetként a 2010. szeptember 27. – október 3-i és a 2010. október 25 – 31-i heteket választottam.

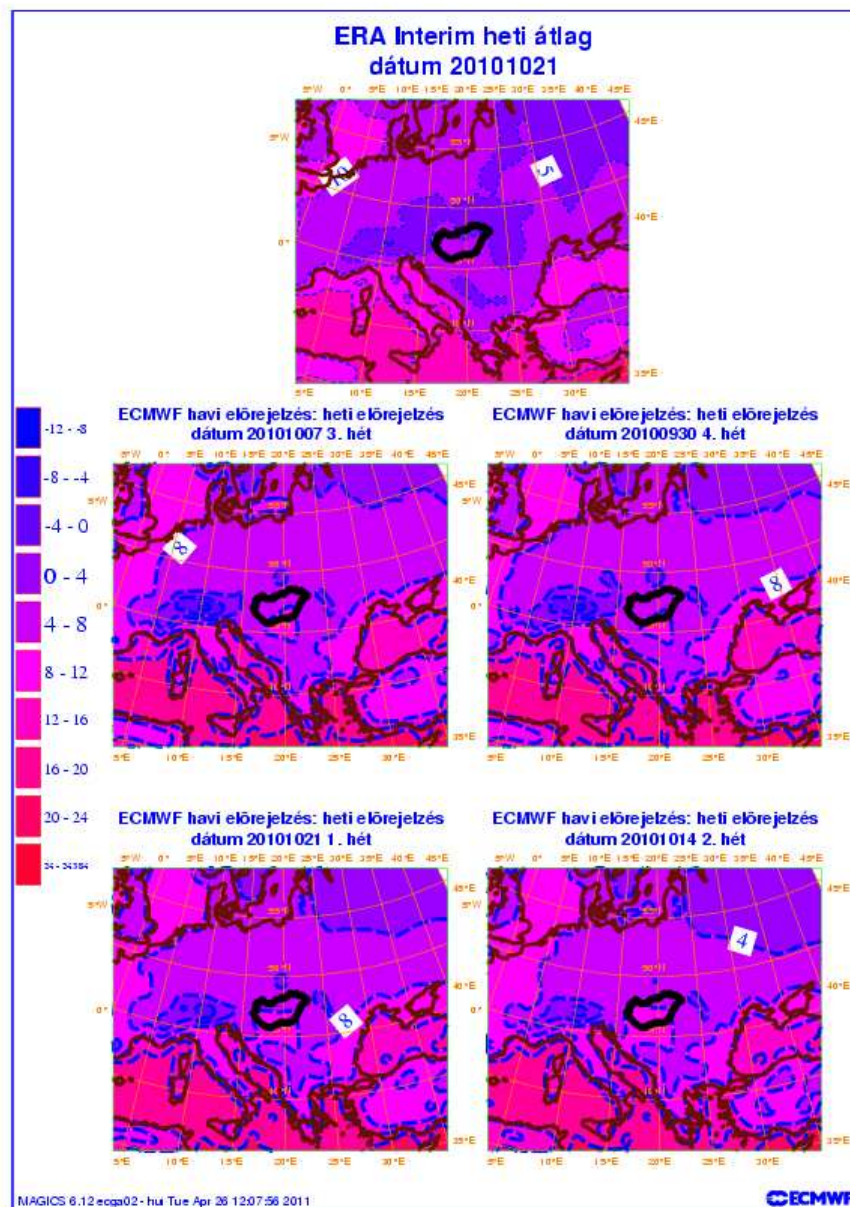
Első esetben a baloldali hőmérséklet térképeken (30. ábra) jól megfigyelhető, hogy a bekövetkezett időjárási helyzetet, még az első héten készített havi előrejelzés sem jelezte jól előre. A modell a 4. héttől kezdődően kisebb változásokkal végig melegebb hőmérsékleti tartományokban mozgott, mint amit a bekövetkezett időjárási helyzetben tapasztaltunk. Jól megfigyelhető, hogy Európa középső és északi részére egy hidegebb nyúlványt láthatunk, mint amit a modellek előre jeleztek. A 3. és 4. héten az előrejelzés ezt a hidegebb légrést még meg sem jeleníti, a második héten Oroszország északi részén egy kisebb foltban már mutat valamit, de ez az első héten sem olyan kiterjedt, mint ami a megfigyelési térképen látszik. A tengerszinti légnyomás térképeken (31. ábra) ez az eset szintén megfigyelhető, csak ott egészen az első hétig közel hasonló nyomási izobárokat prognosztizáltak. A negyedik és a harmadik hét között szinte nincs is lényeges változás, a második héten is csak az olaszországi Alpok és Pó-síkság területénél jelent meg egy alacsonyabb nyomású terület, amit érdekes módon az első héten nem jeleztek előre, mégis bekövetkezett. Mégis az izobárok helyzete az első heti térképen mutat egyedül lényeges változást.



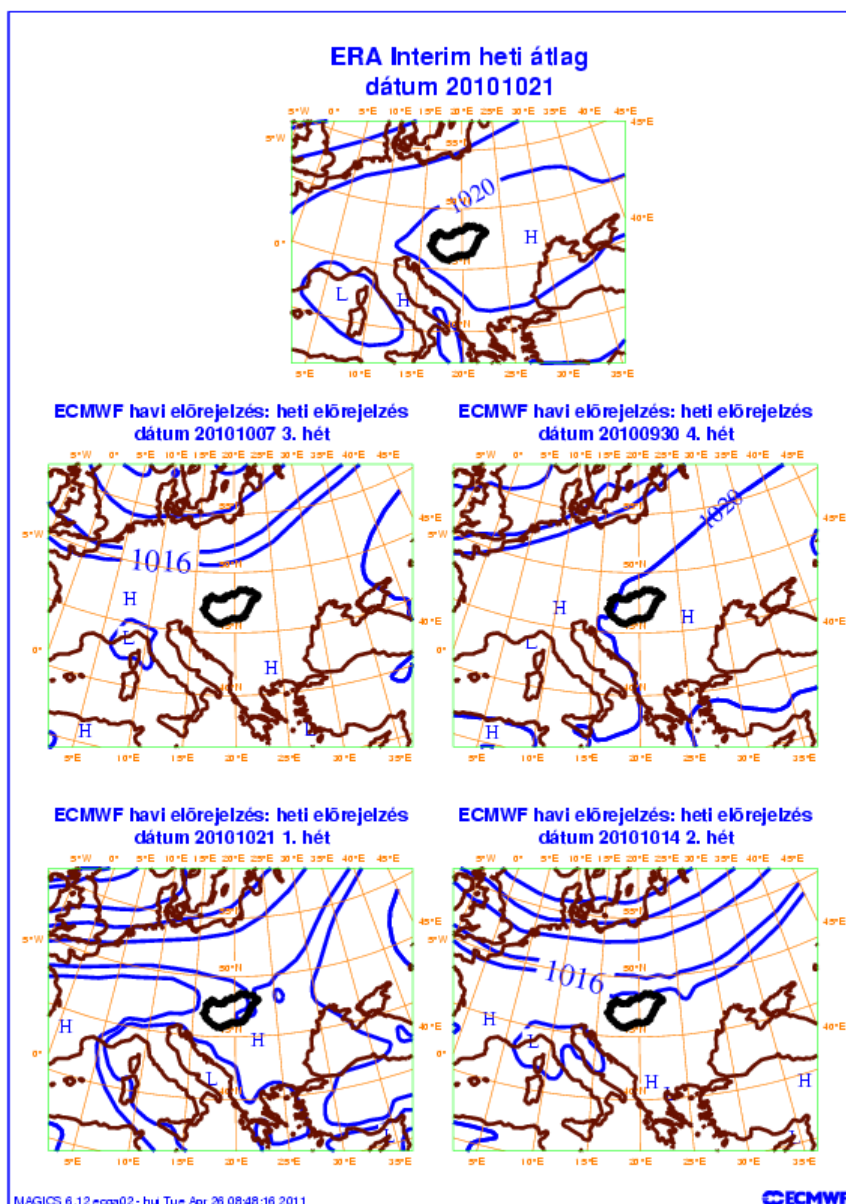
31. ábra: 2010. szeptember 27 – október 3-i hétre vonatkozó, 1-4 héttel korábban készült havi előrejelzésekből számított heti átlag, valamint az ugyanezen időszakra vonatkozó ERA-Interim heti átlag tengerszinti légnyomás mező (fent)

A második esetben először a légnyomás térkép (32. ábra) alapján választottam ki az időpontot és tanulmányoztam a hőmérsékleti térképeket (33. ábra). Választásom egy 2010. októberi végi időszakra esett. Az előző esethez képest, most a szembetűnő eltéréseket a havi előrejelzések között a légnyomás térképek mutatják, a hőmérsékleti térképek szinte majdnem megegyeznek, persze így is más a megfigyelési térképhez képest. Szintén melegebb értékeket jelzett a modell, azzal a különbséggel, hogy Magyarország déli és Horvátország és Szerbia északi területére jelzett meleg terület a második héten teljesen körbehatárolt terület lett, ami a megfigyelési térképen nincsen.

A légnyomás előrejelzésének alakulása a hőmérséklethez képest sokkal látványosabb. Érdekes módon a negyedik héthez képest az izovonalak helyzete és értéke a harmadik hétre teljesen megváltozott és ez maradt a második héten is, kicsit sűrűbb izobárokkal. Az első hétre ez szintén teljesen átalakult. Másik figyelemre méltó dolog, hogy a Fekete-tenger térségében lévő magas légnyomású területet a negyedik héten a modell szinte tökéletesen mutatta, nem csak a helyzete, hanem a nyomási értéke is egyezik. Míg az alacsony nyomású területet Korzika térségénél kisebb területi változásokkal a harmadik és a második héten jelent meg.



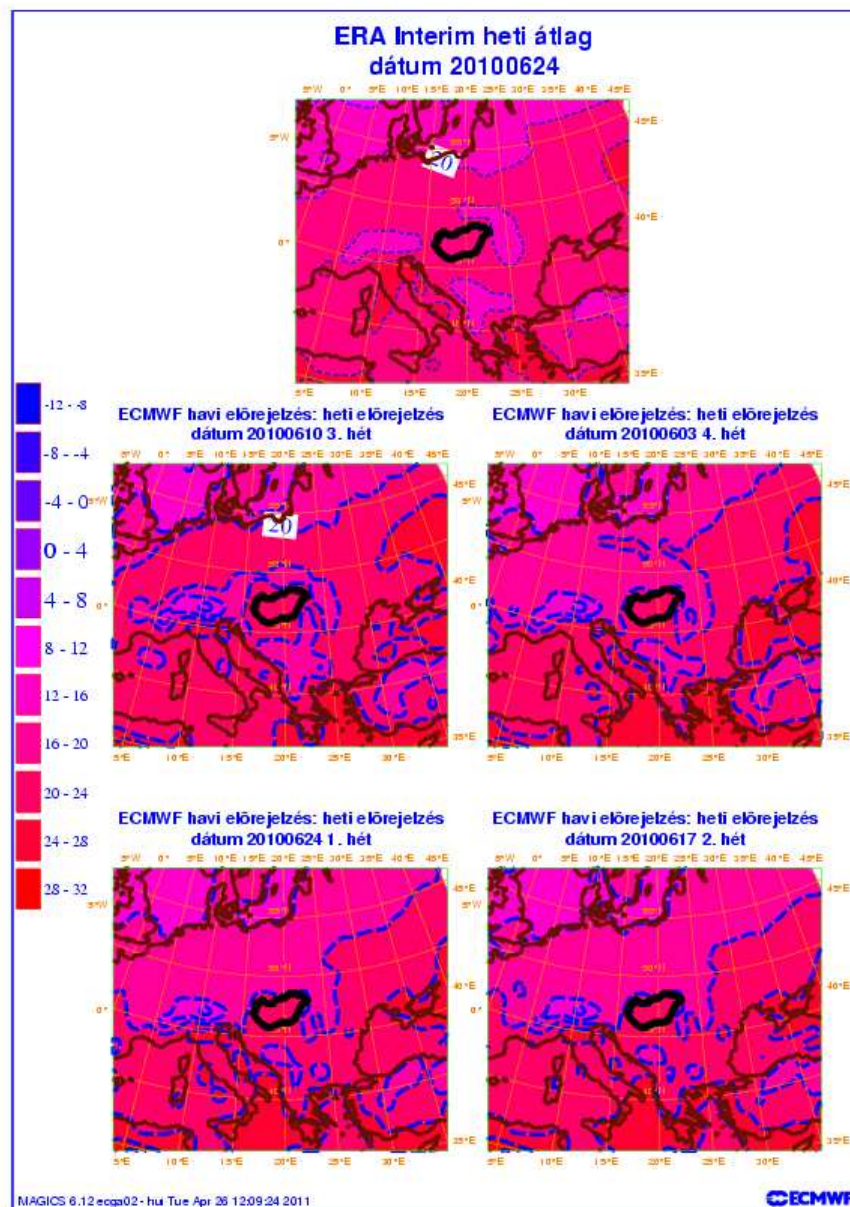
32. ábra: 2010. október 25 – október 31-i hétre vonatkozó, 1-4 héttel korábban készült havi előrejelzésekből számított heti átlag, valamint az ugyanezen időszakra vonatkozó ERA-Interim heti átlag tengersizinti 2 m hőmérséklet mező (fent)



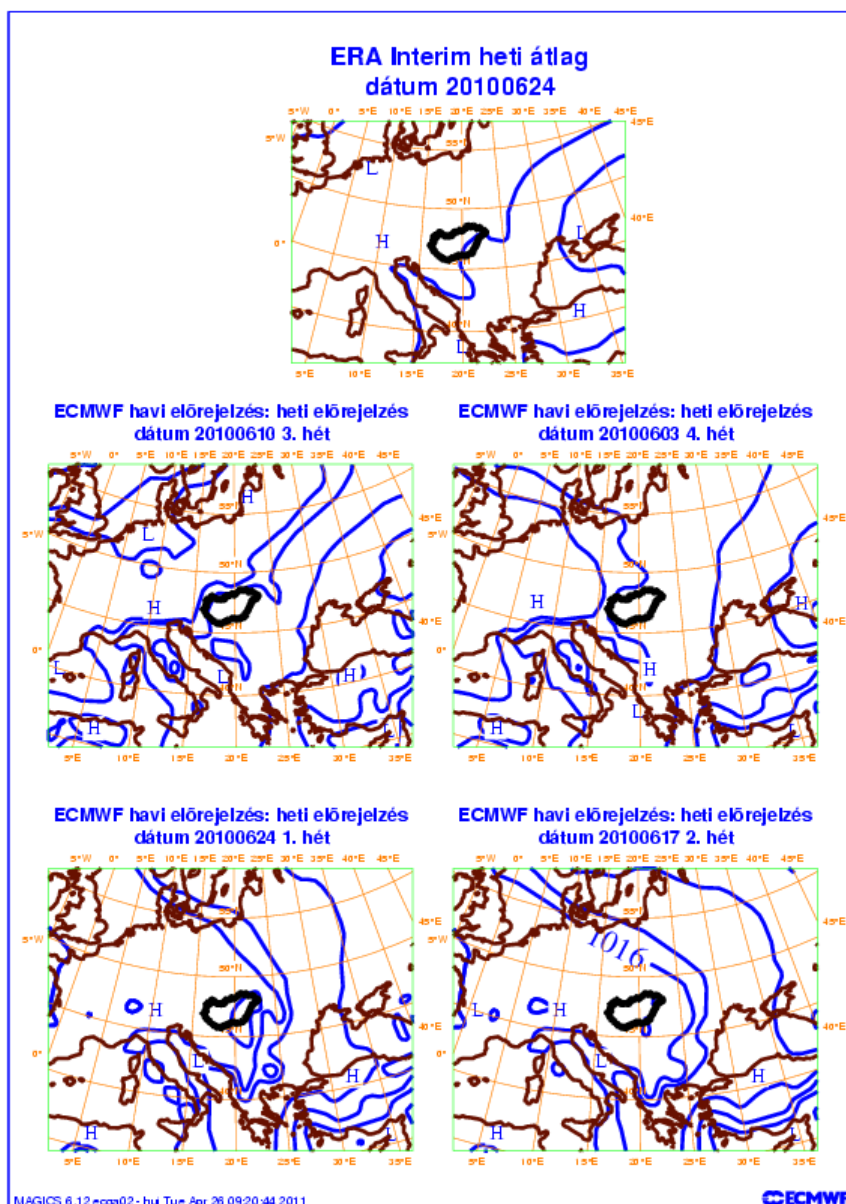
33. ábra: 2010. október 25 – október 31-i hétre vonatkozó, 1-4 héttel korábban készült havi előrejelzésekből számított heti átlag, valamint az ugyanezen időszakra vonatkozó ERA-Interim heti átlag tengerszinti 2 m légnyomás mező (fent)

A harmadik esetben egy jó beválású példát szeretnék elemezni, amit a hőmérséklet előrejelzés alapján választottam ki (34. ábra). A 2010. év júniusában bekövetkezett magas hőmérsékletű helyzetet a modell jól jelezte előre, és jól megfigyelhető a Kárpát-medence és a környező hegységrendszer közötti hőmérséklet különbség is.

A harmadik és a negyedik hét között lényeges különbség nincs hőmérséklet szempontjából, míg a tengerszinti légnyomás térképen a harmadik héten az izovonalak felosztása Magyarország területénél megváltozott (35. ábra). A második és az első hét között szintén nincs változás, míg a második héten a harmadik héthez képest az átlaghőmérséklet területi elhelyezkedése megváltozott. A nyomástérképeken szintén az izovonalak és az alacsony és magas nyomású területek helyzetük eltérnek. Elmondható, hogy a modell 2010 júniusban bekövetkezett extrém meleg időjárási helyzetet jól előre tudta jelezni.



34. ábra: 2010. június 28. – július 4-i hétre vonatkozó, 1-4 héttel korábban készült havi előrejelzésekből számított heti átlag, valamint az ugyanezen időszakra vonatkozó ERA-Interim heti átlag tengerszinti 2 m hőmérséklet mező (fent



35. ábra: 2010. június 28. – július 4-i hétre vonatkozó 1-4 héttel korábban készült havi előrejelzésekből számított heti átlag, valamint az ugyanezen időszakra vonatkozó ERA-Interim heti átlag tengersizti légnyomás mező (fent)

7. Összefoglalás

Szakedolgozatomat az Országos Meteorológiai Szolgálat Numerikus Modellező Osztályán készítettem. Témám az *ECMWF ensemble dekád és havi fáklya előrejelzések verifikációja* volt, melyben először egy rövid bevezetésben utaltam a további vizsgálati alterületekre. Célkitűzéseim ismertetése után rátértem az Európai Középtávú Előrejelző Központ rövid bemutatására, ezen belül az ensemble előrejelző módszerre és az előrejelzések grafikus megjelenítési lehetőségeire.

Majd a főcímben is említett dekád és havi fáklya előrejelzéseket ismertettem, ami után az ECMWF által készített reanalízisek bemutatása, összehasonlítása követett különböző szempontok –, pl. rácsfelbontás, izobárszintek, domborzati felbontás – szerint.

A következő fejezetben a determinisztikus és valószínűségi előrejelzések verifikációjához alkalmazható módszereket mutattam be. Ezt követően saját készítésű FORTRAN programcsalád kifejlesztésével különböző hosszúságú idősorok verifikációját vizsgáltam mind kiválasztott rácspontra, mind pedig a közép-európai térségre. A szakedolgozatomban Budapestre végzett verifikációt mutattam be – megjegyezzük, hogy más magyar szinoptikus állomások adataival végzett vizsgálati eredmények hasonló eredményt adnak.

Először egy hosszabb idősorra (2004-2008) végeztem verifikációt ROC diagram és megbízhatósági diagram segítségével. Majd rátértem a numerikus előrejelzések beválásának szinoptikus meteorológiai feltételekhez kapcsolható vizsgálatára. Itt két esettel is foglalkoztam, egy jó beválású és egy gyengébb beválású numerikus előrejelzéssel szinoptikus meteorológiai vizsgálatok keretében.

Utána megvizsgáltam a havi fáklya előrejelzések beválását heti felbontásban, mind pontbeli verifikáció és szinoptikus meteorológiai vizsgálatokkal. A szinoptikus meteorológiai vizsgálatok során három időszak előrejelzését elemeztem, melyből kettő gyengébb beválású és egy jó beválású numerikus előrejelzés volt. Elmondható, hogy a modell nem tudta a szeptemberi melegebb, ún. „vénasszonyok nyara” időszakot és az őszi időjárást havi szinten prognosztizálni, de a 2010. júniusi extrém meleg időszakot a modell sikeresen előre jelezte.

Láthattuk, hogy a verifikáció nem csak a fejlesztők számára ad fontos információt, hanem az előrejelzést készítőik számára is.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném e néhány sorban kifejezni köszönetemet témavezetőmnek, Ihász Istvánnak a rengeteg segítségért és útmutatásért, amit kaptam, az Országos Meteorológiai Szolgálatnál töltött kellemes és felejthetetlen percekért, órákért. Köszönöm még azt a rengeteg tanácsot, amivel a dolgozat írásának rémét sikerült leküzdenem és kellő motivációt kaptam, hogy a témában való ismereteim mélyítsem és, hogy megszeretette velem.

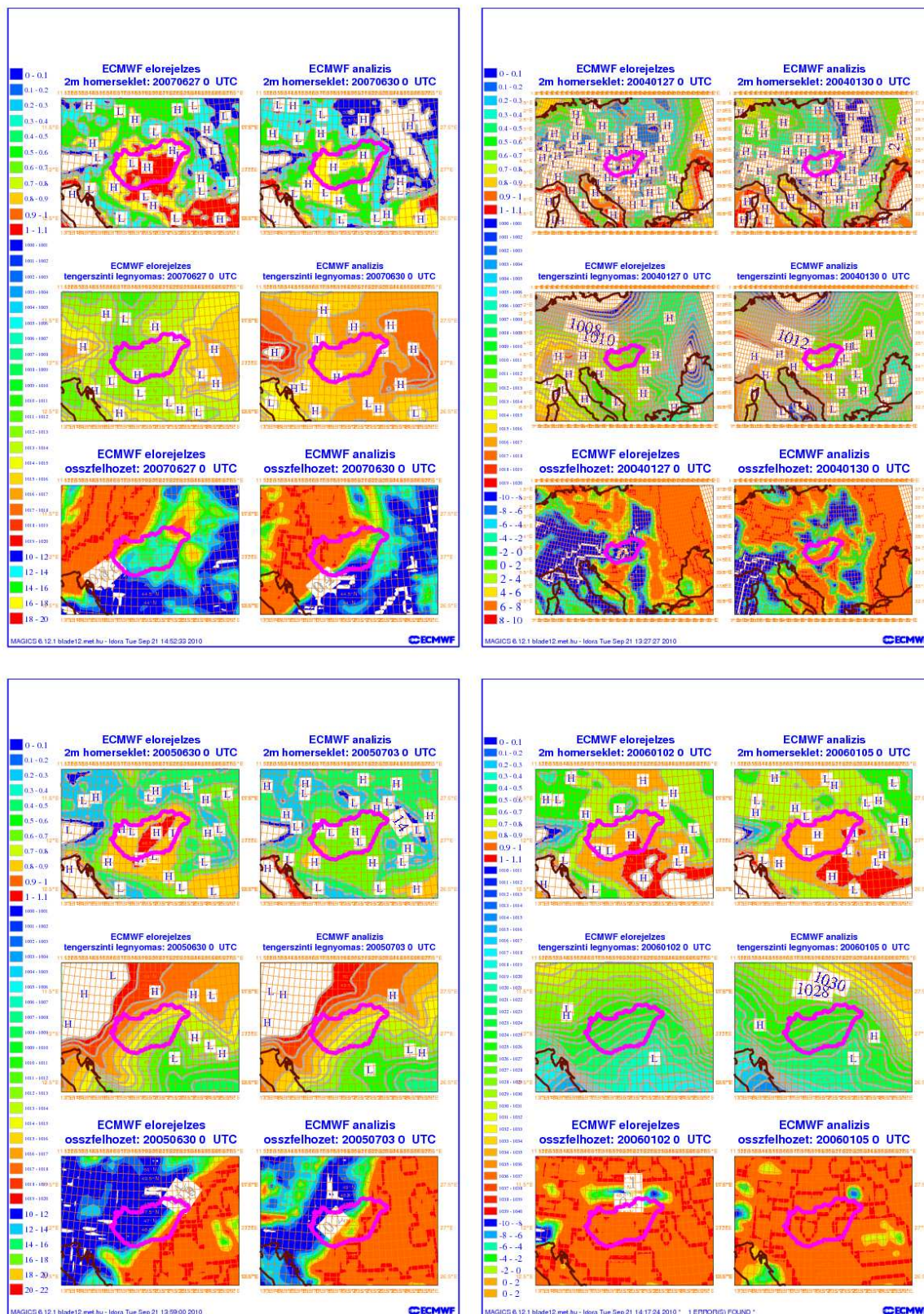
Köszönöm még Barcza Zoltán belső konzulensemnek a formai követelményekkel kapcsolatos hasznos tanácsokat és ötleteket.

Irodalomjegyzék

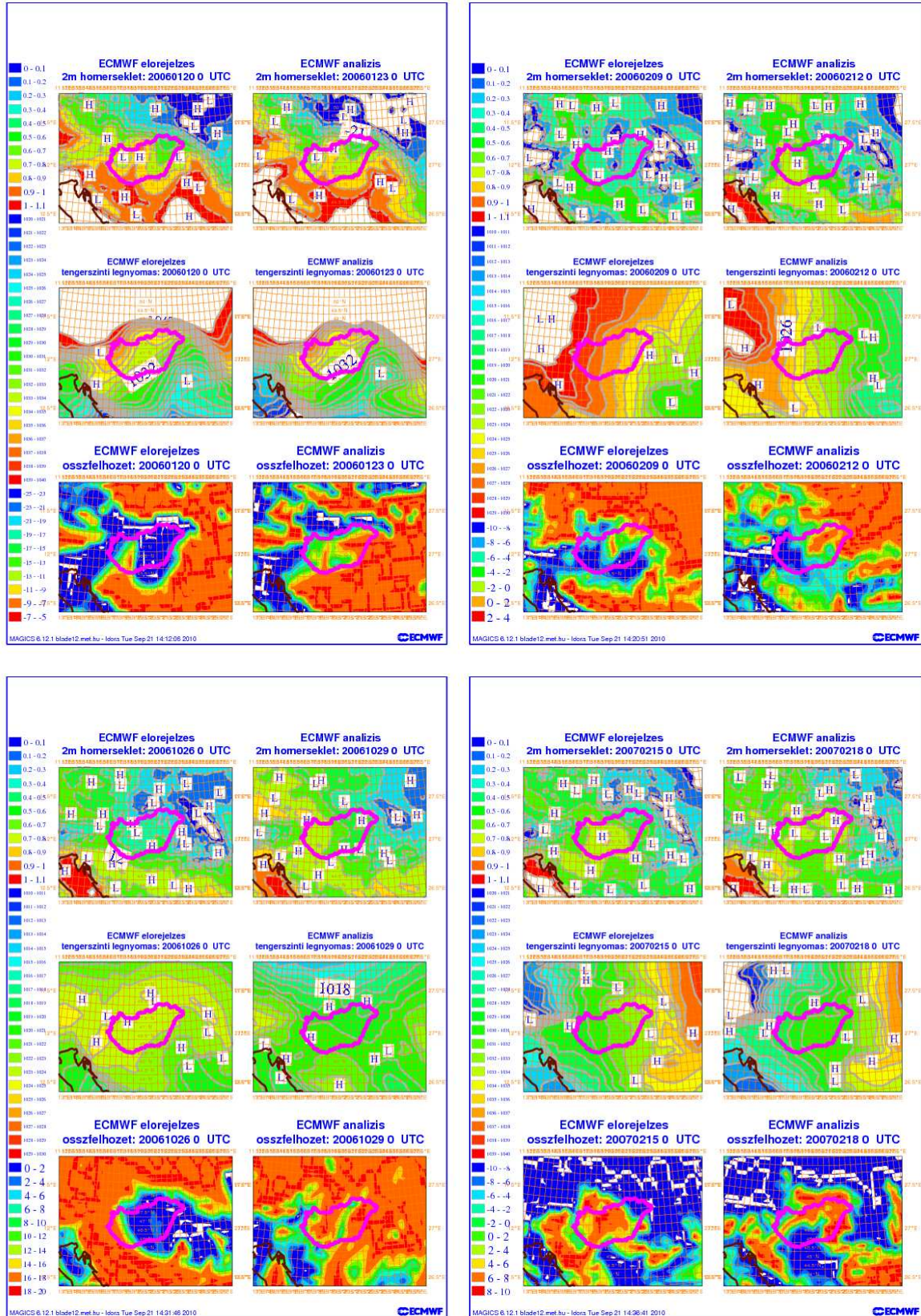
- Andersson, D., 1997: Seasonal forecasting at ECMWF. *ECMWF Newsletter* 77, 2-8.
- Andersson, D., 1998: Seasonal forecasting at ECMWF: and update. *ECMWF Newsletter* 80, 13-19.
- Buizza, R., Bidlot, J.R., Wedi, N., Fuentes, M., Holt, G., Palmert, T., Vitart, R., 2006: The ECMWF variable Resolution Ensemble System (VAREPS), *ECMWF Newsletter* 108, 14-20.
- Götz, G., 2001: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest.
- Horányi, A., 2010: Az időjárás (éghajlat) számszerű előrejelzése (bevezetés). <http://nimbus.elte.hu/~numelo>
- Hágel, E., 2003: Szélsőséges időjárási helyzetek korai felismerése az Extreme Forecast Index alkalmazásával. *ELTE TTK, Diplomamunka*
- Ihász I., 2003: Operatív középtávú időjárás előrejelző modellezés az ECMWFben. 29. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, 119-128*
- Ihász I., 2008: Közép és hosszútávú előrejelzési modelltermékek és alkalmazási lehetőségeik. 34. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa.*
- Ihász, I., Üveges, Z., Mile, M. and Németh, Cs., 2010: Ensemble calibration of ECMWF's medium range forecasts, *Időjárás*, 114, 275-286.
- Jolliffe, I.J. and Stephenson, B., 2003: Forecast verification. A practitioner's guide in atmospheric science. *John Wiley and Sons.*
- Kaba, M., 1995: Csatlakozásunk a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központjához, *Légekör* 1995/4. 34.
- Lamy-Thépaut, S., 2009: MAGICSS++ meteorological graphics library generating weather maps and graphics for web. *Proceedings of the Twelfth ECMWF Workshop on Meteorological Operational Systems*, Reading UK, 2-6 November 2009, 64-69.
- Marbouty, D., 2010: ECMWF's plan for 2010. *ECMWF Newsletter* 122, 4-5.
- Mile, M. 2008: Az ECMWF ensemble előrejelzések utólagos kalibrációja. *ELTE TTK, Diplomamunka, Budapest*
- Molteni, F.R., Buizza, T.N., Palmer, T.N., Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 122, 37-119.
- Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. *ECMWF Technical Memoranda* 430.

- Németh, Cs., 2010: Az ECMWF kalibrált valószínűségi előrejelzéseinek verifikációja. *ELTE TTK, Szakdolgozat.*
- Palmer, T., Buizza, R., Hagedorn, R., Lawrence, A., Leutbecher, M. and Smith, L.: 2006: Ensemble prediction: A pedagogical perspective: *ECMWF Newsletter* 106, 10-17.
- Persson, A., and Grazzini, F. 2007: User Guide to ECMWF forecasts products: *Meteorological Bulletin*, 3.2 (version 4.0), ECMWF Reading, UK
- Raoult, B., 2001: MARS on the Web: a virtual tour. *ECMWF Newsletter* 90, 9-17
- Siemen, S., Lamy-Thépaut, S., 2010: MAGICs++ 2-8 – New developments in ECMWF’s meteorological graphics library. *ECMWF Newsletter* 122, 32-33.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D. and Kobayashi, S., 2007: ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter* 110, 25-35
- Szintai, B., 2006: Rövidtávú ensemble előrejelzések készítése az ALADIN modellel. *ELTE TTK, Diplomamunka*
- Szépszó, G., 2004, Valószínűségi előrejelzések verifikációja. *OMSZ kézirat*
- Szűcs, M.: 2009: *Évszakos előrejelzések kalibrációja és verifikációja. ELTE TTK Diplomamunka.*
- Tajti, D., 2009: Az ECMWF determinisztikus és valószínűségi előrejelzések összehasonlító verifikációja. *ELTE TTK, Szakdolgozat.*
- Uppala, S., Kallberg, P., Hernandez, A., Saarinen, S., Fiorino, M., Li, X., Onogi, K., Sokka, N., Andrae, U. and Bechtold, V. Da Costa, 2004: ERA-40: ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957–2002. *ECMWF Newsletter* 101, 2-21.
- Üveges, Z., 2009: Az ECMWF havi előrejelzéseinek kalibrációja. *ELTE TTK Diplomamunka*
- 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

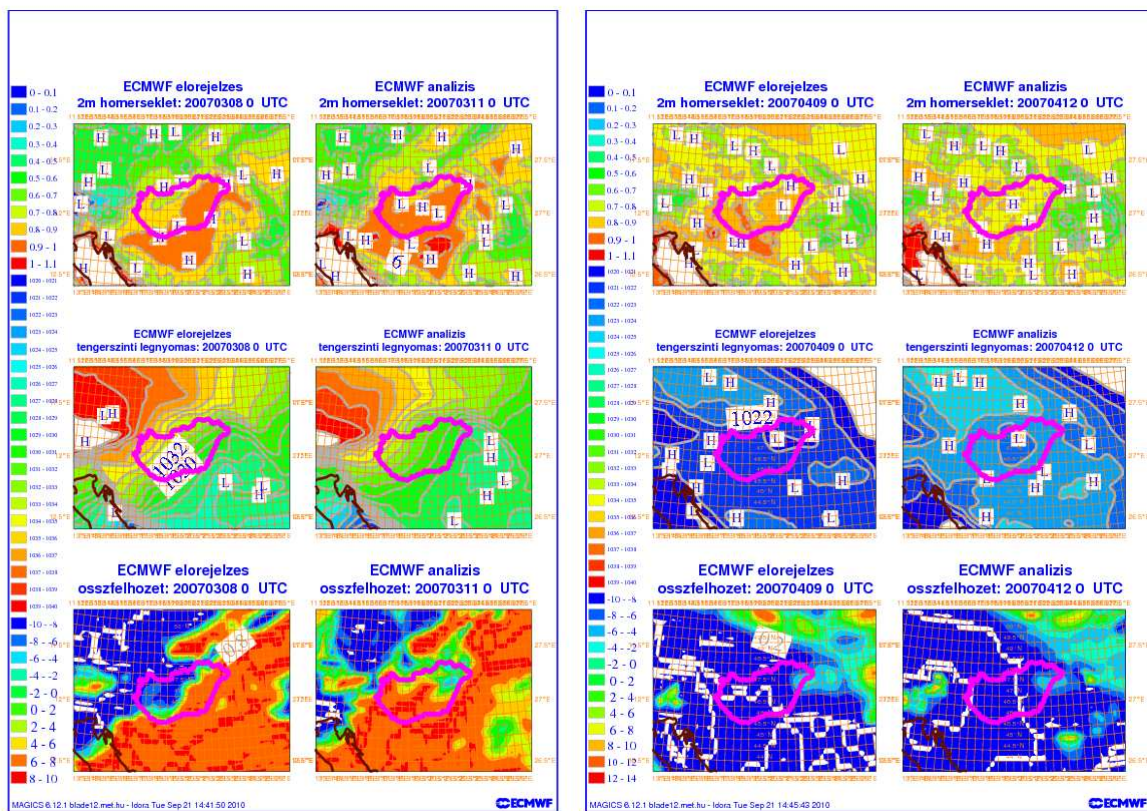
Függelék



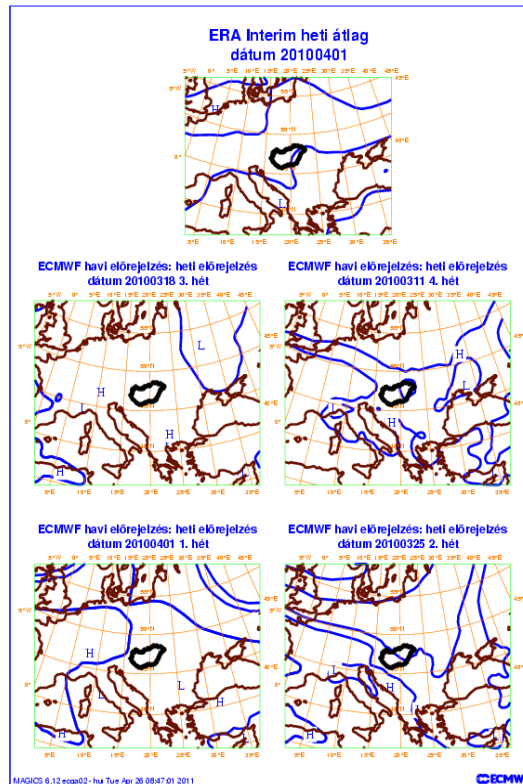
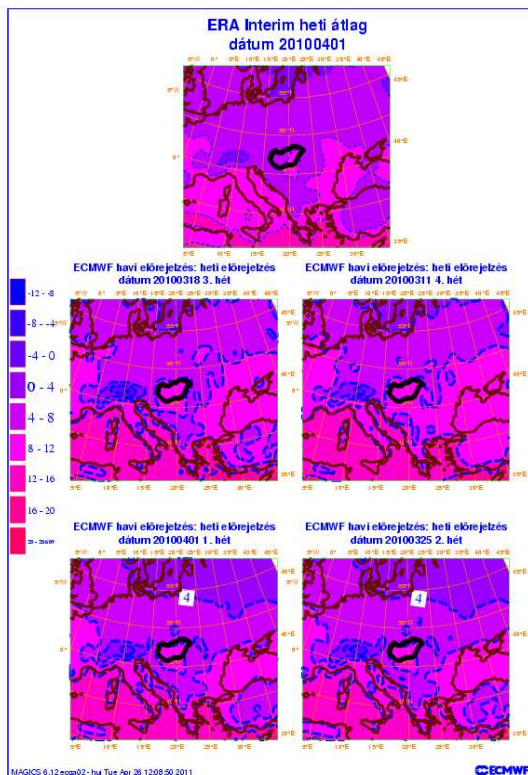
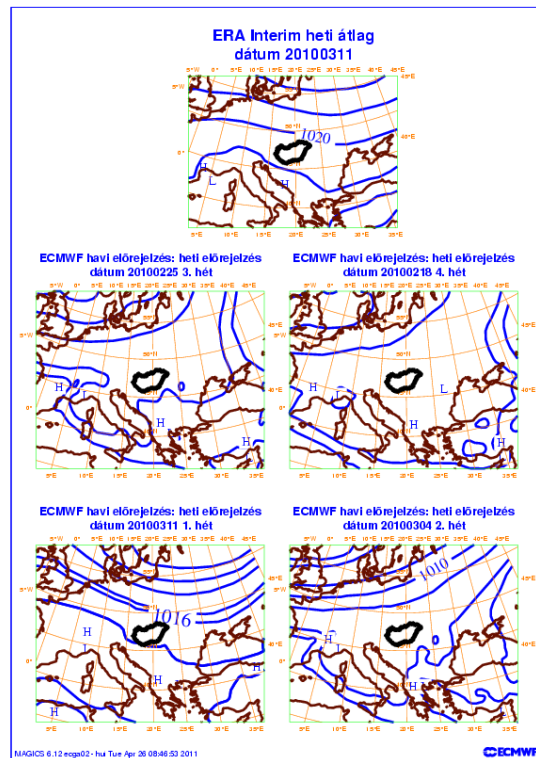
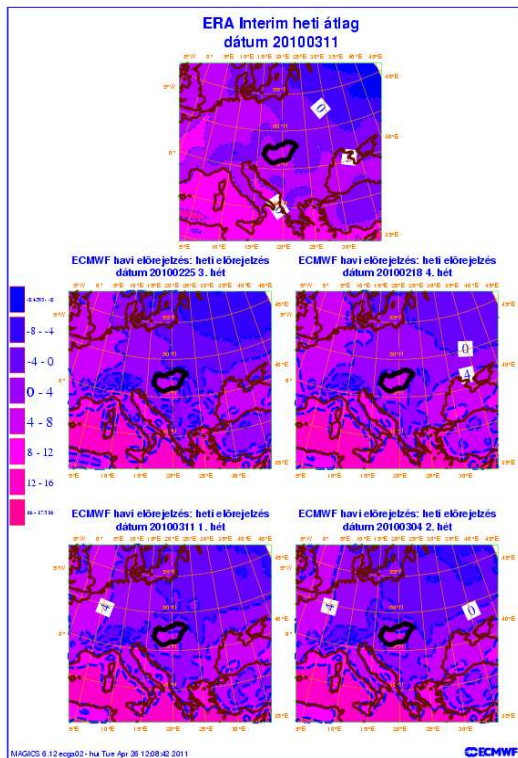
F1. ábra: 2m-es hőmérséklet, tengerszinti légnyomás és felhőborítottság térkép a 2007. június 30., 2004. január 30., 2005. január 30, 2005. január 2. 00 UTC-re vonatkozó 72 órás ECMWF előrejelzések



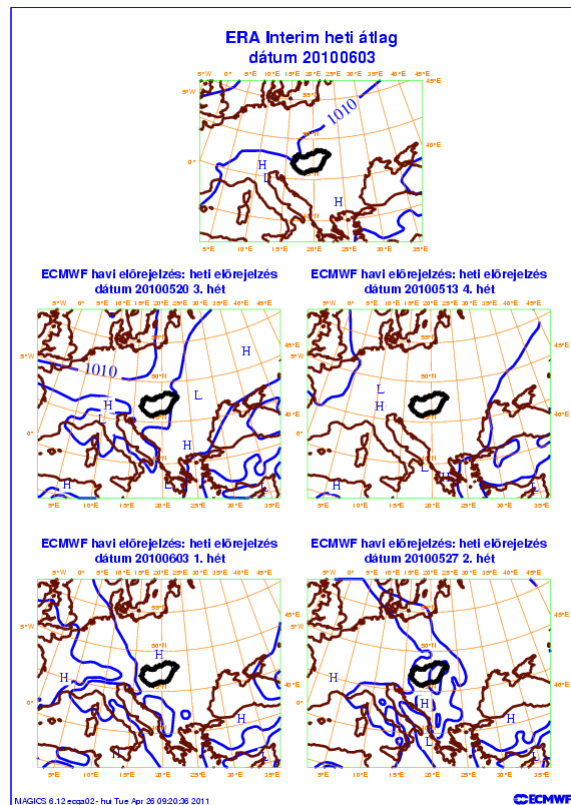
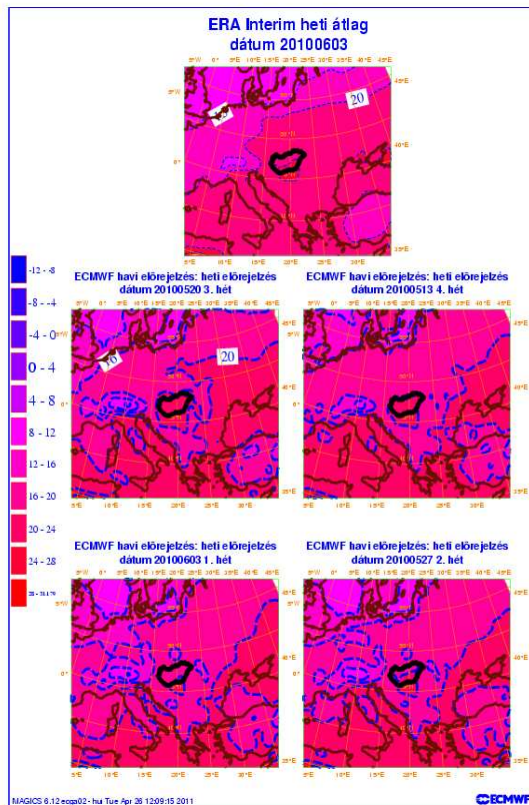
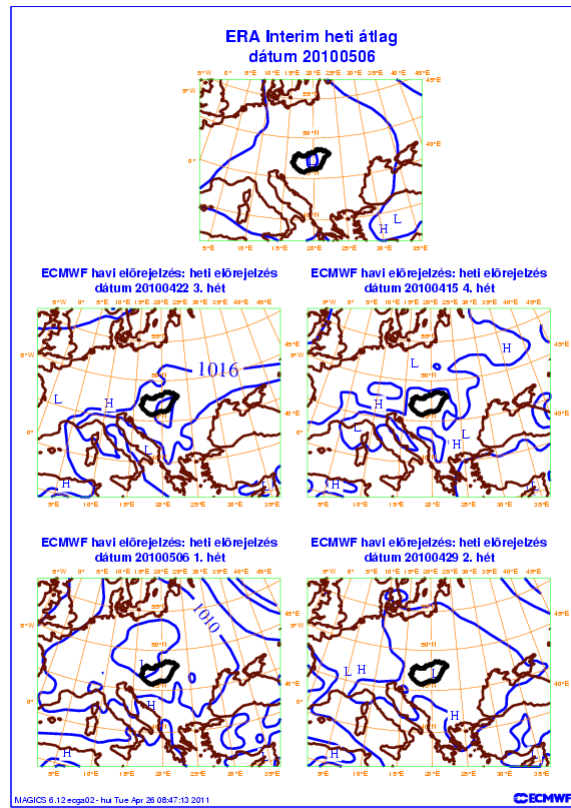
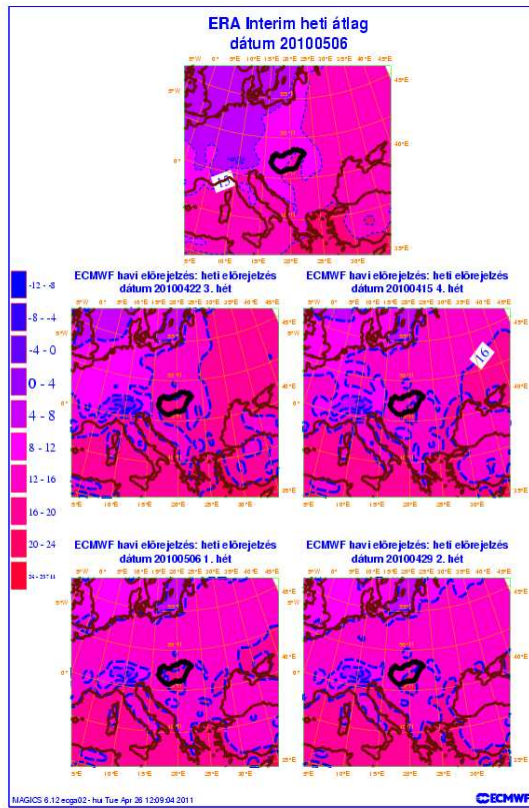
F1. ábra: 2m-es hőmérséklet, tengerszinti légnyomás és felhőborítottság térkép a 2005. január 20., 2005. február 9., 2005. október 26., 2007. február 15. 00 UTC-re vonatkozó 72 órás ECMWF előrejelzések



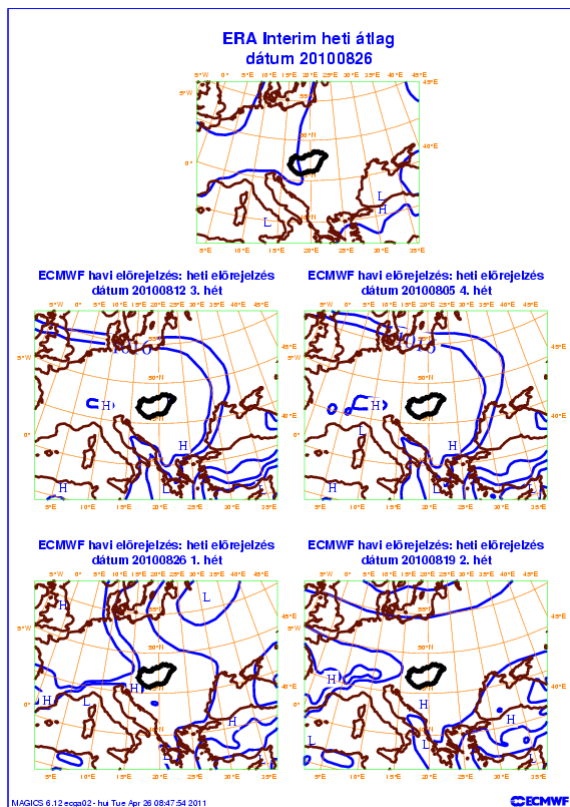
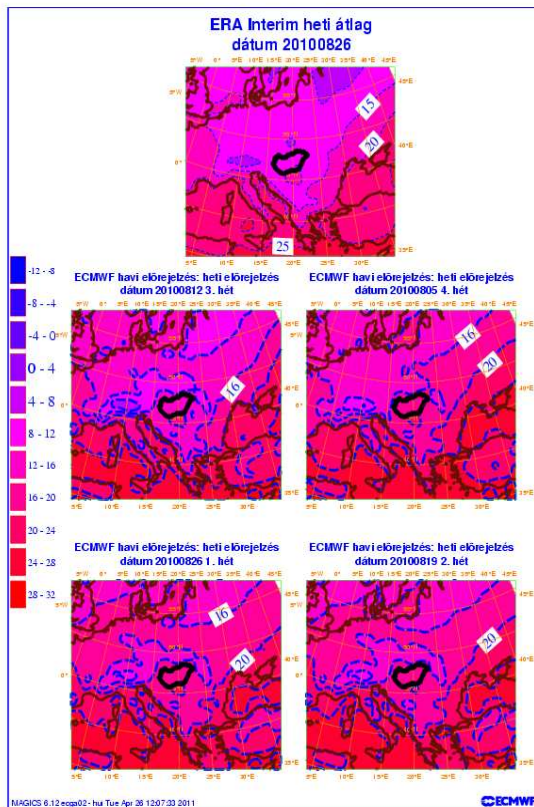
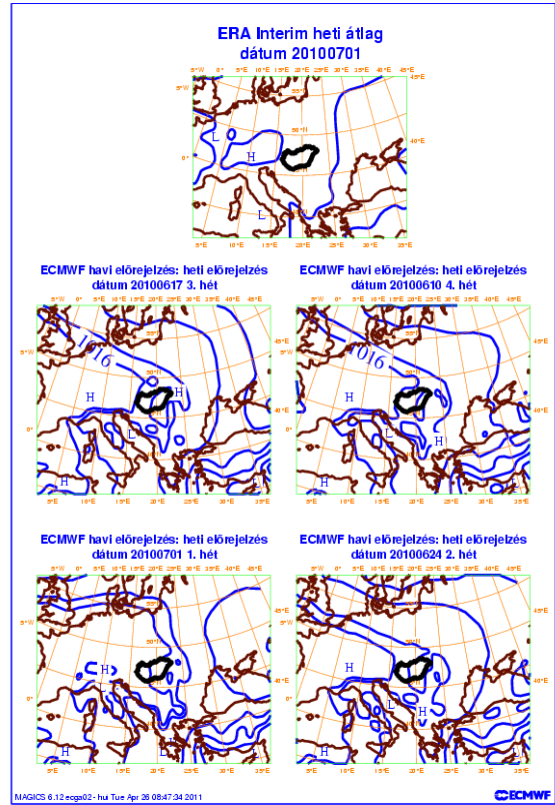
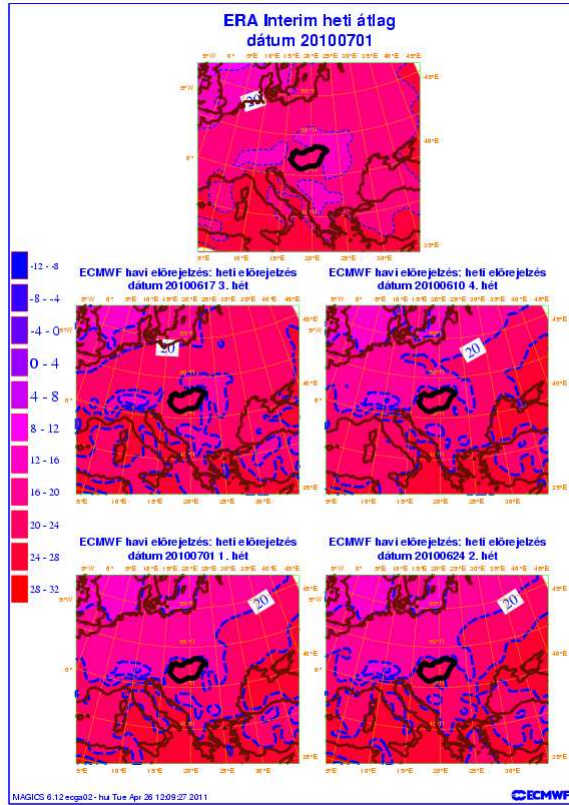
F2. ábra: 2m-es hőmérséklet, tengerszinti légnyomás és felhőborítottság térkép a 2007. március 5., 2004. április 9. 00 UTC-re vonatkozó 72 órás ECMWF előrejelzések



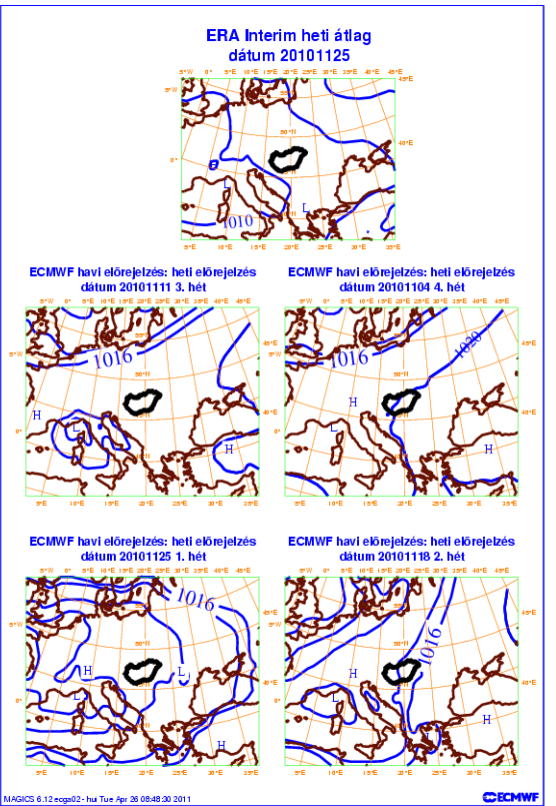
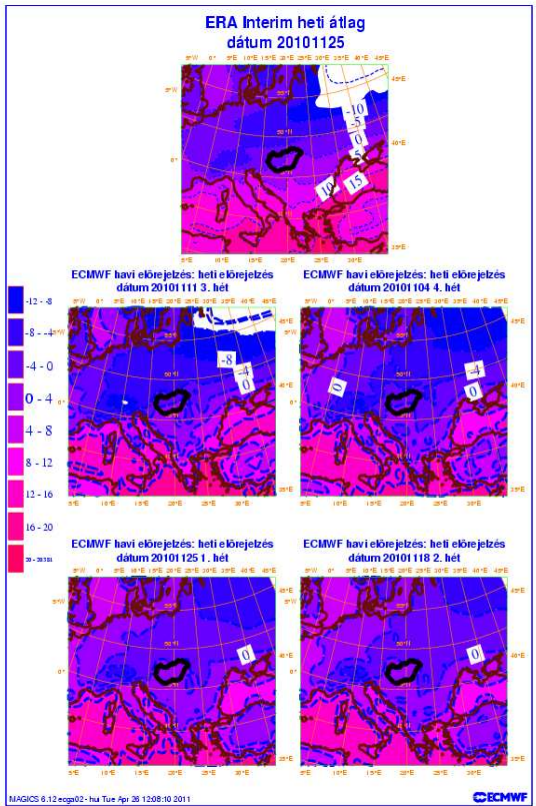
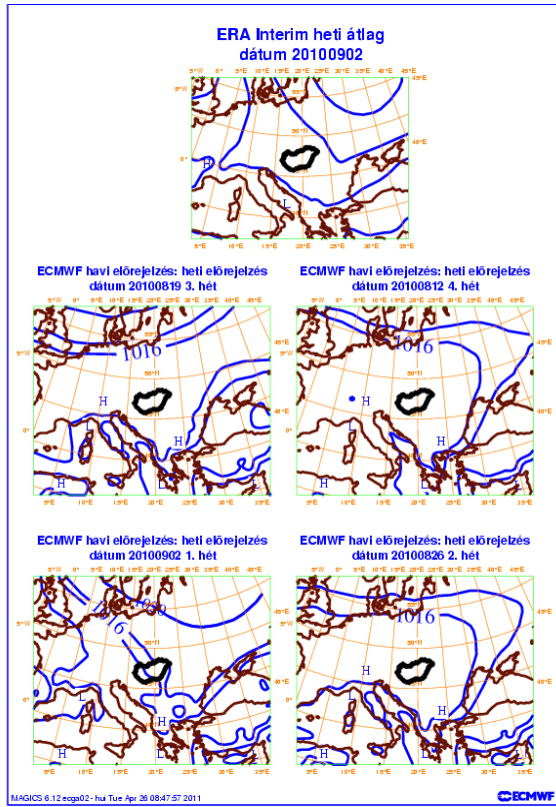
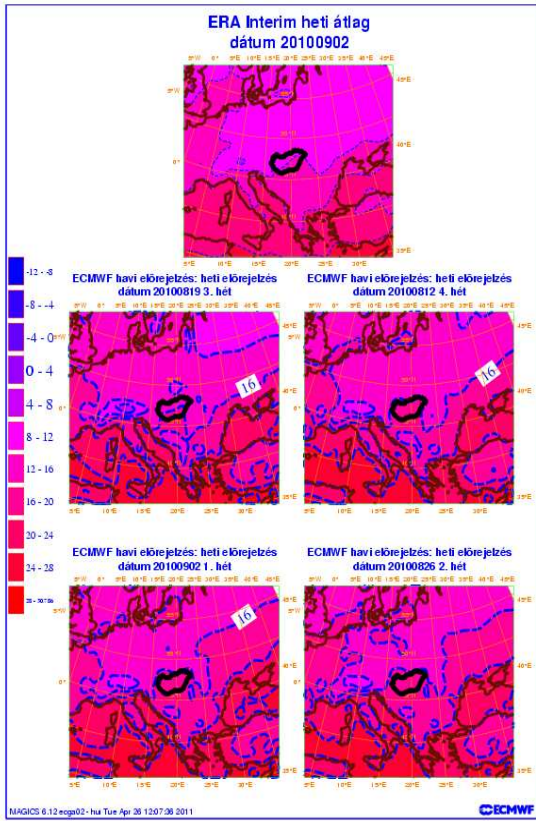
F4. ábra: 2010. március 15-21. és 2010. április 5-11. időszakra vonatkozó havi hőmérséklet és tengerszinti légnyomás-előrejelzések térképes ábrázolása (lent), és ERA-Interim heti átlagolt hőmérséklet és légnyomás térkép (felül)



F5. ábra: 2010. május 10-16. és 2010. június 7-13. időszakra vonatkozó havi hőmérséklet és tengerszinti légnyomás-előrejelzések térképes ábrázolása (lent), és ERA-Interim heti átlagolt hőmérséklet és légnyomás térkép (felül)



F6. ábra: 2010. július 5-11. és 2010. augusztus 30 - szeptember 5. időszakra vonatkozó havi hőmérséklet és tengerszinti légnyomás-előrejelzések térképes ábrázolása (lent), és ERA-Interim heti átlagolt hőmérséklet és légnyomás térkép (felül)



F7. ábra: 2010. szeptember 6-12. és 2010. november 29. - december 5. időszakra vonatkozó havi hőmérséklet és tengerszinti légnyomás-előrejelzések térképes ábrázolása (lent), és ERA-Interim heti átlagolt hőmérséklet és légnyomás térkép (felül)