

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

**A csapadék előrejelezhetőségének vizsgálata
a dunai és a tiszai vízgyűjtőkre vonatkozóan
valószínűségi előrejelzések alapján**

Diplomamunka



Készítette:

Mátrai Amarilla

Meteorológus mesterképzés

Előrejelző szakirány

Témavezető:

Ihász István

Országos Meteorológiai Szolgálat

Konzulens:

Dr. Barcza Zoltán

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. A hidrológiai előrejelzések történeti áttekintése.....	5
2. Numerikus előrejelzés.....	8
2.1. Ensemble technika.....	9
3. Az ECMWF és ensemble előrejelzései.....	10
3.1. Reforecast alapú modell klíma.....	11
4. A kalibráció.....	13
5. Magyarország csapadékviszonyai, általános áttekintés.....	15
5.1. A Duna és a Tisza vízgyűjtő területei.....	15
6. Felhasznált meteorológiai adatok.....	17
7. Havi átlagos és extrém csapadékösszegek vizsgálata.....	19
8. Reforecast klímák összehasonlítása.....	23
8.1. A reforecast klímák és a megfigyelési klíma összehasonlítása.....	23
8.2. Éves menet vizsgálata a különböző klímák összehasonlítása során.....	28
9. Kalibráció alkalmazása ensemble előrejelzésekre.....	30
9.1. Kalibráció alkalmazása a 2013-as dunai árvízre.....	30
9.2. Ensemble kalibráció alkalmazása néhány extrém csapadékú időjárási helyzetben...	35
10. Verifikáció.....	39
10.1. Talagrand diagram.....	39
10.2. Verifikációs vizsgálat eredményei.....	40
11. Esettanulmányok.....	45
11.1. A 2001. márciusi felső-tiszai árvíz.....	45
11.2. A 2013. májusi-júniusi dunai árvíz.....	51
Összefoglalás.....	58
<i>Köszönetnyilvánítás</i>	60
<i>Irodalomjegyzék</i>	61
1. Függelék.....	64
2. Függelék.....	65
3. Függelék.....	66
4. Függelék.....	67

Bevezetés

Az időjárás előrejelzésekben a csapadéknak, mint meteorológiai paraméternek fontos szerepe van. Azonban a csapadék mennyiségének térbeli és időbeli eloszlását a mai napig nehéz előrejelezni. A csapadék előrejelzés bonyolultsága abból adódik, hogy a csapadékképződéshez szükséges mikrofizikai folyamatok rendkívül összetettek, és ezeket a mezo- és szinoptikus-skálán az időjárás előrejelző modellek nem minden esetben tudják egyértelműen prognosztizálni. Különösen nehéz dolgunk van, ha hegyvidéki területre szeretnénk előrejelzést készíteni, ugyanis a domborzati sajátosságokból eredően egyéb trigger hatások is fellépnek a csapadékképződés során. A kis területre koncentrált, rövid időn belül lehullott, nagy mennyiségű csapadék, jelentős vízszintemelkedést tud okozni a folyókon, ami akár árvizet is előidézhet. Az ilyen veszélyes időjárási helyzetek vizsgálatához értékes többlet információt adnak az ensemble előrejelzések, melyek az esemény bekövetkezésére vonatkozóan valószínűségi értékeket szolgáltatnak. A dolgozatomban a nagy mennyiségű csapadék előrejelezhetőségének vizsgálatát tűztük ki célul, kifejezetten olyan esetekre vonatkozóan, amelyek a Duna vagy a Tisza vízgyűjtő területein árvizet okozhatnak.

A dolgozatban az ECMWF ensemble modelljének csapadék előrejelzéseit egy reforecast előrejelzésekre alapozott eloszlásfüggvény típusú ensemble kalibrációs módszerrel javítom. A kalibrációt a kis és átlagos mennyiségű csapadékokra korábbi diplomamunkában már alkalmazták (Üveges, 2009). Jelen dolgozatban az említett kalibrációs eljárást az extrém mennyiségű csapadék előrejelzések pontosítására használom, ugyanis korábbi években ezt a területet, ilyen módszerekkel nem vizsgálták. Az ismertetett téma abban is újdonságot mutat, hogy vízgyűjtő területekre koncentrálna (területi átlagolással) még nem vizsgálták a csapadéokra vonatkozó ensemble előrejelzések bevalását.

Az eloszlásfüggvényen alapú kalibráció azért alkalmas a feladatra, mert a legtöbb meteorológiai paraméterre könnyen alkalmazható, és nem igényel bonyolult matematikai számításokat. Valamint a vizsgálatához szükséges ensemble, determinisztikus és reforecast előrejelzések is könnyen előhívhatók az ECMWF adatbázisából. A kalibráció eredményeként kapott „javított” előrejelzés pedig egyszerűen összehasonlítható a „nyers” előrejelzéssel. Ez nagy segítséget nyújthat az előrejelző és a hidrológus szakembereknek, akik eldönthetik, hogy szükséges-e módosítani a prognosztizált csapadék mennyiségét, ha igen, akkor milyen mértékben.

A csapadék előrejelzések (mind kalibrálatlan mind kalibrált) objektív összehasonlítása akkor lesz teljes, ha verifikációt is végzünk. Talagrand diagram segítségével vizsgáljuk a csapadék előrejelzések beválását. Ez az eszköz is hasznos lehet az operatív munkában.

A dolgozatom első fejezetében a hidrológiai célú csapadék előrejelzés készítés folyamatára mutatom be, hogyan készültek a csapadéokra vonatkozó prognózisok numerikus modellek nélkül, majd a számítógépek elterjedésével, hogyan tértek át a modellek használatára. A második fejezetben a numerikus előrejelzés folyamatát ismertetem, kitérek a prognózis készítés során felmerülő bizonytalanságokra. Bemutatom a bizonytalanságok számszerűsítésére alkalmas ensemble technikát, ennek különböző módszereit. A harmadik fejezetben az ECMWF által futtatott determinisztikus és ensemble modelleket ismertetem, majd rátérek a reforecast előrejelzések rövid bemutatására. A negyedik fejezetben a kalibrációt, mint utó-feldolgozási módszert részletezem, amellyel a csapadék előrejelezhetőségét vizsgálom.

Az elméleti alapok ismertetése után az ötödik fejezetben rátérek a dunai és a tiszai vízgyűjtők csapadékviszonyainak vizsgálatára. 19 év mérési és előrejelzési adatai alapján a csapadék térbeli és időbeli eloszlását tekintem át. Kolmogorov-Szmirnov próba segítségével összehasonlítom a 2008-2013-as időszakban használt, három különböző reforecast klímát. A 9. fejezetben a vízgyűjtőkre vonatkozóan, az ensemble előrejelzések kalibrációs vizsgálatát ismertetem. A kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzések objektív verifikációs összehasonlítását a 10. fejezetben Talagrand diagram segítségével elemzem. Végezetül bemutatok két esettanulmányt, amelyek során a 2001-es tiszai és a 2013-as dunai árvizeket kiváltó csapadék előrejelezhetőségét vizsgálom.

1. A hidrológiai előrejelzések történeti áttekintése

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSz) 1978 óta készül mennyiségi csapadék-előrejelzés Magyarország két legnagyobb folyójának vízgyűjtőterületére. A Duna és a Tisza teljes vízgyűjtőterülete 21 részvízgyűjtőre tagolható. A két folyó vízgyűjtőterülete összesen kb. 960 ezer km²-t fed le. Az elmúlt évtizedekben a csapadék-előrejelzés készítés módja és eszköze sokat változott és fejlődött. A cél viszont ugyanaz maradt, a hidrológiai események pontosabb megértése valamint előrejelzése, és a hidrológusok munkájának a segítése.

Az 1965-ös dunai és az 1970-es tiszai árvíz után merült fel az igény a két fő folyó árullámainak meteorológiai és hidrológiai oldalról való tanulmányozásra. Az 1970-es években az Országos Vízügyi Hivatal és a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet az Országos Meteorológiai Szolgálattal együttesen kezdett kutatásokba, melyek kitértek a nagy csapadékot és árvizet okozó szinoptikus skálájú időjárási helyzetek csoportosítására, ezek éven belüli eloszlásának várható valószínűségére és az egyes típusok 24 órás maximális csapadékhozamaira (*Bodolainé*, 1983). Ekkor fogalmazódott meg a csapadékmennyiség előrejelzésének a szükségessége.

Az OMSz-ben az első hidrológiai célú mennyiségi csapadék-előrejelzés 1978. július 1-én indult el. Ekkor még numerikus modellek használata nélkül kezdték el a prognózisok készítését a csapadéokra vonatkozóan. Az előrejelzés a csapadékfolyamatok találkozási modelljének nevezett módszerén alapult. A modell közelítése szerint a csapadéktevékenység a légkörben potenciálisan rendelkezésre álló kihullható vízmennyiség, a vertikális mozgások és a telítési viszonyok hatására jön létre, ezek térbeli és időbeli találkozásán alapul. A potenciálisan rendelkezésre álló vízmennyiség az a vízmennyiség egy adott légoszlopon belül, amely akkor hullna ki, ha az összes vízgőz kondenzálna. Azonban a valóságban csak egy része kondenzálódik a rendelkezésre álló vízmennyiségnek, és ez függ a légkör telítési állapotától is. A telítési állapot mértékét a dinamikus telítési hiány adja meg, amely a légkör egy adott rétegére vonatkozóan a tényleges relatív geopotenciál és a telítési relatív geopotenciál különbsége. Tehát a találkozási modell azt vizsgálja, hogy a potenciálisan kihullható vízmennyiségnek hányad része realizálódik csapadékként. Kezdetben a csapadékot meghatározó mennyiségeket manuálisan állították elő, az adatokat az európai rádiószondás állomások méréseiből gyűjtötték ki (*Ujváry*, 2008).

A csapadék-előrejelzés a szinoptikus helyzet elemzésével, trajektória módszer alkalmazásával, valamint az egyes vízgyűjtőkre vonatkozóan a találkozási modell alapján számított csapadékmennyiségek felhasználásával készült el az elkövetkezendő 24 órára, 12 órás bontásban. A vízgyűjtőterületekre ilyen módon alkalmazott csapadékmennyiség előrejelzések jónak mondhatóak voltak, hiszen a várt csapadékmennyiségek és a tényleges területi csapadékátlagok közötti eltérések nem voltak jelentősek. Az előrejelzett és a mért csapadékmennyiségek közötti különbségek abból is adódhatnak, hogy a találkozási modell nem veszi figyelembe a csapadékképződést elősegítő konvekciót és az orográfia hatását. E két hatás figyelembevételére több kísérlet is történt (*Bonta és Ujváry, 2011*). Ezek közül a domborzat módosító hatására tett következtetéseket említeném meg.

A vízgyűjtőterületeken elhelyezkedő hegységek (Alpok és Kárpátok) csapadékmódosító hatását figyelembe véve, a csapadék magassággal való eloszlására és a szinoptikus helyzetekre a következő minőségi megállapításokat tették (egy párat kiemelve): az Alpok térségében posztfrontális, ciklon hátoldali, anticiklon előoldali helyzetekben, kicsi vagy zérus feláramlás és kevés nedvesség esetén is nagymértékű orografikus csapadékköződés mehet végbe, ha telített a levegő és az alsó troposzférában erős északi, északnyugati szél fúj. Az Északi- és Északkeleti-Kárpátok térségében az orografikus csapadéktöbbletet a meleg, nedves szállítószalag irányítotttsága befolyásolja (*Bonta és Ujváry, 2011*).

A 80-as években, a numerikus modellek elterjedésével a csapadék-előrejelzésében új korszak kezdődött. 1979-től a Svéd Hidrometeorológiai Intézet szolgáltatott a következő 24 órára vonatkozó csapadék előrejelzést, 12 órás bontásban. 1982-től a Frankfurti Regionális Időjárési Központ 3 napra előre, 24 órás bontásban adott csapadékmennyiségre vonatkozó előrejelzést. 1983-tól pedig az angol szolgálatnál (UKMO, United Kingdom Meteorological Office) futó modell előrejelzései álltak rendelkezésre, amely már 36 órára előre, 6 órás bontásban tartalmazta a csapadékmennyiséget. A több szolgálattól érkező adatok nagy segítséget jelentettek a szinoptikus számára, aki a szinoptikus- és mezoskálájú időjárési folyamatok elemzése után figyelembe vette a numerikus modellek előrejelzéseit, majd ezek alapján hozta meg a döntését (*Bonta és Ujváry, 2011*).

1988 végén az OMSz megkapta a Svéd Hidrometeorológiai Szolgálat által kifejlesztett svéd modell programrendszerét, amely adaptálás után 1991. július 1-étől a hét minden napján 48 órára előre adott előrejelzést (*Ihász, 1992*). 1991 tavaszától a hazai meteorológiai szolgálat

aktív résztvevője volt a francia ALADIN modell fejlesztésének (*Horányi et. al., 1996*). A Toulouse-ban kifejlesztett hidrosztatikus, korlátos tartományú ALADIN modell hazai alkalmazása 1998. február 3-án kvázi-operatív, majd július 20-án teljesen operatív módon indult meg. A modell vízszintes felbontása 11 km volt, függőlegesen pedig 27 modellszintet különített el. Naponta kétszer 48 órás időtartamra készített előrejelzést. A modell jelenleg naponta négy alkalommal fut: 54 órára 00 UTC-kor, 48 órára 06 és 12 UTC-kor valamint 36 órára 18 UTC-kor. A 2000-ben indított kezdeményezés keretein belül készült el az ALADIN modell nem-hidrosztatikus változata az AROME modell, amely az OMSz-ben 2010 novemberétől működik operatíván, egy 2,5 km-es horizontális és 60 vertikális szintes felbontású Magyarországot és a közvetlen környezetét lefedő tartományon. Az AROME modellt naponta négyszer futtatják, 00 és 12 UTC-kor 48 órára, 06 és 18 UTC-kor pedig 36 órára előre ad előrejelzést (*Horányi, 2014*).

1994. július 1-én Magyarország a kelet-közép-európai országok közül elsőként vált az ECMWF társult tagjává (*Kaba, 1995*). A szükséges technikai feltételek megteremtése után, 1995. január végétől a hazai meteorológiai szolgálat operatíván használja a determinisztikus előrejelzéseket. Kezdetben 168, majd 240 óráig 12 órás, később 6 órás – napjainkban 168 óráig már 3 órás – bontásban elérhetőek az előrejelzések. Kezdetben a vízügyi felhasználóknak továbbított csapadék-előrejelzések az ECMWF determinisztikus modell eredményein alapultak, viszont a szinoptikus korrigálható az előrejelzett csapadék mennyiségén. Ez a korrigálás elsősorban a 24 órára adott csapadék esetén fordulhat elő, magasabb időlépcsők esetében nem szükséges ez az eljárás, ugyanis a modell 12 óránként frissül, valamint a heves csapadékot adó időjárási rendszerek élettartama általában kisebb, mint 24 óra (*Ujváry, 2008*). A 2000-es évek elejétől a csapadék előrejelzésben egyre szélesebb körben használják fel az ECMWF ensemble előrejelzéseit is.

A numerikus modellek megjelenése előrelépést jelentett az előrejelzések előállításában olyan módon, hogy a korábban manuálisan végzett számítások helyett, a numerikus modell sokkal összetettebb módon előálló előrejelzéseire alapozhatjuk a munkát. Így az előrejelzés készítés menete felgyorsult, hamarabb és jobb minőségben kapunk információt a várható időjárásról, ami fontos szempont például egy olyan veszélyes időjárási esemény esetén is, mint az árvíz.

2. Numerikus előrejelzés

Az időjárás előrejelzés készítésnek fontos része a numerikus modellek használata. A numerikus modellezés során azt szeretnénk tudni, hogy az időjárás valamely jövőbeli időszakában hogyan alakulnak a meteorológiai paraméterek várható értékei. Számszerű értékekre vagyunk kíváncsiak, ezért az eredményeket a modellek matematikai módszerek alapján, számítások útján állítják elő. A modell figyelembe veszi a légkörben uralkodó fizikai törvényeket. A prognózis elkészítése a hidro-termodinamikai egyenletrendszer megoldásán alapszik, amely tartalmazza a Newton-féle mozgásegyenleteket a három irány szerinti komponensekre, a tömegmegmaradást kifejező kontinuitási egyenletet, a termodinamikai egyenletet kiegészülve az állapotegyenlettel. A légkörben lévő vízgőz térbeli és időbeli változékonyságát a nedvességre vonatkozó kontinuitási egyenlet határozza meg.

A hidro-termodinamikai egyenletrendszer megoldása során parciális differenciálegyenletekkel számol a modell, amelyek megoldásához kezdeti- és határfeltételekre van szükség. Az előrejelzés első lépése a mért és a megfigyelt adatok feldolgozása, amit adatasszimilációs folyamattal végeznek el. Az adatasszimiláció során a kezdeti feltételeket matematikai módszerekkel adják meg a modell által használt rácspontokra. Ezután következik a légköri folyamatokat kormányzó egyenletrendszer numerikus megoldása. Mivel az egyenletek nem lineárisak, és a kiindulási mező sem folytonos, ezért véges differenciás közelítéseket és numerikus sémákat használnak (*Szépszó et. al., 2013*).

Az utolsó lépésben a nyers modelleredmények utófeldolgozása történik, amely során csökkenthetők a modellezés folyamán felmerülő hibák. A legelső hibák ott jelenhetnek meg, hogy nem tudjuk a természetben uralkodó folyamatokat tökéletesen leírni. A mérések is hibával terheltek. Szintén hibaforrásként jelennek meg a parciális differenciálegyenletek megoldása során alkalmazott matematikai közelítések és elhanyagolások. További hibák léphetnek fel a diszkretizáció (modell által leírt folyamatok térbeli rácson való megjelenítése) és a fizikai parametrizáció (rácstávolságnál kisebb skálájú folyamatok közelítő leírása) alkalmazása során (*Horányi et al, 2013*).

2.1. Ensemble technika

A hibákból adódó bizonytalanságok számszerűsítésére alkalmas az ensemble technika (*Palmer et al.*, 2006). Az ensemble módszer lényege, hogy különböző kezdeti feltételekből indítják el a modellt. A különböző kezdeti feltételek előállítására többféle matematikai módszert is alkalmaznak (*Götz*, 2001). Az alapelgondolás szerint az ún. kontroll tag kezdeti állapotát a determinisztikus modellből származtatják, azonban a kontroll modell horizontális felbontása fele a determinisztikus modellének. Az így kapott kezdeti feltételt megfelelő hibahatáron belül módosítják, és egyidejűleg több modellfuttatást indítanak el. Tehát a több előrejelzést „együttesen” vizsgálják. Az ensemble módszerrel nemcsak egy konkrét előrejelzést kapunk eredményül, hanem információval szolgál az egyes időjárási események bekövetkezésének valószínűségeiről. Valószínűségi eloszlásfüggvényeket társíthatunk az egyes modell futásokhoz (*Horányi et al.*, 2013).

A kezdeti feltételeket előállíthatjuk *szinguláris vektorok módszerével*, amely során egy meghatározott norma szerint az időben leggyorsabban fejlődő optimális perturbációkat keressük. A célunk, hogy megtaláljuk a tér azon irányait, amelyek a legtöbb bizonytalanságot tartalmazzák. A *breeding módszer* egyszerűbb és nem annyira költséges, mint a szinguláris vektorok módszere. A módszer lényege, hogy kezdetben véletlenszerű perturbációkkal készítenek egy meghatározott hosszúságú előrejelzést, majd a kapott eredményt az aktuális analízis alapján visszaskálázzák és a rendszer néhány napon belül „kitenyésztik” az optimális perturbációkat. A cél, hogy egy ciklus során véletlen perturbációkból olyanokat tenyesszen ki a rendszer, mely az előző időszak bizonytalanságait reprezentálja. Az *ensemble adat asszimiláció módszerénél* (*Isaksen et al.*, 2010) több adatasszimilációs ciklust futtatunk párhuzamosan, és hibahatáron belüli perturbált megfigyeléseket teszünk a mérésekre, így határozzuk meg a kezdeti feltételek bizonytalanságait (*Buizza*, 2010). Az ECMWF központban több módszert egyszerre használnak a kezdeti feltételek megalkotásában. A szinguláris vektorok módszerét és az ensemble adat asszimilációs módszert alkalmazzák, emellett a modell integrálás során a modell fizikai sajátosságaiból adódó hibákat is figyelembe veszik (*Persson*, 2013).

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy a numerikus modellezés során használt ensemble technikák jelentős mértékben segítenek az előrejelzésben jelentkező bizonytalanságok számszerűsítésében.

3. Az ECMWF és ensemble előrejelzései

Az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ (ECMWF, European Centre of Medium Range Weather Forecast) 1975-ben 18 ország összefogásaként alakult meg (*Woods, 2005*). A 70-es évek végétől lehetőség nyílt együttműködő tagként csatlakozni a szervezethez. Magyarország a kelet-közép-európai országok közül elsőként élt ezzel a lehetőséggel, és 1994. július 1-én csatlakozott az ECMWF-hez (*Kaba, 1995*). Jelenleg 20 teljes jogú tagja és 14 társult tagja van a szervezetnek.

A readingi (Nagy-Britannia) székhelyű központ alapvető célja a jó minőségű középtávú (2-10 napos) előrejelzés készítése az egész Földre vonatkozóan. Az operatíván futó numerikus időjárás előrejelző modell a földfelszíni és magas légköri megfigyelések mellett a tengereken úszó bójják, repülőgépek és műholdas megfigyelések adatait is felhasználja. 1979-től determinisztikus modell futtatás alapján készít előrejelzéseket.

A determinisztikus modell kezdeti feltételeit négydimenziós variációs adat asszimilációs (4D-VAR) eljárással állítják elő, amely során figyelembe veszik a meteorológiai megfigyeléseket és a modell korábbi előrejelzéseit, az aktuális kezdeti mező időpontjára vonatkozóan. A modellt naponta kétszer, 00 UTC-s és 12 UTC-s kezdeti meteorológiai mezőkből indítják el és 10 napos előrejelzést készítenek. A modell horizontális térbeli felbontása 16 km, vertikálisan pedig 137 légnymási szintet tartalmaz. Így a determinisztikus modell finomabb térbeli felbontása miatt jobban kirajzolódnak a domborzatból eredő eltéréseket. Viszont a részletességből adódóan több időt igényel a számítások elvégzésére.

1992-től ún. ensemble (együttes) technika alapján is készítenek prognózisokat (*Molteni et al, 1996*). Az ensemble előrejelzések alapján valószínűségi előrejelzést kapunk. A modellt 51 egymástól eltérő kezdeti állapotból indítják el. Az EPS (Ensemble Prediction System) valószínűségi előrejelzések horizontális és vertikális felbontásai gyengébbek, mint a determinisztikus modellé, így egy simított, egységesebb képet kapunk eredményül. A jelenleg használt modellverzió horizontális térbeli felbontása 32 km és 91 vertikális modell szintből áll.

2006 novemberétől naponta kétszer, 00 UTC-kor és 12 UTC-kor, 15 napra előre készítenek előrejelzést a VaREPS (VARIABLE Resolution Ensemble Prediction System = Változó Felbontású Ensemble Előrejelző Rendszer) rendszer keretében (*Buizza et al, 2006*). Az előrejelzés a 10. napig a megszokott térbeli felbontásban fut, majd ezután alacsonyabb

felbontással megy el a 15. napig. Az időbeli felbontására következő a jellemző: 168 óráig 3 óránként, 168 és 360 óra között pedig 6 óránként áll rendelkezésre modell előrejelzés. 2008 márciusától a 15 napos előrejelzési rendszer minden csütörtökön lefut egy 32 napos időszakra is, ami megfelel a havi előrejelzésnek. Hasonló elgondolás szerint használják a modell térbeli felbontást, mint a 15 napos előrejelzéseknél. A havi előrejelzések 15. napján a modell térbeli felbontása megváltozik, lecsökken és így fut a 32. napig (*Ihász, 2009*).

Ha a modellfutások között az eltérés kicsi, akkor jó az előrejelzés megbízhatósága, ha viszont nagyon széttartanak az előrejelzések, akkor a megbízhatósága kicsi lesz. Az időjárási helyzet bonyolultságától függ, hogy mennyire futnak együtt az egyes tagok (*Persson and Riddaway, 2011*).

3.1. Reforecast alapú modell klíma

Az ECMWF-ben 2008 márciusában vezették be a reforecast előrejelzéseket. A reforecast előrejelzések készítésekor a jelenlegivel megegyező múltbeli azonos dátumokra futtatják le a jelenleg használt operatív modellt (*Hagedorn, 2008*). Minden hét csütörtöki napján 5 tagú ensemble reforecast előrejelzés készül, 32 napra vonatkozóan. Jelenleg a reforecast előrejelzéshez a kezdeti feltételnek az aktuális időpontot megelőző 20 év ERA Interim reanalíziseit használják fel. Például, egy 2015. április 30-án, csütörtökön az aktuális modell verzióval készülő 32 napos reforecast előrejelzés, 1995-től 2014-ig minden év április 30-ára elkészül. Így az elmúlt 20 év minden április 30-ára elkészül egy 5 tagú 32 napos reforecast ensemble előrejelzés. A perturbálatlan kezdeti feltételt a 20 múltbeli nap ERA Interim reanalízisei szolgáltatják.

Mivel az ECMWF nem készíti el a reforecast klímákat, ezért mi magunk állítottuk elő a reforecast előrejelzésekből, mindig az adott hétre vonatkozóan. Stabil modell klíma az aktuális hetet megelőző két hét és azt követő két hét reforecast előrejelzéseiből (összesen 5 heti reforecast előrejelzésből) készíthető el. Ez egy-egy dátumra vonatkozóan azt jelenti, hogy az elmúlt 20 év hetenkénti 5 tagú EPS reforecast előrejelzéséből 100 tagú ensemble populációt állítunk elő. Mivel 5 hetes időszakra készül a reforecast előrejelzés, így 5*100 tag áll elő, ami 500 tagot számlál. Így az eloszlásfüggvény már stabilabb lesz, de még mindig nem elég megbízható a kalibrációhoz. Ezt úgy javíthatjuk tovább, hogy a klímát egy hetes

előrejelzési időszakból állítjuk elő (24 óránkénti adatokkal), így 7×500 , azaz 3500 tag alkotja az eloszlásfüggvényt, ami már megbízhatóbb modell klímának tekinthető.

2008 óta több alkalommal is sor került modellfejlesztésre, amely során változott az ensemble modell horizontális és a vertikális felbontása, ennek következtében a reforecast modell klímában is adódtak változások. 2006-2010 közötti időszakban a modell horizontális felbontása 50 km volt. A 2011-2013-as és a jelenlegi, 2014-2015-ös modell verziók 32 km-es rácestávolsággal dolgoznak (*Miller et al.*, 2010). A 2016 elején bevezetésre kerülő verzióban 16 km-re tervezik finomítani a modell horizontális felbontását. A vertikális felbontásban is történtek változások ez elmúlt években. 2006-2013 között 62 modell szintet használtak, majd 2014-ben finomították 91 modell szintre az ensemble modell vertikális felbontását.

A kalibráció során nem mindegy, hogy melyik modellverzióval előállított reforecast klímát használjuk. Ugyanis egy korábbi modellverzióval készített reforecast előrejelzés nem reprezentatív az aktuális modell előrejelzés kalibrálására nézve. A modellfejlesztések eredményeként az előrejelzések folyamatosan pontosabbá váltak, ezért, ha egy régebbi modellverzióval előállított reforecast klímával kalibrálnánk az aktuális előrejelzésünket, akkor nem kapnánk megbízható értéket („túlkalibrálnánk”). Éppen ezért a különböző modellverzióval előállított reforecast klímákat érdemes összehasonlítani, hogy megtudjuk, melyik közelíti legjobban a megfigyelési klímát. Az összehasonlító vizsgálatot a 8.1 fejezetben mutatom be.

A kalibráció elvégzéséhez minden vízgyűjtőre, minden hétre új reforecast klímát állítottunk elő. Így egy évben, egy vízgyűjtőre összesen 52 reforecast klíma készült el. A reforecast klímák segítségével megtudhatjuk, hogy a jelenlegi modellverzióval milyen maximális intervallum előrejelzésére volt képes a modell az elmúlt 20 évben egy-egy kiválasztott meteorológiai paraméter esetében. Jelen esetben egy elkészített reforecast klíma eloszlásfüggvény a csapadék eloszlását mutatja az adott vízgyűjtőre, egy meghatározott időpontra vonatkozóan.

4. A kalibráció

Mint korábban említettem, a numerikus előrejelző modellek prognózisai nem teljesen pontosak, hibával terheltek. Utó-feldolgozási módszerekkel az előrejelzések eredményesen javíthatók. Az ECMWF nem végzi el a produktumok utófeldolgozást, ezt a folyamatot a tagállamokra bízta, akik maguk döntenek el, hogy milyen módszert alkalmaznak a prognózisok javítására. A tagországok nagy része a determinisztikus modell szisztematikus hibáinak kiküszöbölésére a „szisztematikus hiba korrekciót” (angolul: bias correction) alkalmazza. Magyarország (Ausztria és Franciaország mellett) az ensemble előrejelzések kalibrációját operatíván végzi (*Ihász et. al.*, 2010). Több kalibrációs módszer is ismert (*Gneiting*, 2014) (pl. Bayes becslés, nem-homogén regresszió), melyek közül a dolgozatban az eloszlásfüggvények illesztésén alapuló ensemble kalibrációs módszert alkalmazom.

Magyarországon ensemble kalibrációs vizsgálatot kiválasztott meteorológiai állomásokra - diplomamunka keretében - Mile Máté (2008) és Üveges Zoltán (2009) végzett. Németh Csilla (2010) BSc-es szakdolgozatában a rácsponti kalibráció alkalmazhatóságát vizsgálta. Viszont korábban vízgyűjtőkre vonatkozó csapadék előrejelzés esetén még nem alkalmazták ezt a módszert. Valamint újdonságnak számít, hogy a vízgyűjtőkön területi átlagolással előállított csapadék előrejelzéseket kalibrálok.

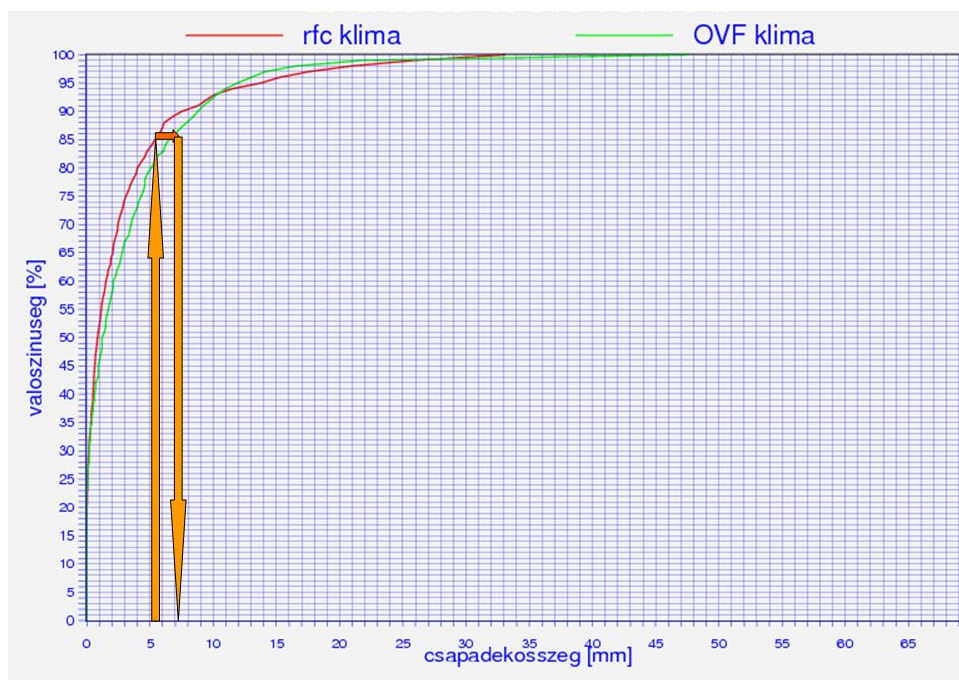
Az eloszlásfüggvény-kalibráció előnye, hogy minden meteorológiai paraméterre alkalmazható és nem igényel bonyolult matematikai számításokat. A kalibráció elvégzéséhez szükségünk van egy meteorológiai paraméterre vonatkozóan a kalibrálni kívánt – területi átlagolással előállított – vízgyűjtő területre érvényes:

- aktuális modellverzióval a múltira lefuttatott reforecast modell klíma eloszlásfüggvényre (Reforecast klíma)
- mérési adatokból előállított megfigyelési klíma eloszlásfüggvényre (Megfigyelési klíma).
- aktuális ensemble előrejelzés eloszlásfüggvényére (EPS előrejelzés)

Fontos, hogy mindegyik eloszlásfüggvényünk ugyanarra a hosszúságú időszakra készüljön és az időszakunk megfelelő hosszúságú legyen. Ugyanis, ha túl rövid a tanuló időszakunk, akkor nem biztos, hogy tartalmaz extrém eseményt. Az eloszlásfüggvényeket az összes adat sorba rendezése után kapjuk 1%-tól 99%-ig, 1%-os lépésközökkel. Például az

eloszlásfüggvényen egy 20 mm-hez tartozó 80 %-os valószínűség azt jelenti, hogy a populációban a 20 mm alatti csapadékok 80 %-os valószínűséggel fordultak elő.

A kalibrációt a következőképpen végezzük el (1. ábra). Egy aktuális ensemble előrejelzés minden tagjára megvizsgáljuk, hogy az adott időpontra előrejelzett paraméterhez milyen valószínűség tartozik a modell klíma eloszlásfüggvény grafikonján, majd megnézzük, hogy ehhez a valószínűséghez a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényén milyen érték tartozik. Az így kapott érték lesz az előrejelzésünk kalibrált értéke. Tehát, a nyers ensemble előrejelzésünket hozzákalibráljuk a múltban mért adatokhoz. Ezzel azt feltételezzük, hogy a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényünk jobban közelíti a választott meteorológiai paraméter egy területre vonatkozó gyakoriságát, mint a modell múltbeli előrejelzéseiből álló reforecast klíma eloszlásfüggvény. A kalibráció során tehát azt vizsgáljuk, hogy az egyes előrejelzett értékekhez mekkora valószínűségi különbségek tartoznak a reforecast és a megfigyelési klíma eloszlásfüggvények alapján. Az így kapott különbségeket pedig felhasználjuk a kalibrált ensemble előrejelzés készítésekor.



1. ábra Kalibráció menete. (piros gráf a reforecast klíma, zöld gráf a megfigyelési klíma, narancssárga nyilak a kalibráció menetét mutatják)

Munkám során a 2013. májusi-júniusi dunai árvíz kapcsán végeztem el a kalibrációt. A vizsgálatot és az eredményeket a 9.1. fejezetben ismertetem. Kalibrációt készítettem a 2008 utáni extrém csapadékok esetén kiemelt vízgyűjtőkre is, amelyet a 9.2. fejezetben mutatok be.

5. Magyarország csapadékviszonyai, általános áttekintés

Mielőtt bemutatom az elvégzett vizsgálatokat és ismertetem az eredményeket, szükséges, hogy röviden áttekintsük Magyarország csapadékviszonyainak klimatológiai jellegzetességeit. A dolgozatban vizsgált vízgyűjtők domborzati tulajdonságai eltérőek, és viszonylag nagy területet fednek le, ezért röviden összefoglalom hazánk csapadékára vonatkozó éghajlati sajátosságokat.

Magyarországon az évi átlagos csapadék 500-750 mm. Ez a mennyiség nem egyenletesen oszlik el az ország területén. A csapadék éves területi eloszlását legnagyobb mértékben a domborzat és a Földközi-tenger irányából érkező légtömegek befolyásolják, valamint kisebb súllyal az Atlanti-óceán is érezteti hatását. A legtöbb csapadék a DNy-i országrészben és a magasabban fekvő területeken esik. A magassággal 100 m-enként kb. 35 mm-rel nő a csapadék mennyisége. A legkevesebb csapadék (évi 500 mm alatti) a Tisza középső medencéjére jellemző. Ahogy DNy-felől ÉK-felé haladunk a csapadék mennyisége fokozatosan csökken.

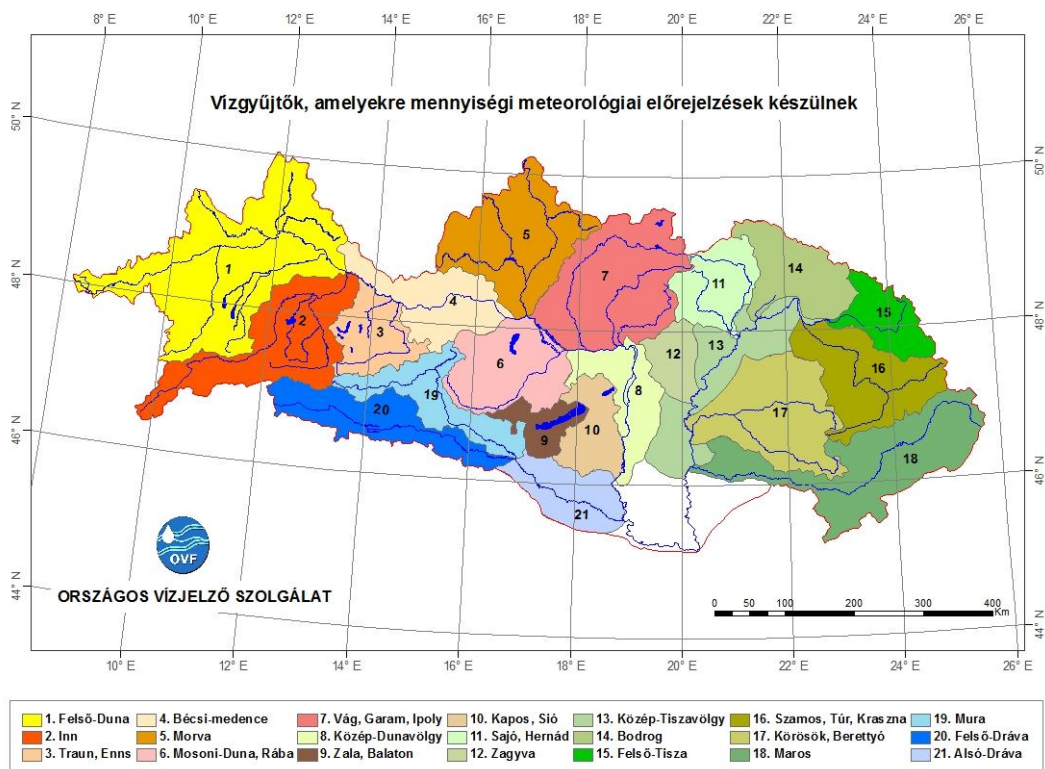
A csapadék éven belüli eloszlása is változatos. A legtöbb csapadék a május-június-július hónapokban esik, a legkevesebb pedig január-február-március időszakban. Az ország több területén megfigyelhető egy másod maximum a csapadékra vonatkozóan, amit az ősszel megerősödő ciklontevékenységek okoznak (*Péczely, 1979*).

Fontos megjegyeznünk, hogy az egyes évek csapadékösszegei jelentősen eltérhetnek egymástól, előfordulhatnak aszályosabb és csapadékosabb évek is. Mindezt az ország időjárását meghatározó szinoptikus légköri képződmények, az északi félteke áramlási viszonyai és még sok egyéb légköri folyamat befolyásolja.

5.1. A Duna és a Tisza vízgyűjtő területei

Dolgozatomban a Duna és a Tisza vízgyűjtőinek csapadékviszonyait és ezekre a területekre vonatkozó csapadék előrejelzéseket vizsgálom. A két folyóhoz hivatalosan 21 vízgyűjtő terület tartozik (2. ábra).

A munkám során viszont, csak 20 vízgyűjtőt vizsgálók, mert a korábbi években a Mura és a Felső-Dráva egy vízgyűjtőnek számított, és a mért csapadék adatok is ilyen bontásban álltak rendelkezésemre.



2. ábra A Duna és a Tisza vízgyűjtői (OVF)

A vizsgált 20 vízgyűjtő terület:

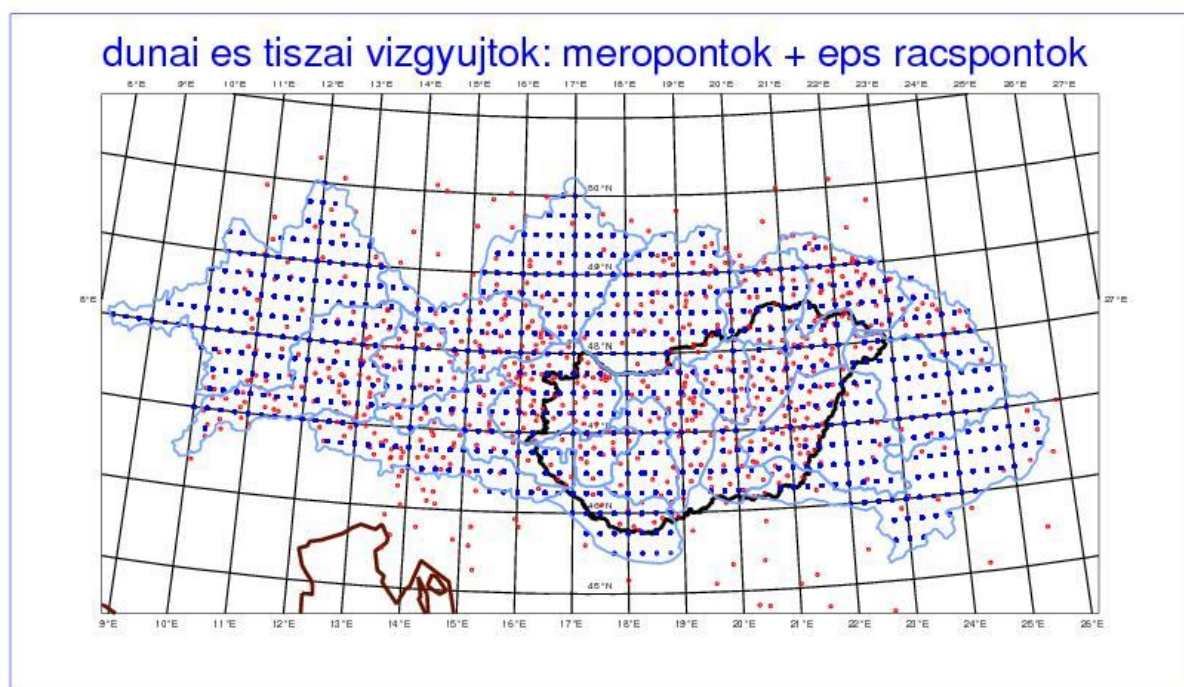
- | | |
|--------------------|-----------------|
| 1. Felső-Duna | 11. Sajó-Hernád |
| 2. Inn | 12. Zagyva |
| 3. Traun-Enns | 13. Közép-Tisza |
| 4. Bécsi-medence | 14. Bodrog |
| 5. Morava | 15. Felső-Tisza |
| 6. Rába | 16. Szamos |
| 7. Vág-Garam-Ipoly | 17. Körösök |
| 8. Közép-Duna | 18. Maros |
| 9. Zala-Balaton | 19. Mura |
| 10. Kapos-Sió | 20. Dráva |

6. Felhasznált meteorológiai adatok

A vízgyűjtőkre vonatkozóan, napi bontású 24 órás területi átlag megfigyelési adatokat kaptunk az Országos Vízügyi Főigazgatóságtól (OVF). 20 vízgyűjtőre nézve, 19 év naponkénti 24 órás csapadékösszeg adatai álltak rendelkezésünkre az 1994-2002 illetve 2004-2013-as időszakokra. A mérési adatok három forrásból érkeznek be az Országos Vízjelző Szolgálathoz (OVSz). A hazai adatok valamint a külföldi adatok jelentős része is elsősorban az OMSz szolgáltatója SYNOP táviratok formájában. Ezen túlmenően a környező országokkal határvízi megállapodás van érvényben, így ennek során jutnak el a meteorológiai adatok az OVSz-hez. A meteorológiai adatok harmadik forrása a határon túli meteorológiai szolgálatok honlapja, amelyről különböző formában érkeznek mérési adatok. A beérkezést követően az adatok többlépcsős ellenőrzésen esnek át. Először a formai és tartalmi szempontból, majd egy beosztott személy által ellenőrzik az adatokat. Ezután az OVSz saját algoritmusával megtörténik az adatok feldolgozása, az adathiányok kezelése, és az adatok szabályos 0,1 x 0,1 fokos földrajzi rácshálóra történő interpolálása. Végezetül archiválják az adatokat. Az OVSz nyilvántartásában összesen 786 állomás van, amelyek nagy része napjainkban is jelent adatokat a szolgálat felé.

Az ECMWF 10 napos determinisztikus és 15 napos ensemble modell előrejelzéseket a MARS (Meteorological Archival and Retrieval System) rendszerben GRIB file-ok formájában archiválják (*Raoult*, 2001). Emellett 2008. márciustól hetente készülő ensemble reforecast modell előrejelzések szintén GRIB file-ok formájában kerülnek archiválásra. A determinisztikus modell adatai 0,125 x 0,125 fokos földrajzi rácson, az ensemble modell és a reforecast előrejelzések adatai 0,25 x 0,25 fokos rácson archiváltak.

Az ECMWF MARS rendszerhez a tag és társult országok meteorológiai szolgálatai szabadon hozzáférnek. Munkánk során – az OMSz-ben – a fenti három adatfajta-hoz való hozzáférés érdekében speciális MARS nyelvű scripteket készítettünk. A kapott GRIB file-ok dekódolásához az ECMWF GRIB API software-t használtuk. A grafikus megjelenítő FORTRAN programokat az ECMWF MAGICS++ szoftverre (*Siemen and Lamy-Thépaut*, 2010) alapozottan készítettük. A 20 vízgyűjtőre vonatkozó területi átlagokat a vízgyűjtőkre eső rácsponti adatok felhasználásával számítottuk (3. ábra).



3. ábra Mérési pontok (piros) és EPS rácspontok (kék) eloszlása a vízgyűjtőkön

A 3. ábrán piros színnel a megfigyelési pontokat, kézzel pedig az ensemble modell rácspontjait ábrázolom. Jól látható, hogy a két ponthalmaz nem fedi le teljesen egymást. A mérési pontok eloszlása térben egyenetlen, s a hegyvidéki területeken inkább a völgyekben helyezkedik el. Az EPS rácspontok pedig homogén hálózatban találhatók. Ez az eltérés megjelenik a kalibráció során is, de mivel mind az EPS rácspontokból, mind a megfigyelésekből is területi átlagokat képeztünk, így már jól használhatók az adatok. A jövőben tervezett kutatási munkában elvégezhető a rácsponti kalibráció is, amennyiben az OVSZ-től rendelkezésre állnak az állomásonkénti havi bontású klíma eloszlásfüggvények.

A munkám során UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelven írt program családokat készítettem és használtam, amelyek segítségével állítottam elő a reforecast modell klíma és a megfigyelési modell klíma eloszlásfüggvényeket, valamint a kalibrációs számításokat is így hajtottam végre. A Kolmogorov-Szmirnov próbát szintén FORTRAN nyelvű programmal végeztem.

7. Havi átlagos és extrém csapadékösszegek vizsgálata

A Duna és Tisza folyók vízgyűjtőin lehullott csapadék térbeli és időbeli eloszlását vizsgálom ebben a fejezetben. Az 1994-2013 közötti időszak mérési adatait használtuk fel a havi átlagos és extrém csapadékösszegek vizsgálatánál. Mivel a 2003-as évre vonatkozó az adatok hiányoztak, így 19 év napi csapadékösszegeivel dolgoztunk.

Mielőtt hozzáfognánk a csapadékértékek vizsgálatához, tekintsük át a vízgyűjtők területi elhelyezkedését. A 20 vízgyűjtőből 12 tartozik a Dunához és 8 a Tiszához. A vízgyűjtőket csoportosíthatjuk aszerint, hogy hegyvidéki területen helyezkedik el vagy inkább alföldi, sík területen, esetleg mind a két földrajzi táj közel azonos mértékben jellemzi. A vízgyűjtők csoportosításakor figyelembe vettem a modelldomborzat szerinti magasságot is, így a kategorizálást az 1. táblázatban foglalom össze.

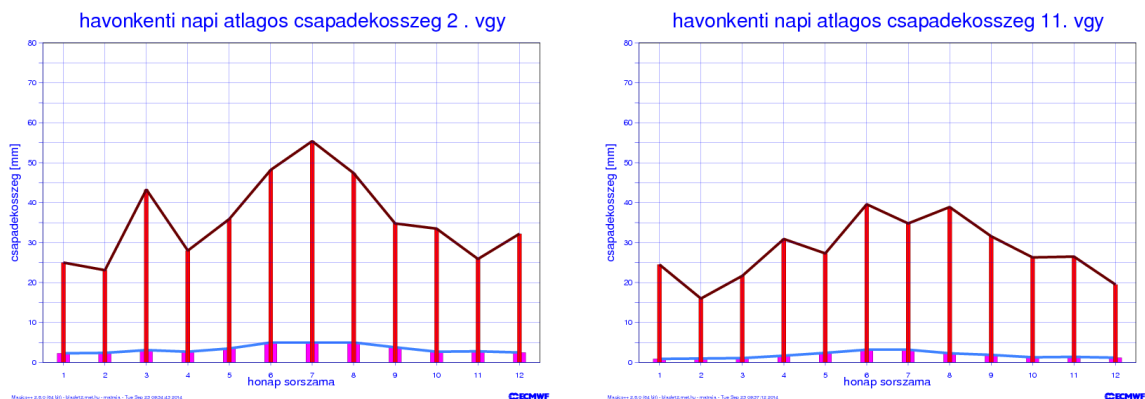
1. táblázat A Duna és a Tisza vízgyűjtői, a hozzájuk tartozó modelldomborzati magasság (m) és kategória

	Vízgyűjtő neve	Tengerszint feletti magasság (m)	Kategória
1	Felső-Duna	680	Hegyvidéki
2	Inn	1330	Hegyvidéki
3	Traun-Enns	850	Hegyvidéki
4	Bécsi-medence	530	Vegyes
5	Morava	420	Vegyes
6	Rába	280	Medence
7	Vág-Garam-Ipoly	430	Vegyes
8	Közép-Duna	160	Medence
9	Zala-Balaton	240	Medence
10	Kapos-Sió	160	Medence
11	Sajó-Hernád	480	Vegyes
12	Zagyva	180	Medence
13	Közép-Tisza	110	Medence
14	Bodrog	550	Vegyes
15	Felső-Tisza	640	Hegyvidéki
16	Szamos	480	Medence
17	Körösök	330	Medence
18	Maros	380	Medence
19	Mura	1330 - 820	Hegyvidéki
20	Dráva	130	Medence

Ezt a csoportosítási fajtát arra használjuk, hogy a vizsgálataink során a domborzatból adódó eltérések alapján össze tudjuk hasonlítani a vízgyűjtőket. Illetve, hogy a domborzatbeli

különbségek valóban okoznak-e különbségeket a csapadék mennyiségében? Valamint a különböző típusoknál megfigyelhető valamilyen egyedi sajátosság a reforecast klímák esetén és a csapadék előrejelzések kalibrálásakor?

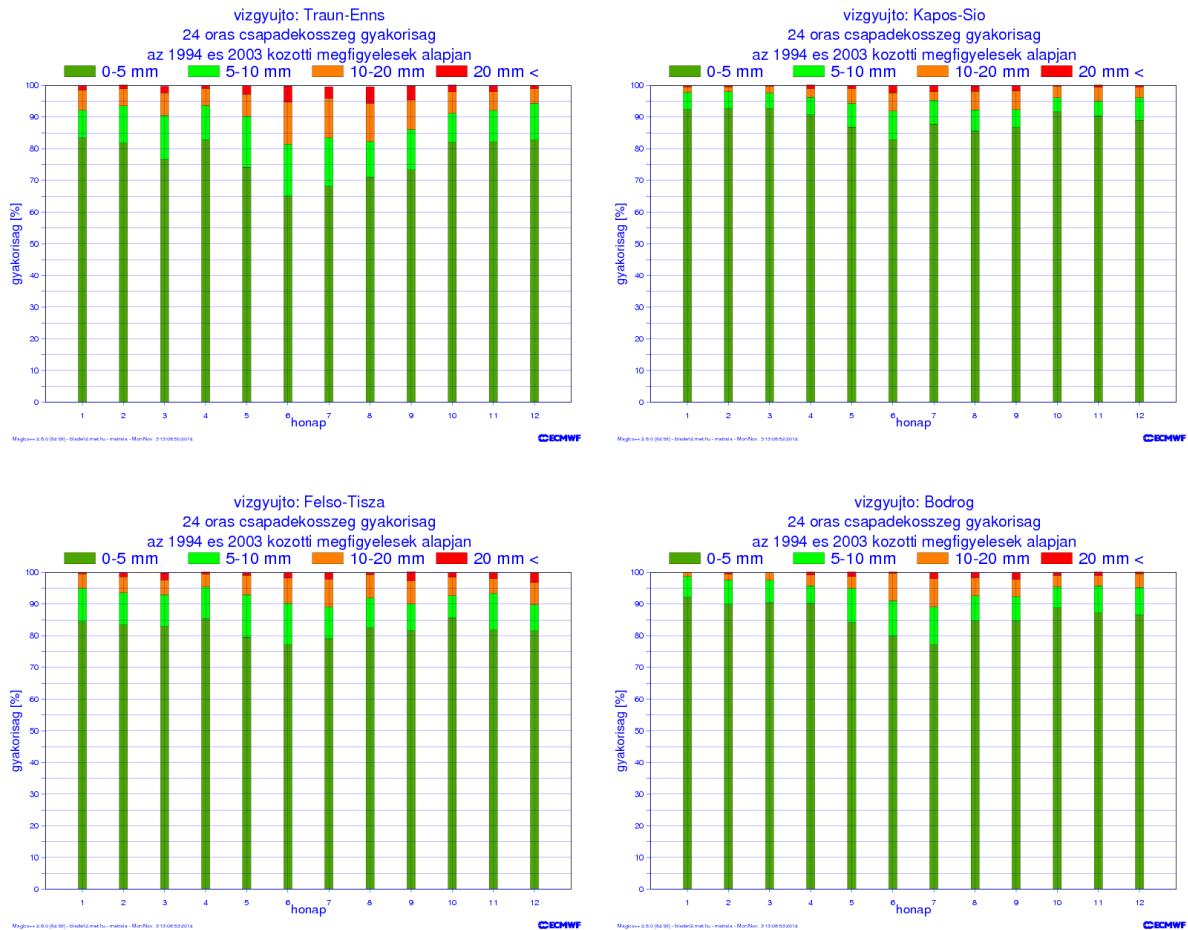
Most pedig térjünk rá a csapadék időbeli eloszlására. A 20 vízgyűjtőn mért csapadék adatok vizsgálata során azt tapasztaljuk, hogy mind a napi átlagos csapadékösszeg, mind a napi csapadékösszeg maximuma általában május-június-július-augusztus-szeptember hónapokban következett be. A Duna magasabban fekvő vízgyűjtőinél a napi átlagos csapadék 2-3 mm-rel több volt, mint a Tiszához tartozóknál. Az 4. ábrán az Inn és a Sajó-Hernád vízgyűjtők napi átlagos és maximum csapadékviszonyai láthatóak.



4. ábra Havi bontásban a napi átlagos és maximum csapadék az Inn (2.) vízgyűjtőre és a Sajó-Hernád (11.) vízgyűjtőre (barna vonal a napi csapadékösszeg maximum, kék vonal a napi átlagos csapadékösszeg)

A továbbiakban mind a 20 vízgyűjtőnél megvizsgáltuk a nagy mennyiségű csapadékok gyakoriságát. A 0-5 mm, 5-10 mm, 10-20 mm és a 20 mm-nél magasabb csapadékok előfordulásának valószínűségére voltunk kíváncsiak. Arra a megállapításra jutottunk, hogy 5-10 mm közötti csapadék legalább egyszer minden vízgyűjtőn bekövetkezett. Az e fölötti csapadéértékek a téli hónapokban ritkábban jellemzőek. Tavasztól ősziig viszont minden vízgyűjtőn kb. 10-15%-os gyakorisággal előfordult 10-20 mm-es csapadék. A 20 mm-t meghaladó csapadékhullás leginkább a nyári hónapokra jellemző, de a hegyvidéki vízgyűjtőkön az év minden hónapjában 1-5 %-os gyakorisággal előfordult.

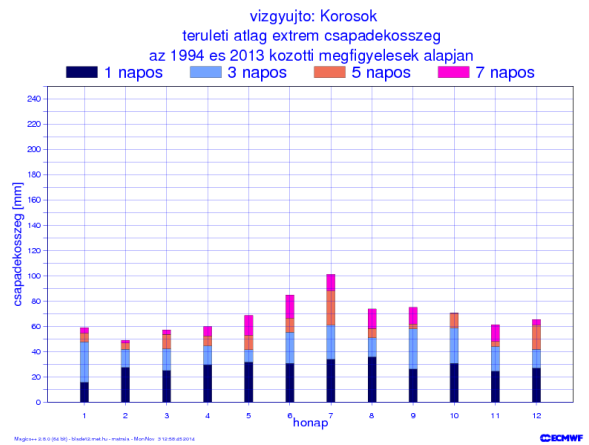
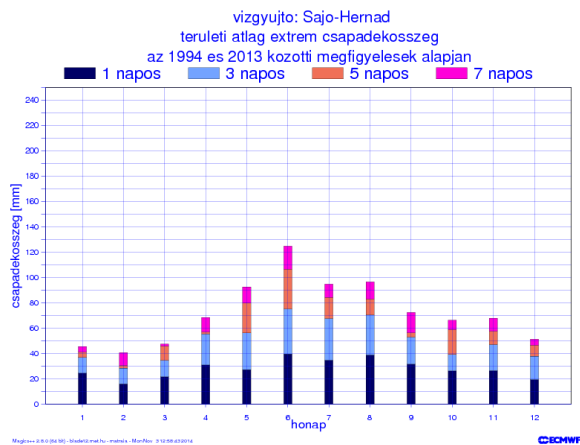
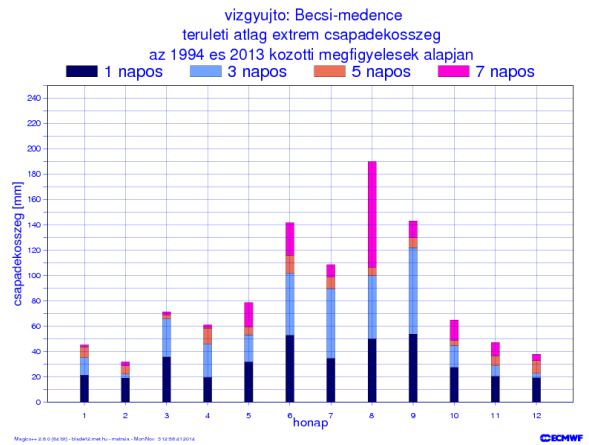
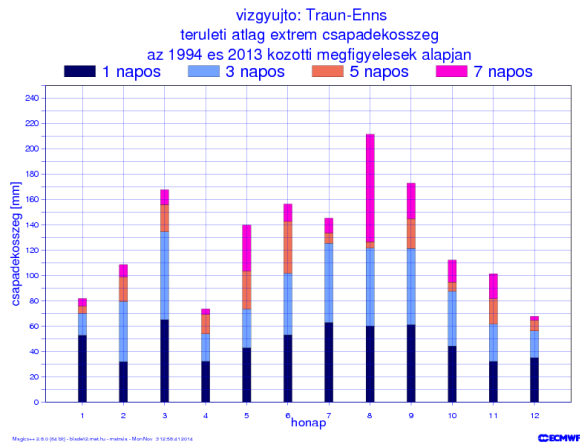
Az 5. ábrán négy vízgyűjtőt emeltem ki, amelyeknél a fent említett tartományok szerint ábrázoltuk a csapadék gyakoriságát. Mindegyiknél látszik, hogy a vizsgált 19 év során többször is előfordult nagy mennyiségű, 20 mm-t meghaladó csapadék az adott területeken



5. ábra A Traun-Enns, a Kapos-Sió, a Felső-Tisza és a Bodrog vízgyűjtőkön 1994-2013 között előfordult csapadék mennyiségek gyakorisága, havi bontásban

A 6. ábrán négy vízgyűjtő látható (két dunai és két tiszai), amelyeknél a többnapos csapadékösszegeket jelenítettük meg. A 20 vízgyűjtőn, egy év alatt lehullott csapadék legnagyobb része a májustól szeptemberig terjedő időszakra koncentrálódott. A maximum csapadék esetében először megnéztük, hogy az adott vízgyűjtőn az egyes hónapokban mekkora extrém csapadék hullott.

Mivel egy kiválasztott extrém érték még nem biztos, hogy reprezentatív, ezért a vizsgálatot kiterjesztettük a maximális érték körüli 3, 5 és 7 napos csapadékösszegekre. A többnapos csapadékösszegek esetén a csapadék időbeli eloszlása leginkább a május-június-július-augusztus hónapokra korlátozódott. A domborzatnak itt is jelentős szerepe van. A Duna felső szakaszához tartozó, magasabban elhelyezkedő vízgyűjtők esetében nagyobb csapadékösszeg értékeket kaptunk. A többi vízgyűjtő esetében is előfordult több napos extrém mennyiségű csapadék, viszont ezek értéke alulmaradt felső dunaiakhoz képest.



6. ábra A Traun-Enns, a Bécsi-medence, a Sajó-Hernád és a Körösök vízgyűjtőkre vonatkozó havi extrém csapadékoszlegek, 1, 3, 5 és 7 napos összegzésben.

Összességében elmondhatjuk, hogy nagy mennyiségű csapadék a vizsgált 19 év alatt mindegyik vízgyűjtőn előfordult, és leggyakrabban a májustól augusztusig terjedő időszakban. A Duna felső szakaszához tartozó vízgyűjtőknél és a felső-tiszai vízgyűjtőknél (hegyvidéki típusok) a domborzat rásegíthet az extrém csapadék kialakulásához, de a csapadék mennyiségét leginkább a területek időjárását alakító szinoptikus légköri képződmény határozhatja meg.

8. Reforecast klímák összehasonlítása

A 3.1. fejezetben már említettem, hogy reforecast előrejelzések 2008 márciusától készülnek az ECMWF-nél. Jelenleg minden csütörtökön 5 ensemble tagú 32 napos reforecast előrejelzés készül az aktuális előrejelzést megelőző 20 évre visszamenően. A 3.1 fejezetben leírt módon a reforecast előrejelzésből állítjuk elő a heti bontású reforecast modell klímát. A modell fejlesztések eredményeként az egyes modell verziók horizontális és vertikális felbontásai változtak, így a reforecast klímák között is jelentkeznek eltérések.

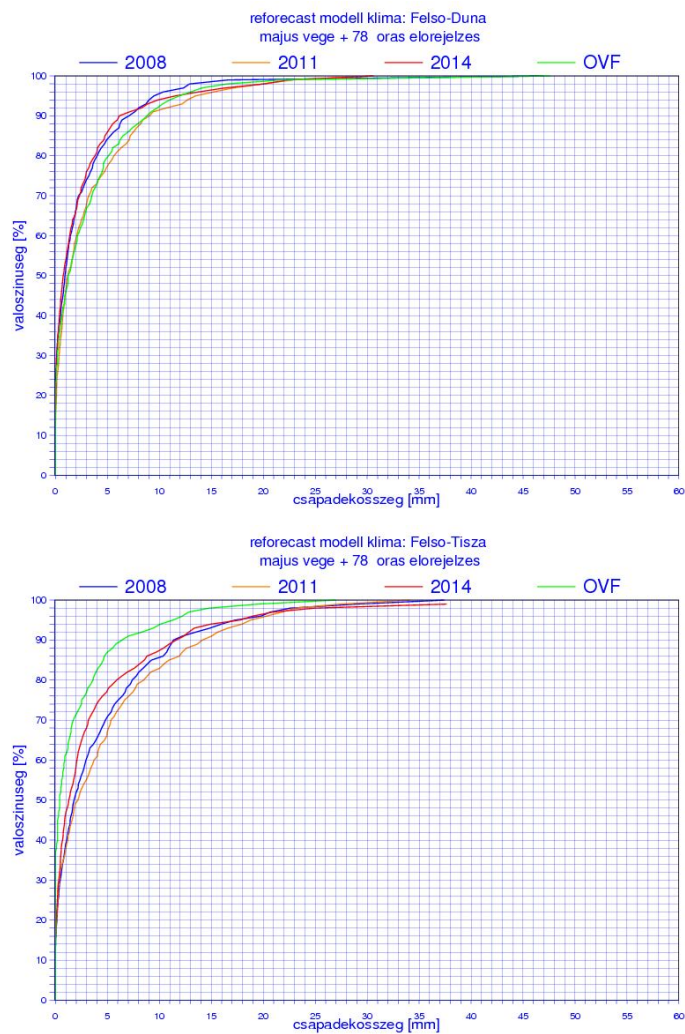
8.1. A reforecast klímák és a megfigyelési klíma összehasonlítása

Mivel 2010 és 2013 végén jelentős változás történt az ensemble modellben, ezért érdemes megvizsgálnunk a különböző időszakokból származó modell klímákat. A három fő modell korszakból kiválasztottunk egy évet, amely reprezentálja az adott modellverziót. Így ebben a fejezetben a 2008-as, a 2011-es és a 2014-es reforecast klímákat hasonlítom össze. A vizsgálatba bevontam a megfigyelési klímát is, amit a 19 év mérési adataiból állítottuk elő. Mind a 20 vízgyűjtőre elkészítettük a reforecast klímák összehasonlítását. Eredményeimet május végi időszakra mutatom be. A 00 UTC-s modell előrejelzések esetében +2 nap +6 óra és +3 nap +6 óra időszaknak megfelelő +54-78 órás reforecast előrejelzéseket vizsgáltuk. A klímák összehasonlításakor érdemes figyelembe venni a vízgyűjtők területi elhelyezkedését is. A hegyvidék, a medencés és a vegyes vízgyűjtőkre különbözhet a reforecast klímák egymáshoz való viszonya. Ez szintén a modell felbontás időbeli változására vezethető vissza. Mivel a modell felbontás az évek során fokozatosan finomodott, így arra számítunk, hogy a legfrissebb, 2014-es modell verziós reforecast klíma lesz a legközelebb a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényéhez, mert ekkor mondhatjuk, hogy javult a modell fejlesztések eredménye.

A vizsgálat során egyrészt megnéztük, hogy a különböző klímák mennyire különböznek egymástól. Másrészt arra voltunk kíváncsiak, hogy a 2008, 2011 és 2014-es reforecast klímák eltérnek-e szignifikánsan a megfigyelési klímától. Ha az eltérés szignifikáns, akkor célszerű kalibrációt végeznünk az előrejelzésünkre. (A kalibráció elméleti alapját a 3. fejezetben ismertettem, konkrét alkalmazását pedig a 9. fejezetben mutatom be.) A klímák közötti eltérések vizsgálatához Kolmogorov-Szmirnov próbát is alkalmaztunk. A statisztikai próba ismertetését az 1. függelék tartalmazza. Viszont fontos itt megemlíteni, hogy

a Kolmogorov-Szmirnov próba a legnagyobb eltéréseket veszi figyelembe és ez alapján ad eredményt. A reforecast klímák és a megfigyelési klíma összehasonlítására a Kolmogorov-Szmirnov próba eredményeit a 2. függelék tartalmazza. A statisztikai próba eredményei minden esetben meghaladták a 0,05-ös szignifikancia szintet, így az eltérések szignifikánsak.

A május végére vonatkozó reforecast klímák és megfigyelési klíma összehasonlításait a Duna és a Tisza vízgyűjtői alapján mutatom be. Először, a hegyvidéki típusba tartozó vízgyűjtők estén a klímák közötti eltéréseket a 7. ábra szemlélteti.

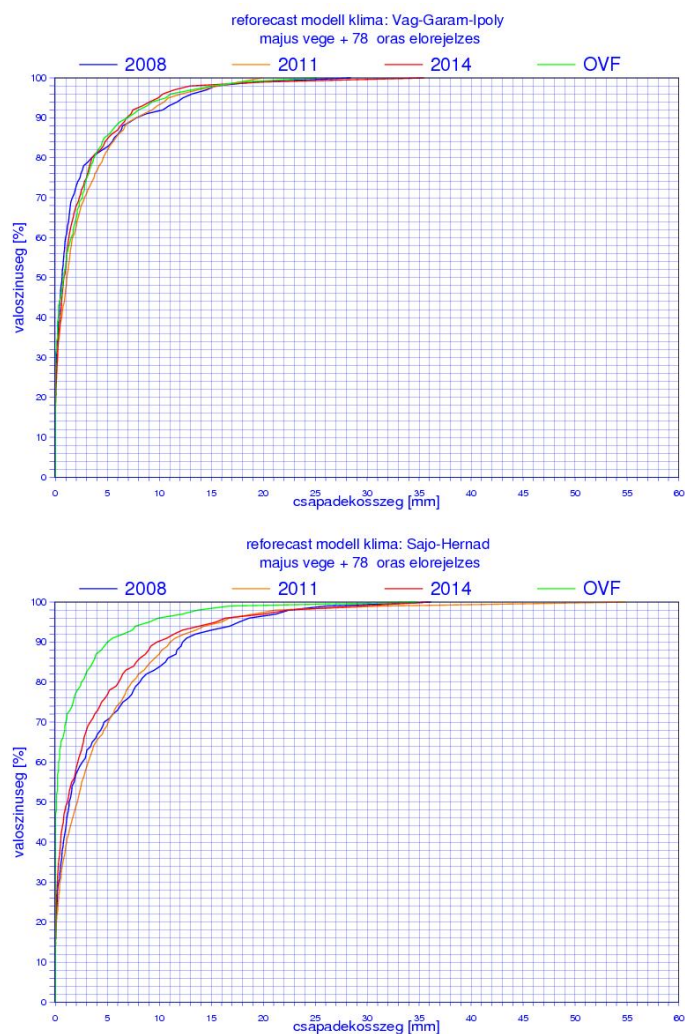


7. ábra A Felső-Duna és a Felső-Tisza vízgyűjtőkre vonatkozó reforecast klímák és megfigyelési klíma összehasonlítása (kék vonal 2008-as reforecast klíma, narancssárga vonal 2011-es reforecast klíma, piros vonal 2014-es reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma)

A Felső-Duna vízgyűjtő (és a további dunai hegyvidéki vízgyűjtők esetében is) a klímák közel futnak egymáshoz, a többihez képest nagyobb eltérést a 2011-es reforecast klíma mutat. A Felső-Tisza esetében szemmel láthatóan nagyobbak a különbségek a

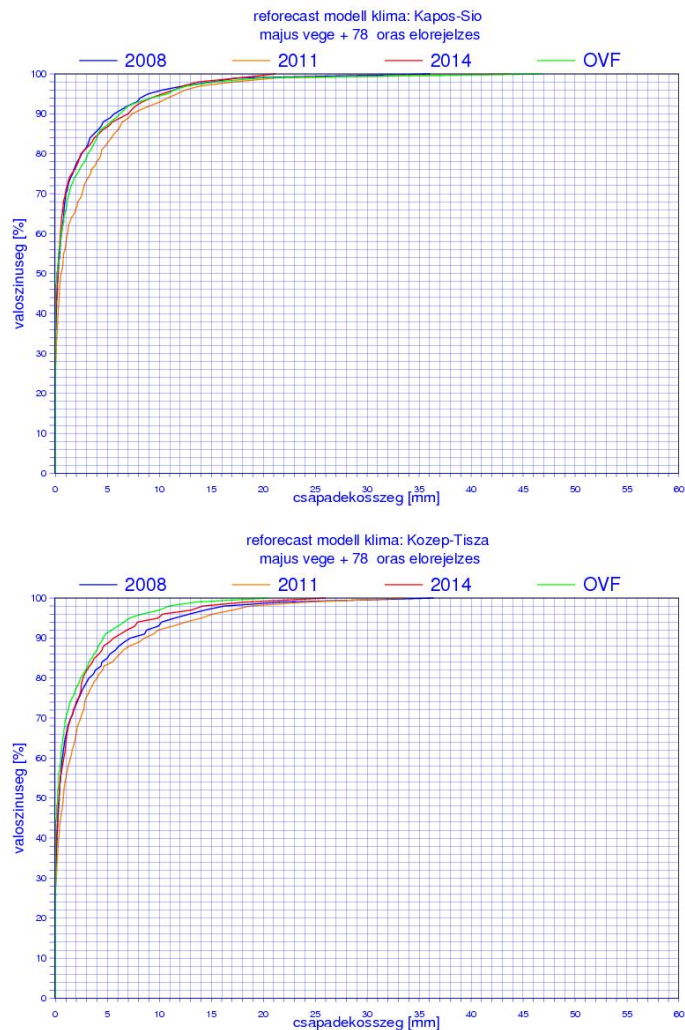
reforecast klímák és a megfigyelési klíma között. A Kolmogorov-Szmirnov próba eredménye azt mutatta, hogy a klímák között szignifikáns eltérés van a hegyvidéki vízgyűjtők esetén. Az egyezés és eltérés aránya a reforecast klíma és a megfigyelési klíma között, a 2008-as és a 2014-es modell verzió esetén is ugyanolyan volt.

A vegyes típusú vízgyűjtőknél a klímák összehasonlításakor nem tudunk egyértelmű megállapítást tenni. Mint a 8. ábra is mutatja, a vegyes típusú vízgyűjtőknél a klímák közötti eltérések széles skálán mozognak. A Vág-Garam-Ipoly vízgyűjtőnél a klímák közelebb futnak egymáshoz, a Sajó-Hernád vízgyűjtőnél nagyobb az eltérés közöttük. A statisztikai próbánk eredménye szerint a legtöbb egyezés a 2014-es reforecast klíma és a megfigyelési klíma között volt, a többi reforecast klíma esetén inkább eltérések jelentek meg.



8. ábra A Vág-Garam-Ipoly és a Sajó-Hernád vízgyűjtőkre vonatkozó reforecast klímák és megfigyelési klíma összehasonlítása (kék vonal 2008-as reforecast klíma, narancssárga vonal 2011-es reforecast klíma, piros vonal 2014-es reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma)

A medencés típusú vízgyűjtők esetén, ha csak a gráfok futása alapján nézzük a klímák egymáshoz való viszonyát, akkor kis eltéréseket látunk (9. ábra). Viszont, a típusba tartozó összes vízgyűjtőt (9 db) megvizsgálva, a Kolmogorov-Szmirnov próba eredményül azt adta, hogy a klímák között nagy eltérések is adódnak. A legtöbb egyezés viszont a 2014-es reforecast klíma és a megfigyelési klíma között adódott.



9. ábra A Kapos-Sió és a Közép-Tisza vízgyűjtőkre vonatkozó reforecast klímák és megfigyelési klíma összehasonlítása (kék vonal 2008-as reforecast klíma, narancssárga vonal 2011-es reforecast klíma, piros vonal 2014-es reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma)

Összefoglalva, ha a vízgyűjtők típusai szerint vizsgáljuk a klímák közötti eltérést, akkor azt mondhatjuk, hogy a hegyvidéki típusnál van a legtöbb eltérés. A vegyes és a medence típusú vízgyűjtőknél a 2014-es reforecast klíma egyezik a legjobban a megfigyelési klímával, de itt is adódnak nagy eltérések.

Ha a 20 vízgyűjtőt együtt vizsgáljuk, és így próbálunk konklúziót levonni a klímák egymáshoz való viszonyáról, akkor a következőket állapíthatjuk meg:

- a különböző reforecast klímák között jelentős eltérés van, ez várható volt a modell fejlesztések miatt
- a 2011-es reforecast klíma közelebb áll a 2008-hoz (6 egyezés a 20-ból), mint a 2014-hez (2 egyezés a 20-ból). 2013-ban a horizontális felbontásban ugyan nem történt változtatás (32 km), viszont a vertikális modell szintek száma 62-ről 91-re emelkedett. Ezért lehet nagyobb eltérés a 2011-es és a 2014-es reforecast klímák között.
- az eloszlásfüggvények alapján úgy tűnik, hogy síkvidékeken alacsony csapadék mennyiség esetén nem lenne szükséges kalibrálni, mert a reforecast klímák (különösen a 2014-esnél) és a megfigyelési klíma között kicsi az eltérés.
- viszont a nagy csapadékok esetén a klímák nagyon eltérőek egymáshoz képest, ezért indokolt a kalibráció
- a legkevesebb eltérés (11 eltérés a 20-ból) a 2014-es reforecast klíma és a megfigyelési klíma között volt.

Mindezek alapján elmondhatjuk, hogy a modell fejlesztések eredményeként a reforecast klímák jelentősen változtak. A megfigyelési klímához képest még a legfrissebb, 2014-es reforecast klíma esetén is jelentősek az eltérések. Ugyan most csak egy rövid időszakra mutattam be a klímák egymáshoz való viszonyát, de így is találtunk jelentős eltéréseket (még a legújabb reforecast klíma esetén is). Tehát, a kalibráció elvégzése szükséges és indokolt, minden mennyiségű csapadék esetén, az összes vízgyűjtőre vonatkozóan.

8.2. Éves menet vizsgálata a különböző klímák összehasonlítása során

A Kolmogorov-Szmirnov próba segítségével elvégeztük a 2014-es reforecast klíma és a megfigyelési klíma, valamint a 2014-es és a 2008-as reforecast klíma összehasonlítást. A három klímát mind a 20 vízgyűjtőre, az év 52 hetére készítettük el. A teljes populáción belül külön megvizsgáltuk az éves és az évszakos eltéréseket is.

A 2014-es reforecast klíma és a megfigyelési klíma összehasonlítására vonatkozó vizsgálat eredményeit az 2. táblázat tartalmazza, ahol külön bontottam a dunai és a tiszai vízgyűjtőkre vonatkozó eredményeket, illetve egy külön résztáblázatban összegeztem a 20 vízgyűjtőre vonatkozó eltéréseket (%). Az eredmények alapján elmondhatjuk, hogy egész évben nagy eltérések vannak (79%) a két klíma között, különösen a tavaszi (92%) és a nyári (79%) évszakokban. Ha a vízgyűjtők típusai szerint vizsgálódunk, akkor nem vonhatunk le egyértelmű megállapítást az egyes kategóriákra. A típusokon belül találtunk nagyobb és kisebb eltéréseket is.

2. táblázat A 2014-es reforecast és a megfigyelési klíma összehasonlítása, az eltérések %-ban kifejezve (első táblázatban a dunai vízgyűjtők, a második táblázatban a tiszai vízgyűjtők, a harmadik táblázatban az összes vízgyűjtő esetén az eltérések)

Dunai vízgyűjtők												
Vízgyűjtő	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	19	20
Típus	H	H	H	V	V	M	V	M	M	M	H	M
Éves	71	69	100	85	75	65	48	73	100	100	100	100
Tavaszi	50	75	100	100	92	100	75	100	100	100	100	100
Nyári	67	58	100	75	67	75	50	83	100	100	100	100
Őszi	100	100	100	92	83	17	33	83	100	100	100	100
Téli	67	58	100	67	58	75	42	25	100	100	100	100

Tiszai vízgyűjtők								
Vízgyűjtő	11	12	13	14	15	16	17	18
Típus	V	M	M	V	H	M	M	M
Éves	90	100	58	81	94	63	62	54
Tavaszi	100	100	75	100	100	75	100	92
Nyári	100	100	58	100	100	58	58	25
Őszi	100	100	25	83	83	58	25	50
Téli	67	100	67	42	100	67	58	50

	Összegzett eltérések (%)
Éves	79
Tavaszi	92
Nyári	79
Őszi	77
Téli	72

A 2008-as és 2014-es reforecast klímák összehasonlítása esetén a Kolmogorov-Szmirnov próba eredményeit a 3. táblázat tartalmazza. A két reforecast klíma között a

legnagyobb eltérés nyáron adódik (27%). A legkevesebb eltérés itt is télen (8%) mutatkozik. A vízgyűjtők típusaira ebben az esetben sem lehet egyértelmű konzekvenciát levonni. Mindegyeik típusnál adódnak nagyobb és kisebb eltérések is. Viszont a téli hónapokban a két klíma több vízgyűjtőnél (5, 7, 8, 10, 12, 14) is megegyezik.

3. táblázat A 2014-es reforecast és a 2008-as reforecsst klíma összehasonlítása , az eltérések %-ban kifejezve (első táblázatban a dunai vízgyűjtők, a második táblázatban a tiszai vízgyűjtők, a harmadik táblázatban az összes vízgyűjtő esetén az eltérések)

Dunai vízgyűjtők												
Vízgyűjtő	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	19	20
Típus	H	H	H	V	V	M	V	M	M	M	H	M
Éves	13	15	13	15	13	17	15	15	12	13	19	19
Tavaszi	8	8	8	8	17	25	17	17	8	8	17	17
Nyári	25	33	33	25	33	25	25	25	17	25	17	33
Őszi	17	17	8	17	0	17	17	17	8	8	25	17
Téli	8	8	8	17	0	8	0	0	17	0	25	17

Tiszai vízgyűjtők								
Vízgyűjtő	11	12	13	14	15	16	17	18
Típus	V	M	M	V	H	M	M	M
Éves	17	15	10	13	23	13	17	12
Tavaszi	17	17	8	8	17	8	17	17
Nyári	33	33	25	33	42	17	25	17
Őszi	17	17	0	17	25	25	17	8
Téli	8	0	8	0	8	8	17	8

	Összegzett eltérések (%)
Éves	15
Tavaszi	13
Nyári	27
Őszi	15
Téli	8

A két vizsgálat összefoglalásaként elmondhatjuk, hogy a 2008-as, a 2014-es és a megfigyelési klímák között az eltéréseknek éves menete van. Általában a legtöbb különbség a nyári évszakban, a legkevesebb pedig télen fordult elő. A megfigyelési klíma és a 2014-es reforecast klíma esetén a legnagyobb eltérés a tavaszi és a nyári hónapokban adódott. Ez az évszaki különbség a 2008-as és a 2014-es klímák között a nyári évszakra redukálódott. Ebből arra következtethetünk, hogy az ensemble modell a horizontális felbontása révén a nyári csapadékokat nehezen tudja pontosan előrejelezni. Mivel az árvizek főleg a tavaszi és a nyári évszakokban fordulnak elő, és a klímák között is ekkor tapasztaltuk a legnagyobb eltéréseket, ezért célszerű a kalibráció elvégzése. Az előrejelzések javítását minden vízgyűjtőre külön el kell végezni. Ugyanis az egyes vízgyűjtő típusokra nem találtunk meghatározó jellemzőket a klímák közötti eltérések alapján.

9. Kalibráció alkalmazása ensemble előrejelzésekre

Amint a 4. fejezetben írtam, a kalibrációval az előrejelzésünket szeretnénk pontosítani. Az ensemble előrejelzést a reforecast és a megfigyelési klíma eloszlásfüggvények egymáshoz való viszonya alapján szeretnénk javítani. A kalibrációhoz három dologra van szükségünk:

1. Reforecast klíma, amihez ECMWF reforecast előrejelzéseket használtunk, és ezekből készítettük az eloszlásfüggvényeket, amelyek az adott vízgyűjtőre vonatkoznak.
2. Megfigyelési klíma, amely szintén az adott vízgyűjtő mérési adataiból készült el.
3. EPS előrejelzés, amihez az adatokat az ECMWF MARS adatbázisából kértünk le, a vizsgált vízgyűjtőre, és ezekből állítottuk elő az eloszlásfüggvényünk.

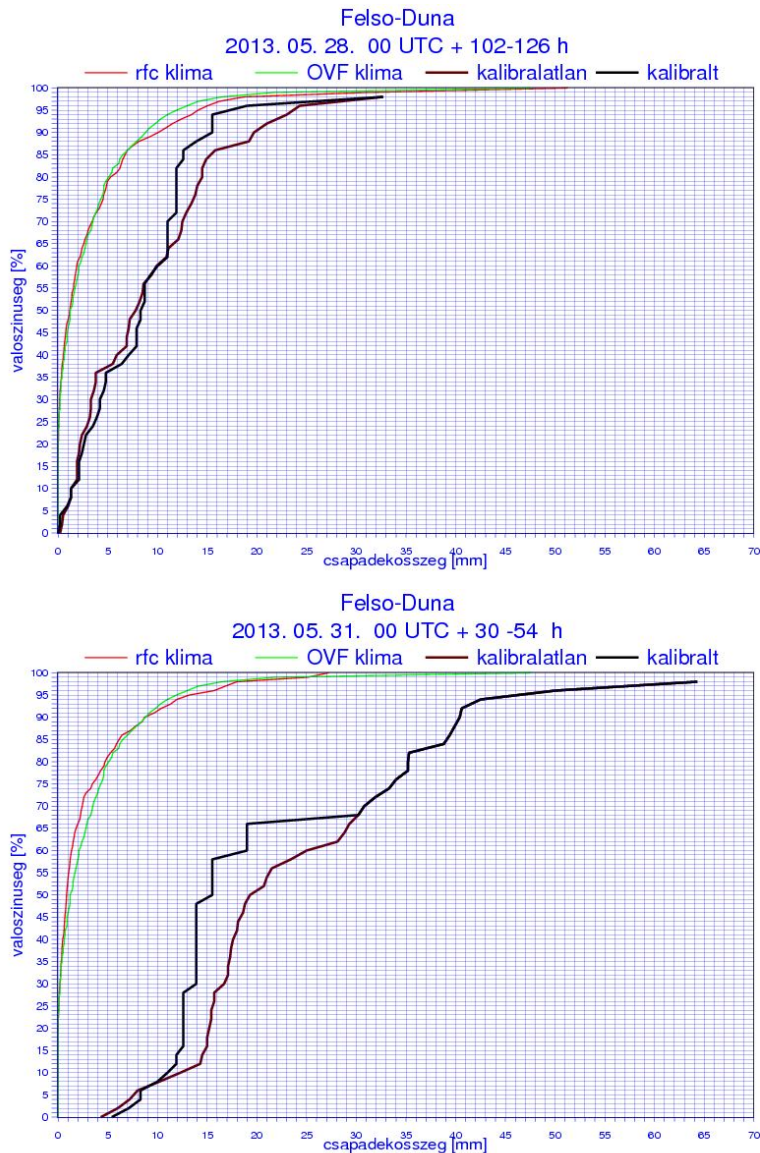
A kalibráció során a nyers EPS előrejelzés javítása a megfigyelési klíma és a reforecast klíma eltérései alapján történik (*Ihász et al.*, 2010). Minél inkább eltér egymástól a megfigyelési és a reforecast klíma, annál nagyobb korrigálás látható a kalibrált EPS előrejelzésben. Ha a két klímánk közel azonos, akkor az előrejelzésünkben a kalibráció csak kis javítást fog eredményezni.

9.1. Kalibráció alkalmazása a 2013-as dunai árvízre

A kalibrációt a 2013-as dunai árvíz csapadék előrejelzéseire mutatom be, a Duna felső szakaszához tartozó vízgyűjtőkre vonatkozóan. 2013. május 28-tól május 31-ig vizsgáltuk a június 2-ára szóló 24 órás csapadékösszeg előrejelzéseket. Azért ezt a júniusi napot vizsgáljuk, mert ezen a napon esett a legtöbb csapadék a Duna felső vízgyűjtőin. Az ábrákon a piros vonal a reforecast klímát, a zöld vonal a megfigyelési klímát, a barna vonal a nyers EPS előrejelzést, a fekete vonal pedig a kalibrált EPS előrejelzést mutatja. Az ábrákon az látszik, hogy az egyes csapadékösszegek (mm) milyen valószínűséggel fordulnak elő.

A 10. ábrán a Felső-Duna vízgyűjtőre vonatkozó kalibrációt láthatjuk, amelyen a 2013. május 28. 00 UTC-s +102-124 órás és a 2013. május 31. 00 UTC-s +30-54 órás előrejelzéseket kalibráljuk. Mind a két esetben a megfigyelési és a reforecast klíma közel együtt fut, nagyobb eltéréseket a 8-16 mm-es illetve a néhány mm-es csapadékok estén látunk. Ezek alapján a legnagyobb kalibrációs javítás is a 10-20 mm közötti értékek esetén valósult meg, ezen a szakaszon tér el leginkább egymástól a nyers EPS és a kalibrált EPS

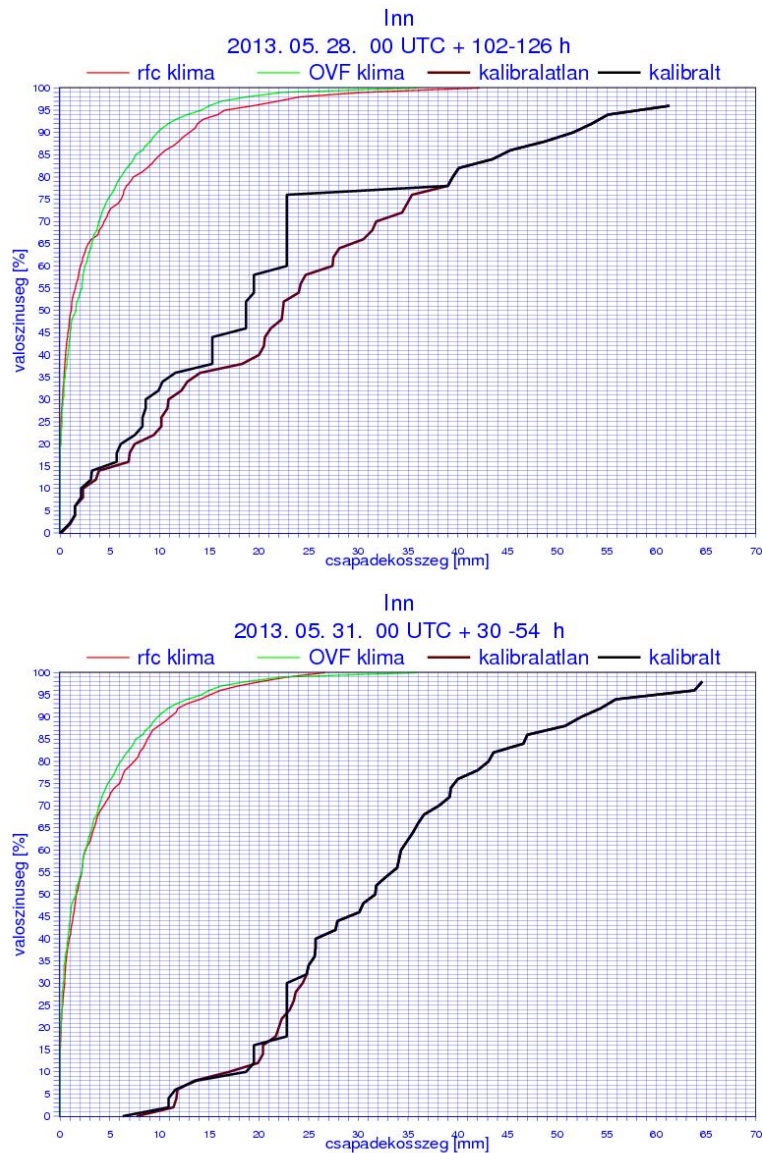
előrejelzés. A nagy csapadékok esetén a kalibráció csekély marad, mert a reforecast és a megfigyelési klíma eloszlásfüggvények közel maradnak egymáshoz.



10. ábra A 2013. május 28. 00 UTC-s és 2013. május 31. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja a Felső-Duna vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

A 10. ábrán az is látható, hogy amint időben közelebb kerülünk az esemény bekövetkezéséhez, az előrejelzésben már megjelennek magasabb csapadék értékek, de nem adják vissza pontosan a ténylegesen mért 34,6 mm-es értéket. Viszont, ha a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényét és az előrejelzések eloszlásfüggvényeit nézzük, akkor elmondható, hogy nagy a különbség köztük. A kalibráció ez esetben a 20 mm körüli csapadékokra volt eredményes.

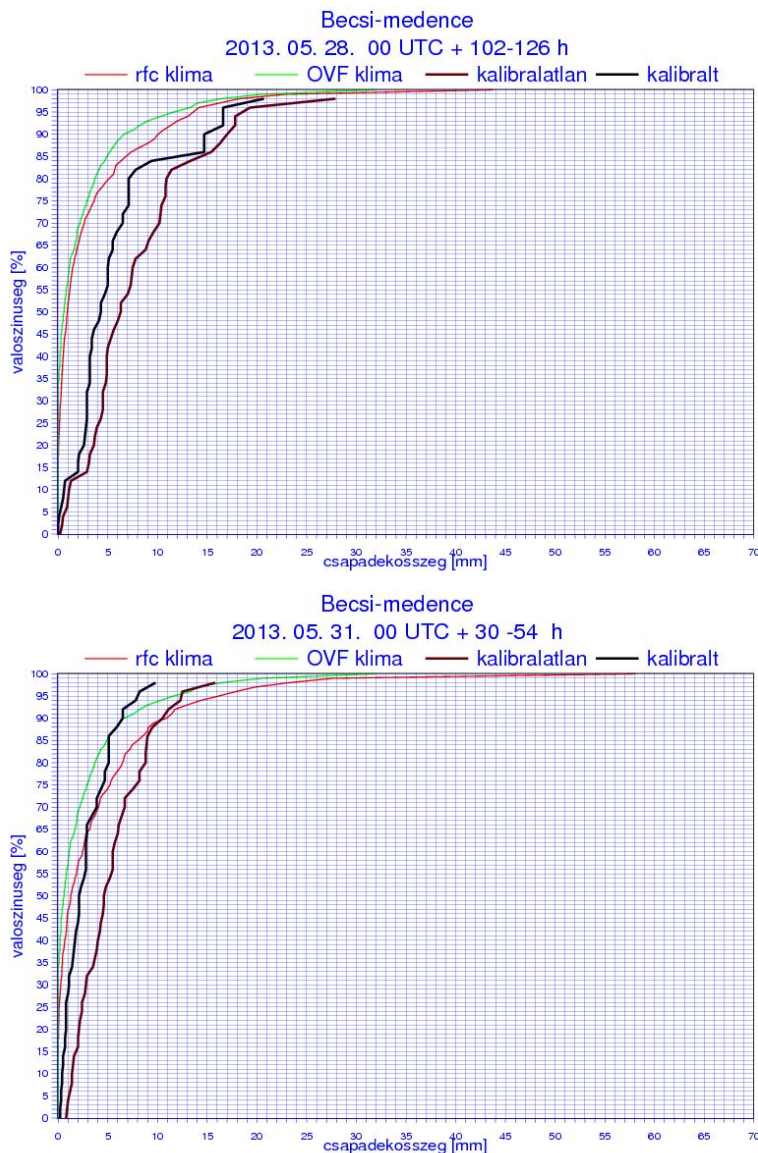
A 11. ábrán az Inn vízgyűjtőre készített kalibrációk láthatóak. Itt is a 2013. május 28. és május 31. 00 UTC-s előrejelzéseket mutatom be. Az Inn vízgyűjtőn nagyobb csapadékokat mértek (48,2 mm), mint a Felső-Duna vízgyűjtőn és a kalibrálatlan előrejelzés már a május 28-i futásban jelzi, hogy nagy csapadéokra is lehet számítani. Ebben az esetben a reforecast és a megfigyelési klíma közötti eltérést már nagyobb szakaszon figyelhetjük meg. A kalibráció is leginkább ezen a részen történik.



11. ábra A 2013. május 28. 00 UTC-s és 2013. május 31. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja az Inn vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

A május 31-ei előrejelzésben már a párban futó eloszlásfüggvények közötti eltérések kisebbek, így a kalibrált előrejelzés sem tér el annyira a kalibrálatlantól. Ebben az esetben csak a 15-25 mm-es csapadékok valószínűségére tudta javítani az előrejelzést a kalibráció. A teljes képet vizsgálva itt is elmondható, hogy az előrejelzett és a mérési értékek eloszlása között nagy a különbség.

A Duna felső szakaszához tartozik a Bécsi-medence vízgyűjtő is, amelyre a következő kalibrációkat kaptuk (12. ábra).



12. ábra A 2013. május 28. 00 UTC-s és 2013. május 31. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja a Bécsi-medence vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

A megfigyelési és a reforecast klímák hasonlóan futnak, mint az előző két vízgyűjtőnél, viszont a nyers előrejelzés és ennek megfelelően a kalibrált előrejelzés is eltérő képet mutat a korábbi két esethez képest. A május 28-i és május 31-i időpontban is szépen látszik a megfigyelési és reforecast klímák közötti eltérés. A kalibráció során is megfigyelhető ez a különbség. Az előrejelzések gráfja jelentősen más alakot ölt, mint a két hegyvidéki terület esetén. A Bécsi-medence vízgyűjtőre inkább kis csapadékot vár a modell, a valóságban összesen 16,2 mm hullott. (A további napokra vonatkozó kalibrációk a 3. függelékben megtalálhatóak.)

Összességében, a bemutatott három vízgyűjtő esetén, elmondhatjuk, hogy a kalibrációval az előrejelzéseinket tudtuk javítani. A Felső-Duna és az Inn vízgyűjtők esetében ugyan még mindig nagy az eltérés a kalibrált előrejelzés eloszlásfüggvény és a valóban mért értékek között. A kisebb csapadékok esetén a korábbi időpontokból indított előrejelzés jobbnak bizonyul, a nyers és a kalibrált előrejelzés is közelebb esik a megfigyelési klímához. A nagyobb csapadékoknál viszont az esemény bekövetkezéséhez közelebbi időpont előrejelzése ad pontosabb prognózist. A teljes képet vizsgálva, a megfigyelési klíma, a nyers EPS és a kalibrált EPS előrejelzések közötti eltérés adódhat abból, hogy ezek a vízgyűjtők hegyvidéki területen helyezkednek el, és a modell a domborzati sajátosságokból adódóan nem tudja olyan pontosan megbecsülni a várható csapadékot. A Bécsi-medence vízgyűjtő egyenletesebb domborzattal rendelkezik, a medence típusba soroltuk. A kis csapadékok esetén a kalibrálatlan ensemble eloszlásfüggvényünk közelebb helyezkedett el a megfigyelési klímához, a modell előrejelzése jobbnak mondható. A kalibrációval viszont még inkább tudtuk közelíteni a két eloszlásfüggvényt. Ebben az esetben a javítás leginkább a kisebb csapadékok esetén valósult meg.

A kalibrációval mindenképpen javítható az előrejelzés, viszont figyelembe kell vennünk a domborzatból adódó eltéréseket. A kalibráció elvégzésekor kapott eredmények plusz információval szolgálhatnak az előrejelző szakemberek számára oly módon, hogy a megfigyelési klíma eloszlásfüggvény segítségével képet kapunk arról, hogy az elmúlt évek alapján milyen a csapadék mennyiségek eloszlása az adott vízgyűjtőn. A hetente újuló reforecast klímák felhasználásával pedig elvégezhető az ensemble előrejelzés kalibrációja. Az eredményként kapott kalibrált előrejelzést összehasonlítva a kalibrálatlan, nyers ensemble előrejelzéssel, információt kapunk arról, hogy kell-e módosítani az előrejelzésünket, ha igen, akkor milyen mértékben. A kalibrációval tehát képet kaphatunk a modell előrejelzés pontatlanságairól, és az alapján javíthatjuk a prognózisunkat.

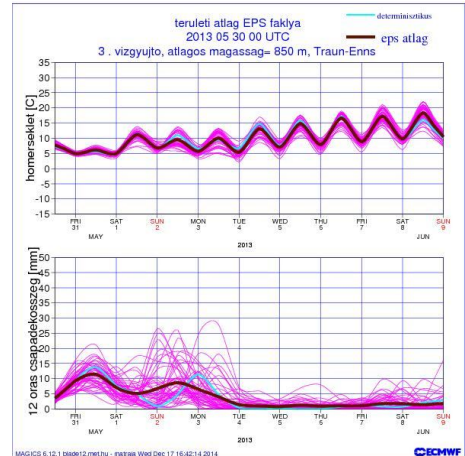
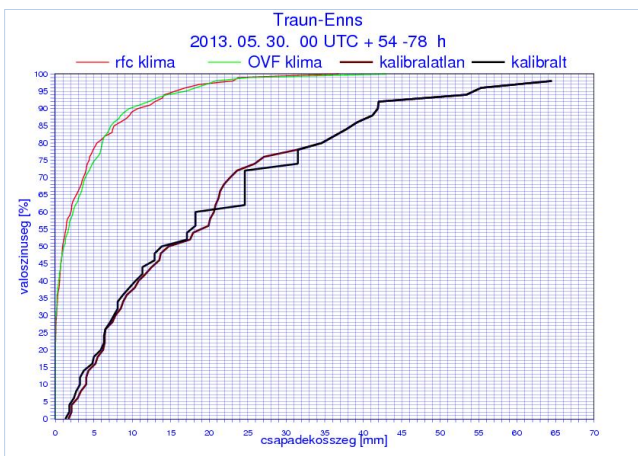
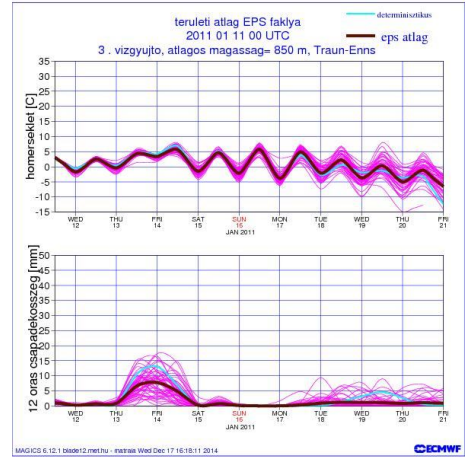
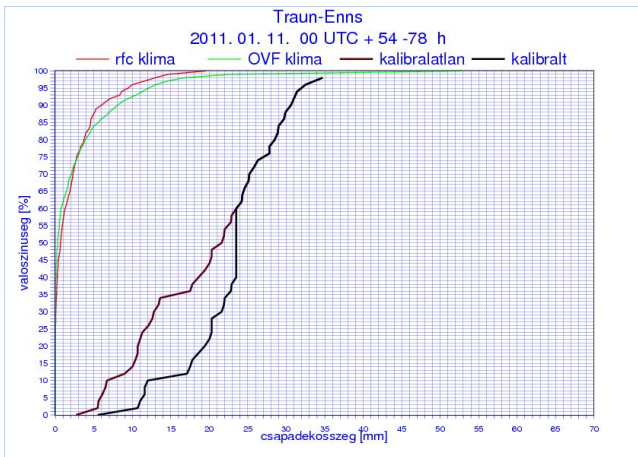
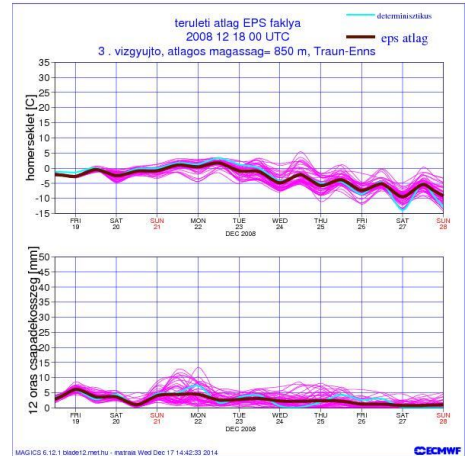
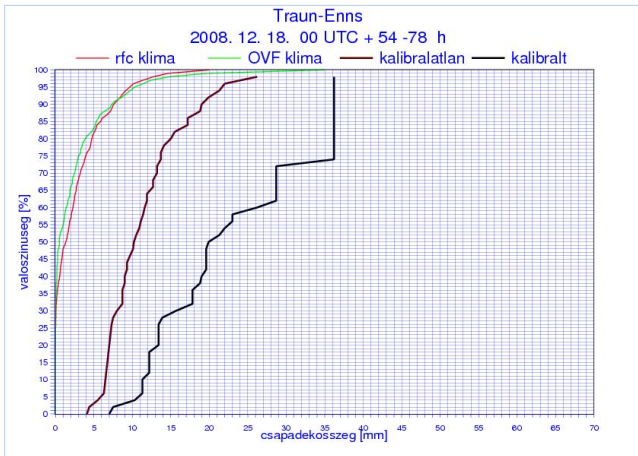
9.2. Ensemble kalibráció alkalmazása néhány extrém csapadékú időjárási helyzetben

A megfigyelési és a 2014-es reforecast klímák összehasonlításakor több vízgyűjtő esetén is nagy eltéréseket kaptunk. Így kiválasztottunk 3 vízgyűjtőt, amelyeknél minden évszakban jelentősen eltért egymástól a két klíma. A 3. táblázat alapján a következő vízgyűjtőkre készítettünk kalibrációt: Traun-Enns (3), Zala-Balaton (9), Kapos-Sió (10). 2008 utáni extrém csapadékos napokat kerestünk a vízgyűjtőkre, majd a három nappal korábbi előrejelzést (+54-78 óra) kalibráltuk. Az 4. táblázatban a kiválasztott extrém csapadékos napok és a mért csapadék értékek láthatóak a kiválasztott három vízgyűjtőre vonatkozóan.

4. táblázat Kalibráció a Traun-Enns, a Zala-Balaton és a Kapos-Sió vízgyűjtőkre (kalibrált nap és a mért napi csapadékösszeg érték)

Traun-Enns		Zala-Balaton		Kapos-Sió	
2008.12.21.	35 mm	2009.01.28.	22,9 mm	2008.03.24.	20,3 mm
2011.01.14.	52,8 mm	2013.03.31.	25,5 mm	2010.05.16.	46,8 mm
2013.06.02.	53,1 mm				

A Traun-Enns vízgyűjtő esetén három időpontra készítettünk kalibrációt (13. ábra). A három időpont esetén két különböző modell verzióval készített reforecast klímát tudunk összehasonlítani a megfigyelési klímával. A leglátványosabb és legeredményesebb javulást a 2008-as esetnél tudunk elérni. Itt jelentősen eltér egymástól a kalibrálatlan és a kalibrált eloszlásfüggvény. A kalibrált előrejelzés megközelítette a valóban mért 35 mm-es értéket is. A fáklyadiagramon látható, hogy a determinisztikus és az ensemble modell is alábecsülte a valóban mért csapadék értéket, sőt inkább december 22-re várja a nagyobb csapadékot. A 2011-es időpontnál a kisebb mennyiségű csapadékoknál látunk javulást. A fáklyadiagramon mind a két modell nagy csapadékot jelez a vizsgált napra. A valóban mért 52,8 mm-es csapadékot csak néhány ensemble tag közelíti meg az előrejelzésben. A 2013. június eleji esetnél a kalibrációval kis mértékben értünk el javulást az előrejelzésben. A kalibrált előrejelzés azonban nagy csapadék értékeket is mutat, ami alátámasztja a valóban mért jelentős mennyiségű csapadékot. A fáklyadiagramon ennél az esetnél szórnak a legjobban az EPS tagok. A vizsgált napra 0-25 mm-es 12 órás csapadékösszegeket prognosztizálnak. A determinisztikus modell jelentősen alábecsüli az ensemble átlagot és a mért csapadék értéket is.

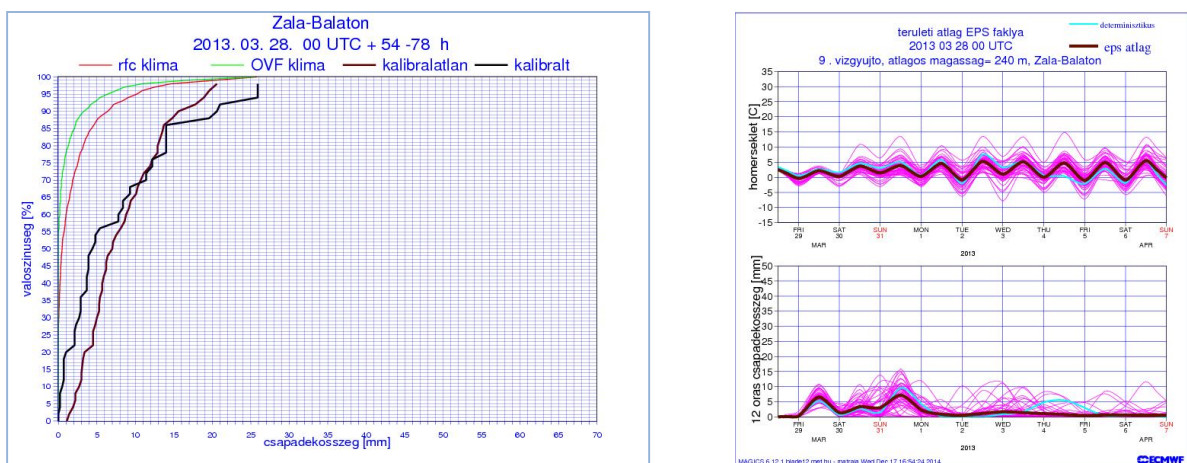


13. ábra A Traun-Enns vízgyűjtő csapadék előrejelzéseinek kalibrációja és 10 napos csapadék előrejelzése 2008. december 18. 00 UTC, 2011. január 11. 00 UTC, 2013. május 30. 00 UTC időpontok esetén

A Traun-Enns vízgyűjtőn vizsgált extrém csapadékos napok alapján elmondhatjuk, hogy mind a három esetben tudtuk javítani az előrejelzést a kalibrációval. A legnagyobb pontosítást a 2008-as reforecast klíma esetén értük el, ez adódhat abból is, hogy ebben az időszakban még az ensemble modell felbontása durvább volt, mint a 2011, 2013-as esetekben. A másik két reforecast klíma esetén is tapasztaltunk javulást a csapadék előrejelzésben, ugyan kisebb mértékben, de még így is nagy eltérések vannak a valóban mért értékekhez képest. A fáklyadiagramok segítségével képet kaphattunk arról, hogy a determinisztikus és az ensemble modellek mennyire közelítették meg a valós, mért értékeket. A 2008-as esetben közel együtt futott a determinisztikus modell és az ensemble átlag, a 2011-es esetben már felülbecsli az ensemble átlagot, a 2013-asnál pedig jelentős alulbecslés látható.

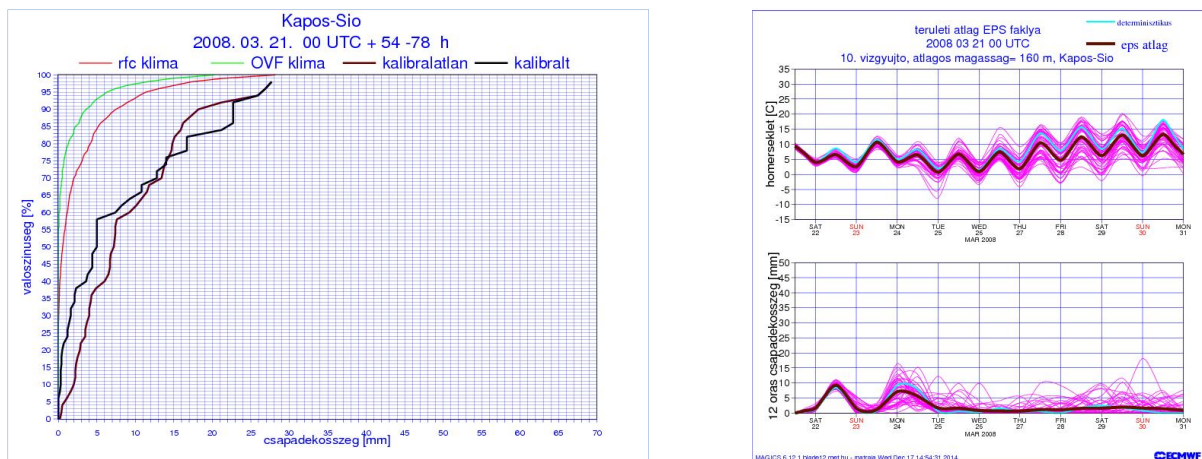
A Zala-Balaton vízgyűjtő alacsonyabban fekszik, mint a Traun-Enns vízgyűjtő. Kiterjedésében is kisebb, és inkább síkvidéki területeket foglal magába. A Zala-Balaton vízgyűjtő esetén két időpontot találtunk 2008 után, amikor nagy csapadék hullott a vízgyűjtőn. Egy 2009. január 28. és 2013. március 31. időpontokra készítettük el a kalibrációt. A dolgozatban a 2013-as esetet mutatom be, a 2009-es vizsgálatot az 5. függelék tartalmazza.

A 14. ábrán a bal oldali kalibrációt bemutató ábrán jól látható, hogy a klímák jelentősen eltérnek egymástól. A kalibráció elvégzése után a javulás a kis és nagy csapadékokra is tapasztalható. A valóban mért 25,5 mm-es értéket a kalibrált előrejelzés szépen közelíti. A kiválasztott időpontra vonatkozó determinisztikus és ensemble modellek előrejelzéseiben nagy csapadékok jelennek meg a kritikus napra, bár még így is alulbecsülték a valós csapadékot. A determinisztikus modell itt is felülbecsli az ensemble átlagot.



14. ábra A Zala-Balaton vízgyűjtő csapadék előrejelzéseinek kalibrációja és 10 napos csapadék előrejelzése 2013. március 28. 00 UTC időpont esetén

A harmadik kiválasztott vízgyűjtő a Kapos-Sió, aminél szintén két időpontban találtunk extrém csapadékos napot 2008 után. Ebben a fejezetben a 2008. március 24-i esetre elkészített kalibrációt mutatom be, a 2010. május 16-ra vonatkozó kalibráció az 5. függelékben látható. Előljáróban elmondható, hogy mind a két esetben tudtuk javítani az ensemble előrejelzésünket. A 2008-as esetben a kalibrációt és a fáklyadiagramokat a 15. ábra tartalmazza. A Kapos-Sió vízgyűjtő szintén alacsonyabban fekszik, a medencés típusba sorolható, alapvetően sík területről van szó. Területe kicsit nagyobb, mint a Zala-Balaton vízgyűjtőé és kicsit kisebb, mint a Traun-Enns vízgyűjtőé. A reforecast és a megfigyelési klíma ennél a vízgyűjtőnél is jelentősen különbözik. A kalibráció során jól látható a javulás az előrejelzésben. A valóban mért 20,3 mm-es csapadékos napot is jól közelíti az előrejelzés. A fáklyadiagramon ismét a determinisztikus modell felülbecslése látható az ensemble átlaghoz képest, de néhány EPS tag ad jelentős csapadékos napot.



15. ábra A Kapos-Sió vízgyűjtő csapadék előrejelzéseinek kalibrációja és 10 napos csapadék előrejelzése 2008. március 21. 00 UTC időpontra

A 2010-es esetről (4. függelékben) a kalibrációval csak kisebb mértékben tudtuk javulást elérni. A valóságban mért 46,8 mm-es csapadékos napot is felülbecsli a kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzés. A fáklyadiagramon is azt látjuk, hogy az ensemble tagok is jelentősen szórnak a csapadék mennyiségét illetően. Ebben az esetben a modellek számára nehezen megfogható szinoptikus helyzet alakíthatta a vízgyűjtő időjárását, ugyanis a csapadék előrejelzésben nagy bizonytalanságok jelentek meg.

A bemutatott vízgyűjtők esetén elmondható, hogy a kalibrációval minden esetben javulást értünk el a csapadék előrejelzésre vonatkozóan, viszont figyelembe kell venni a vízgyűjtő domborzati sajátosságait és a terület időjárását alakító szinoptikus helyzetet is.

10. Verifikáció

A kalibráció során a nyers ensemble előrejelzést próbáltuk meg javítani. A mérési hibákból és a modell szisztematikus hibáiból eredő pontatlanságokat igyekeztünk csökkenteni. A kalibráció elvégzésekor (mint korábban láttuk) az előrejelzéseket tudtuk pontosítani, ugyan eltérő mértékben, de a legtöbb esetben javulást értünk el.

A verifikáció során pedig az előrejelzésünket értékeljük. Az előrejelzés bevalásának a mérési és megfigyelési adatok utólagos összehasonlításával információt kapunk arról, hogy mennyire pontosan tudtuk előrejelezni az adott meteorológiai paraméter értékét. Mindez segítséget nyújt az előrejelző szakemberek számára. Ugyanis képet kapnak arról, hogy mennyiben tér el a kalibrált előrejelzés a modell nyers, kalibrálatlan előrejelzéstől. Egy-egy gyengébben sikerült prognózis okainak feltárása elősegíti, hogy a jövőben a hasonló hibák elkerülhetőek legyenek. Mivel a mai prognózisok nagyban támaszkodnak az előrejelző modellekre, ezért a verifikáció során a numerikus modellek hibái is előtérbe kerülhetnek. Egy numerikus modell prognózisainak hosszabb időszakra kiterjedő vizsgálata rávilágíthat a modell gyenge pontjaira, kijelölheti a továbbfejlesztések irányát.

Az ensemble előrejelzések verifikációja módszertanilag meglehetősen eltér a determinisztikus előrejelzésektől. Ugyanis itt nem egyetlen előrejelzési értéket hasonlítunk össze egy megfigyelési értékkel, hanem az előrejelzések együttesét. Éppen ezért más verifikációs módszerekre van szükségünk, mint a determinisztikus előrejelzések esetén.

10.1. Talagrand diagram

Az EPS előrejelzések verifikációjára széles körben alkalmazzák, az ún. Talagrand diagramot (*Jolliffe, 2003*). Ez a diagramtípus jól szemlélteti az ensemble modell előrejelzési értékek tartományait és annak szóródását, az ún. ensemble-spread-et. Az 50 tagú EPS-nél a vízszintes tengelyen 51 intervallum található, amelyek közül 49 zárt, a végein pedig egy-egy nyílt intervallum található. Az ensemble előrejelzések értékei nagyság szerint sorba rendezve határozzák meg a vízszintes tengely értékeit. Az oszlopok azoknak az eseteknek a gyakoriságát mutatják, amelyek a mért érték két szomszédos ensemble tagja közé esnek. Megvizsgáljuk, hogy a mért érték melyik két ensemble érték közé esik, majd ennek az

intervallumba eső pontok számát eggyel megnöveljük az értékét. Így megkapjuk az adott intervallumba esés előfordulásának gyakoriságát.

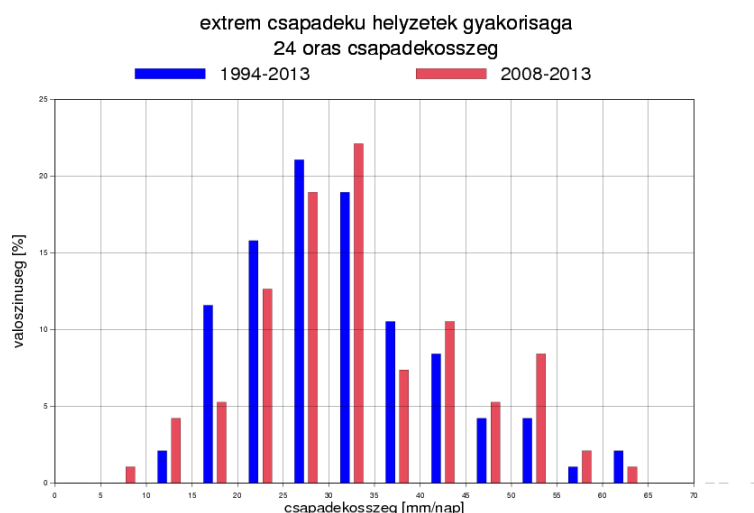
Egy ideális ensemble előrejelzésnél a megfigyelési értékek bármelyik két szomszédos EPS tag közé ugyanolyan valószínűséggel eshetnek. Ekkor a Talagrand diagram lapos lesz, ami azt is jelenti, hogy az ensemble előrejelzés szisztematikus hibától mentes. Ha a Talagrand diagram szimmetrikus U alakot vesz fel, akkor az azt jelenti, hogy az ensemble spread nem elég széles, vagyis a megfigyelési érték gyakrabban esik az előrejelzési tartományon kívül, mint ahogy az prognosztizálva volt. A J alakú Talagrand diagram szisztematikus alábecslést, az L alak pedig szisztematikus felülbecslést tükröz.

A szélső, nyílt intervallumokba eső megfigyeléseket outlier eseteknek nevezzük. A kalibrációval a célunk ezek csökkentése. Az outlier esetek száma csökken, ha szélesebb ensemble spread-et ad a modell, növelve az ensemble szórását. A kalibrációval úgy csökkenthetjük ezen az outlierok számát, hogy egyben nem növeljük az ensemble szórást.

Ha ideális ensemble rendszerünk van, akkor az időben előre haladva a Talagrand diagram nem lesz mindig lapos. Az előrejelzési tartomány első napján szűk ensemble spread-et mutat, mert ekkor még kicsi a tagok szórása, közel vannak egymáshoz (U alakot mutat). A második és a harmadik napon kapunk lapos diagramot, ekkor az előrejelzési tartomány jónak mondható. Ugyanis az ensemble előrejelzések kezdeti perturbációja a középtávra van optimalizálva, azaz ekkor a legjobb az ensemble spread és az előrejelzés hibaszórásának az aránya. A középtávú előrejelzési időszakban a Talagrand diagramok általában hasonló, többnyire lapos formát vesznek fel (*Persson, 2013*).

10.2. Verifikációs vizsgálat eredményei

Az 1994-től 2013-ig terjedő időszakban az összes extrém csapadékos időszakokra szeretnénk volna elvégezni a kalibrációt, ami 12×20 , azaz 240 esetet jelentett volna. Mivel a reforecast klímát csak 2008-tól készítik, így csak a 2008-2013 időszakba eső eseteket tudjuk kalibrálni. Azonban megvizsgáltuk, hogy a 19 év alatt hogyan változott a nagy csapadékos időszakok aránya. Az 1994-2013 és a 2008-2013 közötti években előfordult extrém csapadékos napok gyakoriságát hisztogramon ábrázoltuk (16. ábra).

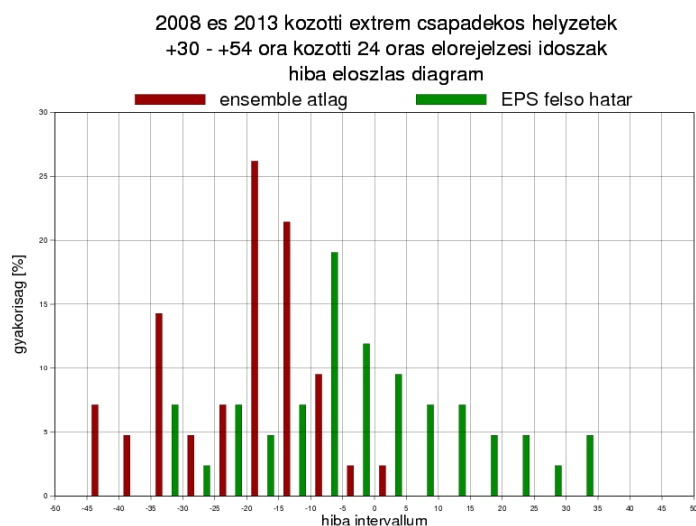


16. ábra Hisztogram az extrém csapadékú helyzetek gyakoriságára, 24 órás csapadékösszegek alapján az 1994-2013 és a 2008-2013 időszakokra

A hisztogramon az látszik, hogy arányban, a 2008 után több extrém csapadékos nap fordult elő, mint az 1994-2013-as időszakban. Az extrém mennyiségű csapadékok gyakorisága kb. 5 mm/nap-al tolódtak el későbbi évek felé.

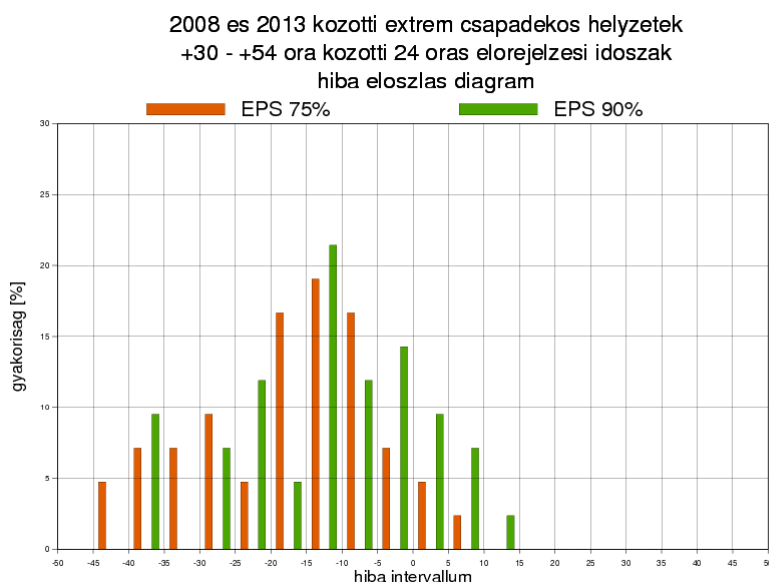
A kalibráció nélküli, nyers ensemble előrejelzésekre is készítettünk verifikációs vizsgálatot, a 2008-2013 közötti extrém csapadékos esetekre. Megnéztük, hogy milyen a hibaeloszlás ensemble átlag és az EPS felső határa esetén (17. ábra).

A hibaeloszlás diagram vízszintes tengelyén a lehetséges hibák intervallumait ábrázoltuk -50-től +50-ig, ötös lépésközökkel. Az 17. ábrán az látható, hogy az ensemble átlag (barna szín) hibái főleg a negatív tartományban fordulnak elő. Tehát az ensemble átlag erősen alábecsli a csapadék mennyiségét extrém esetben. Túlbecslés alig van. A zöld színnel a sorba rendezett EPS felső határát, vagyis a legmagasabb értéket adó EPS tag hibáit ábrázolom. Ebben az esetben szisztematikus hiba nem látható, viszont az alá és fölé becslések közel azonos arányban fordulnak elő.



17. ábra Hiba eloszlás diagram a +30- +54 óra közötti 24 órás csapadék előrejelzésre a 2008-2013-as időszak extrém csapadékos helyzetekben

A 18. ábrán a sorba rendezett EPS 75%-os (narancssárga) és 90%-os (zöld) értékeihez tartozó tagok hiba eloszlásai láthatóak. A diagramról az olvasható le, hogy a 75%-os értékek esetén alábecslés a gyakoribb, felülbecslés alig van. Ha nem szeretnénk kalibrálni, és a túlbecslést is el akarjuk kerülni, akkor érdemes lehet a 75%-hoz tartó értékeket nézni az extrém csapadékos esetekben. A 90%-os értékek nem jók, ugyanis gyakran felülbecslik a csapadékot. A 75%-hoz képest pedig szinte kétszer nagyobb a felülbecslés gyakorisága.



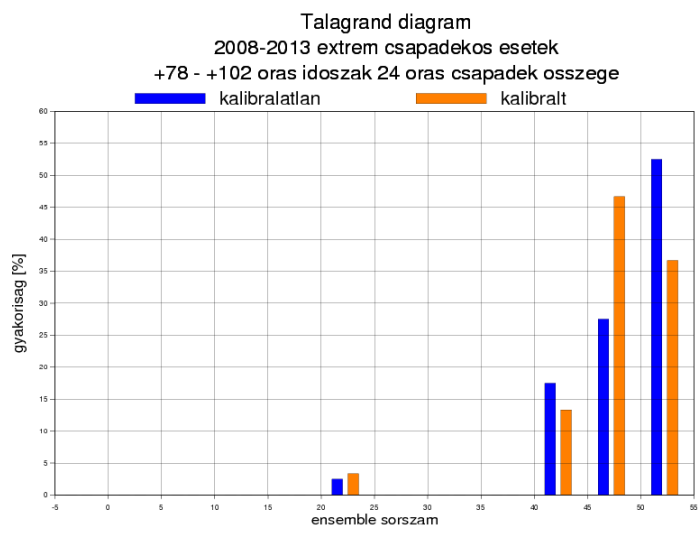
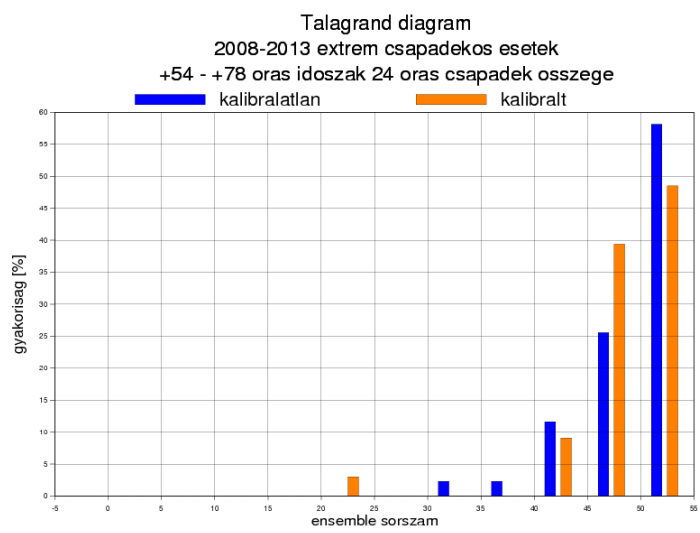
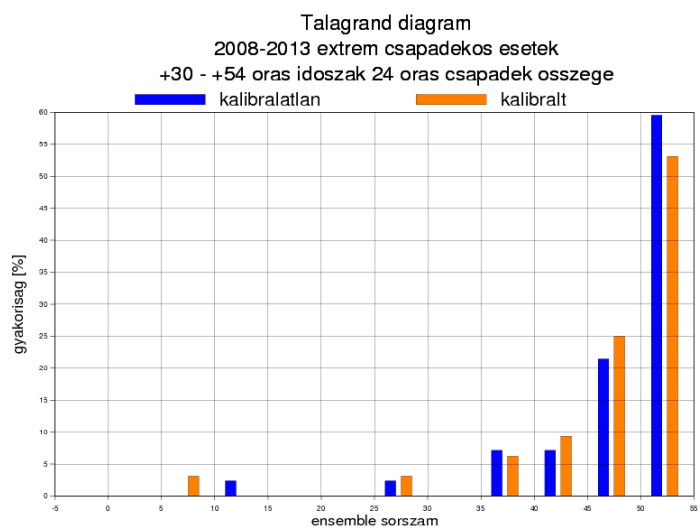
18. ábra Hiba eloszlás diagram a sorba rendezett EPS tagok felső 75%-os és a 90%-os értéket adó tagjaira +30 és +54 óra közötti 24 órás előrejelzési időszakban extrém csapadékok esetén.

A kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzések objektív összehasonlító verifikációs vizsgálatának elvégzéséhez mindegy 100 extrém csapadékú esetet gyűjtöttünk össze. A kiválogatás a következőképpen zajlott. A megfigyelési adatokban minden vízgyűjtőre megnéztük a 19 év alatt mért maximális csapadék értékeket, ez 20×12 , azaz összesen 240 adat. A fenti okok miatt, ezekből csak a 2008 utáni eseteket vizsgáltuk, ugyanis a kalibrációhoz szükséges reforecast előrejelzések csak ekkortól állnak rendelkezésre. Az így kigyűjtött mintegy 100 esetre előállítottuk az adott napra érvényes reforecast és megfigyelési klímát, valamint a kalibrálatlan ensemble előrejelzés eloszlásfüggvényeket, végezetül alkalmaztuk a kalibrációs módszerünket. Ezután Talagrand diagramon ábrázoltuk a kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzések értékeit a 10.1 fejezetben leírtak szerint. Annyit változtattunk, hogy a Talagrand diagram vízszintes tengelyén az EPS tagokat ötösével összevontuk, így 10 intervallumot kaptunk. Három időlépcsőre készítettük el az összehasonlítást, így a +30 -+54 órás, a +54 - +78 órás és a +78 - +102 órás időintervallumokban elemeztük az extrém csapadékos esetek előrejelzéseit.

A kalibrálatlan (kék) és a kalibrált (narancssárga) előrejelzéseket jelenítettük meg Talagrand diagramon a 19 ábrán az említett időlépcsőkben. Az utolsó oszlopok az outlier tagokat mutatják, ezeket szeretnénk csökkenteni. Mind a két előrejelzésnél az outlier tagoknál alábecslés látható. Azonban jól látszik, hogy a kalibrált előrejelzésnél a kilógó tagok gyakoriságát sikerült csökkenteni. Az extrém csapadékokra vonatkozó előrejelzéseket tudtuk javítani.

Az eredmények alapján összességében elmondható, hogy a megvizsgált extrém csapadékos helyzetek esetén a 2008-2013-as időszakban az ensemble átlag jelentős alábecslést mutatott. Ha a kalibrációt nem szeretnénk elvégezni, és a felülbecslést is el kívánjuk kerülni, akkor a 75%-os értékhez tartozó EPS tag jó közelítéssel használható.

A Talagrand diagram eredményei alapján, viszont érdemes kalibrálni a csapadék előrejelzéseket, ugyanis ezzel a prognózisokban javulás érhető el. Tehát extrém csapadékok előrejelzései a kalibrációval pontosíthatók.



19. ábra Talagrand diagramok a kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzésekre +30 - +54, +54 - +78 és +78 - +102 órás intervallumokban a 2008-2013-as időszakra.

11. Esettanulmányok

Ebben a fejezetben két esettanulmányt mutatok be, amelyek jól reprezentálják, hogy néhány napos nagy csapadékos időszak képes rendkívüli árvizet okozni. Ebben a fejezetben egy tiszai és egy dunai árvizes eset kapcsán vizsgálom a csapadék előrejelezhetőségét.

11.1. A 2001. márciusi felső-tiszai árvíz

2001 márciusában rendkívüli árvíz alakult ki a Tisza felső szakaszán. Az árvíz az Alföld észak-keleti régióját sújtotta, amely négy ország (Magyarország, Szlovákia, Ukrajna, Románia) területén található. A rövid ideig tartó nagy csapadékos időszak hosszan levonuló árvizet okozott a Tiszán. Az árvíz kialakulásában meteorológiai és talajtani hatások is közrejátszottak.

Szinoptikus szempontból elmondható, hogy 2000-2001 telének csapadéka jóval elmaradt a korábbi évektől. Számottevő csapadék csak februárban hullott. Február végén, március elején intenzív ciklon közelítette meg a térséget, amely március 3-tól 5-ig több hullámban érkező, kiadós esőzést és jelentős hőmérséklet emelkedést okozott. Február utolsó napjaiban Közép-Európa felett alacsony nyomású légköri képződmény örvénylett, amely fokozatosan haladt kelet felé. A ciklon március elején érte el a Kárpát-medence térségét. Az 500 hPa-os szinten az áramlás zonális képet mutatott, a talajon pedig meleg advekción zajlott. A ciklon előoldalán a hideg légtömegre felsikló, délnyugati irányítottágú meleg nedves szállítószalag labilizálta a légkört. A nedves légtömeg az Észak-Keleti-Kárpátok vonulatának torlódva a Tisza felső vízgyűjtőin okozott nagy mennyiségű csapadékhullást. A délnyugat felől érkező nedves levegő a Kárpátok vonulatát merőlegesen keresztezte, így a hegység orografikus hatása rásegített a csapadékképződésre. Március 3. és 5. között több hullámban érkező csapadék területi átlagban 124 mm csapadékot eredményezett, azonban helyenként a lehullott csapadék meghaladta a 200-260 mm-t is (*Szlávik, 2001*). A legnagyobb csapadékot a Tarac-völgyi Oroszmoqrán mérték, 296 mm-t (*Bodnár et al., 2004*).

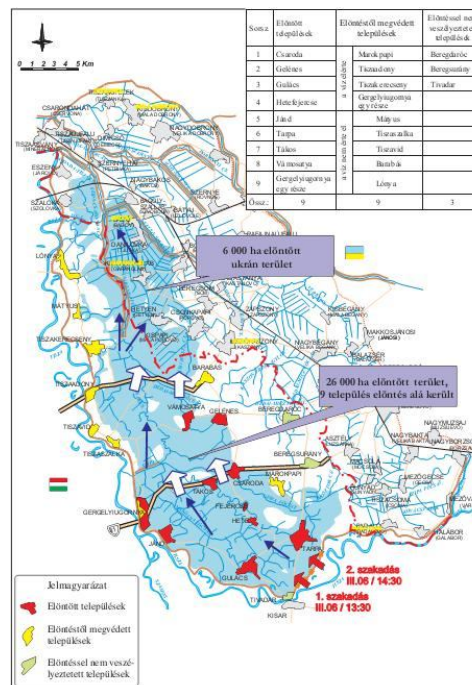
A térség felett bekövetkezett hőmérséklet emelkedés hatására a hegyekben megolvadt a téli hótakaró. A völgyekben viszont még fagyott állapotban volt a talaj, így a lehullott csapadék és a hó olvadék nem tudott a talajban telítődni. Valamint a téli, lombtalan állapotban

lévő növényzet sem tudta felfogni a csapadékvizet. A lehullott eső és a hó olvadék nagy csapadékvizet eredményezett (Bodnár et al., 2004). A 2001. március eleji időszakban a Tisza és mellékágainak tetőzési szintjeit, az árvíz sújtotta településeken, az 5. táblázat mutatja be.

5. táblázat A 2001. évi árhullámok tetőzési vízállásai a Tiszán és mellékágain (cm) (Szlávik, 2001)

Folyó	Vízmérce	Vízállás (cm)
Tisza	Rahó	575
Tisza	Técső	745
Tisza	Huszt	528
Tisza	Tiszabecs	736
Túr	Túrterebes	540
Tisza	Tivadar	1014
Szamos	Csenger	668
Tisza	Vásárosnamény	943
Tisza	Záhony	752
Bodrog	Bodrogszerdahely	832
Tisza	Tokaj	847

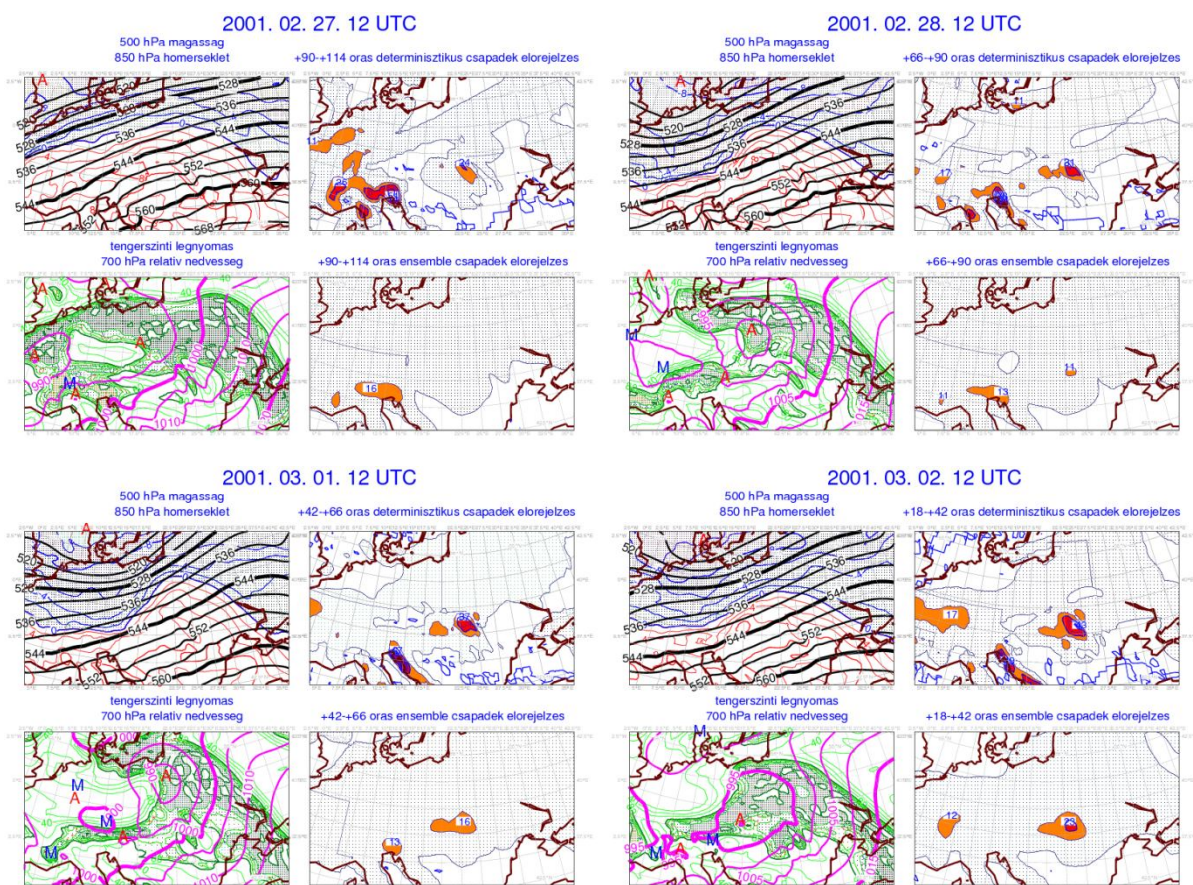
A magas vízállások mellett a katasztrófa helyzetet növelték a kárpátaljai és romániai szakaszokon történt töltésmeghágások, átfolyások és gátszakadások (20. ábra).



20. ábra 2001. márciusi árvíz a Tisza felső szakaszán (Bodnár et al., 2004)

A Tisza magyarországi szakaszán Tarpa és Tivadar között is átszakadt a gát, a folyó medréből és hullámteréből 140 millió m³ víz folyt át a Beregi-síkság területére. A kiömlött víz kilenc települést öntött el, összesen 250 km² terület került víz alá (Szlávik, 2001).

Az árvizet kialakító szinoptikus helyzethez tartozó ECMWF determinisztikus és ensemble átlag előrejelzés tanulmányozásához négy részterképet tartalmazó megjelenítést fejlesztettünk ki. A 21. ábrán az extrém csapadékeseményt megelőző négy napon a 12 UTC-kor készített modell előrejelzésekhez tartozó térképeket láthatjuk.



21. ábra A 2001. márciusi tiszai árvíz szinoptikus helyzetére és a csapadék előrejelzésére vonatkozó mezők 2001. február 27-től 2001. március 2-ig 12 UTC-kor (mindegyik időlépcsőben a bal felső mező: 500 hPa-os nyomás, 850 hPa-os hőmérséklet; bal alsó mező: tengerszinti légnyomás, 700 hPa-os relatív nedvesség; jobb felső mező: determinisztikus futás csapadék előrejelzése; jobb alsó mező: ensemble futás csapadék előrejelzése)

A vizsgált cél időtartam minden esetben azonos, azaz a 2001. március 3. 06 UTC és a március 4. 06 UTC közötti 24 órás időtartam. Mindegyik időpont esetén a bal oldali mezőkben látható a Kárpát-medence időjárását meghatározó szinoptikus helyzet: a bal felső mezőben az 500 hPa-os nyomási szint és a 850 hPa-os hőmérséklet. A bal alsó mezőben a

tengerszinti légnyomás és a 700 hPa-os relatív nedvességet jelenítettük meg. A jobb oldali mezőkben a csapadéokra vonatkozó előrejelzéseket ábrázoljuk: a jobb felső mezőben a determinisztikus modellfuttatás eredménye, alatta pedig az ensemble modell előrejelzései láthatóak. Mind a determinisztikus, mind az ensemble átlag előrejelzések, a 2001. március 3-ára várható 24 órás csapadékösszeget mutatják.

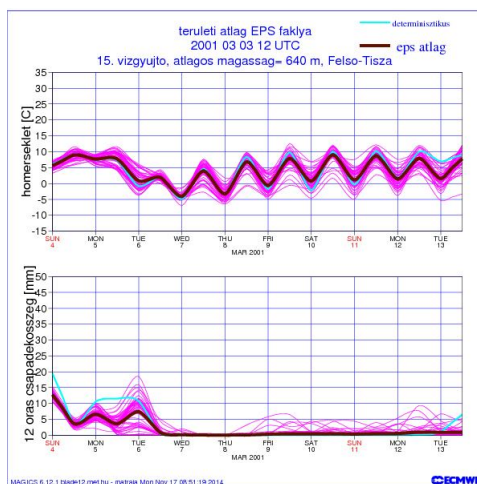
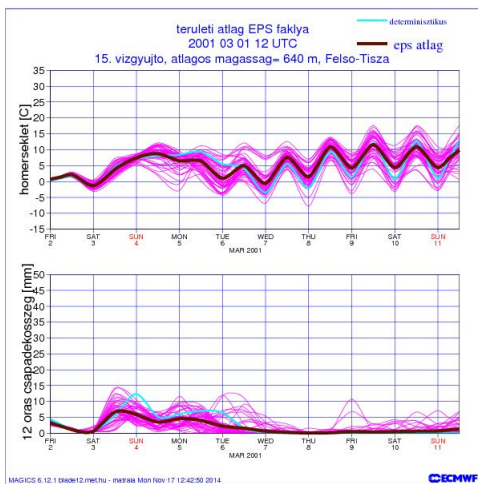
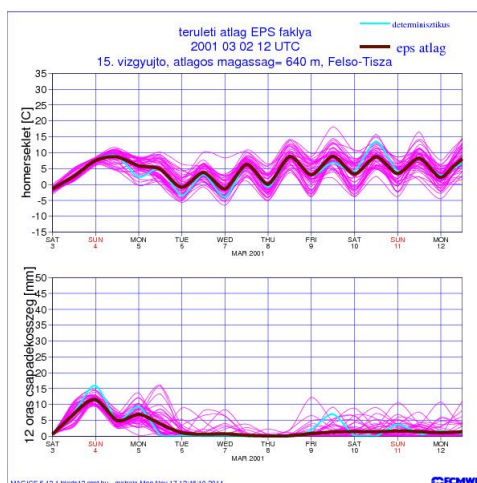
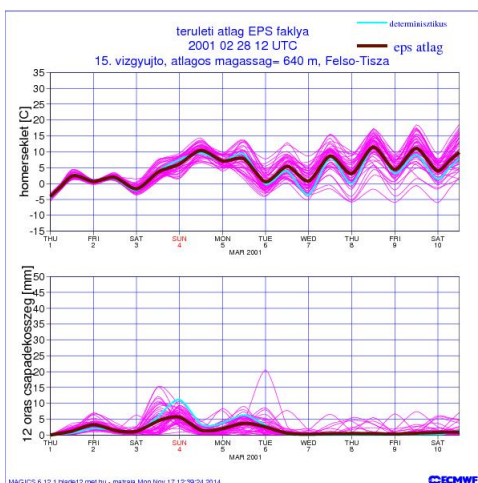
Megállapíthatjuk, hogy a determinisztikus modell a Tisza felső vízgyűjtőin március 3-án bekövetkező nagy mennyiségű csapadékhullást, már 5 nappal az esemény bekövetkezése előtt szépen adta. Az ensemble modell előrejelzésében az esemény bekövetkezése előtt 4 nappal mutatkozik meg a csapadék. A csapadéksáv területi elhelyezkedését mindkét modell közel pontosan prognosztizálta. Ugyanez a várható csapadékösszege nem mondható el.

Március 3-án a Felső-Tisza vízgyűjtőn 60,3 mm csapadék hullott le 24 óra alatt. Mind a két modell jóval alulbecsülte a csapadék mennyiségét. A determinisztikus modell 43 mm maximális csapadékot várt az ensemble modell pedig 16 mm-t. Viszont, mindkét modell esetén, minél közelebb kerülünk időben az esemény bekövetkezéséhez, annál jobban közelítik csapadék mennyiségét, egyre magasabb értékeket várnak.

Fáklya diagramokon is megvizsgáltuk az árvizet okozó időjárás néhány paraméterét. ECMWF ensemble modell futtatások (vízgyűjtőkre számított területi átlag) alapján a 2 m-es hőmérsékletet és a 12 órás csapadékösszeget jelenítettük meg. Külön vizsgáltuk a Felső-Tisza, Bodrog, Szamos és Körösök vízgyűjtőkre vonatkozó 10 napos valószínűségi előrejelzéseket.

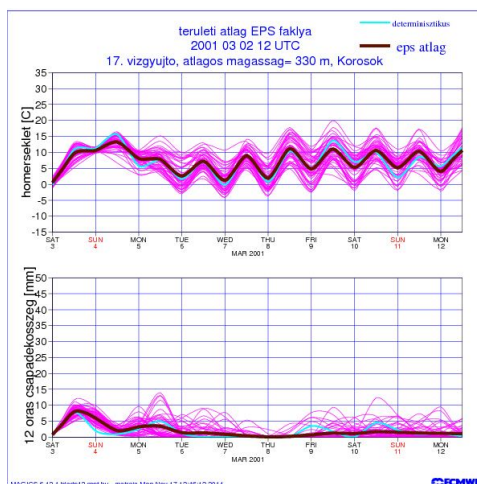
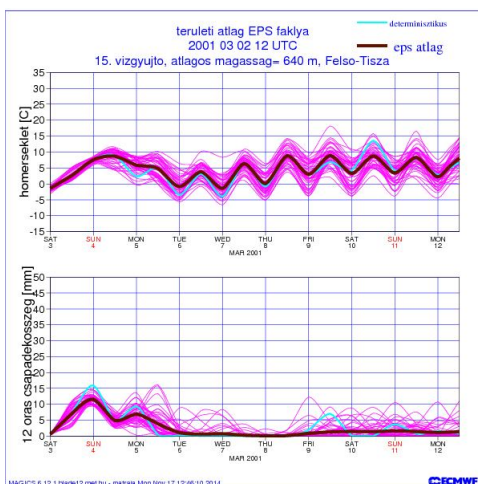
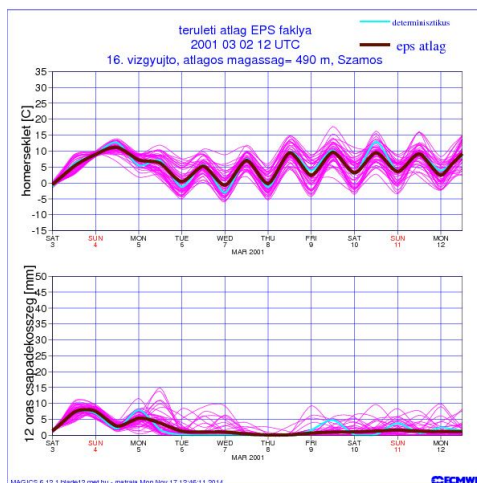
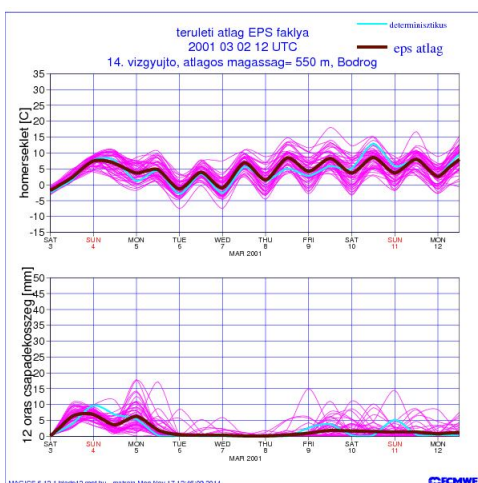
A fáklya diagramokon a hőmérséklet futásában jól látszik, hogy március 3-tól a tagok futása elkezd eltérni egymástól. Ekkor érkezik a térség felé a ciklon, és az előrejelzésben egyre nagyobb bizonytalanságok jelennek meg, viszont a determinisztikus és az ensemble átlag futások közel maradnak egymáshoz.

A Felső-Tisza vízgyűjtőre vonatkozóan az EPS előrejelzések a hőmérséklet időbeli alakulását napról-napra pontosabban adják. A csapadék előrejelzésben nagyobb a tagok szórása, de egyértelműen jelzik a március 3-4-5. napokra várható csapadékot. A determinisztikus futás mind a négy ábrán magasabb értékeket vár, mint az ensemble modell, de még így is alulmarad a valóban mért csapadék értéktől (22. ábra).



22. ábra A Felső-Tisza vízgyűjtő valószínűségi előrejelzései 2001. február 28-tól 2001. március 3-ig 12UTC-s futásra vonatkozóan (2 m-es hőmérséklet és 12 órás csapadékösszeg)

Ha együtt vizsgáljuk a négy vízgyűjtőre szóló ensemble előrejelzéseket (23. ábra), akkor elmondhatjuk, hogy a csapadék térbeli eloszlását illetően a prognózis jónak bizonyult. Ugyanis a Felső-Tisza vízgyűjtőn hullott a legtöbb csapadék, a Bodrog, a Szamos és a Körösök vízgyűjtőkön pedig kevesebb. A csapadék mennyiségét, mindegyik területen közvetlenül az esemény bekövetkezte előtti futás közelítette meg a legjobban, bár így is jelentős alábecslés figyelhető meg. A Bodrog vízgyűjtő esetén találkozunk talán a legpontosabb előrejelzéssel, ugyanis ezen a területen március 5-én esett a legtöbb csapadék, mérések alapján 19,5 mm. Ezt az értéket az esemény bekövetkezte előtt két nappal az ensemble modell 2 tagja is közel pontosan adja. A többi vízgyűjtőnél egyértelmű, jelentős alábecslést tapasztalunk.



23. ábra A Bodrog, a Felső-Tisza, a Szamos és a Körösök vízgyűjtők valószínűségi előrejelzései a 2001. március 2. 12 UTC-s futásra vonatkozóan (2 m-es hőmérséklet és 12 órás csapadékösszeg)

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a 2001-es márciusi tiszai árvízet néhány napos nagy csapadékos időszak idézte elő. A nagy csapadék leginkább a Felső-Tisza vízgyűjtőre koncentrálódott. A Tisza felső szakaszán a nagy csapadékhullást elősegíti, ha délnyugati áramlással érkezik a nedves légtömeg. Célszerű a determinisztikus és az ensemble előrejelzések együttes vizsgálata. Az ensemble előrejelzés az esemény bekövetkezte előtt 4 nappal már figyelmeztetett a várható nagy csapadéokra. Ugyan a csapadék értékét alábecsülte, de egyértelműen felhívta a figyelmet arra, hogy a következő napokban nagy csapadékhullás következhet be a vízgyűjtőn.

11.2. A 2013. májusi-júniusi dunai árvíz

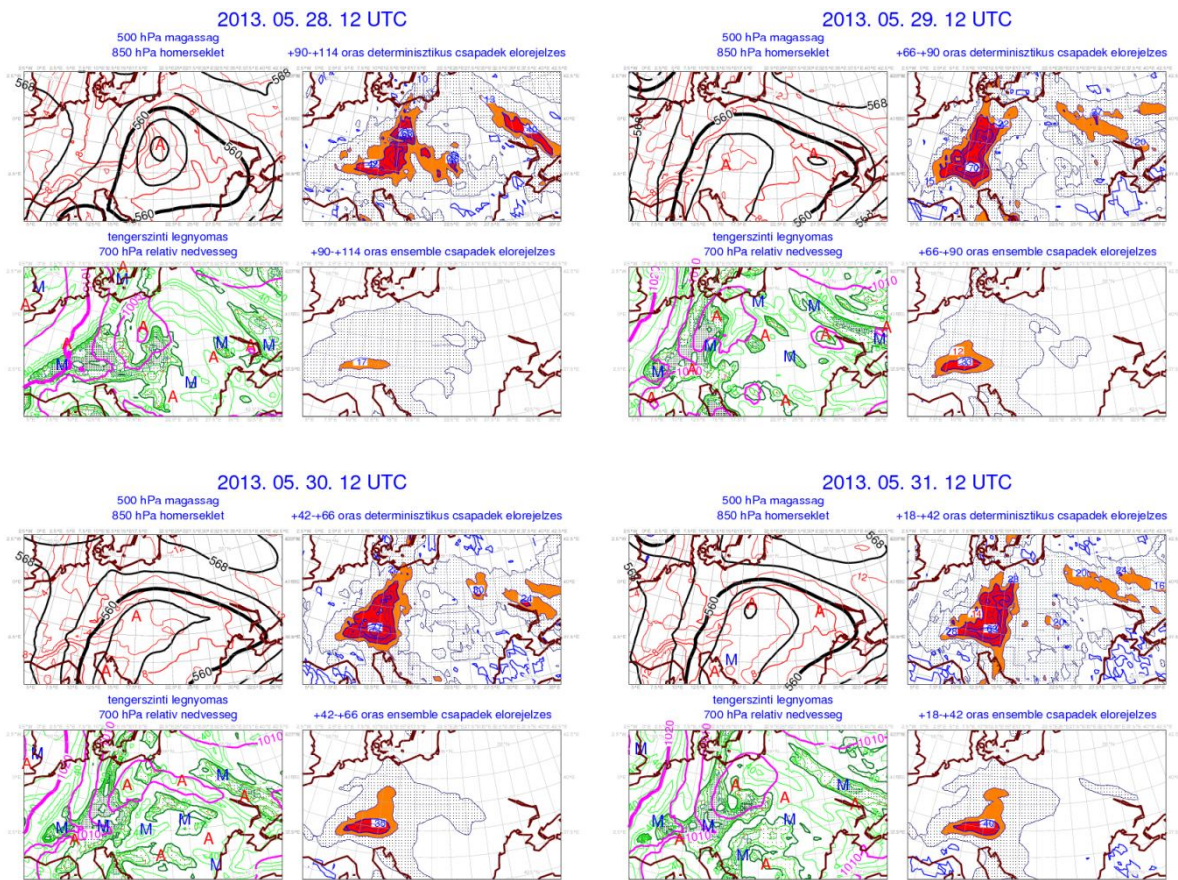
A 2013. május végi, június eleji dunai árvíz rekord vízállásokat eredményezett. A legnagyobb károkat a Duna felső, ausztriai szakaszán okozta. Magyarországon a Duna vízszintje (egészen Bajáig) meghaladta a 2002-es történelmi árvízi szintet, új „legnagyobb víz” értékeket produkálva. A 2013-as dunai árvizet a Duna felső három vízgyűjtőjén 4 nap alatt lehullott extrém mennyiségű csapadék váltotta ki. A legtöbb csapadék június 2-án hullott. A 24 órás csapadékösszeg - területi átlagban - a Felső-Duna vízgyűjtőn 34,6 mm, az Inn vízgyűjtőn 48,2 mm, a Traun-Enns vízgyűjtőn pedig 53,1 mm volt.

Európa felett az említett időszakban az áramlási kép meridionális típusú volt. A Közép- és Nyugat-Európa felett hosszan kimélyült nyomási teknőt két oldalról magas szélességekig felnyúló gerincek vették körül. A dunai árvizet ebben a kimélyült, lassan mozgó nyomási teknőben kialakult hidegcsepp váltotta ki. A hideg örvény középpontja május 30-án Magyarország felett volt, majd északnyugati irányba mozdult el. Amikor Csehország fölé ért, a keleti oldalán spirál alakban melegebb, nedves levegő áramlott a középpontja felé. Ugyanakkor a hátoldalán hidegebb levegő érkezett Európa nyugati területeire. A hideg örvényt körbefogta a magasan áramló futóáramlat, amit délről egy erős jet mag kísért. A Közép- és Nyugat-Európa felett tartózkodó nyomási teknő területén május közepe óta több ciklon is kialakult. Az árvizet okozó hideg örvény ezekből a megmaradt, karokba rendeződött nedves szállítószalagokból újra és újra intenzív esőzést okozott. A nagy csapadékhullást tovább erősítették az Alpok hegyvonulatai. A nedves légtömegek észak, észak-nyugat felől merőlegesen torlódtak a hegységnek, ami erőteljes felhő és csapadékképződést idézett elő (orografikus hatás). Emiatt a legtöbb csapadék az Alpok északi előterében hullott. A hideg örvény lassú feltöltődésével és északkelet felé való elmozdulásával a csapadékhullás mérséklődött, majd megszűnt (*Horváth et al.*, 2013).

A Dunán levonult árhullámot 4 napig tartó intenzív csapadékos periódus váltotta ki. Május 30-án a Duna felső vízgyűjtő területén kezdődött a csapadékhullás. Győr és Linz között átlagosan 15-20 mm eső hullott. Május 31-e reggelére a vízgyűjtő felső szakaszán esett nagy mennyiségű, átlagosan 20-25 mm csapadék. A legnagyobb értékeket az Alpok térségében mérték, ahol 60 mm-t is detektáltak. Június 1-én szintén az Alpok közelében és a német forrásvidéken hullott nagy mennyiségű, átlagosan 35 mm csapadék. Az intenzív esőzés folytatódott június 2-án is, főleg az Isar, Inn és a Traun vízgyűjtőin hullott le 40 mm-t

meghaladó csapadék. A következő napon az intenzív csapadékhullás megállt, viszont az eső még több napon keresztül esett, de ekkor már csak 5-10 mm eső hullott (Homokiné, 2013).

A 2013-as dunai árvíz vizsgálatánál is hasonló eszközöket használtunk fel, mint a 2001. márciusi tiszai árvíznél. A térképes megjelenítés során mindegyik időpontnál a 2013. június 1-re vonatkozó szinoptikus képet és a várható 24 órás csapadékösszeget jelenítettük meg (24. ábra).



24. ábra A 2013. május végi június eleji dunai árvíz szinoptikus helyzetére és a várható csapadékösszegegre vonatkozó előrejelzések 2013. május 28-tól 2013. május 31-ig 12 UTC-kor indított modell futtatások alapján (mindegyik időlépcsőben a bal felső mező: 500 hPa-os nyomás, 850 hPa-os hőmérséklet; bal alsó mező: tengerszinti légnyomás, 700 hPa-os relatív nedvesség; jobb felső mező: determinisztikusfutás csapadék előrejelzése; jobb alsó mező: ensemble átlag csapadék előrejelzése)

A bal oldali mezőkön látható az Alpok-vonulatától észak-keletre kimélyült ciklon. A magasban és a talajon is kirajzolódnak a ciklon izobárjai. A 700 hPa-os szinten több különálló nedvesség gócot látunk, amelyek főleg az Alpok térségében koncentrálnak.

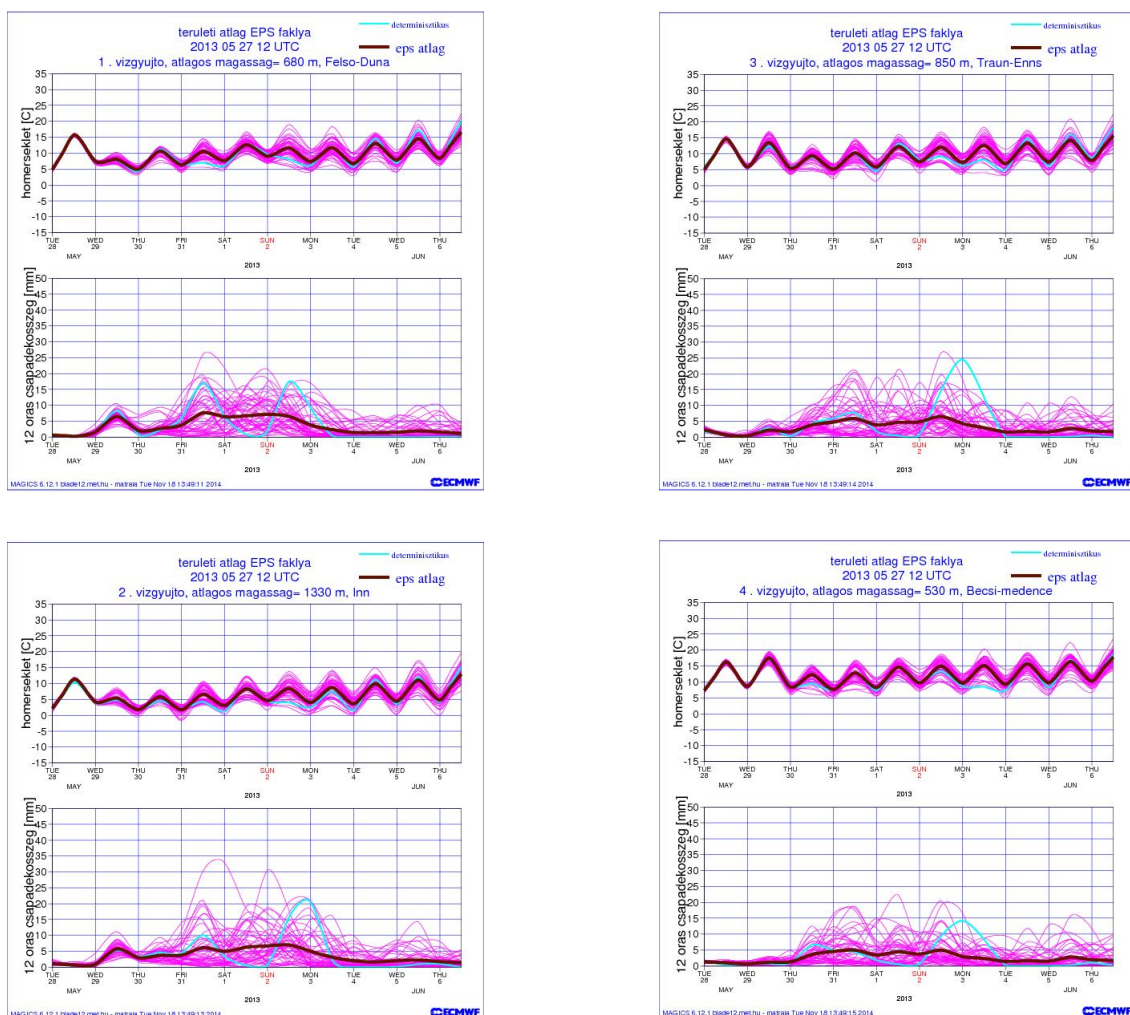
A csapadék előrejelzésről elmondhatjuk, hogy a determinisztikus modell a vizsgált időszakban a csapadékhullás területi elhelyezkedését közel jól prognosztizálta. Minél közelebb kerülünk az esemény bekövetkezéséhez, annál pontosabban jelzi a csapadék területi elhelyezkedését. A csapadéértékek ugyan napról-napra csökkennek az előrejelzésben, de még így is extrém mennyiségnek mondhatóak (május 31-es futásban 63 mm).

Az ensemble átlag szerinti előrejelzések mind a négy időpont esetén jóval kevesebb csapadékot prognosztizálnak és kisebb térségre, mint a determinisztikus modell. Öt nappal a csapadékhullás előtt az Alpok északi lábainál csak egy keskeny sávban vár csapadék tevékenységet. A következő időpontokból indított modell futtatásokban sem változik jelentősen a csapadék területi előfordulása, viszont a várható csapadék mennyiségben már eltérnek a napi előrejelzések. A május 28-ai futás szerint az ensemble átlag csak 17 mm maximális csapadékot vár, a május 29-ei előrejelzésben már 33 mm-t. A determinisztikus modellhez képest jelentősen alábecsli a csapadék értékeket. Természetesen az EPS átlag mellett a többi ensemble tag adhat nagyobb illetve kevesebb csapadékot is az adott területre, de jelen esetben csak az ensemble átlagot jelenítettük meg.

Összességében a két modell előrejelzéséről elmondható, hogy a modellek a csapadéktevékenység térbeli elhelyezkedését közel jól prognosztizálták. A determinisztikus modell az extrém csapadék mennyiségét, a vizsgált időszak alatt végig felülbecsülte (kb. 10-20 mm-rel), az ensemble átlag esetén viszont az alulbecslés volt a jellemző (kb. ugyanannyival becsülte alul, mint amennyivel a determinisztikus felül). Ezek a különbségek adódhatnak az eltérő modell felbontásokból (ensemble felbontása fele a determinisztikusénak), az előrejelzett időjárási esemény változékonyságából, a domborzat összetettségéből. Viszont ki kell emelni, hogy mind a két modell a csapadékhullás bekövetkezésének főbb területi elhelyezkedését és extrém mértékét már több nappal korábban jól előre jelezte.

Fáklya diagramok segítségével is megvizsgáltuk a 2013-as dunai árvizet. A területi átlag ensemble fáklyadiagramok segítségével a vízgyűjtő egészére jellemző előrejelzett értékeket vizsgáljuk. Külön készítettünk fáklya diagramokat a Felső-Duna, az Inn, a Traun-Enns és a Bécsi-medence vízgyűjtőkre. A 2 m-es hőmérsékletet és a 24 órás csapadékösszegeket jelenítettük meg. 2013. május 27. és június 2. között minden napra elkészítettük a 12 UTC-s időpontból indított ensemble előrejelzéseket, amelyek a következő 10 napra érvényesek.

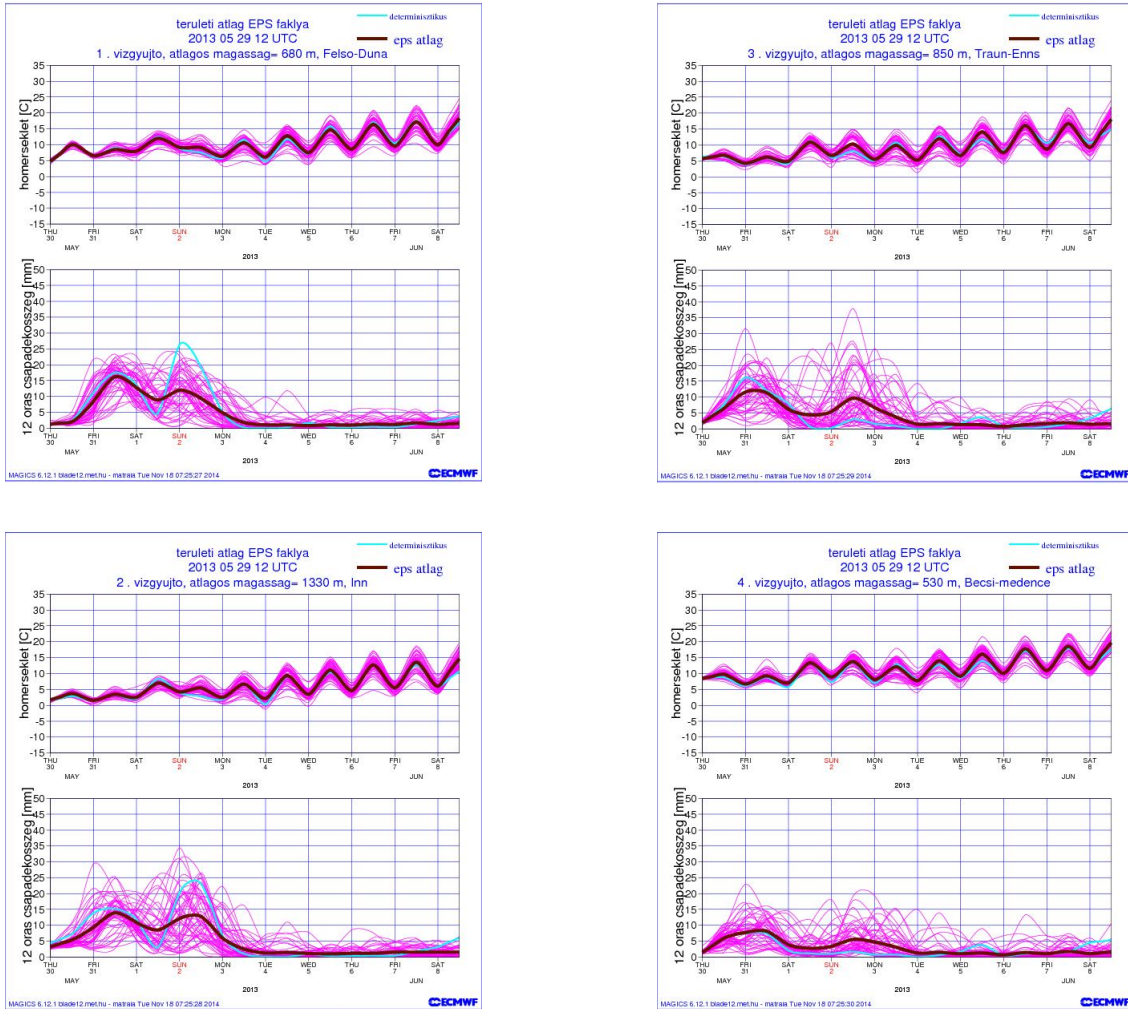
A 25. ábra a 2013. május 27. 12 UTC-s futás eredményeit mutatja a Duna felső négy vízgyűjtőire. A fákyadiagramon azt láthatjuk, hogy már a következő napra vonatkozó csapadék előrejelzésnél is fellépnek kisebb bizonytalanságok (első három vízgyűjtőre).



25. ábra A Felső-Duna, az Inn, a Traun-Enns és a Bécsi-medence vízgyűjtők valószínűségi előrejelzései a 2013. május 27. 12 UTC-s futásra vonatkozóan (2 m-es hőmérséklet és 12 órás csapadékösszeg)

Jól kirajzolódik, hogy a csapadék mennyiségét illetően a május 30-tól június 2-ig tartó időszak kritikusnak ígérkezik. A május 30. utáni időpontokra a prognózis bizonytalansága nagyon megnő, a csapadék várható értéke 0 mm és 35 mm között szóródik az ensemble tagok alapján. A determinisztikus modell előrejelzésében kettős maximum látható mind a négy terület esetén. A harmadik napig (május 30.) a determinisztikus és az EPS átlag közel együtt fut, eltérés csak a negyedik naptól figyelhető meg.

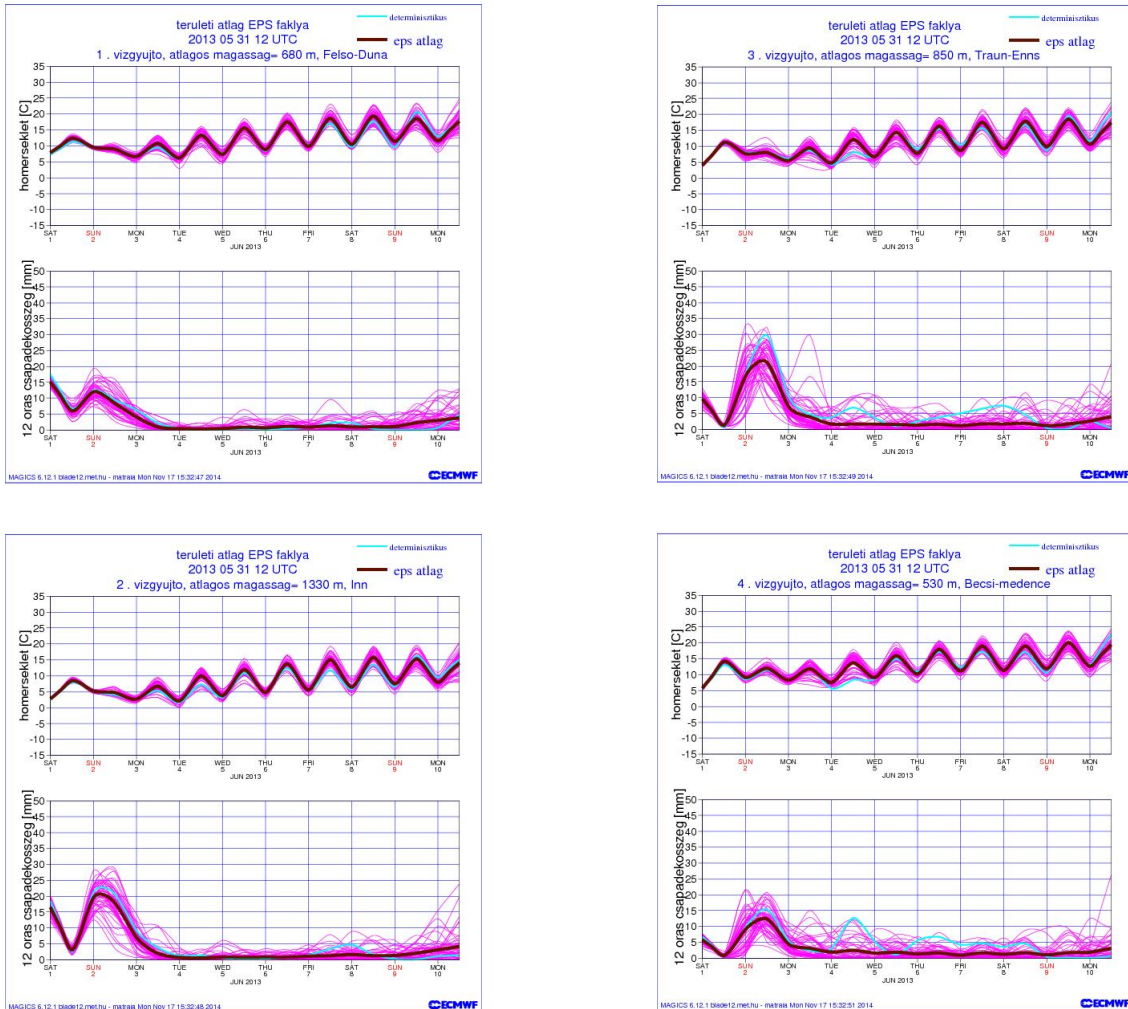
A május 29-ei 12 UTC-s futások már nagyobb csapadék értékeket prognosztizálnak (26. ábra). A Felső-Duna és az Inn vízgyűjtőkre az ensemble modell egyértelműen vár csapadékot (már nincs 0 mm-t prognosztizáló tag), viszont a bizonytalanság nagy.



26. ábra A Felső-Duna, az Inn, a Traun-Enns és a Bécsi-medence vízgyűjtők valószínűségi előrejelzései a 2013. május 29. 12UTC-s futásra vonatkozóan (2 m-es hőmérséklet és 12 órás csapadékösszeg)

Ugyanezekre a területekre a determinisztikus modell még mindig két hullámban adja a nagy csapadékot, június 2-ára prognosztizálja a magasabb értékeket. A másik két vízgyűjtő esetén alacsonyabb értékekkel számol, és május 31-re várja a nagyobb csapadékot. A Bécsi-medencére vonatkozó előrejelzésben az ensemble tagok szórása kisebb, mint a többi vízgyűjtőnél.

A bizonytalanság a május 31. 12 UTC-s előrejelzésben csökken a csapadék mennyiségét illetően (27. ábra). Azonban a prognosztizált értékek jóval alulmaradnak a valóban mértektől.



27. ábra A Felső-Duna, az Inn, a Traun-Enns és a Bécsi-medence vízgyűjtők valószínűségi előrejelzései a 2013. május 31. 12UTC-s futásra vonatkozóan (2 m-es hőmérséklet és 12 órás csapadékösszeg)

A dunai árvíz vizsgálata során megállapíthatjuk, hogy a legcsapadékosabb napra (2013. június 2-ára) vonatkozóan ugyan mind a determinisztikus modell, mind az ensemble modell alulbecsülte a valóban mért 24 órás csapadék értékeket, de arra egyértelműen felhívták a figyelmet, hogy nagy mennyiségű csapadék várható a következő napokban. Továbbá az extrém csapadék időbeli bekövetkezését is jól jelezték, körülbelül 4-5 nappal korábban. A Felső-Duna, az Inn és a Traun-Enns vízgyűjtők mindegyikén sok csapadék hullott, de a legtöbb eső mégis a Traun, az Enns és az Inn folyókhoz tartozó területekre koncentrált.

A két esettanulmány alapján elmondhatjuk, hogy a sikeres csapadék előrejelzés érdekében célszerű a determinisztikus modell mellett az ensemble modell előrejelzéseit is figyelembe venni. Az eltérő pontosságú előrejelzések arra is utalhatnak, hogy a két árvíz között eltelt időszakban több modellfejlesztés történt, amelyek eredményeként pontosabbá vált a csapadék prognosztizálása.

Összefoglalás

A dolgozatomban a csapadék előrejelezhetőségét vizsgáltam, a Duna és a Tisza vízgyűjtőin. Kifejezetten a néhány napos, kis területre koncentrált, extrém mennyiségű csapadék előrejelzésekre koncentráltam, amelyek a folyókon árvizet is képesek okozni.

A dolgozatom első felében, a hidrológiai célú csapadék előrejelzés rövid történeti áttekintése után, a numerikus előrejelzés készítését mutattam be. Ismertettem a numerikus modellezés során felmerülő hibákat. Kitértem az ECMWF-ben futó determinisztikus és ensemble modellek előrejelzéseire, és a reforecast előrejelzésekre. Mivel a numerikus modellezés során több okból is hibákkal, bizonytalanságokkal kerülünk szembe, ezért célszerű az előrejelzést valamilyen utó-feldolgozási módszerrel pontosítani. Dolgozatomban a kalibráció módszerét mutattam be, amely a reforecast klíma, a megfigyelési klíma eloszlásfüggvények és az aktuális ensemble előrejelzés felhasználásával végezhető el.

A dolgozatom második felében a Duna és a Tisza vízgyűjtőire elkészített csapadék előrejelzések vizsgálatait mutattam be. A 7. fejezetben a vízgyűjtők mérési csapadék adatai alapján a csapadék időbeli és térbeli eloszlását vizsgáltam. Az eredmények alapján elmondhatjuk, hogy mind a 20 vízgyűjtőn előfordultak extrém, 20 mm-t meghaladó csapadékok és ez leginkább a nyári időszakra jellemző. A hegyvidéki területeken pedig az orografikus hatás is hozzájárul a nagy csapadékok kialakulásához.

A 8. fejezetben a 2008, a 2011 és a 2014-es reforecast klímák, és a megfigyelési klíma összehasonlítását végeztem el. A különböző időszakokból származó reforecast klíma eloszlásfüggvények összehasonlításával képet kaphatunk, hogy mely évszakokban történt a legnagyobb arányú modelljavulás. Az összehasonlításhoz a vizuális összehasonlítás mellett Kolmogorov-Szmirnov próbát használtam. Arra a megállapításra jutottam, hogy a reforecast klímák szignifikánsan különböznek egymástól. Várakozásunkkal összhangban a legfrissebb, 2014-es reforecast klíma tér el legkevésbé a megfigyelési klímától, de még itt is adódnak nagyobb különbségek. Az éves vizsgálat során a legtöbb eltérést a tavaszi és a nyári hónapokban kaptam, ami azért jelentős, mert az árvizek is leggyakrabban ezekben az évszakokban fordulnak elő. Mivel az említett időszakban a legnagyobb az eltérés a klímák között, vagyis ekkor kiugróan nagy pontatlanságok jelentkeznek az előrejelzésekben, mindenképpen javítani kell a prognózisokat. A tavaszi-nyári időszakban a konvektív csapadékot az ECMWF hidrosztatikus modellje nehezebben tudja megfogni.

A kalibrációt a 2013-as dunai árvízre és a 2008-2013 közötti időszakban kiválasztott extrém csapadéku vízgyűjtőkre végeztem el. A 9. fejezetben bemutattam, hogy a kalibrációval (reforecast klíma és a megfigyelési klíma közötti eltérések alapján) sikeresen tudtuk pontosítani az előrejelzéseket. Azonban, egyértelműen látszik, hogy a domborzatnak jelentős szerepe van a javítások mértékében. A hegyvidéki területeken kisebb mértékű, a medencés típusú vízgyűjtőn nagyobb javulást tapasztaltunk. Az eredmények mindenképpen informatívak lehetnek, az előrejelző szakemberek számára, akik ez alapján eldönthetik, hogy módosítják-e az előrejelzést.

A 10. fejezetben objektív összehasonlító vizsgálatot mutattam be, amely során (közel 100 extrém csapadékos eset segítségével) összehasonlítottam a kalibrálatlan és a kalibrált előrejelzéseket. A verifikációs eredményeket Talagrand diagramon ábrázoltam. A Talagrand diagram alapján a csapadék prognózisok alulbecslik a nagy csapadékokat, mind a kalibrálatlan, és sajnos a kalibrált előrejelzések esetén is. Ebben az esetben a diagram J alakot mutatott. Azonban a kalibrációval módosított előrejelzéseknél a kilógó (outlier) tagok csökkentek, tehát eredményesnek tekinthetjük az eljárásunkat.

Végezetül a 11. fejezetben a 2001. márciusi tiszai és a 2013. májusi-júniusi árvíz csapadék előrejelzéseit elemeztem. Az árvizet kialakító szinoptikus helyzet vizsgálatára kidolgoztam egy térképes megjelenítési módszert. A vizsgálat során fáklyadiagramot is használtam. Célszerű a két produktumok együttesen vizsgálni. A két árvíz során a csapadék mennyiségét a modellek eltérő pontossággal prognosztizálták. A 2001. tiszai árvíznél jelentős alulbecslést tapasztaltunk, a 2013. dunainál szinte pontosan adták a valóban mért értéket. Ez a különbség abból is adódhat, hogy a 2001 óta megvalósított modellfejlesztések eredményeként jelentősen javult a csapadék előrejelzés. Azonban a determinisztikus és az ensemble modell csapadék előrejelzései – mind területi, mind mennyiségi szempontból – eltértek egymástól. Ezért érdemes a két modell prognózisait együtt használni, mert az eltérő térbeli felbontásból adódó különbségek megjelenhetnek az előrejelzésekben is.

Összességében elmondható, hogy a kalibráció alkalmazása a csapadék előrejelzések javítására, a vízgyűjtő területekre vonatkozóan, sikeres volt. További vizsgálatok még lehetségesek, például rácsponti kalibráció elvégzése, valamint a 2016-ban megjelenő új modellverzió alapján előállított reforecast klímák vizsgálata is érdekes lehet.

Az elvégzett munka eredményeként, várhatóan 2015. I. félév végén a vízgyűjtőkre vonatkozó ensemble csapadék előrejelzés kalibráció operatív bevezetésre kerül.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni Ihász István témavezetőmnek, a témában szerzett ismereteim megszerzésében és a munkám során nyújtott rengeteg segítségért, és nem utolsósorban lelkiismeretes munkájáért, amivel hozzájárult a dolgozatom elkészüléséhez.

Köszönöm Barcza Zoltánnak, meteorológia tanszéki konzulensemnek értékes tanácsait, segítő észrevételeit a diplomamunkámmal kapcsolatban.

Köszönet illeti Csík Andrást, az Országos Vízügyi Főigazgatóság osztályvezetőjét, aki sokéves megfigyelési adatokkal és a vízgyűjtőkre vonatkozó információkkal hozzájárult diplomamunkám elkészüléséhez.

Irodalomjegyzék

- Bodnár G., Fazekas L., Illés L., Kerti A., Pesel A., 2004: A 2001. márciusi felső-tiszai árvíz. 1-57. Nyíregyháza, Felső-Tisza-vidéki Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, 59 pp*
- Bodolainé-Jakus E., 1983: Árhullámok szinoptikai feltételei a Duna és a Tisza vízgyűjtő területén OMSZ Hivatalos Kiadványai LVI. kötet Budapest.*
- Bonta I., Ujváry K., 2011: Hidrológiai célú mennyiségi csapadék-előrejelzés hazánkban. Magyar Tudomány, 12, 1449-1458.*
- 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.*
- Buizza R., Leutbecher M. Isaksen L., Haseler J., 2010: Combined use of EDA- and SV- based perturbations in the EPS. *ECMWF Newsletter*, 123, 22-28.*
- Dévényi D., Gulyás O., 1988: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó, Budapest 235-236.*
- Gneiting T., 2014: Calibration of medium-range weather forecasts. *ECMWF Tech. Memo. No. 719*.*
- Götz G., 2001.: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest pp 490.*
- Hagedorn R., 2008: Using the ECMWF reforecast datasets to calibrate EPS reforecasts, *ECMWF Newsletter 117*, 8-12.*
- Homokiné Ujváry K., 2013: Történelmi árvíz a Dunán – 2013. június. OMSZ tanulmány <http://www.met.hu>*
- Horányi A., Ihász I., and Radnóti G., 1996: ARPEGE/ALADIN: A numerical weather prediction model for Central-Europe with the participation at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, 110, 203-227.*
- Horányi A., Szépszó G., Szűcs M., 2013: Valószínűségi előrejelzések: áldás vagy átok? *Természet Világa*, 144. évf., 2. különszám, 56-61.*
- Horányi A.: 2014: Operatív numerikus modellek az Országos Meteorológiai Szolgálatnál: a svéd modelltől az AROME modellig (in: *Dévényi Dezső emlékkötet*), Budapest 71-82.*
- Horváth Á., Nagy A., Simon A., 2013: A dunai árvíz időjárási háttere. *Természet világa*, 144, 338-340.*
- Ihász I., 1992: Hogyan működik az első operatív hazai numerikus előrejelző modell? *Léggör*, 40. évf, 2. szám, 12-16.*

- Ihász I.*, 2009: Közép- és hosszú távú előrejelzési modell-produktumok és alkalmazási lehetőségei. 35. *Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa*, 97-112
- Ihász I., Üveges Z., Mile M., Németh Cs.*, 2010: Ensemble calibration of ECMWF's medium-range forecasts. *Időjárás*, 114, 275-286
- Isaksen L., Haseler J., Buizza R., Leutbecher M.*, 2010: The new ensemble of Data Assimilations, *ECMWF Newsletter*, 123, 17-21.
- 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 Időjárási Előrejelzések Európai Központjához. *Léggör*, 40. évfolyam 2. szám 34.
- Miller M., Buizza R., Haseler J., Hortal M., Janssen P., Untch A.*, 2010: Increased resolution in the deterministic and ensemble prediction systems. *ECMWF Newsletter* 124, 10-16.
- Molteni F., Buizza R., Palmer T. N., Petroliagis T.*, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 37-119
- Péczely Gy.*, 1979: Éghajlattan, Tankönyvkiadó, Budapest, 336 pp
- Palmer T., Buizza R., Hagedorn R., Lawrence A., Leutbecher M., Smith L.*, 2006: Ensemble prediction: A pedagogical perspective. *ECMWF Newsletter*, 106, 10-17
- Palmer T. and Richardson D.*, 2014: Decision, decision ..., *ECMWF Newsletter* 141, 12-14.
- Persson A. and Riddaway R.*, 2011: Increasing trust in medium-range weather forecasts. *ECMWF Newsletter*, 129, 8-12.
- Persson A.*, 2013: User guide to ECMWF forecast products, ECMWF, Reading, http://old.ecmwf.int/products/forecasts/guide/user_guide.pdf
- Raoult B.*, 2001: MARS on the Web: a virtual tour. *ECMWF Newsletter* 90, 9-17.
- Rényi A.*, 1966: Valószínűség számítás. *Tankönyvkiadó*, Budapest, 422.
- Siemen S. and Lamy-Thépaut S.*, 2010: MAGICs++ 2-8 – New developments in ECMWF's meteorological graphics library. *ECMWF Newsletter*, 122, 32-33.

Szépszó G., Bölöni G., Horányi A., Szűcs M., 2013: A numerikus időjárási modellek felépítése: tér-és időskála, adatasszimiláció, diszkretizáció, parametrizációk, valószínűségi előrejelzések, éghajlati modellezés. In: Alkalmazott számszerű előrejelzés (szerkesztette: Weidinger T., Gyöngyösi A. Z.) *Elektronikus egyetemi jegyzet* <http://nimbus.elte.hu/~numelo/Doc/jegyzetek/NumerikusModellezes.pdf>

Szlávik L., 2001: A 2001. márciusi árvíz a Felső-Tiszán. *Hidrológiai Közlöny melléklete*, 81. évf., 4. szám, 2-6.

Ujváry K., 2008: 30 éves a hazai hidrológiai célú mennyiségi csapadék-előrejelzés. *Légkör*, 53. évf. 4. szám, 2-8.

Üveges Z., 2009.: Az ECMWF havi ensemble előrejelzéseinek kalibrációja. *Diplomamunka*

Woods A., 2005: Medium-Range Weather Prediction – The European Approach. *Springer*, pp 270.

1. Függelék

Kolmogorov-Szmirnov próba

A kétmintás Kolmogorov-Szmirnov próba esetén olyan hipotézisvizsgálatot végzünk, amikor azt vizsgáljuk, hogy az egyik mintánk valószínűségi változójának eloszlása, eloszlásfüggvénye megegyezik-e a másik mintánkból képzett eloszlásfüggvénnyel. Tekintsük a (ξ, η) valószínűségi változó párt és az azokból képzett független $\xi, \eta, n_1,$ és n_2 elemű mintákat. Jelölje ξ eloszlásfüggvényét $F(x)$, a mintából számított empirikus eloszlásfüggvényét $F_{n_1}(x)$; az η valószínűségi változóra pedig $G(x)$ és $G_{n_2}(x)$. A nullhipotézisünk: $H_0 : F(x) = G(x)$.

A próbához tartozó próbastatisztikánk:

$$D_{1,2} = \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} \sup |F_{n_1}(x) - G_{n_2}(x)|$$

amelyre a Szmirnov tétel szerint (Rényi, 1966)

$$\lim_{\substack{n_1 \rightarrow \infty \\ n_2 \rightarrow \infty}} \mathbb{P}(D_{1,2} < x) = K(x)$$

ahol a $K(x)$ határeloszlás-függvény.

Az elfogadási tartomány meghatározásához szükséges x_α értékeket a legfontosabb szignifikanciaszintekre az alábbi táblázat tartalmazza:

1.1. táblázat: az x_α értékei a legfontosabb szignifikanciaszintekre

α	0,1	0,05	0,01
x_α	1,23	1,36	1,63

Az x_α értékeket a $K(x)$ eloszlásfüggvény táblázatából vesszük, $K(x_\alpha) = 1 - \alpha$. Az elfogadási tartomány a $(0, x_\alpha)$ intervallum az α szignifikanciaszinten. Az $F(x) = \mathbb{P}(\xi < x)$ nullhipotézist megtartjuk, ha $0 \leq D_n < x_\alpha$, és a nullhipotézist elvetjük, ha $D_n \geq x_\alpha$ (Dévényi et al., 1988).

2. Függelék

A Kolmogorov-Szmirnov próba eredményei. A táblázatok első oszlopában az egyezéseket 0, az eltéréseket 1-es jelöli. 20 vízgyűjtőre készültek az összehasonlítások.

2.1. táblázat Kolmogorov-Szmirnov próba eredményei: 1. tábla a 2008-as reforecast és megfigyelési klíma összehasonlítása, 2. tábla a 2008-as és 2011-re reforecast klímák összehasonlítása, 3. tábla a 2011-es és 2014-es reforecast klímák összehasonlítása, 4. tábla a 2014-es reforecast klíma és a megfigyelési klíma összehasonlítása

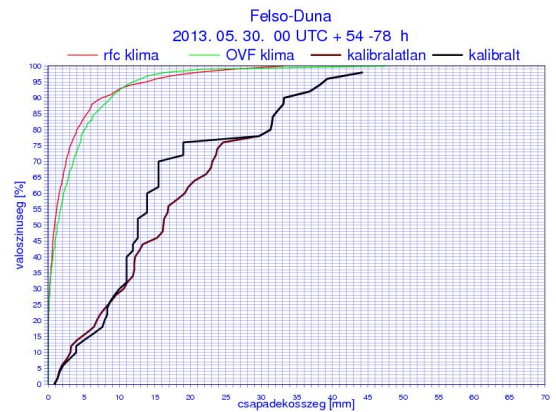
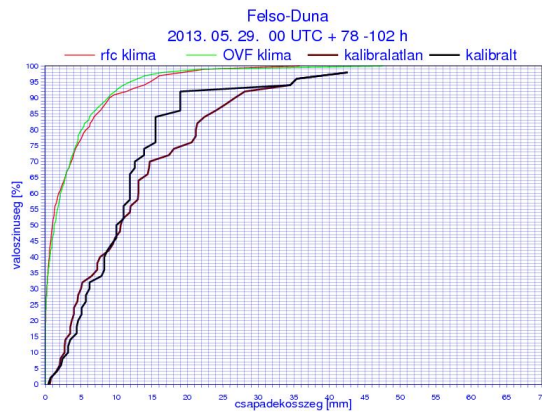
2008 - OVF	
1	15,3
0	0,8
1	14,5
0	1,3
0	0,8
0	0,5
0	1
1	14,2
1	13,7
1	15,2
1	4,2
1	2,2
0	1,1
1	13,7
1	2,8
1	1,5
0	0,6
0	1
1	3,4
1	4,1

2011- 2008	
0	1,1
1	2
1	16,3
1	1,6
0	1,3
1	2
0	1,3
1	1,6
1	13,6
1	14,7
1	16,4
1	15,4
1	1,5
1	13,9
0	0,8
1	12,5
1	2,1
0	1,2
1	17,5
0	1,2

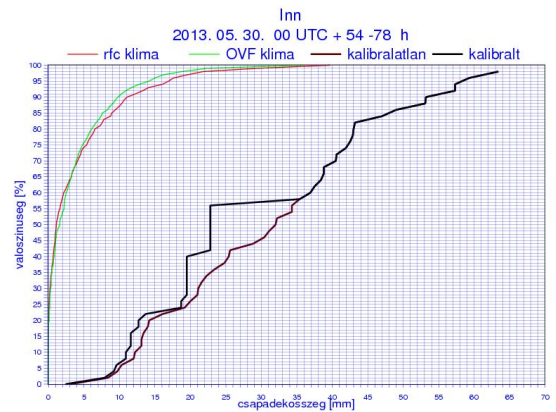
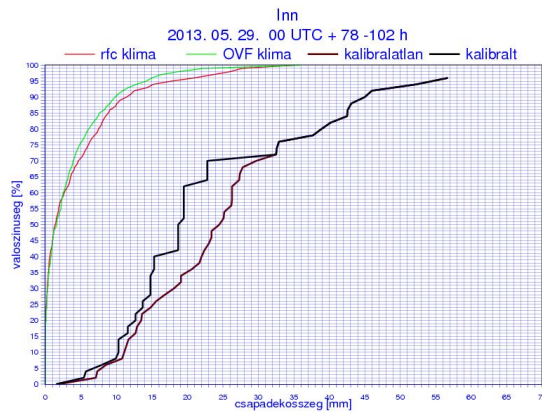
2014-2011	
1	12,3
1	2,8
1	3
1	14,5
1	13,1
1	13,7
1	13,2
1	14,7
1	1,7
1	1,4
0	1,3
1	1,6
0	1,2
1	1,5
1	20,4
1	14,2
1	13,7
1	13,2
1	2,5
1	2

2014 – OVF	
1	15,3
0	1,3
1	14,5
0	1,3
0	0,9
0	0,6
0	1
1	1,8
1	13,7
1	15,2
1	3,5
1	2,6
0	0,8
1	13,7
1	2,3
0	1,1
0	0,7
0	0,5
1	3,4
1	14,1

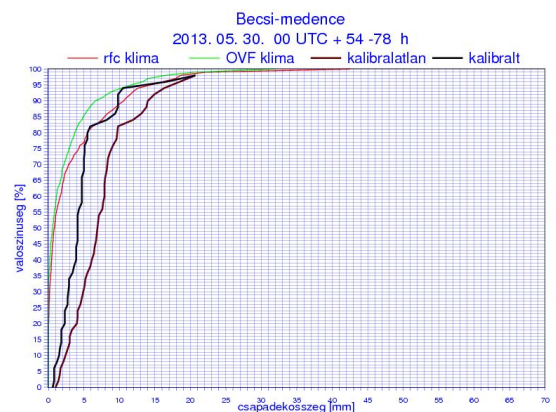
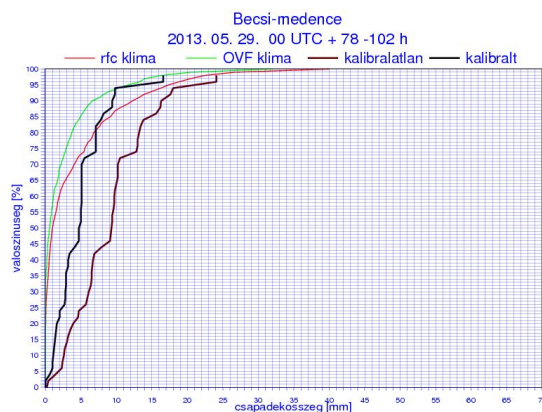
3. Függelék



3.1. ábra A 2013. május 29. 00 UTC-s és 2013. május 30. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja a Felső-Duna vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

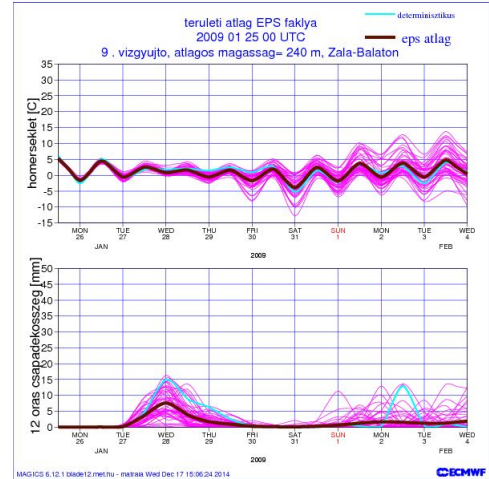
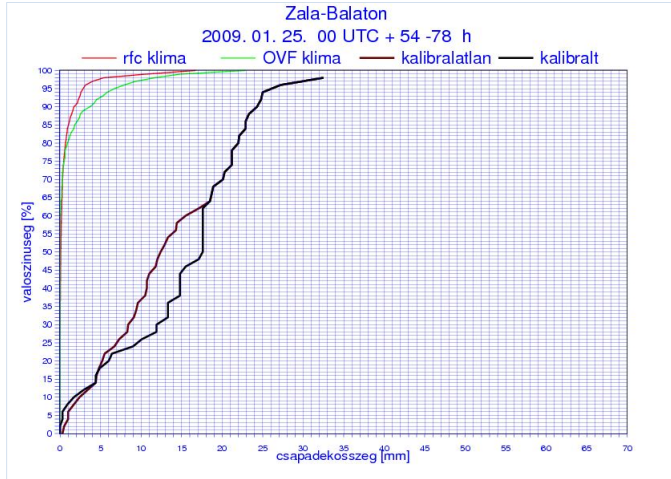


3.2. ábra A 2013. május 29. 00 UTC-s és 2013. május 30. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja az Inn vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

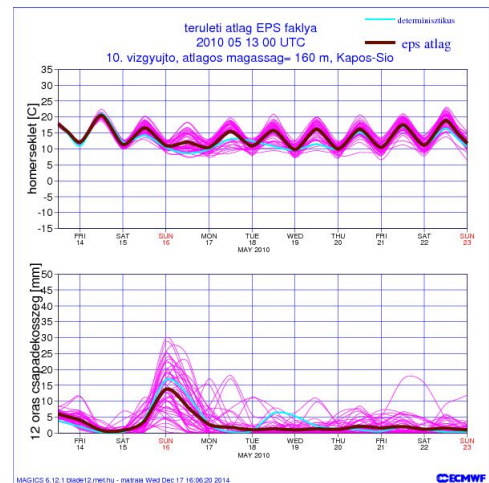
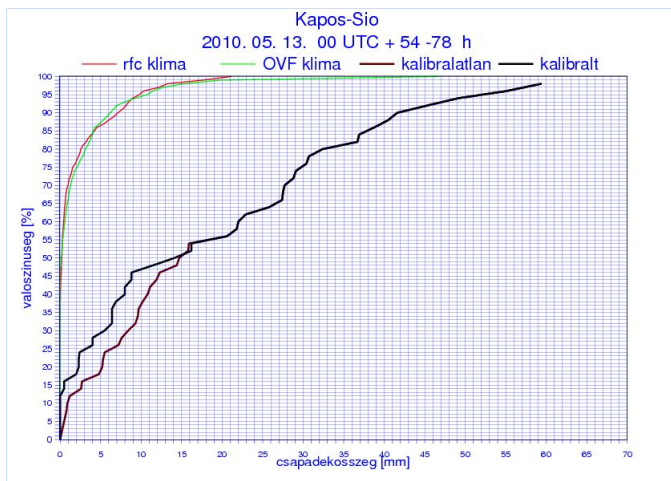


3.3. ábra A 2013. május 29. 00 UTC-s és 2013. május 30. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja a Bécsi-medence vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

4. Függelék



4.1. ábra A Zala-Balaton vízgyűjtő csapadék előrejelzéseinek kalibrációja és 10 napos csapadék előrejelzése 2009. január 25. 00 UTC időpont esetén



4.2. ábra A Kapos-Sió vízgyűjtő csapadék előrejelzéseinek kalibrációja és 10 napos csapadék előrejelzése 2010. május 13. 00 UTC időpontra