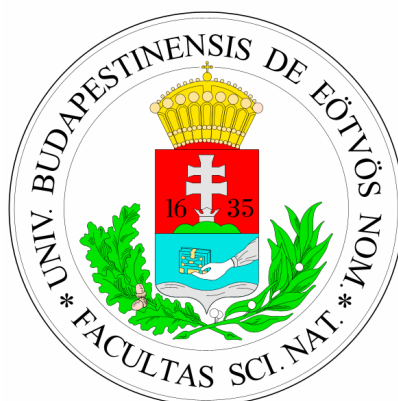


Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A csapadék előrejelezhetőségének vizsgálata a dunai és a tiszai vízgyűjtőkre vonatkozóan ECMWF ensemble előrejelzések alapján

Tudományos Diákköri Dolgozat



Készítette:

Mátrai Amarilla

Meteorológia MSc

II. évfolyam

Témavezető:

Ihász István

Országos Meteorológiai Szolgálat

2014. december

Tartalomjegyzék

Bevezetés	3
1. A hidrológiai előrejelzések történeti áttekintése	4
2. Numerikus előrejelzés.....	7
2.1. Ensemble technika	8
3. Az ECMWF és ensemble előrejelzései.....	10
3.1. Reforecast alapú modell klíma	11
4. A kalibráció	12
5. Magyarország csapadékviszonyai, általános áttekintés	14
5.1. A Duna és a Tisza vízgyűjtő területei	14
6. Felhasznált meteorológiai adatok	16
7. Havi átlagos és extrém csapadékösszegek vizsgálata.....	17
8. Reforecast klímák összehasonlítása.....	21
8.1. A reforecast klímák és a megfigyelési klíma összehasonlítása	21
8.2. Éves menet vizsgálata a különböző klímák összehasonlítása során.....	26
9. Kalibráció alkalmazása ensemble előrejelzésekre.....	28
9.1. Kalibráció alkalmazása a 2013-as dunai árvízre	28
9.2. Ensemble kalibráció alkalmazása néhány extrém csapadékú időjárási helyzetben ...	33
10. Esettanulmányok	37
10.1. A 2001. márciusi felső-tiszai árvíz	37
10.2. A 2013. májusi-júniusi dunai árvíz.....	43
Összefoglalás	49
Köszönetnyilvánítás	50
Függelék.....	51
1. Függelék	52
2. Függelék	53
3. Függelék	54
4. Függelék	55
5. Függelék	56
Irodalomjegyzék	57

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 a 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.

Az első fejezetben a hidrológiai célú csapadék előrejelzés készítés folyamatára mutatom be, hogyan készültek a csapadékra 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, majd megjelenítési formáit. 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 az előrejelzések beválását 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. 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 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 árhullámainak 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-ban 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 csapadékra 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 vízgyűjtőre 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 csapadékközödés 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 irányitottsága 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 24 órára előre jelzett csapadék előrejelzést, 12 órás bontásban. 1982-től a Frankfurti Regionális Időjárási Központ 3 napra előre 24 órás bontásban adott csapadékmennyiségre vonatkozó előrejelzést. 1983-tól pedig az angol szolgálatnál (UKMO, United Kingdom Met 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 időjárási 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-ban 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 Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ (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 korrigálhatott az előrejelzett csapadék mennyiségen. 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. Az ensemble előrejelzések során képet kaphatunk az előrejelzés bizonytalanságairól is. Az ensemble előrejelzésekről a 2. fejezetben írok.

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 peremfeltételekre van szükség. Az előrejelzés pontosságát a kezdeti feltételek minél pontosabb megadása határozza meg. Az előrejelzés első lépése a mért és a megfigyelt adatok feldolgozása, amit adatasszimilációs folyamattal végeznek el. Az adatasszimiláció során a kezdeti- és peremfeltételeket interpolációs matematikai módszerekkel adják meg a modell által használt rácpontokra, valamint kiszűrik a hibás adatokat. 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 kiküszöbölhetők a modellezés folyamán felmerülő hibák. A legelső hibák ott jelenhetnek meg, hogy nem tudjuk a természetben uralkodó folyamatokat tökéletesen leírni. A mérések is hibával terhelték, ami a mérő műszerek mérési hibáiból származnak. Ugyan a kezdeti- és peremfeltételek előállításakor a hibákat matematikai módszerekkel valamennyire csökkenteni tudjuk, a felhasznált adatok még így is tartalmazhatnak hibákat. Másrészt 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 perturbációk megtalálásához egy sajátérték feladatot kell megoldanunk (Hägel, 2009). 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 visszakálázzák és a rendszer néhány napon belül „kitenyésztí” 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).

Az ensemble előrejelzések megjelenítésének többféle formája ismert. Az eredményeket ábrázolhatjuk térképes formában, ilyen a *bélyegdiagram*, amin az 50 EPS tag mellett a kontroll tag és a determinisztikus modell futtatás eredménye jeleníthető meg.

Felismerhetők az ensemble tagok előrejelzései közötti esetleges különbségek. Információt ad arról, hogy az adott szinoptikus eseményt a modell milyen térbeli bizonytalansággal jelezte előre. A *spagetti diagramon* egy kiválasztott meteorológiai paraméter izovonalait ábrázoljuk az adott ensemble összes tagjának előrejelzése alapján. Ez is térképes megjelenítési módszer, információt ad arról, hogy az egyes területek felett mekkora lesz az előrejelzés megbízhatósága. A *valószínűségi térképeken* egy meteorológiai esemény bekövetkezésének valószínűségét ábrázolják. Egy adott küszöbértéket meghaladó vagy el nem érő előrejelzések valószínűsége látható. Fontos szerepe lehet veszélyes időjárási esetek vizsgálatakor. Egy adott helyre vonatkozóan, pontbeli előrejelzés megjelenítésére szolgálnak a következő ábrázolási eszközök. A *fáklyadiagram* a különböző meteorológiai paraméterek időbeli menetét mutatja be, az összes ensemble tagra vonatkozóan. Megfigyelhető, hogy az egyes tagok mely időpontig mozognak hasonló valószínűséggel és mikortól válnak jelentősen szét. A *meteogramon* ún. box-plot diagramok ábrázolják az előrejelzések eredményét. Az egyes időpontokban az előrejelzések valószínűségének terjedelme (minimum, maximum, átlag, kvantilisok) olvasható le. Meg kell még említeni a *clustereket*, amelynél térképes és pontbeli megjelenítést is használhatunk. Ez egy olyan ábrázolási forma, amikor a hasonló ensemble tagokat egy clusterekbe csoportosítjuk, így könnyebben követhetők az egyes csoportok által prognosztizált időjárási esemény (Persson, 2013).

A numerikus modellezés során használt ensemble technikák segítenek az előrejelzésben jelentkező bizonytalanságok számszerűsítésében és a hibák leredukálásában, a megjelenítési módszerek pedig vizualizálják az időjárási események bekövetkezési valószínűségeit. Ennél a témánál meg kell említeni az ECMWF-et, ami élen jár az ensemble előrejelzések készítésében és fejlesztésében.

3. Az ECMWF és ensemble előrejelzései

Az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ (ECMWF, European Centre of Medium Range 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 reading-i (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 bójak, 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 nyomási 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 modell verzió horizontális térbeli felbontása 32 km és 91 vertikális modell szintből áll.

2006 novemberétől naponta kétszer, 00UTC-kor és 12UTC-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 alkalmával múltbeli időpontra futtatják le a jelenleg használt modellt (Hagedorn, 2008). Minden hét csütörtöki napján 5 tagú ensemble reforecast előrejelzés készül, 32 napra vonatkozóan. A reforecast előrejelzéshez az aktuális időpontot megelőző 18 év adatait használják fel. A reforecast ensemble előrejelzések előállításának alapvető célja az ensemble kalibráció elősegítése.

A reforecast előrejelzésekből állítható elő az adott hétre vonatkozó modellklíma. A modellklímát az aktuális hetet megelőző két hét és azt követő két hét reforecast előrejelzéseiből (összesen 5 heti reforecast előrejelzésből) készítik el, mindig a legfrissebb modell verzióval. 2008 óta több alkalommal is sor került modellfejlesztésre, amely során változott a modell horizontális és a vertikális felbontása, így 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 rácsávolsággal dolgoznak (Miller et al., 2010). A 2016-ban 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.

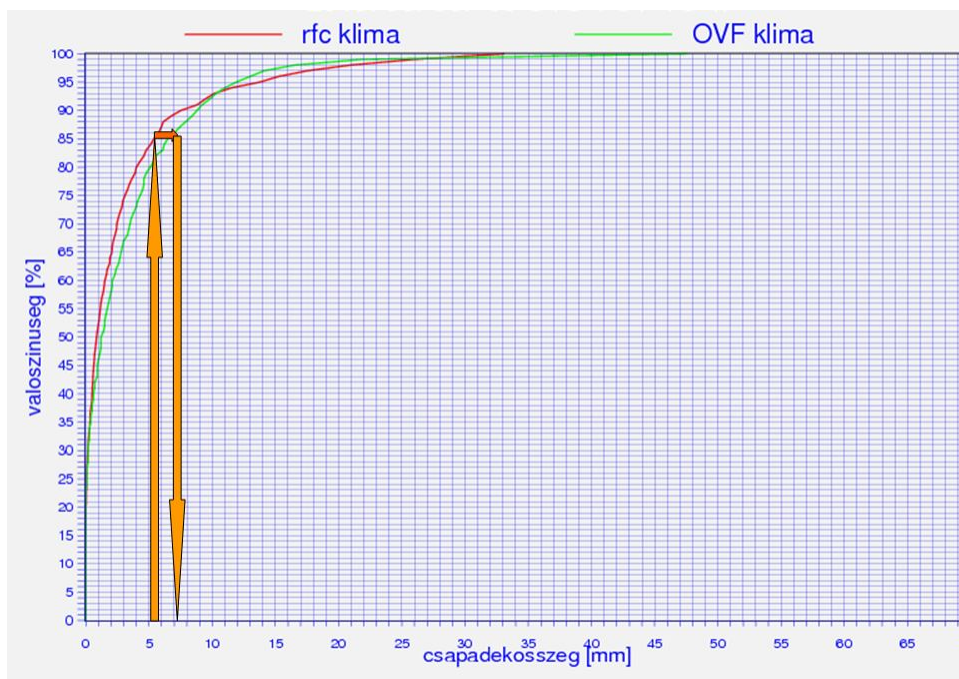
4. A kalibráció

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. A tagországok nagy része a determinisztikus modell szisztematikus hibáinak kiküszöbölésére az „átlagos 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 az eloszlásfüggvényen alapuló módszert alkalmazzuk. Magyarországon ensemble kalibrációs vizsgálatot - diplomamunka keretében - Mile Máté (2008) és Üveges Zoltán (2009) végzett. Viszont vízgyűjtőkre vonatkozóan, csapadék előrejelzés esetén még nem alkalmazták ezt a módszert korábban.

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 földrajzi helyhez legközelebb eső rácspontra érvényes:

- az aktuális modellverzióval a múltra 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.



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

A kalibrációt a következőképpen végezzük el (1. ábra). Egy aktuális ensemble 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 pontra 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.

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 csapadékkára vonatkozó éghajlati sajátosságait.

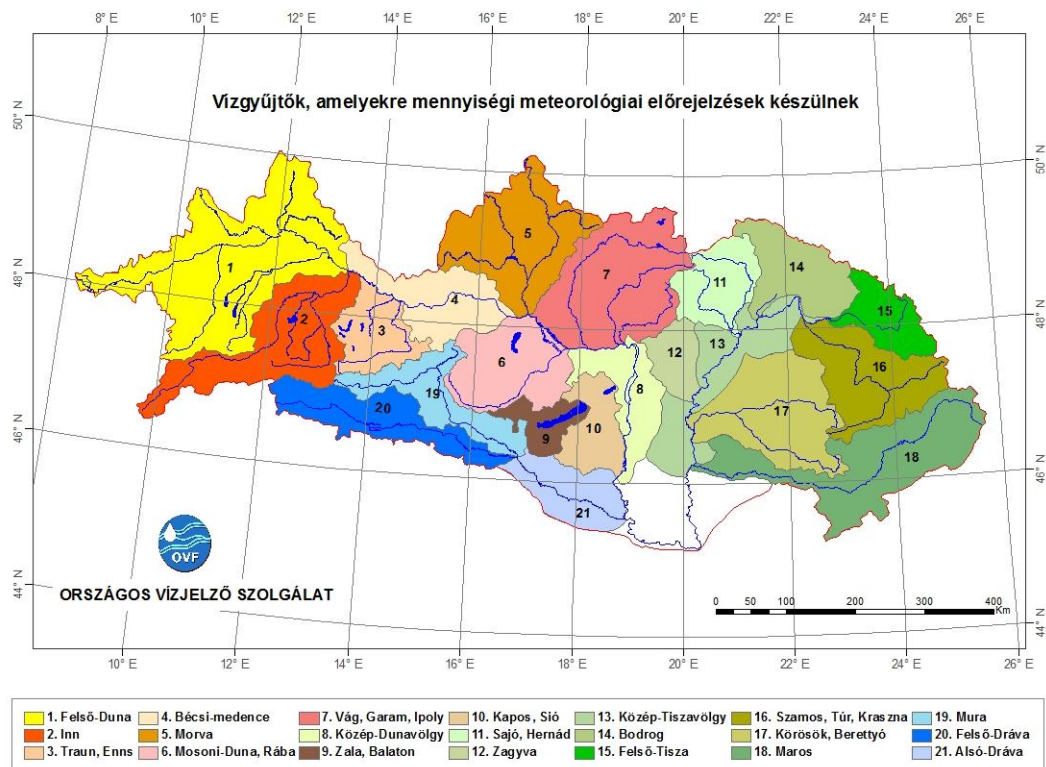
Magyarországon az évi átlagos csapadék 500-750 mm. Ez a mennyiség nem egyenletesen oszlik el az ország területén. A csapadék éves területi eloszlását legnagyobb mértékben a domborzat és a Földközi-tenger irányából érkező légtömegek befolyásolják, valamint kisebb súllyal az Atlanti-óceán is érezteti hatását. 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 ekként 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. Felső-Dráva |
| 10. Kapos-Sió | 20. Alsó-Dráva |

6. Felhasznált meteorológiai adatok

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 – 18 illetve 20 évre visszamenő – 32 napos 5 tagú ensemble reforecast modell előrejelzések szintén GRIB file-ok formájában kerülnek archiválásra.

Az ECMWF MARS rendszerhez a tag és társult országok meteorológiai szolgálatai szabadon hozzáférnek. Munkánk során – az OMSZ-ban – 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 rácspontri adatok felhasználásával számítottuk.

A vízgyűjtőkre vonatkozóan, napi bontású 24 órás területi átlag megfigyelési adatokat kaptunk az Országos Vízügyi Főigazgatóságtól. 20 vízgyűjtőre nézve, 19 év naponkénti 24 órás csapadékösszeg adatai álltak rendelkezésünkre az 1994-2002 illetve 2004-2013-as időszakokra.

A munkám során UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelven írt program családokat használtam. 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.

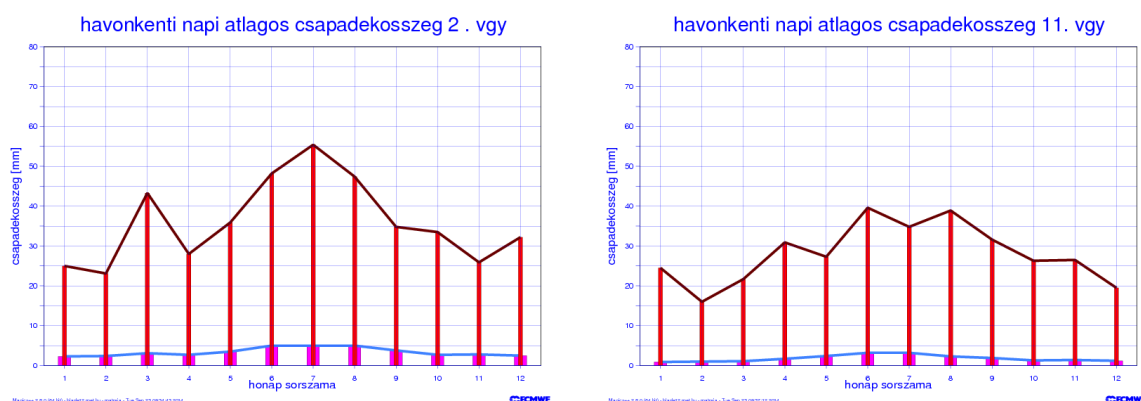
Mielőtt hozzáfognánk a csapadéértékek vizsgálatához, foglalkozzunk egy kicsit a vízgyűjtők területi elhelyezkedésével. A 20 vízgyűjtőből 12 tartozik a Dunához és 8 a Tiszához. A vízgyűjtőket csoportosíthatjuk aszerint, hogy hegyvidéki területen helyezkedik el vagy inkább alföldi, sík területen, esetleg mind a két földrajzi táj közel azonos mértékben jellemzi. A vízgyűjtők csoportosításakor figyelembe vettük 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

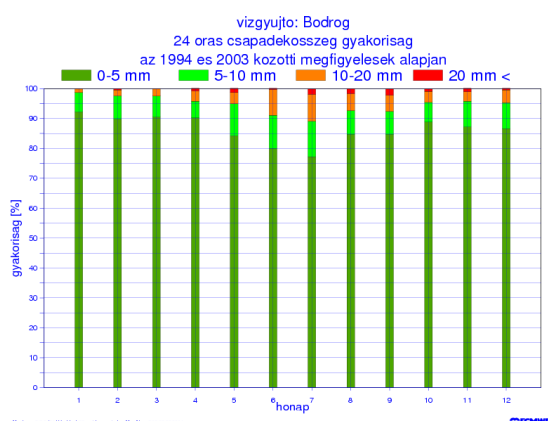
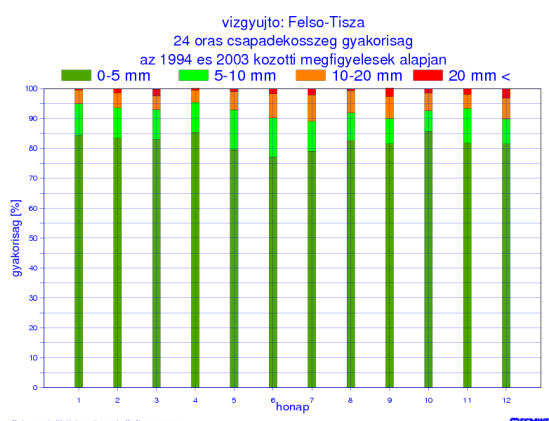
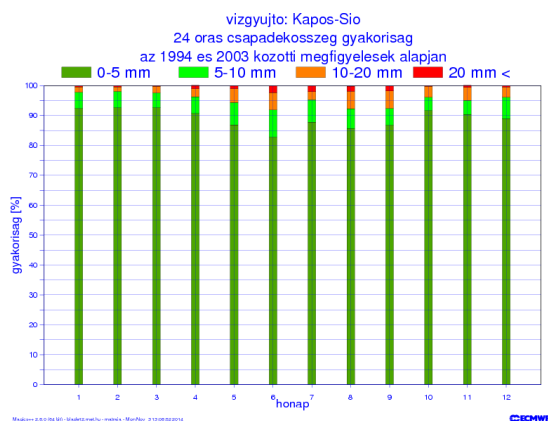
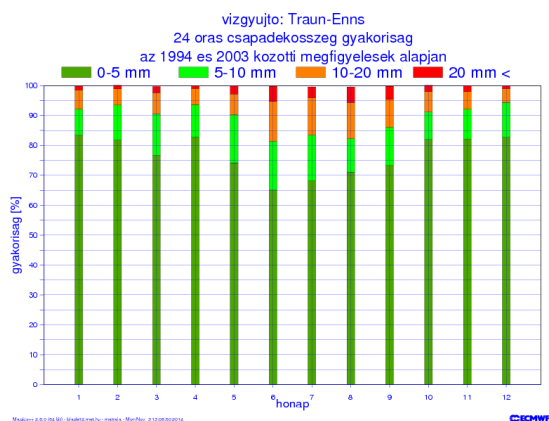
Ezt a csoportosítási fajtát arra használjuk, hogy a vizsgálataink során a domborzatból adódó eltérések alapján össze tudjuk hasonlítani a vízgyűjtőket. Illetve, hogy a domborzatbeli különbségek valóban okoznak-e különbségeket a csapadék mennyiségében.

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 3. ábrán az Inn és a Sajó-Hernád vízgyűjtők napi átlagos és maximum csapadékviszonyai láthatóak.



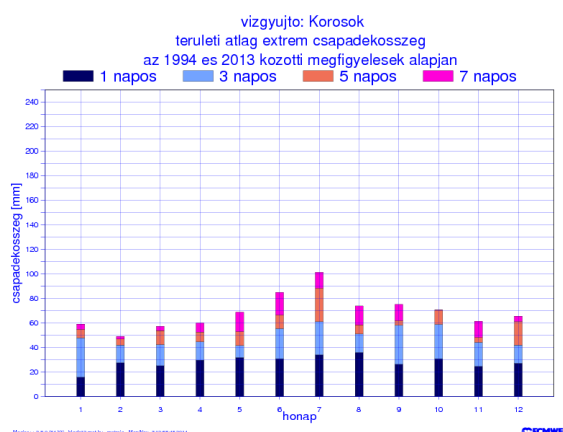
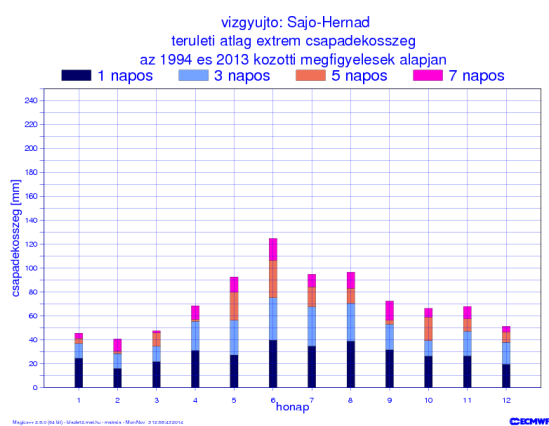
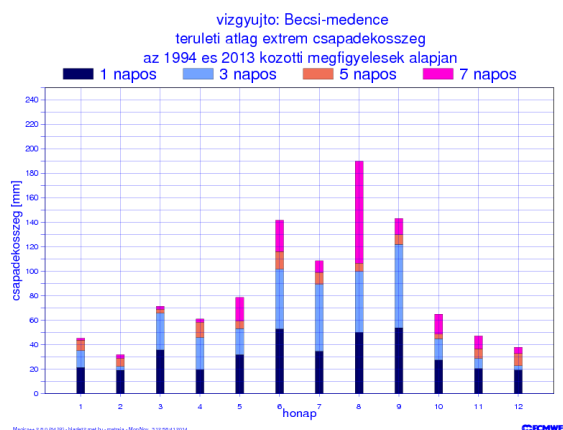
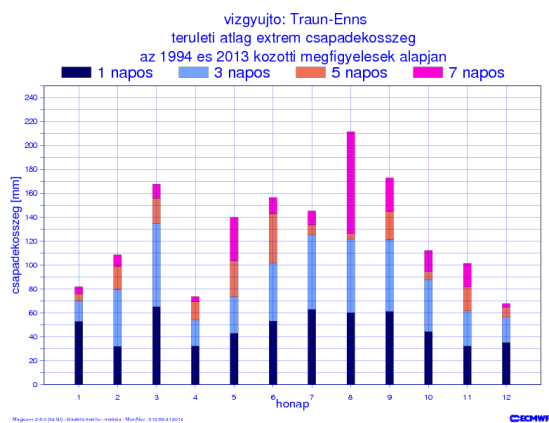
3. ábra Havi bontásban a napi átlagos és maximum csapadék az Inn (2.) vízgyűjtőre és a Sajó-Hernád (11.) vízgyűjtőre

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 őszig 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. A 4. 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.



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

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 több napos 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 dunaiaiakhoz képest. Az 5. ábrán négy vízgyűjtő látható (két dunai és két tiszai), amelyeknél a többnapos csapadékösszegeket jelenítettük meg.



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

Összességében elmondhatjuk, hogy nagy mennyiségű csapadék a vizsgált 19 év alatt mindegyik vízgyűjtőn előfordult, és leginkább a májustól augusztusig terjedő időszakban. A Duna felső szakaszához tartozó vízgyűjtőknél és a felső-tiszai vízgyűjtőknél 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. Minden csütörtökön 5 ensemble tagú 32 napos reforecast előrejelzés készül, az aktuális előrejelzést megelőző 18 illetve 20 évre. A reforecast előrejelzésből állítható elő a reforecast modell klíma, ami az adott hétre vonatkozik. A modell klímát az aktuális hét körüli két hetes időszakok reforecast előrejelzéseiből állítják elő. A modell fejlesztések eredményeként az egyes modell verziók horizontális és vertikális felbontásai változtak, így a reforecast klímák között is jelentkeznek eltérések.

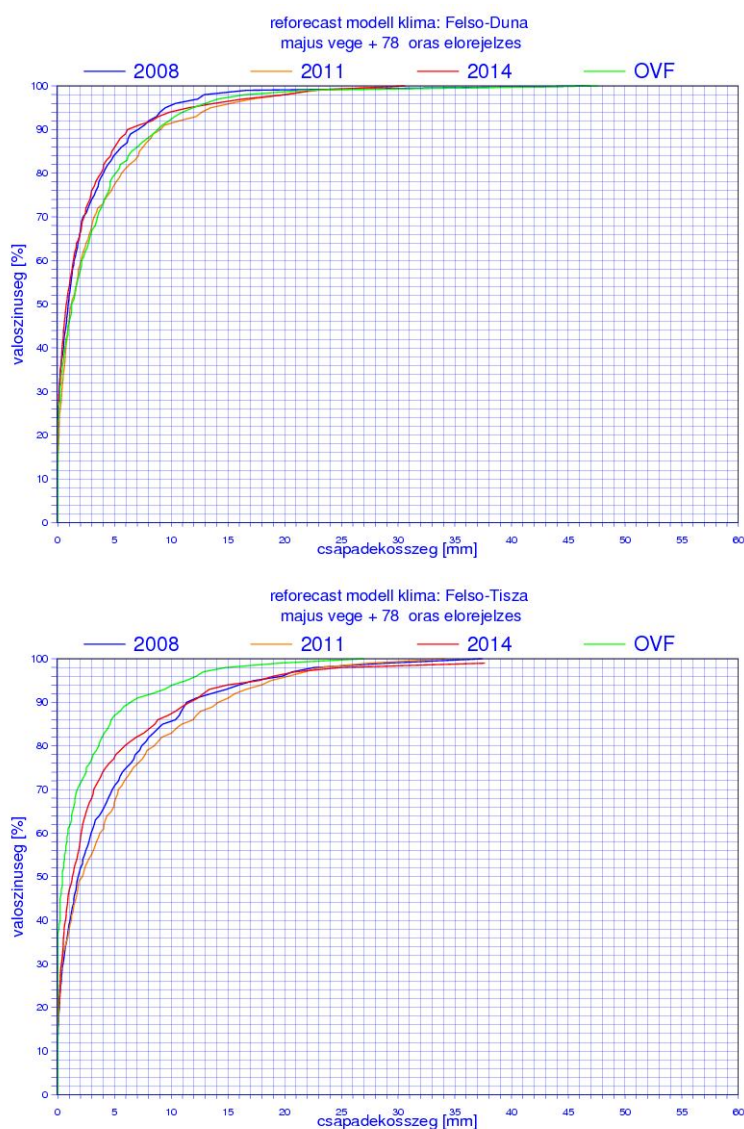
8.1. A reforecast klímák és a megfigyelési klíma összehasonlítása

Mivel 2010 és 2013 végén jelentős változás történt az ensemble modellben, ezért érdemes megvizsgálnunk a különböző időszakokból származó modell klímákat. Ebben a fejezetben a 2008, a 2011 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. A vizsgált időszaknak május végét választottuk. 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 számítottunk, 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 2. 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 3. függelék tartalmazza.

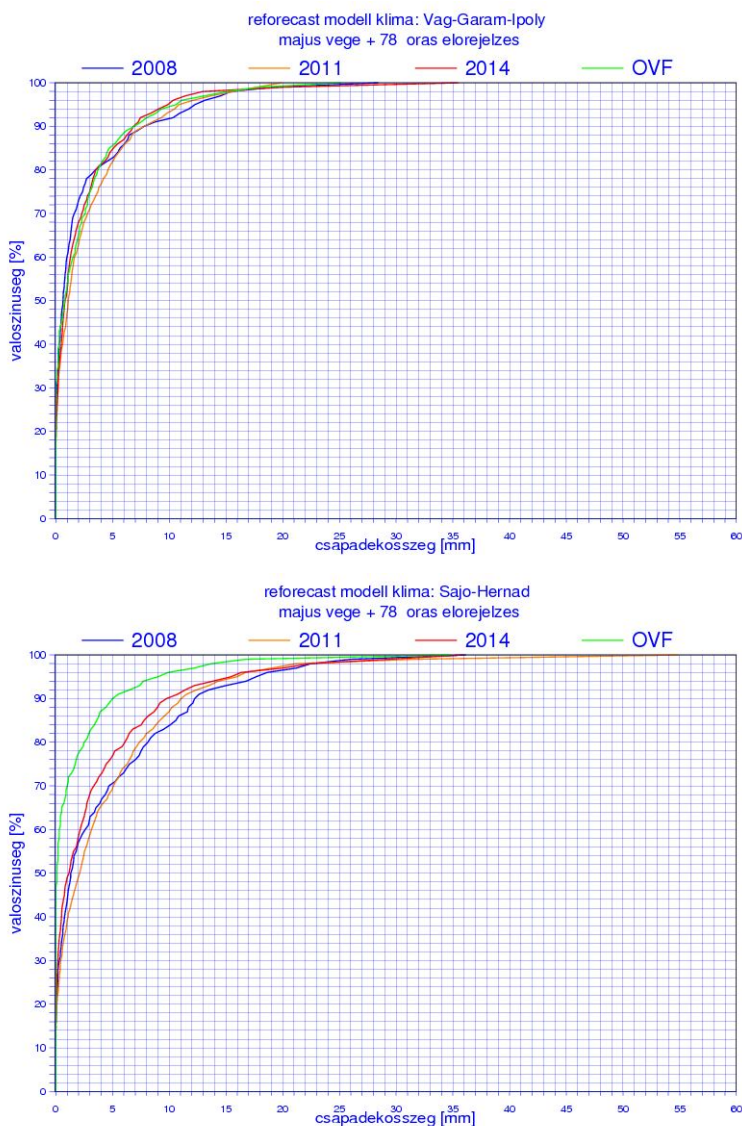
A május végére vonatkozó reforecast klímák és megfigyelési klíma összehasonlításait a Duna és a Tisza vízgyűjtői alapján mutatom be. Először, a hegyvidéki típusba tartozó vízgyűjtők estén a klímák közötti eltéréseket az 6. ábra szemlélteti.



6. 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

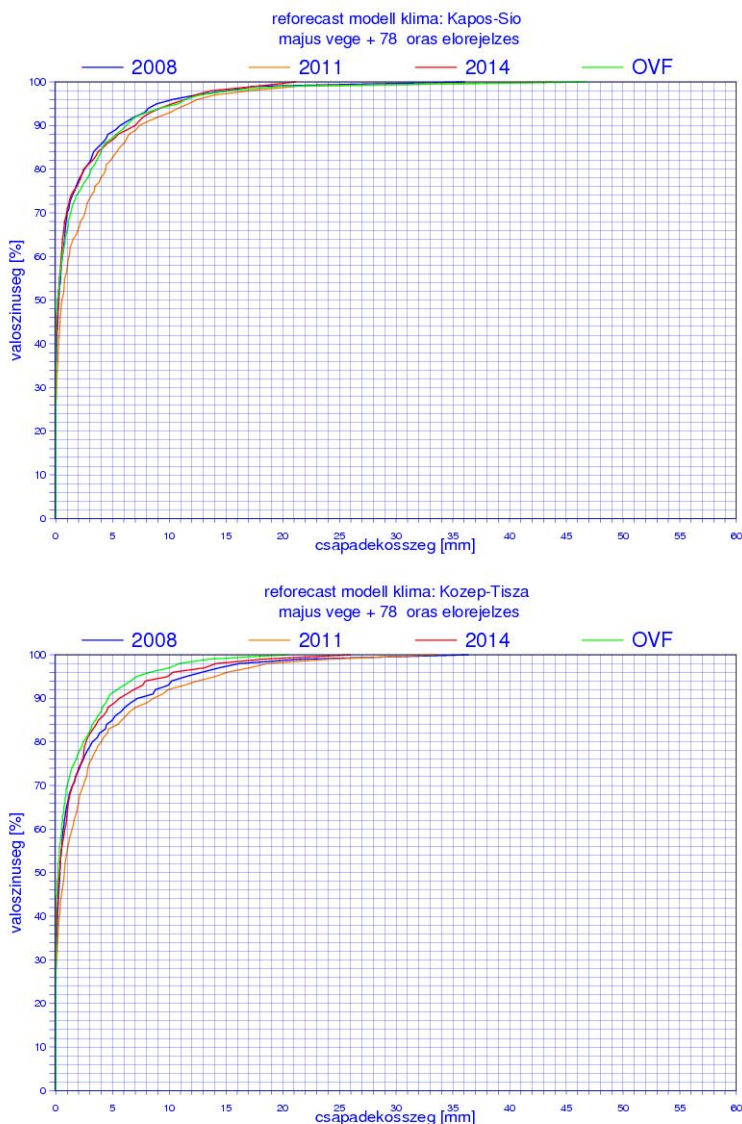
klíma mutat. A Felső-Tisza esetében szemmel láthatóan nagyobbak a különbségek a reforecast klímák és a megfigyelési klíma között. A Kolmogorov-Szmirnov próba eredménye azt mutatta, hogy a klímák között szignifikáns eltérés van a hegyvidéki vízgyűjtők esetén. Az egyezés és eltérés aránya a reforecast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



7. 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 vegyes típusú vízgyűjtőknél a klímák összehasonlításakor nem tudunk egyértelmű megállapítást tenni. Mint a 7. 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 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)

A medencés típusú vízgyűjtők esetén, ha csak a gráfok futása alapján nézzük a klímák egymáshoz való viszonyát, akkor kis eltéréseket látunk (8. 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.

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 egymástól 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 vizsgáltuk 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 évszagos 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 (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
Nyár	67	58	100	75	67	75	50	83	100	100	100	100
Ősz	100	100	100	92	83	17	33	83	100	100	100	100
Tél	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
Nyár	100	100	58	100	100	58	58	25
Ősz	100	100	25	83	83	58	25	50
Tél	67	100	67	42	100	67	58	50

	Összegzett eltérések (%)
Éves	79
Tavaszi	92
Nyár	79
Ősz	77
Tél	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. Mindegyek 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 rfc és a 2008-as rfc klíma összehasonlítása (első táblázatban a dunai vízgyűjtők, a második táblázatban a tiszai vízgyűjtők, a harmadik táblázatban az összes vízgyűjtő esetén az eltérések)

	Dunai											
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							
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 volt 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.

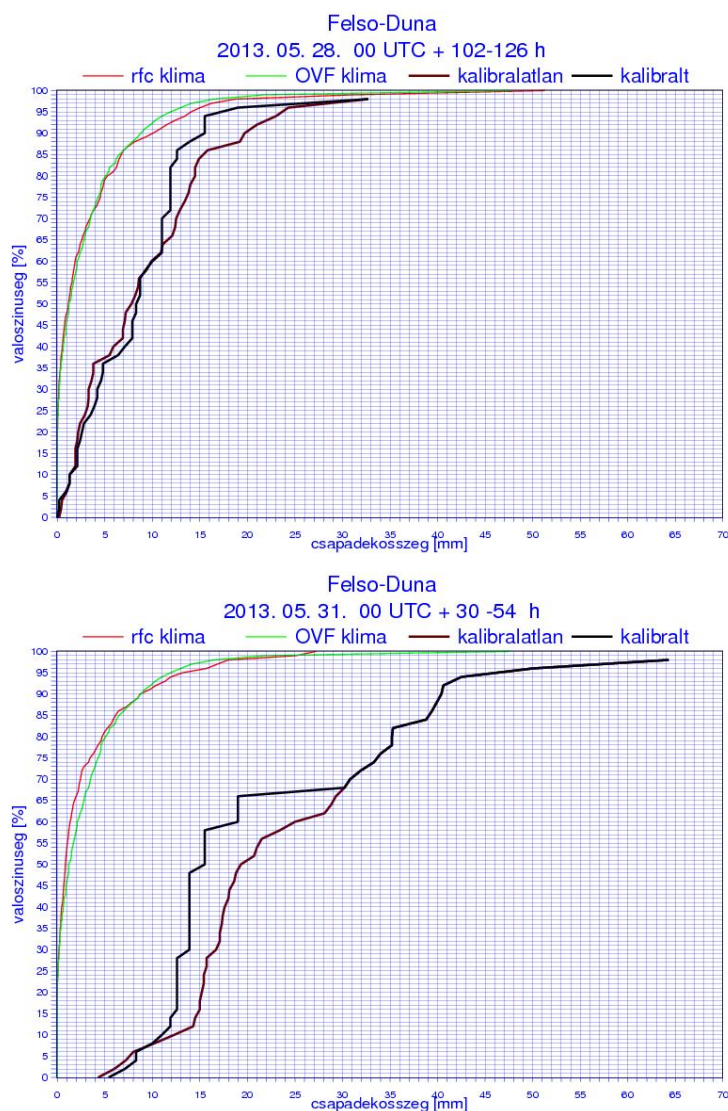
A kalibráció során a nyers EPS előrejelzés javítása a megfigyelési klíma és a reforecast klíma eltérései alapján történik (*Ihász et al., 2010*). Minél inkább eltér egymástól a megfigyelési és a reforecast klíma, annál nagyobb korrigálás látható a kalibrált EPS előrejelzésben. Ha a két klímánk közel azonos, akkor az előrejelzésünkben a kalibráció csak kis javítást fog eredményezni. A kalibráció során az a célunk, hogy a kalibrált előrejelzésünk eloszlásfüggvénye minél közelebb legyen a megfigyelési klíma eloszlásfüggvényéhez. Ezek alapján nézzük a vizsgálataink eredményét.

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 9. 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.

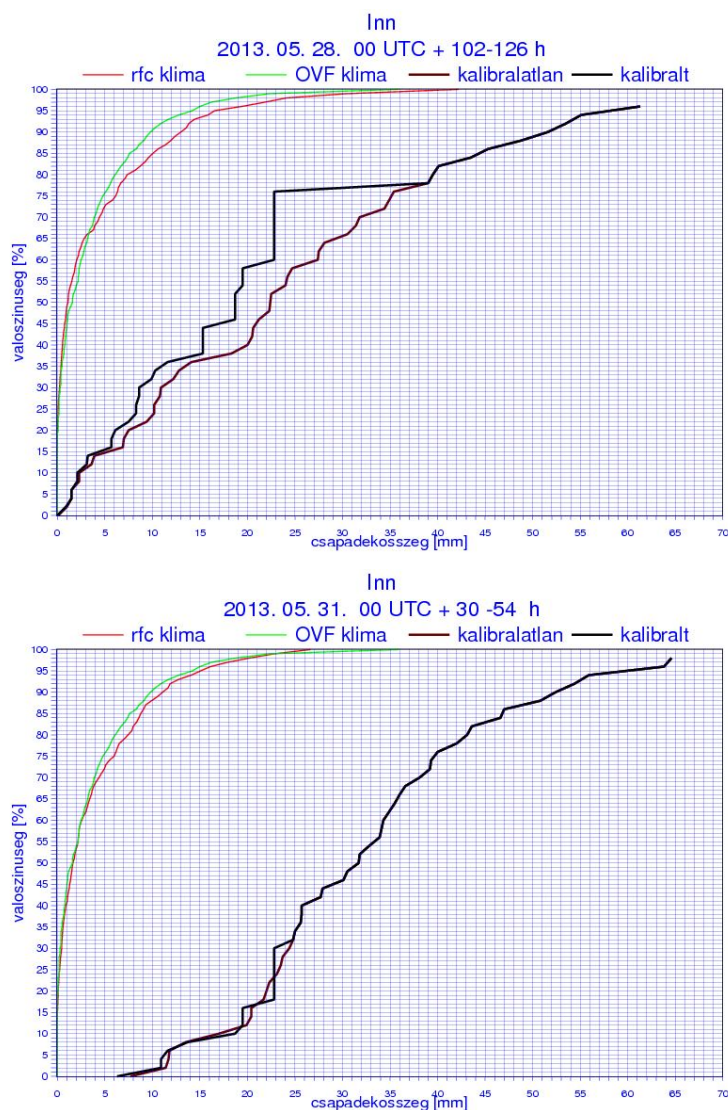


9. ábra A 2013. május 28. 00 UTC-s és 2013. május 31. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja a Felső-Duna vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

A 9. ábrákon 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 kalibrálással valamelyest közelebb lehet hozni az EPS előrejelzést a megfigyelésekhez, de még így is nagy az eltérés.

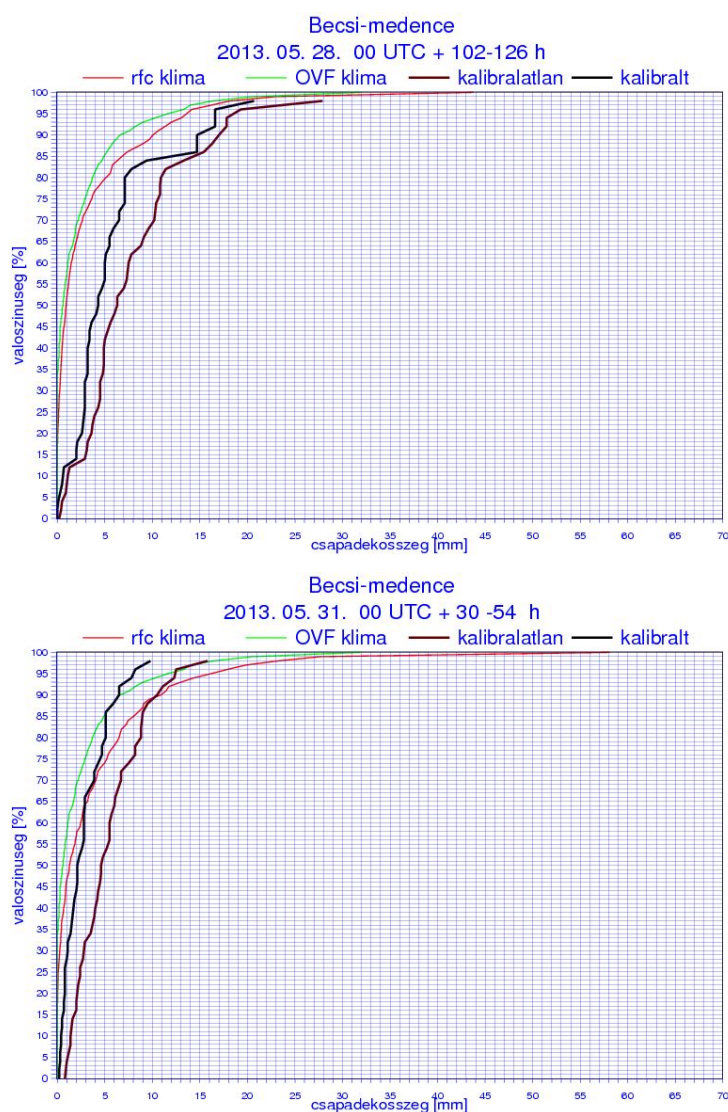
A 10. ábrán az Inn vízgyűjtőre készített kalibrációk láthatóak. Itt is a 2013. május 28. és május 31. 00 UTC-s előrejelzéseket mutatom be. Az Inn vízgyűjtőn nagyobb csapadékokat mértek (48,2 mm), mint a Felső-Duna vízgyűjtőn és a kalibrálatlan előrejelzés már a május 28-i futásban jelzi, hogy nagy csapadéokra is lehet számítani. A ebben az esetben a reforecast és a megfigyelési klíma közötti eltérést már nagyobb szakaszon figyelhetjük meg. A kalibráció is leginkább ezen a részen történik.



10. 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 (11. ábra).



11. 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 és május 31 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 csapadékokat vár a modell, a valóságban összesen 16,2 mm hullott. (A további napokra vonatkozó kalibrációk a 4. 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 megfigyelési klíma 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 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 csapadékokat. 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.

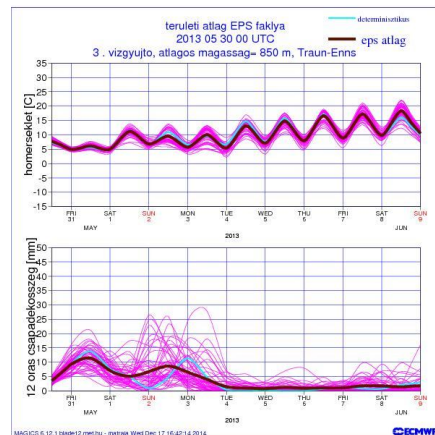
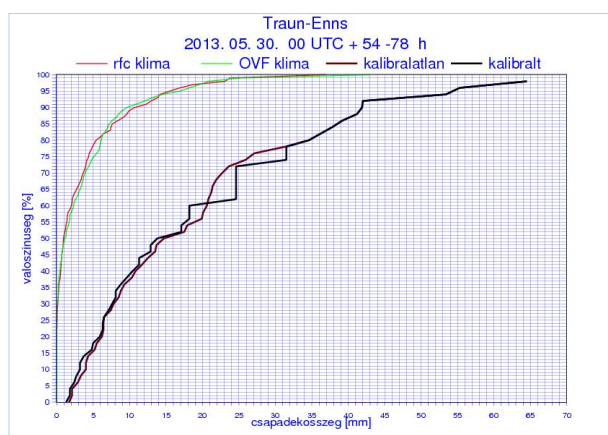
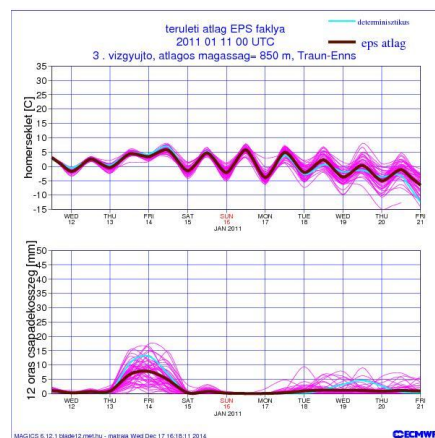
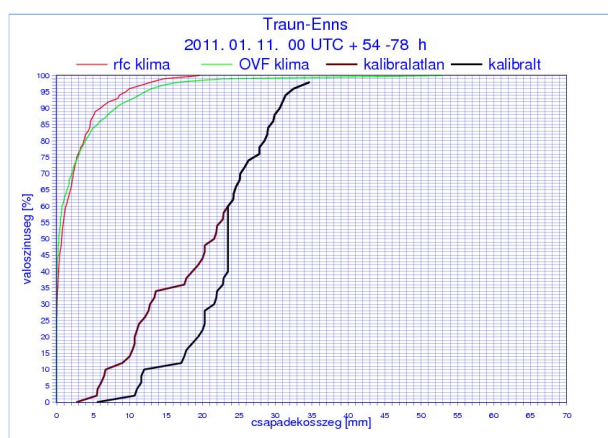
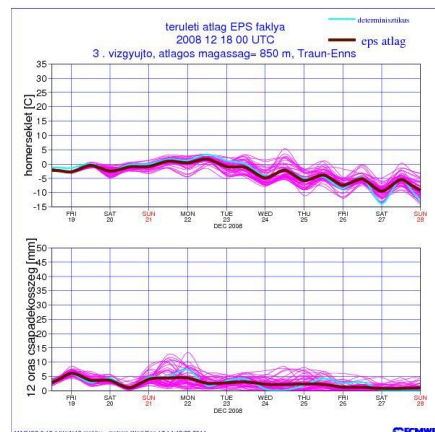
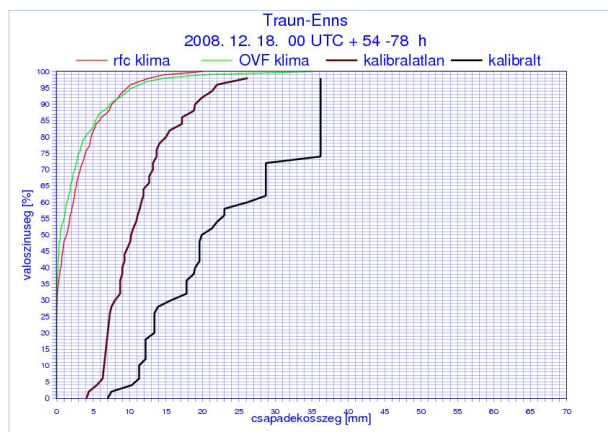
9.2. Ensemble kalibráció alkalmazása néhány extrém csapadékú időjárási helyzetben

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 (12. 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.

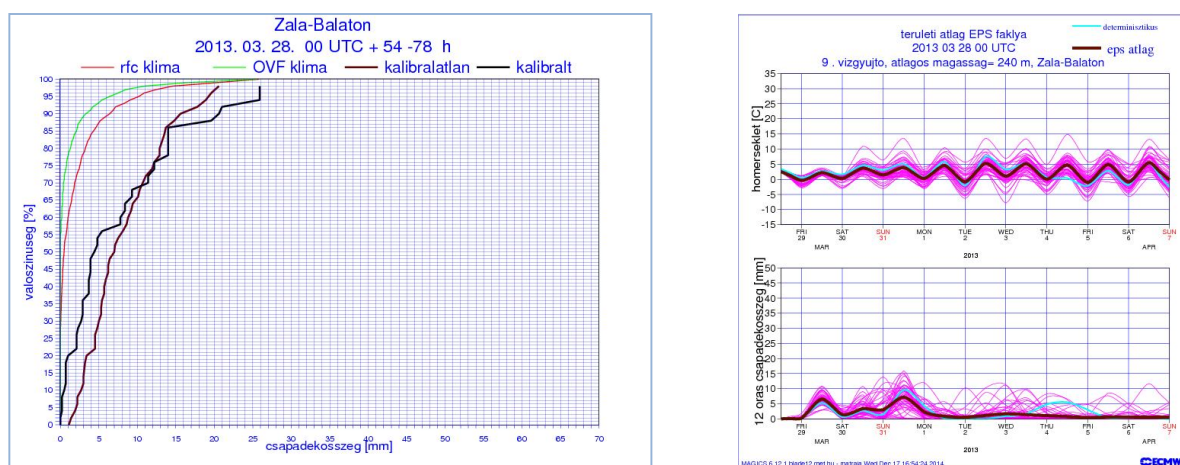


12. ábra A Traun-Enns vízgyűjtő csapadék előrejelzéseinek kalibrációja és 10 napos csapadék előrejelzése 2008. december 18. 00 UTC, 2011. január 11. 00 UTC, 2013. május 30. 00 UTC időpontok esetén

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.

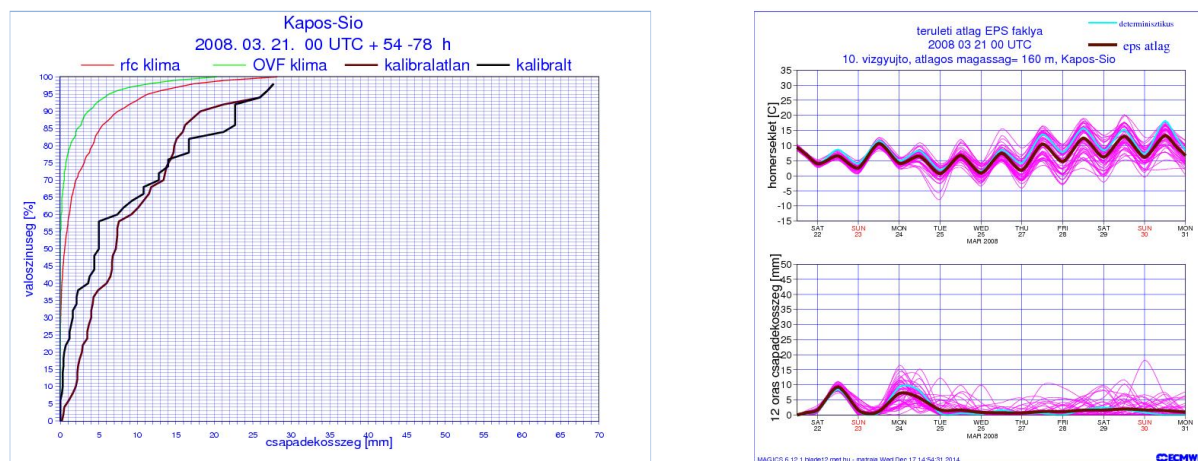
A Zala-Balaton vízgyűjtő alacsonyabban fekszik, mint a Traun-Enns vízgyűjtő. Kiterjedésében is kisebb, és inkább síkvidéki területeket foglal magába. A Zala-Balaton vízgyűjtő esetén két időpontot találtunk 2008 után, amikor nagy csapadék hullott a vízgyűjtőn. Egy 2009. január 28. és 2013. március 31.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

A 13. ábrán a bal oldali kalibrációt bemutató ábrán jól látható, hogy a reforecast 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.



13. 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 14. 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 vízgyűjtőnek 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.



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

A 2010-es esetről (5. 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. Esettanulmányok

Két esettanulmányt szeretnék bemutatni, amelyek jól reprezentálják, hogy néhány napos nagy csapadékos időszak képes rendkívüli árvizet okozni. A csapadék előrejelezhetőségének szempontjából megvizsgáltunk egy tiszai és egy dunai árvizes esetet, ezeket mutatom be ebben a fejezetben.

10.1. 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 Oroszmokrán mérték, 296 mm-t (*Bodnár et al.*, 2004).

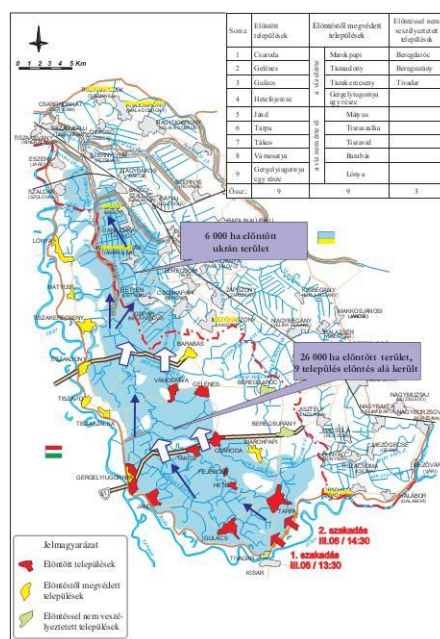
A térség felett bekövetkezett hőmérséklet emelkedés hatására a hegyekben megolvadt a téli hótakaró. A völgyekben viszont még fagyott állapotban volt a talaj, így a lehullott

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 (Szlávik, 2001). 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 (15. ábra). 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).

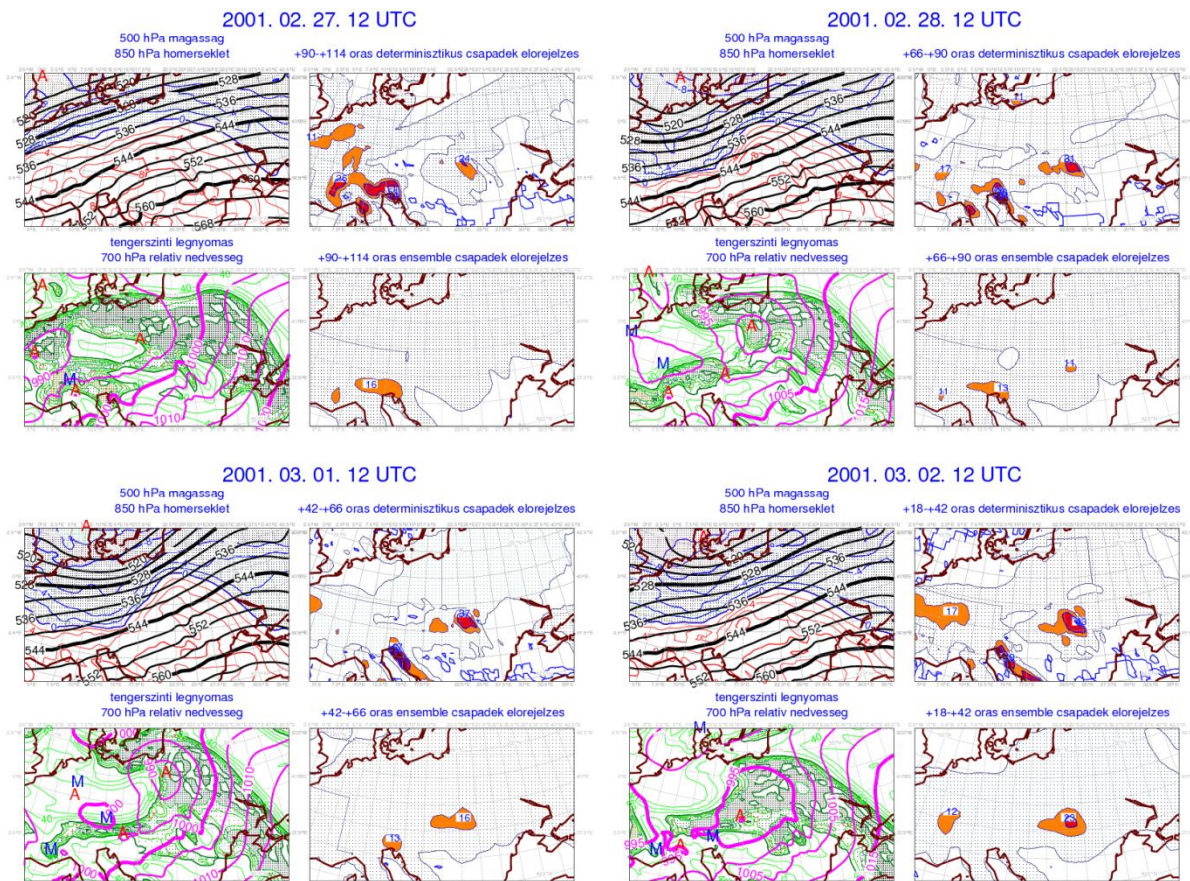


15. ábra 2001. márciusi árvíz a Tisza felső szakaszán (Bodnár et al., 2004)

Az árvizet kialakító szinoptikus helyzethez tartozó ECMWF determinisztikus és ensemble átlag előrejelzés tanulmányozásához négy résztérképet tartalmazó megjelenítést fejlesztettünk ki. A 16. ábrán az extrém csapadékeseményt megelőző négy napon a 12 UTC-kor készített modell előrejelzésekhez tartozó térképeket láthatjuk. 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. Minden időpont esetén 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 csapadékösszegre nem mondható el.

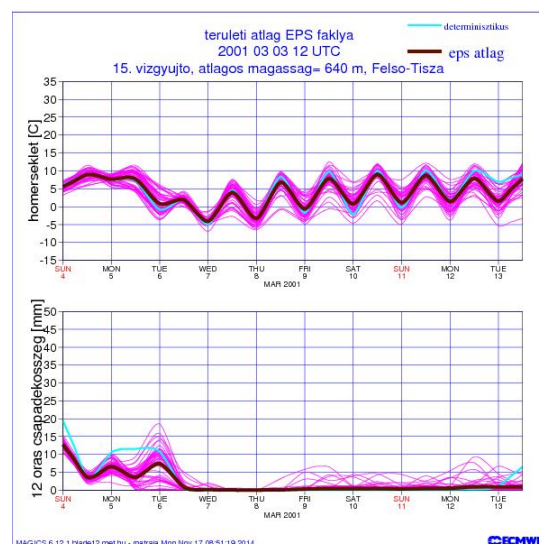
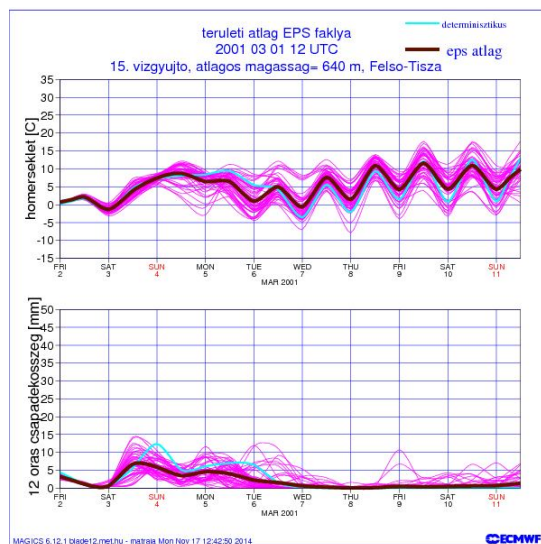
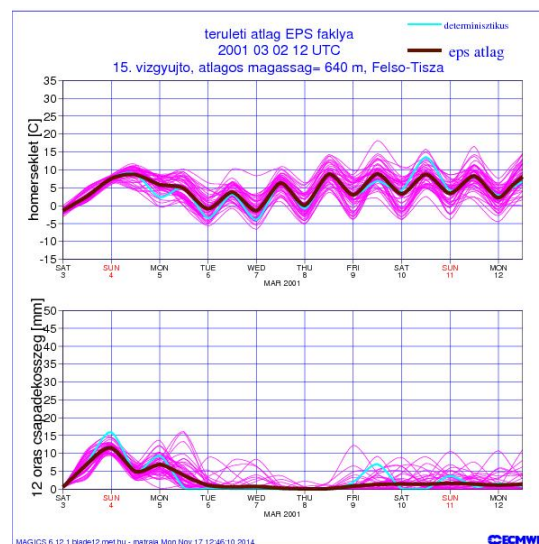
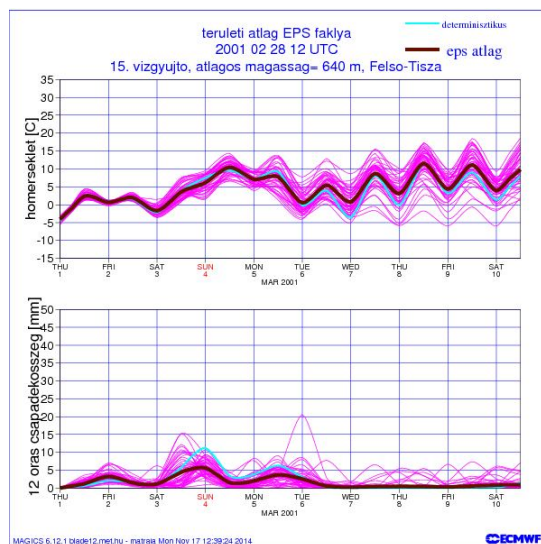
Március 3-án a Felső-Tisza vízgyűjtőn 60,3 mm csapadék hullott le 24 óra alatt. Mind a két modell jóval alulbecsülte a csapadék mennyiségét. A determinisztikus modell 43 mm maximális csapadékot várt az ensemble modell pedig 16 mm-t. Viszont, mindkét modell esetén, minél közelebb kerülünk időben az esemény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



16. ábra A 2001. márciusi tiszaí 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)

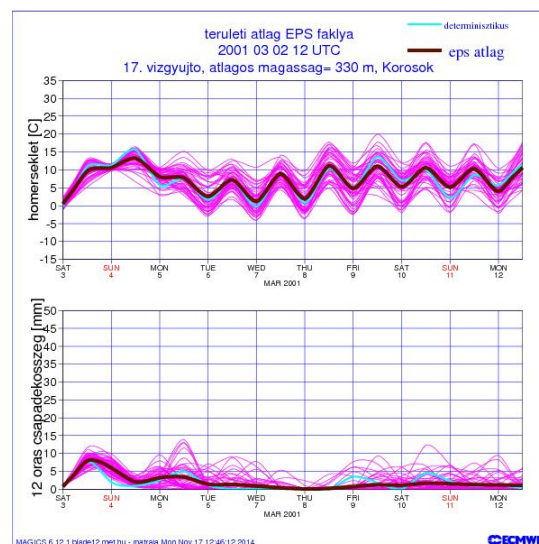
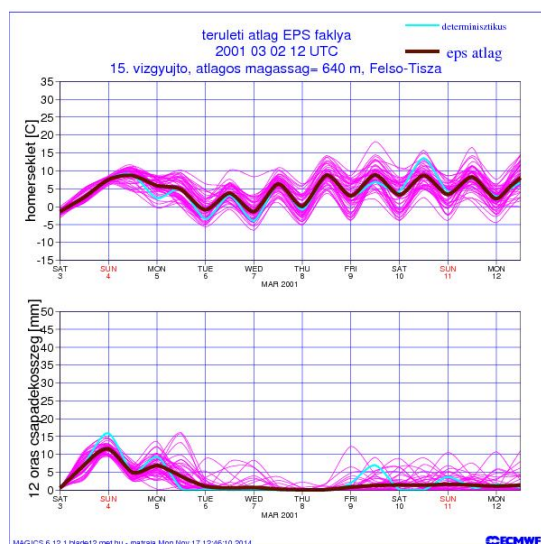
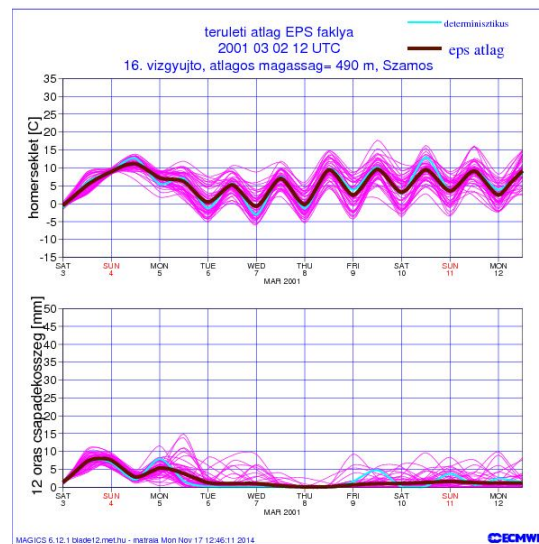
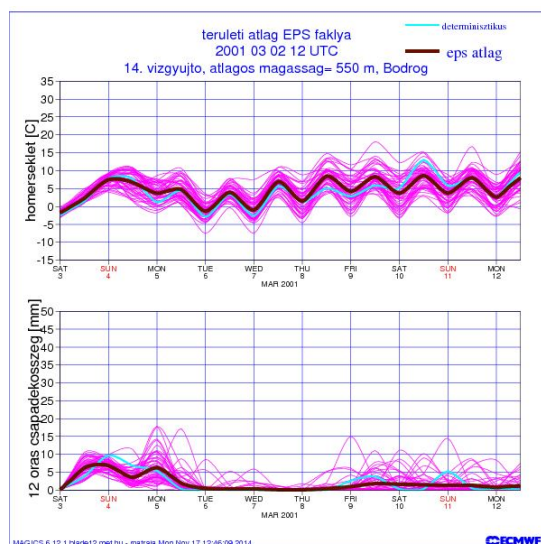
Fáklya diagramokon is megvizsgáltuk az árvizet okozó időjárás néhány paraméterét. ECMWF ensemble modell futtatások (vízgyűjtőkre számított területi átlag) alapján a 2 m-es hőmérsékletet és a 12 órás csapadékösszeget jelenítettük meg. Külön vizsgáltuk a Felső-Tisza, Bodrog, Szamos és Körösök vízgyűjtőkre 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 csapadékokot. A determinisztikus futás mind a négy ábrán magasabb értékeket vár, mint az ensemble modell, de még így is alulmarad a valóban mért csapadék értéktől (17. ábra).



17. 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 (18. 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.



18. 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 árvizet néhány napos nagy csapadékos időszak idézte elő. A nagy csapadék leginkább a Felső-Tisza vízgyűjtőre koncentrált. 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 csapadékokra. Ugyan a csapadék értékét alábecsülte, de egyértelműen felhívta a figyelmet arra, hogy a következő napokban nagy csapadékhullás következhet be a vízgyűjtőn.

10.2. A 2013. májusi-júniusi dunai árvíz

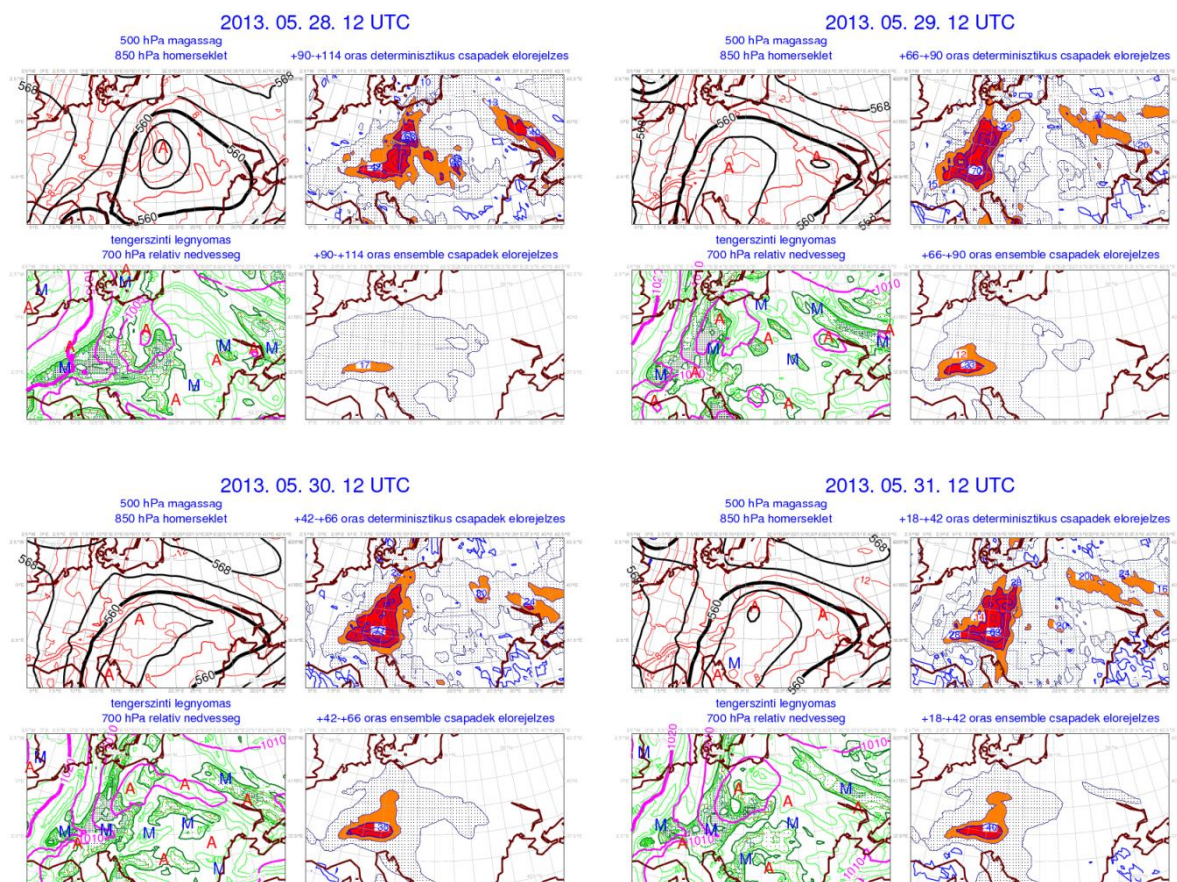
A 2013. május végi, június eleji dunai árvíz rekord vízállásokat eredményezett. A legnagyobb károkat a Duna felső, ausztriai szakaszán okozta. Magyarországon a Duna vízszintje (egészen Bajáig) meghaladta a 2002-es történelmi árvízi szintet, új „legnagyobb víz” értékeket produkálva. A 2013-as dunai árvizet 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 szélességeig felnyúló gerincek vették körül. A dunai árvizet ebben a kimélyült, lassan mozgó nyomási teknőben kialakult hideg csepp váltotta ki. A hideg örvény középpontja május 30-án Magyarország felett volt, majd észak-nyugati 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 észak-kelet 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 (19. ábra). 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.



19. 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: tengersizti légnyomás, 700 hPa-os relatív nedvesség; jobb felső mező: determinisztikusfutás csapadék előrejelzése; jobb alsó mező: ensemble átlag csapadék előrejelzése)

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 csökkenek az előrejelzésben, de még így is extrém mennyiségnek mondhatóak (május 31-is futásban 63 mm).

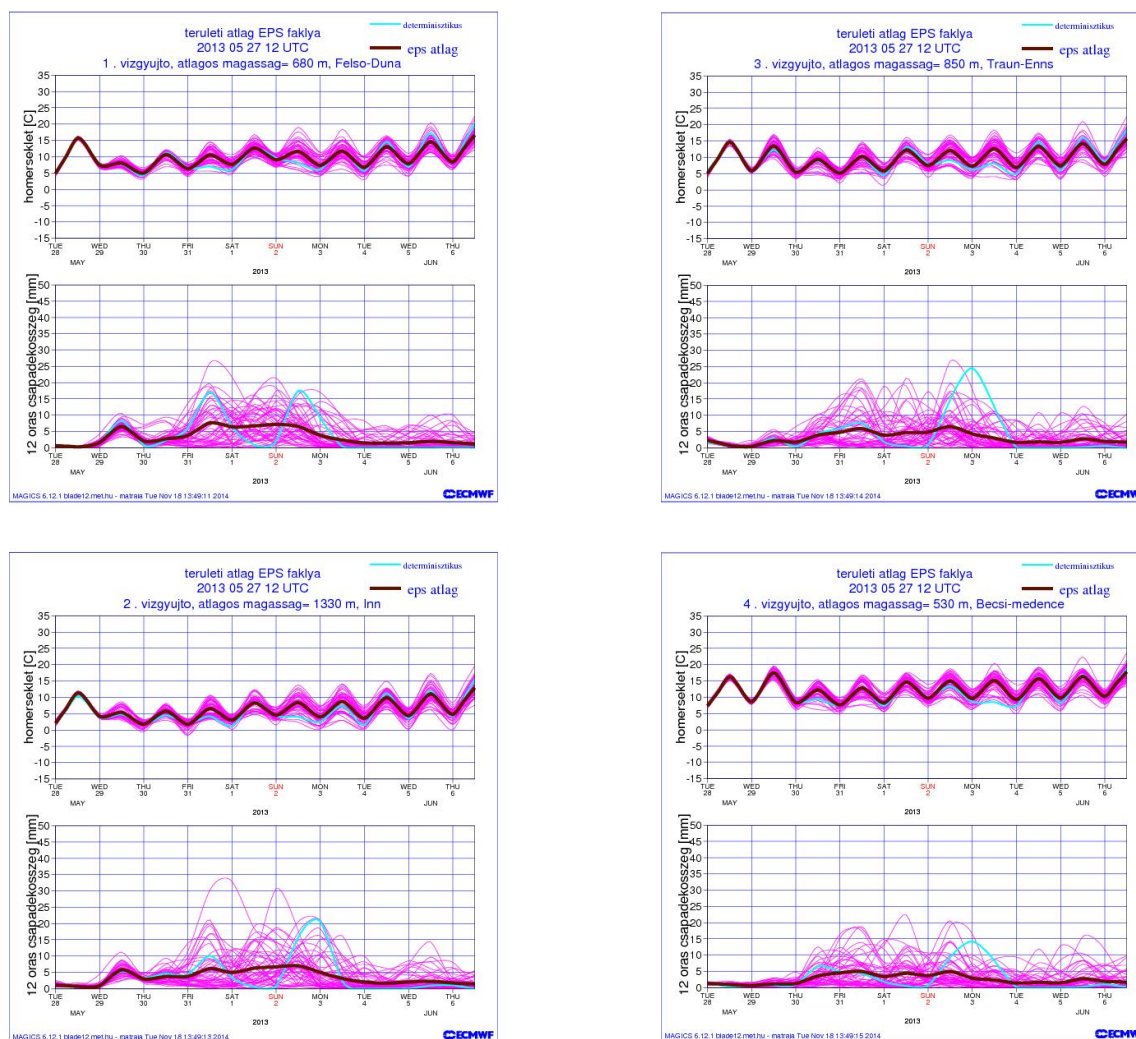
Az ensemble átlag szerinti előrejelzések mind a négy időpont esetén jóval kevesebb csapadékot prognosztizálnak és kisebb térségre, mint a determinisztikus modell. Öt nappal a csapadékhullás előtt az Alpok északi lábainál csak egy keskeny sávban vár csapadék tevékenységet. A következő időpontokból indított 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 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 20. ábra a 2013. május 27. 12 UTC-s futás eredményeit mutatja a Duna felső négy vízgyűjtőire. A fáklyadiagramon azt láthatjuk, hogy már a következő napra vonatkozó csapadék előrejelzésnél is fellépnek kisebb bizonytalanságok (első három vízgyűjtőre). Jól kirajzolódik, hogy a csapadék mennyiségét illetően a május 30-tól június 2-ig tartó időszak

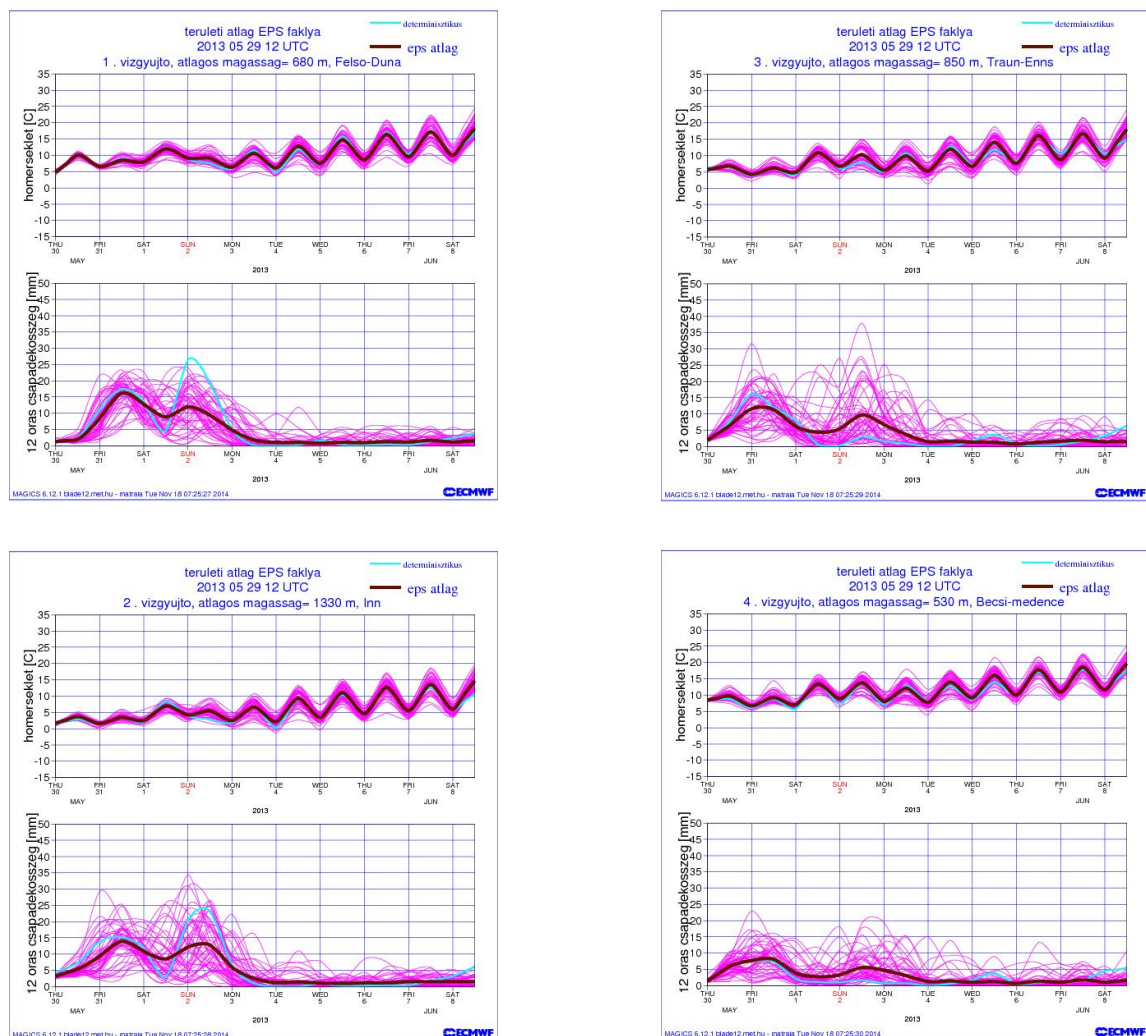
kritikusnak ígérkezik. A május 30. utáni időpontokra a prognózis bizonytalansága nagyon megnő, a csapadék várható értéke 0 mm és 35 mm között szóródik az ensemble tagok alapján. A determinisztikus modell előrejelzésében kettős maximum látható mind a négy terület esetén. A harmadik napig (május 30.) a determinisztikus és az EPS átlag közel együtt futnak, eltérés csak a negyedik naptól figyelhető meg.



20. 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)

A május 29-ei 12 UTC-s futások már nagyobb csapadék értékeket prognosztizálnak (21. 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. 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.

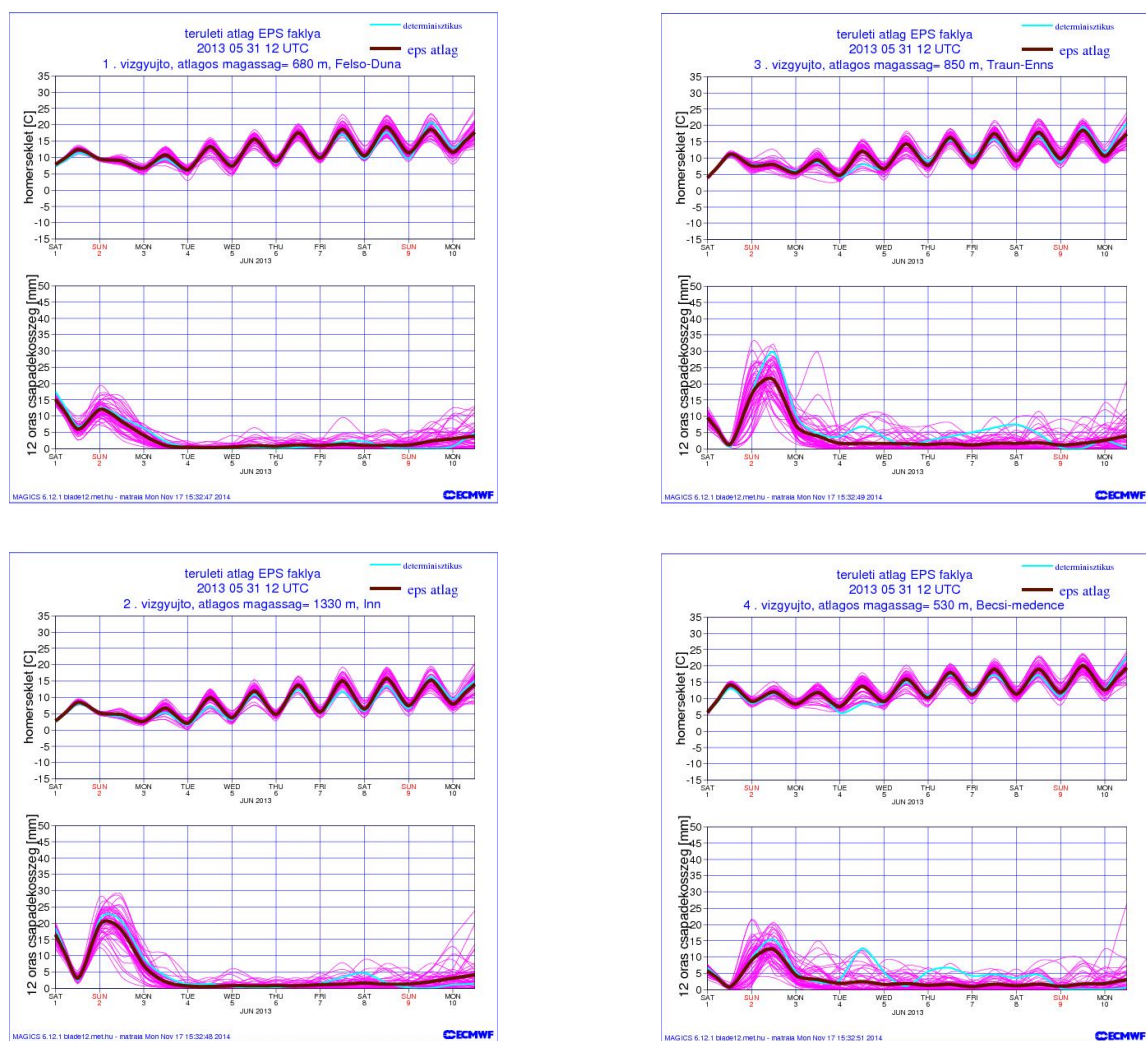


21. ábra A Felső-Duna, az Inn, a Traun-Enns és a Bécsei-medence vízgyűjtők valószínűségi előrejelzései a 2013. május 29. 12UTC-s futásra vonatkozóan (2 m-es hőmérséklet és 12 órás csapadékösszeg)

A bizonytalanság a május 31. 12 UTC-s előrejelzésben csökken a csapadék mennyiségét illetően (22. ábra). Azonban a prognosztizált értékek jóval alulmaradnak a valóban mértektől.

A dunai árvíz vizsgálata során megállapíthatjuk, hogy a legtöbb csapadékot számláló 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 nagy csapadék területi elhelyezkedését is viszonylag jól prognosztizálták. 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. Ezt a tényt a fáklya diagramok is jól visszaadják. Fontos még megemlíteni, hogy a Duna felső szakaszán kialakuló nagy csapadékhullást az Alpok térségébe északi, északnyugati irányból érkező nedves légtömegek még inkább elősegítik.



22. 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 két esettanulmány alapján elmondhatjuk, hogy a sikeres csapadék előrejelzés érdekében célszerű a determinisztikus modell mellett az ensemble modell előrejelzéseit is figyelembe venni. A bemutatott térképes megjelenítést és a fáklya diagramokat érdemes együtt szemlélni.

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 modell 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 ismertettem, amely a reforecast klíma, a megfigyelési klíma és az ensemble előrejelzési klíma eloszlásfüggvényekkel 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 a legtöbb csapadék a nyári időszakban hullik. 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 összehasonlításakor arra a megállapításra jutottunk, hogy a reforecast klímák szignifikánsan különböznek egymástól. A legfrissebb, 2014-es reforecast klíma tér el legkevésbé a megfigyelési klímától, de még itt is adódnak nagyobb különbségek. Az összehasonlításhoz Kolmogorov-Szmirnov próbát is használtam. A kalibrációt a 2013-as dunai árvíz és a 2008-2013 közötti időszakban kiválasztott vízgyűjtők kapcsán végeztem el, az ensemble előrejelzésekre. A kalibrációval, a reforecast klíma és a megfigyelési klíma közötti eltérések alapján javítható az előrejelzésünk, és mindenképpen informatív lehet, az előrejelző szakemberek számára. Végezetül a 2001. márciusi tiszai és a 2013. májusi-júniusi árvíz csapadék előrejelzéseit vizsgáltam.

További tervek között szerepel az objektív verifikáció elkészítése mind a kalibrálatlan, mind a kalibrált csapadék előrejelzésekre, a 2008 és 2013 közötti időszakból kiválasztott mintegy 100 nagycsapadékos időjárási helyzetben. Az elvégzett munka eredményeként várhatóan 2015. I. félévében a vízgyűjtőkre vonatkozó ensemble csapadékelőrejelzés 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.

Függelék

1. Függelék

A tudományos diákköri dolgozatomban a csapadék előrejelezhetőségét vizsgálom a dunai és a tiszai vízgyűjtőkön ECMWF ensemble előrejelzések alapján. A témával 2014 tavaszán kezdtem foglalkozni. Munkámat az alapvető irodalmi háttér felkutatásával és elsajátításával kezdtem. Magyar és nemzetközi folyóiratokban megjelent közel három tucat cikket tanulmányoztam át. Ezután a dolgozat elkészítéséhez szükséges informatikai ismereteimet szélesítettem, mely főleg számítógépes programozásra irányult. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál lehetőségem nyílt számítógépes munkaállomáson elkészíteni a vizsgálataimhoz szükséges programokat, ábrákat, statisztikai és kalibrációs számításokat. A munkám során UNIX operációs rendszerben FORTRAN nyelven írt program családokat készítettem és használtam. A programok helyes működésének ellenőrzésében témavezetőm segítséget nyújtott.

A vizsgálatok elkészítéséhez ECMWF determinisztikus és ensemble előrejelzésekre, valamint reforecast előrejelzésekre volt szükség, melyeket az ECMWF MARS adatbázisából érhetőek el, letöltésükhöz MARS nyelvű scriptet készítettem. A vízgyűjtőkre vonatkozóan az Országos Vízügyi Főigazgatóság napi megfigyelési csapadék adatokat szolgáltatott, amelyek feldolgozása szintén FORTRAN nyelvű programok kifejlesztését igényelte.

A megfigyelési adatok alapján a vízgyűjtők csapadék viszonyait vizsgáltam az 1994-2013 közötti időszakban, ami átfogó információt szolgáltatott a vízgyűjtők csapadék eloszlásáról. A reforecast adatok felhasználásával, a vízgyűjtőkre elkészített 2008-as, 2011-es és 2014-es reforecast eloszlásfüggvények, valamint a megfigyelési adatokból előállított megfigyelési klíma eloszlásfüggvény közötti eltéréseket vizsgáltam. Az összehasonlításhoz FORTRAN nyelvű programmal Kolmogorov-Szmirnov statisztikai próbát is végeztem. Az összehasonlítás arra szolgált, hogy a különböző modell verziókkal készített 24 órás csapadék összeg reforecast klímák mennyire térnek el egymástól. Mivel jelentős különbségek adódtak, ezért indokolt a csapadék előrejelzések javítása, amihez kalibrációs módszert használtam. A vízgyűjtőkre elkészített csapadék kalibráció eredményeként azt kaptam, hogy jelentős javulás érhető el a módszer alkalmazásával, viszont figyelembe kell venni az aktuális időjárási helyzetet és a vízgyűjtő sajátosságait is. A 2001. tiszai és 2013. dunai árvíz tanulmányozásához új térképes megjelenítő módszert és fáklyadiagramokat használtam.

Munkám eredményeit, a közeljövőben tervezem a Légek folyóiratban magyar és az ECMWF Newsletterben angol nyelvű cikk formájában is összefoglalni.

2. 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 ξ, η, 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).

3. 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

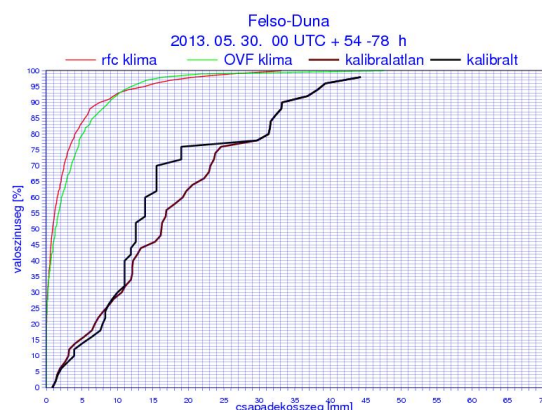
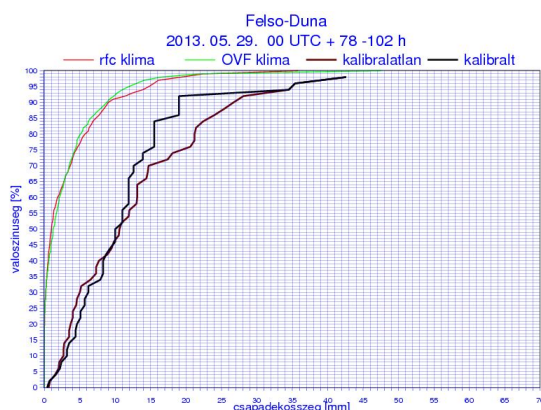
2008 - OVF	
1	15,3
0	0,8
1	14,5
0	1,3
0	0,8
0	0,5
0	1
1	14,2
1	13,7
1	15,2
1	4,2
1	2,2
0	1,1
1	13,7
1	2,8
1	1,5
0	0,6
0	1
1	3,4
1	4,1

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

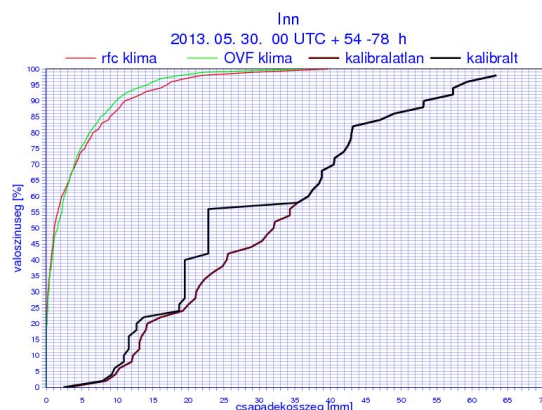
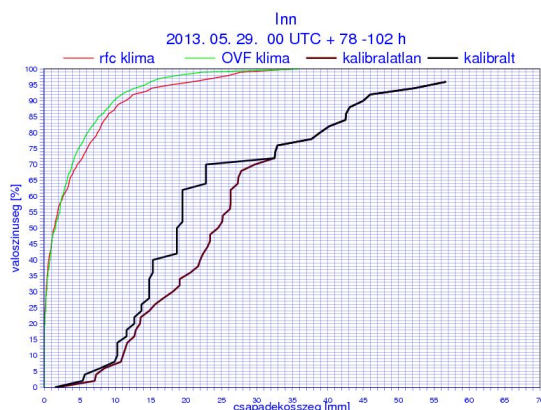
2014-2011	
1	12,3
1	2,8
1	3
1	14,5
1	13,1
1	13,7
1	13,2
1	14,7
1	1,7
1	1,4
0	1,3
1	1,6
0	1,2
1	1,5
1	20,4
1	14,2
1	13,7
1	13,2
1	2,5
1	2

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

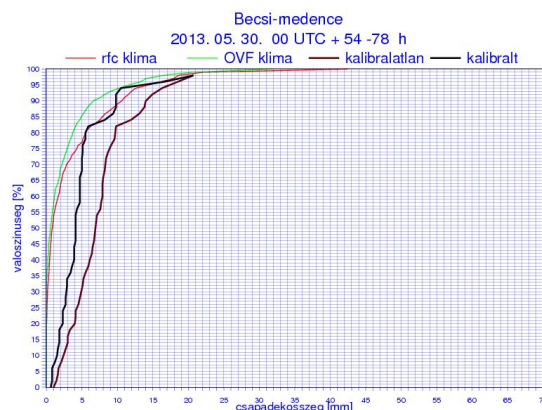
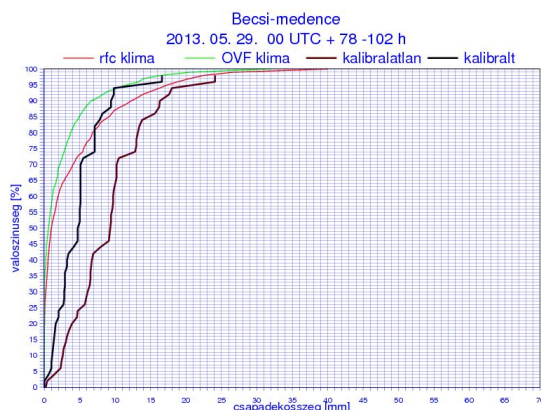
4. Függelék



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)

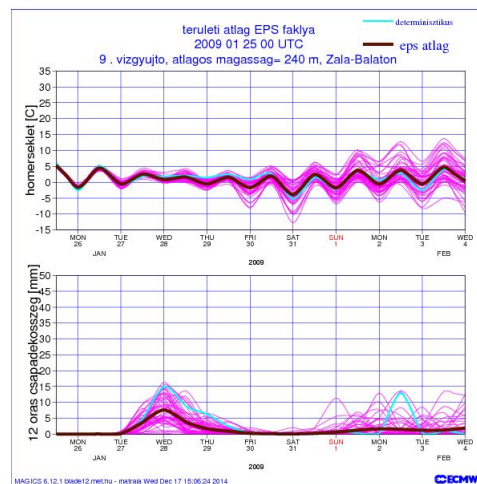
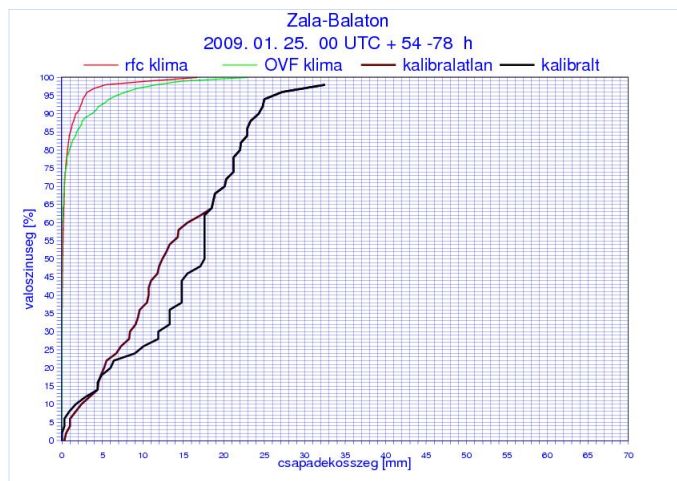


3.2. ábra A 2013. május 29. 00 UTC-s és 2013. május 30. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja az Inn vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

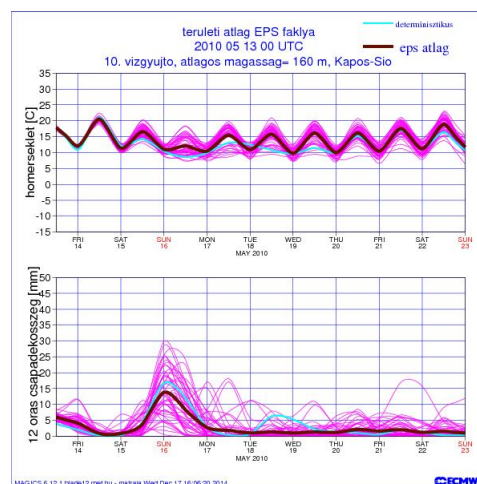
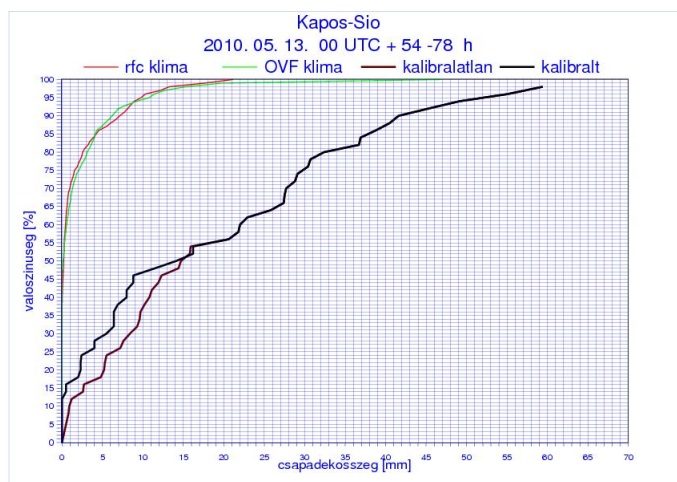


3.3. ábra A 2013. május 29. 00 UTC-s és 2013. május 30. 00 UTC-s előrejelzések kalibrációja a Bécsi-medence vízgyűjtőre (piros vonal reforecast klíma, zöld vonal megfigyelési klíma, barna vonal nyers ensemble előrejelzés, fekete vonal a kalibrált ensemble előrejelzés)

5. 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

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.

Hágel E., 2009: Ensemble előrejelzések: elméleti és gyakorlati háttér, 35. Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, 53-62.

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.

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. R., Buizza, T. N., Palmer, T. N., Petroliagis, 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122, 37-119

Péczely Gy., 1979: Éghajlatlan, 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.

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