



Az ALADIN5.2 és a REMO2015 regionális klímamodellek múltbeli időszakra vonatkozó eredményeinek validációja

Bán Beatrix, Megyeri Otília Anna, Suga Réka

Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2021.

SZÉCHENYI 2020



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Kohéziós Alap



BEFECTETÉS A JÖVŐBE

Tartalomjegyzék

1. Motiváció	3
2. Bevezetés	3
3. Alkalmazott modellek	6
3.1. ALADIN-Climate	6
3.2. REMO	7
3.3. Modellkísérletek	10
4. Módszertan	12
4.1. Validációs eszközök	12
4.2. Megfigyelési adatok	15
5. Eredmények	15
5.1. Hőmérséklet	15
5.2. Csapadék	26
6. Összefoglalás	42
Irodalomjegyzék	42

1. Motiváció

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) a jövőben várható éghajlatváltozás vizsgálatára két regionális éghajlati modellt alkalmazunk, az ALADIN-Climate és REMO modelleket, melyek eredményei az elmúlt másfél évtizedben számos hazai és nemzetközi együttműködés keretében végzett éghajlati hatásvizsgálathoz szolgáltak kiindulásul.

2016-ban adaptáltuk az ALADIN-Climate modell egy friss verzióját, melyet 10 km-es horizontális felbontáson használtunk, s a korábbi, csak a Kárpát-medencét lefedő tartományát kiterjesztettük egy Közép- és Kelet-Európát magában foglaló tartományra. Ezzel a modell az országhatárokon átnyúló hatásvizsgálatok számára is kiindulási információval szolgálhat (pl. a Duna vízgyűjtőjére vonatkozó hidrológiai vizsgálatokhoz; Szépszó, 2014; Illy et al., 2015). A REMO-val 2006 és 2009 között készült éghajlati szimulációk a számítástechnikai kapacitás korlátai végett 25 km-es felbontásúak voltak. A számítástechnikai fejlesztések azonban lehetővé tették, hogy a REMO modellel is 10 km-es felbontású szimulációkat hajtsunk végre, támogatva a felhasználók finomfelbontású éghajlati adatokra vonatkozó igényét.

„Az éghajlatváltozás magyarországi hatásainak feltérképezése regionális klímamodell-szimulációk elvégzésével és reprezentatív adatbázis fejlesztésével” című KlimAdat projektben egy olyan mérési és modellezett éghajlati adatokkal feltöltött térinformatikai adatbázis-rendszer kialakítása a cél, amely objektív háttérként segíti az alkalmazkodással kapcsolatos tervezést és döntéshozatalt. A projektben adaptáltuk a REMO modell egy új változatát, felbontását 10 km-esre növeltük, és a tartományának megválasztására érzékenységvizsgálatot hajtottunk végre (Suga et al., 2021). Ezt követte a validáció, mely során hosszabb, több évtizedes múltbeli időszakon rácsra interpolált mérési adatbázisok felhasználásával vizsgáljuk, hogy milyen eredményekkel írja le a modell a múltbeli éghajlatot.

Jelen beszámolóban e két modell átfogó validációjának eredményeit vetettük össze és mutatjuk be Magyarországra, ehhez referenciaként az OMSZ-ban előállított rácsra interpolált mérési adatbázist használtuk fel.

2. Bevezetés

Az éghajlati rendszert a légkör, a felszíni és felszín alatti vizek, a szárazföld, a hó- jégta- karó, valamint az élővilág kölcsönható együttese alkotja. Az egyes szférák tehetetlensége igen eltérő, közülük a legváltozékonyabb komponens a légkör, míg az óceánok és jégta- karók lassú folyamatokkal jellemezhetőek. Az éghajlati rendszer elemei között bonyolult kölcsönhatások és visszacsatolások lépnek fel. Mindegyik komponens folyamatait fizikai törvények kormányozzák, működésük tanulmányozására a numerikus modellezés eszköztára szolgált objektív módszert. Az összetevők fizikai folyamatainak és a közöttük levő kölcsönhatások és visszacsatolások leírására azok az ún. kapcsolt globális modellek (GCM: General Circulation Model) képesek, melyek a teljes éghajlati rendszer válaszát leírják egy feltételezett jövőbeli kényszerre. A modellszimulációkban a természetes éghajlatalakító folyamatok mellett figyelembe veszik az emberi tevékenység hatását is. Ennek alakulását nem ismerjük egy

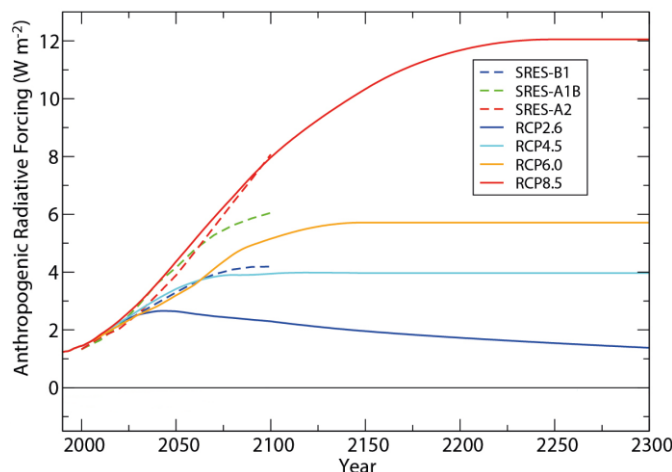
évszázadra előre, ezért forgatókönyveket (ún. scenáriókat) állítanak fel, amelyek az antropogén tevékenység eltérő jövőbeli fejlődési lehetőségeit jelenítik meg.

A regionális részletek feltárására a globális modellek eredményeit (melyek horizontális térbeli felbontása ritkán finomabb 100 km-nél) regionális éghajlati modellek (RCM: Regional Climate Model; Giorgi és Bates, 1989) alkalmazásával finomítjuk az érdeklődésünkre számot tartó területen, amihez a globális modellek eredményei határfeltételt szolgáltatnak. A finomabb felbontás lehetővé teszi a felszíni, és azon kisskálájú folyamatok pontosabb leírását, amelyek lényeges szerepet játszanak a regionális éghajlati viszonyok alakításában.

A globális és regionális éghajlati szimulációk számos bizonytalanságot tartalmaznak, melyek pontos ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy az eredményeket megfelelő módon tudjuk értelmezni. A szimulációk bizonytalanságai az alábbi tényezőkre vezethetők vissza:

1. Az éghajlati rendszer sajátossága a minden külső kényszer nélkül fellépő **belső változékonyság**. Ezt tapasztaljuk például akkor, amikor egy csapadék szempontjából rendkívülinek nem tekinthető időszakot néhány, a szokásosnál jóval szárazabb vagy nedvesebb év sorozata követ, de hosszabb, évszázados-évezredes időskálán is találunk erre példát. Ez tehát az éghajlati rendszer természetes, belső tulajdonsága.
2. A bizonytalanság másik lényeges összetevője **a modellek közelítő jellegéből ered**. Ez származhat egyrészt a különböző globális modellek adta határfeltételekből, valamint a fizikai folyamatok leírásának különbözőségéből. A modellek között a legnagyobb eltérés az ún. parametrizációkban van, melyek a térbeli rácsfelbontásnál kisebb skálán zajló fizikai folyamatok leírására használatosak. (A parametrizációkon keresztül megjelenő bizonytalanságok közül a csapadékképződéssel kapcsolatosak a legjelentősebbek, így elsősorban ennek köszönhető a csapadék szimulációk nagyfokú bizonytalansága.)
3. Az éghajlatra hatással bíró külső kényszerek egyik legbizonytalanabb eleme az **emberi tevékenység**, ugyanis ennek a XXI. században való alakulásáról nincs egyértelmű jövőképünk, csupán különböző forgatókönyveink vannak (**1. ábra**), melyek az egyes lehetőségeket a globális és regionális éghajlati modellek számára külső kényszerként, az üvegházhatású gázok és aeroszol részecskék koncentrációjának különböző jövőbeli meneteként, illetve sugárzási kényszer változásaként írják le. A globális modell az éghajlati rendszer egészének válaszát szimulálja a feltételezett külső kényszerre. Az IPCC 3. és 4. jelentésében alkalmazott kibocsátás-alapú SRES scenáriókat (Nakicenovic et al., 2000) az IPCC 5. jelentésében felváltották a sugárzási kényszer megváltozását leíró RCP forgatókönyvek (Moss et al., 2010). Ezek szintén részletesen megadják az aeroszol részecskék és az üvegházhatású gázok koncentrációjának lehetséges jövőbeli értékeit, viszont már figyelembe veszik a kibocsátás-csökkentési (ún. mitigációs) törekvéseket. A scenárió-család négy reprezentatív (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 és RCP8.5) tagját aszerint nevezték el, hogy az általuk leírt koncentráció-növekedés 2100-ra mekkora sugárzási kényszer változást (rendre 2,6, 4,5, 6 és 8,5 W/m²-t) jelent.

A numerikus szimulációkban lévő bizonytalanságok az ún. ensemble (együttes) technika segítségével számszerűsíthetők, aminek lényege, hogy nem egyetlen modellkísérletet végzünk, hanem több, egyforma bekövetkezési valószínűségűnek tekintett szimuláció eredményét együttesen értékeljük ki.



1. ábra. Az iparosodás (kb. 1765) előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer alakulása 2000 és 2300 között különböző RCP (teli görbék) és SRES (szaggatott görbék) forgatókönyvek alapján (IPCC AR5 WGI, 2013).

Szolgáltatunknál különböző projektek során elsőként az ALADIN-Climate4.5 (Csima és Horányi, 2008) és a REMO5.0 (Szépszó, 2014) regionális éghajlati modellekkel végeztünk a múltra vonatkozó kísérleteket, melyeket a modelltartomány kijelöléséhez végzett tesztek előztek meg. A kísérletek a Kárpát-medencét az ALADIN-Climate4.5 esetében 10, a REMO5.0 esetében pedig 25 km-es horizontális felbontással fedték le, a tartományon kívül zajló folyamatok leírásáért (azaz az oldalsó határfeltételekért) egyrészt az ERA-40 (Uppala et al., 2005) re-analízis adatbázis, másrészt pedig két különböző globális klímamodell felett.

A két modell validációs eredményeit az alábbiakban összegezzük:

- Az ALADIN-Climate4.5 modell tavasszal és ősszel alul-, nyáron pedig felülbecsülte a hőmérsékletet, ami a meleg (pl. hőségnap) és a hideg (pl. fagyos nap) hőmérsékleti indexek előfordulásának felülbecslésével párosult.
- A REMO5.0 modell a méréseknél 1–3 fokkal szisztematikusan magasabb hőmérsékleteket jelzett, a felülbecslés mértéke nyáron és ősszel volt a legmagasabb.
- A havi átlagos csapadékösszegek évi menetét az ALADIN-Climate4.5 jól követte, ugyanakkor a május–július időszakban jelentős felülbecslést mutatott. A nagy csapadékú napok mérések alapján számított előfordulását az ALADIN-Climate4.5 többnyire jól visszaadta. A száraz időszakok hosszát a referenciánál rövidebbnek jellemezte.
- A csapadék mennyiségét a REMO5.0 modell nyáron és ősszel elhanyagolható mértékű hibával jellemzi, ha az E-OBS (ENSEMBLES európai napi rácsponti megfigyelési adatbázis, 3.0 verzió) adatbázist vesszük referenciának. Azonban a CARPATCLIM

magasabb csapadékösszegeket mutat Magyarországra, mint az E-OBS, ennek következtében a REMO5.0 kisebb tavaszi és téli felülbecsléssel, illetve nagyobb alulbecsléssel jellemzi a július-szeptemberi csapadékviszonyokat.

Azonban ezekkel a modellekkel végzett szimulációk idővel több szempontból is fejlesztésre szorultak. Egyrészt az ALADIN-Climate integrálási területét kiterjesztettük, ugyanis a 4.5 verzióban megválasztott túl kicsinek bizonyult az eredmények országhatárokon átívelő (pl. hidrológiai célú) hatásvizsgálatok felhasználására, másrészt az elhelyezkedése sem volt megfelelő, ugyanis oldalsó peremei túl közel húzódtak magashegységekhez, mely a leskálázás során erősíti a fellépő numerikus zajokat. A REMO5.0 modell eredményei 25 km-es horizontális rácsfelbontáson álltak rendelkezésre, amely az akkori céloknak megfelelt, azonban a felhasználói igényeket figyelembe véve célszerűnek véltük, hogy az eredményeket 10 km-esre finomítsuk. A kísérletekben a modellek új verzióit alkalmaztuk: az ALADIN-Climate 5.2-es és a REMO 2015-ös modelleket.

A 3. fejezetben részletesen bemutatjuk az alkalmazott regionális klímamodelleket (3.1-3.2), az elvégzett modellkísérletek beállításait, jellemzőit (3.3). A 4. fejezetben a felhasznált kiértékelési eszközöket (4.1) és a megfigyelési adatbázist (4.2) ismertetjük. Az eredményeket az 5. fejezetben fejtjük ki, a 6. fejezetben pedig összefoglaljuk a legfontosabb megállapításokat.

3. Alkalmazott modellek

3.1. ALADIN-Climate

Az ALADIN-Climate egy hidrosztatikus, spektrális, korlátos tartományú regionális éghajlati modell, melynek jelenleg az 5.2-es verzióját (Colin et al., 2010; a továbbiakban ALADIN5.2) alkalmazzuk az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. A dinamikai egyenletek megoldásának módszere az ALADIN numerikus időjárás-előrejelző modell 32. ciklusán alapszik, a parametrizált folyamatok leírása (pl.: sugárzás, konvekció, mikrofizika) pedig az ARPEGE-Climate globális éghajlati modell 5. verziójából ered.

A hidrosztatikus modell elhanyagolja a vertikális irányú gyorsulásokat, ezért a vertikális sebesség diagnosztikus módon kerül kiszámításra. Ezen közelítést alkalmazó modellek legnagyobb horizontális felbontása 8–10 km lehet. A horizontális derivált-operátorokat spektrális módszerrel közelíti, melynek során az állapotváltozókat Fourier-sorok formájában felírva a differenciálást analitikus módon végzi. A prognosztikai változók időbeli fejlődésének meghatározásához a szemi-implicit és a szemi-Lagrange sémák kombinációját alkalmazza a modell, ami egy hosszabb integrálási időlépés használatát teszi lehetővé. A modell számításait egy Lambert-féle kúpvetületen definiált horizontális rácshálózaton végzi; vertikális irányban felszínkövető-nyomási hibrid koordinátákat használ, ami a felszín közelében követi a domborzatot, a légkör tetején tisztán nyomási rendszer, a közbülső hibrid modellszintek pedig folytonos átmenetet képeznek e két reprezentáció között. A modell prognosztikai változói a horizontális sebességkomponensek, a hőmérséklet, a specifikus nedvesség és a felszíni

légn nyomás. Az ALADIN5.2 korlátos tartományú modell, tehát az integrálási tartományon kívül zajló folyamatok hatását peremfeltételeken keresztül veszi figyelembe. A peremfeltételek csatolása a Davies séma (Davies, 1976) alkalmazásával egy 8 rácspont szélességű ún. relaxációs zónában történik, ahol a prognosztikai változóknak a „meghajtó” modell által a zóna külső peremén határfeltételként előírt és a regionális modell által a zóna belső határpontjaiban megadott értékei összesítődnek, kiszűrve az ezek eltéréséből eredő zajokat.

A hosszúhullámú sugárzást az RRTM (Rapid Radiation Transfer Model; Mlawer et al., 1997) séma írja le, mely figyelembe veszi a hosszúhullámú sugárzás emisszióját, abszorpcióját, és egyes légköri gázok, illetve aeroszolkok hatását. A sugárzási fluxus rövidhullámú komponensének számítása a Fouquart és Bonnel (1980) sémát követi, mely leírja a rövidhullámú sugárzás visszaverődését, szóródását és abszorpcióját, továbbá figyelembe veszi az egyes légköri nyomgázok elnyelését és a felhőzet módosító hatását is. A nagyskálájú felhőzet meghatározása Ricard és Royer (1993) statisztikus módszerével történik, az ebből származó nagyskálájú csapadékot pedig a Smith-séma (1990) írja le a modellben. A konvekció parametrizációja Bougeault (1985) sémáján alapul, mely leírja a konvektív felhőzet képződését, a felhőn belüli fel- és leáramlásokat, figyelembe veszi a felhő és környezete közötti légtömegcserét, a kihulló konvektív csapadék párolgását és az ehhez köthető hőcsere folyamatokat. A felszín és a légkör közötti turbulens hő- és nedvességáramok számítását a SURFEX (Masson et al., 2013) felszíni almodell végzi, melyben a növényzet és a tavak feletti áramok meghatározása külön séma szerint történik. Jelen modellkonfigurációban a természetes felszín felett az ISBA sémát (Interaction of Soil Biosphere Atmosphere; Noilhan and Planton, 1989) alkalmaztuk, a városi felszín sziklaként kerül figyelembevételre, míg a vízfelszín felett a Charnock formula (Charnock, 1955) biztosítja a felszíni fluxusok leírását (előre megadott felszíni hőmérsékleti értékek segítségével).

Az emberi tevékenység hatását különböző üvegházhatású gázok (CO₂, CH₄, N₂O, CFC-11, CFC-12) éves globális légköri koncentrációján, illetve bizonyos aeroszolkokon (szén, szulfát, organikus aeroszol, tengeri só, füst) keresztül vesszük figyelembe. Az aeroszolkok leírása egy 10 éves periódusra, havi felbontásban történik mind a múltbeli időszakra (Tegen et al., 1997), mind a scenáriókat alkalmazó időszakra (Szopa et al., 2013).

3.2. REMO

A REMO (Regional Model; Jacob and Podzun, 1997) egy rácsponti, korlátos tartományú, hidrosztatikus regionális éghajlati modell, melyet a Német Meteorológiai Szolgálat (DWD – Deutscher Wetterdienst) időjárás előrejelző modelljéből, az Europa-Modellből (Majewski, 1991) fejlesztettek ki úgy, hogy az Európa-Modell fizikai parametrizációs csomagját (mely a rövidtávú időjárás-előrejelzésekre alkalmas) az ECHAM4 (Roeckner et al., 1996) légköri cirkulációs modell parametrizációs csomagjával helyettesítették.

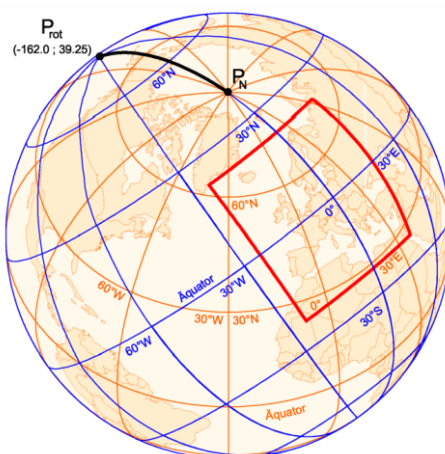
Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál jelenleg a REMO 2015-ös verzióját (továbbiakban REMO2015) használjuk. A modell prognosztikus változói a horizontális szélkomponensek, a felszíni légn nyomás, a hőmérséklet, a specifikus nedvesség és a

felhővíztartalom. A modell a hidro-termodinamikai egyenletrendszer egy elforgatott szférikus koordináta rendszerben oldja meg, mely módszer lényege, hogy a tartományt az Egyenlítő fölé transzformáljuk úgy, hogy az északi sarkot eltoljuk (pl. a **2. ábrán** az Északi sark új koordinátája: é.sz. 39.25°, ny.h. 162°, mely transzformációval a piros négyzettel kijelölt tartomány közepe épp az elforgatott koordináta rendszer egyenlítőjére esik). A transzformáció számos előnnyel bír: az Egyenlítő fölött egyrészt a rácspontok (amit a földrajzi szélesség és hosszúság koordinátákkal definiálunk) közötti távolság x és y irányban közel azonos, sőt a magasabb szélességekhez képest nagyobb, ami nagyobb időlépcsőt enged meg. A modell horizontális irányban a szférikus Arakawa-C rácsot alkalmazza, mellyel a szélkomponensek kivételével a prognosztikus változókat a rácscella közepén számítja, míg a szélkomponenseket a rácscella határain. Az ALADIN5.2 modellhez hasonlóan vertikális irányban nyomási-felszínkövető hibrid koordináta rendszert használ, az oldalsó határfeltételek csatolása pedig szintén a Davies séma (Davies, 1976) alkalmazásával történik egy 8 rácspont szélességű relaxációs zónában.

A talajhőmérséklet kiszámítása öt diszkrét rétegben történik a diffúziós egyenlet megoldásával (Warrilow et al., 1986). A REMO-ban definiált talajrétegek alsó határai 6,5, 25, 91 centiméterrel, valamint 2,9 és 5,7 méterrel a felszín alatt helyezkednek el. A talaj hidrológiai folyamatainak leírásánál három, a hóra, a növényzet által felfogott csapadékmennyiségre és a talajnedvességre vonatkozó egyenletet oldunk meg. A talajnedvességet a lehulló csapadék, a felszíni párolgás, a talajban történő transpiráció, a hó olvadása és a felszíni lefolyás határozza meg. A felszíni vertikális turbulens fluxusok meghatározása a Monin-Obukhov séma (1954) szerint alakul. A nagyskálájú felhőzet és csapadék leírása Sundqvist (1978) módszerét követi, a konvekció parametrizációja pedig a Tiedtke-féle tömegfluxus sémára (1989) támaszkodik, Nordeng (1994) módosításaival. A sugárzási folyamatok kezelésére a Morcrette et al. (1986) által kidolgozott eljárást adaptálták a modellbe, majd több üvegházgáz, az ózon és az aeroszolok elnyelő-szóró hatásának figyelembevételével bővítették. Nagy számításigénye miatt a sugárzási parametrizációt a REMO óránként hívja meg. Ezzel az egyszerűsítéssel azonban nem veszítünk lényeges információt, mert a sugárzási folyamatok alapvetően hosszú távon fejtik ki hatásukat.

Az ALADIN-hoz hasonlóan öt üvegházhatású gáz (CO₂, CH₄, N₂O, CFC-11, CFC-12) éves globális átlagát veszi figyelembe, bár az aeroszolat egyszerűbben kezeli, Tanré et al. (1984) szerint. Az aeroszolok különböző forrásait is figyelembe veszi (tengerekből, szárazföldről, sivatagokból, városokból és a sztratoszférából), de sem az évszakos ciklusukkal, sem a tendenciájukkal nem számol.

A REMO modellről részletes leírást ad Szépszó (2014), a két vizsgált modell legfontosabb jellemzőit az **1. táblázatban** foglaljuk össze.



2. ábra: A REMO regionális klímamodell elforgatott szférikus koordináta rendszere (kék háló), amelyben az Északi sark koordinátája: k.h. 162,0°, é.sz. 39,25° (Buntemeyer et al.).

1. táblázat: Az ALADIN 5.2 és a REMO2015 regionális klímamodellek legfontosabb jellemzői.

	ALADIN5.2	REMO2015
Kiindulási modell	Dinamika: ALADIN NWP	Dinamika: Europa-Model
	Parametrizációk: ARPEGE-Climat AGCM ¹	Parametrizációk: ECHAM4 AGCM
Dinamika		
Horizontális deriváltak kezelése	Spektrális módszer	Véges differencia módszer
Vertikális koordináta rendszer	Felszínkövető–nyomási hibrid	
Vertikális irányú gyorsulás leírása	Hidrosztatikus közelítés	
Prognosztikus (időtől függő) változók	Horizontális szélesség-komponensek felszíni légnyomás, hőmérséklet, specifikus nedvesség	Horizontális szélesség-komponensek, felszíni légnyomás, hőmérséklet, specifikus nedvesség, felhővíztartalom
Időbeli sémák	Szemi-implicit és a szemi-Lagrange sémák kombinációja	Leapfrog séma szemi-implicit korrekcióval és Asselin-szűrővel
Fizikai parametrizációk		
Sugárzás	Rövidhullámú sugárzás: Fouquart and Bonnel (1980) Hosszúhullámú sugárzás: Mlawer et al. (1997)	Rövidhullámú sugárzás: Fouquart and Bonnel (1980) Hosszúhullámú sugárzás: Morcrette (1989)
Felszíni modell	SURFEX (Masson et al., 2013) szerinti tiling módszer: 3	Tiling módszer: 3-féle felszín típus (föld-, víz- és

¹ AGCM: Atmospheric General Circulation Model

	felszín típus (természetes, tenger/óceán és tavak) aránya egy rácscellán belül; 3 talajréteg	jégfelszín) aránya egy rácscellán belül Talajhőmérséklet: 5-rétegű séma Talajnedvesség: Manabe (1969)
Vertikális diffúzió és turbulens fluxusok	Természetes felszín felett: ISBA séma (Noilhan and Planton, 1989) Vízfelszín felett: Charnock formula (1955)	Monin and Obukhov (1954)
Konvekció	Bougeault (1985)	Tiedtke (1989)

3.3. Modellkísérletek

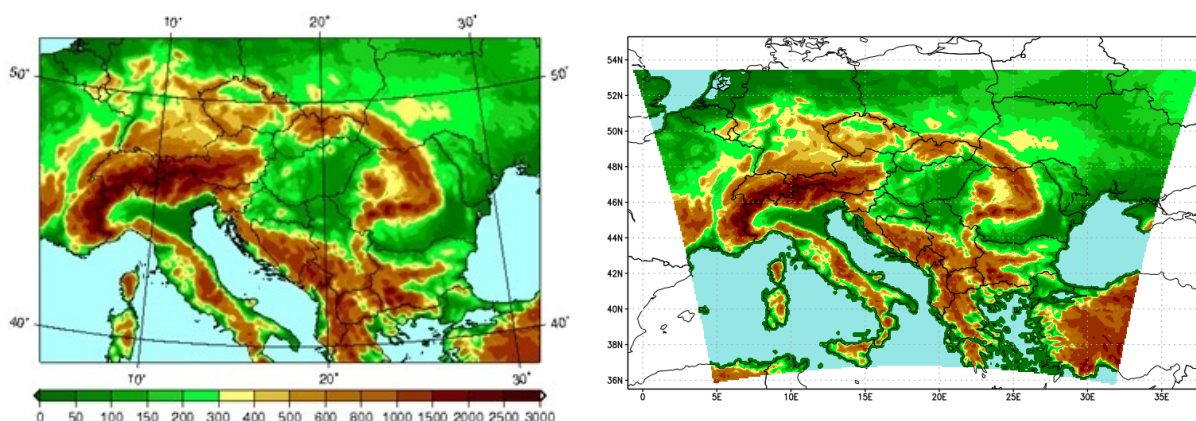
A klímamodellezés egyik alapvető célja, hogy számszerű becsléseket adjunk a jövő éghajlatának várható alakulására. Ahhoz, hogy ezek a becslések objektívan értékelhetők legyenek, az alkalmazott éghajlati modelleket validációs eljárásnak kell alávetnünk, mely során a modelleket egy néhány évtizedes múltbeli (ún. referencia) időszakra futtatjuk, majd megvizsgáljuk, hogy a modelleredmények milyen pontossággal reprodukálják ezen időszak éghajlati jellemzőit. Kétféle szimulációt hajtottunk végre mind az ALADIN5.2, mind a REMO2015 modellekkel:

1. Az első kísérlet során az ECMWF (European Center of Medium Range Weather Forecast) ERA-Interim re-analízisei (Dee et al., 2011) szolgáltatották a határfeltételeket mindkét modell számára. A re-analízisek a hidro-termodinamikai egyenletrendszer prognosztikai változóit tartalmazó (globális vagy regionális) meteorológiai mezők, melyeket mérési információkból és rövidtávú előrejelzésekből adatasszimilációs módszerek segítségével állítanak elő, s a 3-dimenziós légkör múltbeli állapotának legpontosabb reprezentációját adják. Az ERA-Interim adatbázis horizontális rácsebontása hozzávetőlegesen 80 km, 60 vertikális szintet tartalmaz, és az 1979. január 1.–2019. augusztus 31. időszakot fedi le 6-órás időbeli sűrűséggel.
2. A jövőre vonatkozó vizsgálatoknál az oldalsó peremfeltételeket – mérések hiányában – mindkét modell számára egy korábban futtatott, Föld rendszer modell (ESM: Earth system model) mezőinek dinamikus leskálázásával előállított ALADIN, illetve REMO szimuláció eredményei biztosították, azaz mindkét esetben egy szintén korlátos tartományú éghajlati szimulációt skáláztunk le 10 km-es felbontásra. A közvetlen határfeltételek 50 km-es felbontású térbeli rácson, az ALADIN esetében 31, míg a REMO esetében 27 vertikális szinten, 6-órás időbeli sűrűséggel álltak

rendelkezésre, ezek számára pedig rendre a CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2013) és a MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013) modell adta a kezdeti- és peremfeltételeket.

Az eltérő peremfeltételeknek elvi jelentősége van. Mivel a re-analízisek készítése során mérési információkat is felhasználnak, az ezekből előállított határfeltételek (többnyire) csekély hibával közelítik a valóságot. Emiatt a re-analízis határfeltételekkel végrehajtott szimuláció elsősorban a regionális modell hibáiról és erősségeiről ad információt, ami elengedhetetlen annak fejlesztéséhez. Ezzel szemben a második típusú szimuláció a regionális modell és az azt meghajtó modell együttes viselkedését jellemzi. A re-analízis határfeltételekkel előállított eredmények ezen túlmenően leírják egy adott időszakban az egyes évek jellemzőit. A globális klímamodell-eredmények leskálázásán alapuló szimuláció azonban erre nem képes, ugyanis a re-analízisekkel ellentétben csak a légköri gázok koncentrációján keresztül van kapcsolatban a valósággal, így az eredmények csupán az adott térség éghajlati viszonyait képesek reprezentálni. A jövőre vonatkozóan csak az utóbbi típusú éghajlati szimulációt lehetséges készíteni, ezért ezen kísérletek validációja szintén fontos.

Az integrálási tartományokat a **3. ábra**, a kísérletek jellemzőit pedig az **2. táblázat** mutatja.



3. ábra: A 10 km-es felbontású ALADIN5.2 (bal) és REMO2015 (jobb) modellszimulációk integrálási tartománya és domborzata.

2. táblázat: A modellkísérletek jellemzői.

	ALADIN5.2_ ERA1	ALADIN5.2_ CNRM	REMO2015_ ERA1	REMO2015_ MPI
Határfeltétel	ERA-Interim	CNRM-CM5 → ALADIN5.2	ERA-Interim	MPI-ESM-LR → REMO2015
Határfeltétel horizontális felbontása	80 km	50 km	80 km	50 km
Horizontális felbontás	10 km			
Vertikális szintek száma	31		27	
Időszak	1980–2000	1950–2005	1980–2000	1950–2005

4. Módszertan

4.1. Validációs eszközök

A validáció során a modelleredményeket mérési adatbázisokkal hasonlítjuk össze, s a modellek bevalását különböző statisztikai mutatók kiszámításával határozzuk meg. Vizsgáljuk, hogy mekkora az eltérés a modelleredmények és a mérések időbeli átlagértékei között, a szimulációs eredmények térbeli és időbeli eloszlása mennyire van összhangban a megfigyelésekkel, továbbá mennyire adja vissza a modell a meteorológiai változók változékonyságát. Jelen validáció során két meteorológiai változóra, a hőmérsékletre és csapadékra, valamint a belőlük származtatott úgynevezett éghajlati indexekre (**3. táblázat**) koncentráltunk, s az 1981–2000 referencia-időszakra végeztük el azt éves, évszakos, havi és napi adatok felhasználásával. Az alkalmazott kiértékelési eszközöket és módszertani jellemzőket az alábbiakban foglaljuk össze:

- **Hiba és szignifikancia:** minden rácspontban kiszámítottuk a modelleredmények megfigyelésektől vett átlagos éves és évszakos eltéréseit. Az összevetést a referencia adatbázis (CarpatClim-HU) 10 km-es rácshálózatán végeztük el, így elkerültük, hogy a megfigyelések finomabb felbontásra történő interpolációjával zajt hozzunk az eredményekbe. A térképeken az alul-, illetve felülbecslés mértéke a színskála alapján leolvasható. Az átlagos hibák meghatározása mellett szignifikancia vizsgálat segítségével számszerűsítettük, hogy a rácspontokban kapott átlagos hibaérték miként viszonyul a referencia-időszak évszakos és éves átlag- vagy hibaértékeinek szórásához. Ehhez kétoldali Welch-próbát (a re-analízis meghajtású szimulációk esetében t-próbát) hajtottunk végre 0,05-ös szignifikancia-szinttel rácspontonként, vagyis a próbastatisztikát és a hozzá tartozó szabadsági fokot, illetve a kritikus értéket minden egyes rácspontban kiszámoltuk. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat,

ahol a próbastatisztika meghaladta az adott kritikus értéket, azaz ahol az eltérés szignifikáns.

- Átlagos hiba: kiszámítottuk a modelleredmények megfigyelésektől vett éves és évszagos hibáinak magyarországi átlagértékeit, s ezeket táblázatban vagy grafikonon jelenítettük meg.
- Átlagos térbeli és időbeli szórás: a térbeli szórás esetében a referencia-időszakra vonatkozó éves és évszagos átlaghőmérséklet, valamint csapadékösszeg magyarországi rácpontokban felvett értékeinek az országos átlag körüli szórását számítottuk ki, míg az időbeli szórás esetében az éves és évszagos országos átlagok évenkénti értékeinek a referencia-időszak átlagértéke körüli szórását határoztuk meg.
- Éves menet havi átlagértékekkel: összevetettük a havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg referencia-időszakra kiszámított átlagos magyarországi értékeit a modelleredmények, illetve a mérések tekintetében.
- Évenkénti (vagy 20-éves) menet: összevetettük az éves és évszagos átlaghőmérséklet és csapadékösszeg magyarországi átlagának évenkénti értékeit a modelleredmények, illetve a mérések tekintetében. Mindezt csak a re-analízis határfeltételekkel készült kísérletekre végeztük el, ugyanis ahogyan korábban említettük, a GCM-meghajtású kísérletek nem tükrözik vissza az egyedi évek jellemzőit, így ezekre nincs értelme évenkénti összehasonlítást tekinteni. Ennek megfelelően utóbbi kísérletek csak 20-éves átlag formájában jelennek meg az ábrákon, melyeket a 20-éves megfigyelési átlaghoz hasonlítottunk.
- Boxplot/box-whisker diagram: ezek a diagramok lehetővé teszik az éves, évszagos, és havi magyarországi átlagok adott 30-éves időszakon belüli eloszlásának összehasonlítását a mérési adatokra és a modelleredményekre (Tukey, 1977; McGill et al., 1978). A diagramokon modellkísérletenként különböző színnel jelölt téglalapok alsó és felső határai rendre a minta alsó és felső kvartiliseit (25. és 75. percentilis), míg a dobozok közepén lévő vonal a mediánértékeket (a minták középső elemét) jelölik. A dobozok alatt és felett lévő függőleges szaggatott vonalak a referencia-időszak 20 éve alatt előforduló minimális és maximális éves és évszagos átlagértékekig nyúlnak (azaz a fennmaradó 25–25 %-ot fedik le). A téglalap, illetve a függőleges szaggatott vonal hossza az évek közötti változékonyság nagyságára utal az adott modellkísérletben, valamint a megfigyelésekben.
- Taylor-diagram: a diagram lehetőséget ad a modellszimulációk gyors összevetésére, mivel egyszerre mutatja a mérési idősor időbeli szórásával normalizált mérési és szimulált idősorok korrelációját, szórásuk arányát, s a modellszimulációk normalizált négyzetes hibáját (Taylor, 2001). A Taylor-diagramon sugárirányban a szórások aránya található, a függőleges tengellyel bezárt szög a korrelációs együttható értékét jelzi. A magyarországi méréseket egy fekete kereszt reprezentálja, az egyes modellkísérletek eredményeit pedig különböző szimbólumok, illetve színek. A referencia-pont körüli koncentrikus körök a négyzetes hibát jelölik. Azok a szimulációk, amelyek szimbólumai a fekete keresztet közelebb helyezkednek el, jobban reprodukálják a mért értékeket,

mint amelyek távolabb vannak. A felhasznált adatsorok tekintetében a bemenő adatokat a hőmérséklet és a csapadék magyarországi 20-éves havi átlagértékei adták, s e két meteorológiai változóra vonatkozó eredményeket közös diagramon mutatjuk be. A körök a hőmérsékletre, a háromszögek a csapadékra utalnak, míg az egyes modellszimulációkat színezéssel különböztettük meg.

- Scatter-plot diagramok éghajlati indexekre: a napi adatok felhasználásával különböző hőmérsékleti és csapadék éghajlati indexek éves és évszakos gyakoriságát vizsgáltuk. Ehhez meghatároztuk a napi modelleredményekből és mérésekből a teljes időszakra vonatkozó éves és évszakos gyakoriságokat, s az eredményeket scatter-plot diagramokon jelenítettük meg a magyarországi rácspontokra, az x-tengelyen a méréseket, az y-tengelyen a modelleredményeket ábrázolva. Ideális esetben a szimuláció–mérés párokat reprezentáló pontok az átló közelében helyezkednek el. Ha viszont ezek az y-tengelyhez vannak közelebb, akkor a modell felülbecsli az adott index gyakoriságát, míg ha a pontok az x-tengelyhez esnek közelebb, akkor az eredmény alulbecslést jelent.
- Scatter-plot diagramok szimulációs hibákra: ehhez a diagramhoz a 20-éves havi átlagok eltérését használtuk fel a modellszimulációk és a mérési adatbázis tekintetében. Az x-tengelyen a hőmérsékleti eltérést, az y-tengelyen a csapadékösszeg eltérést ábrázoljuk. Az egyes hónapokat különféle színekkel és jelekkel ábrázoltuk, ahol a téli hónapokat a kék, a tavasziakat a zöld, a nyáriakat a piros, az ősziakat pedig a barna árnyalattal jelöltük. A modellek akkor reprezentálják legjobban a valós helyzetet, amennyiben a pontok a 0 értékű vonalak kereszteződéséhez vannak közelebb. Ez az ábratípus azt mutatja meg, hogy a hőmérsékleti és csapadék eredmények szimulációs hibái között milyen kapcsolat áll fenn.

3. táblázat: A vizsgált hőmérsékleti és csapadékindexek.

Index	Név	Definíció	Mértékegység
FD	Fagyos napok száma	$T_{\min} < 0 \text{ °C}$	nap
SU	Nyári napok száma	$T_{\max} > 25 \text{ °C}$	
TX30GE	Hőségnapok száma	$T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$	
CDD	Egymást követő száraz napok maximális száma	Az a leghosszabb időszak, amikor $R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$	
RR1	1 mm-t meghaladó csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$	
RR10	Nagy csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 10 \text{ mm}$	

4.2. Megfigyelési adatok

Ahogy az előző, 4.1 fejezetben is kihangsúlyoztuk, a modellszimulációk eredményeit megfigyelési adatbázisokhoz hasonlítjuk. Ebben a validációs elemzésben a CarpatClim-HU (Bihari et al., 2017) adatbázist használtuk, mely egy olyan napi felszíni megfigyelési adatokat tartalmazó adatbázis, melyet speciálisan meteorológiai célokra kifejlesztett homogenizációs és interpolációs módszerek (Szentimrey, 2008; Szentimrey és Bihari, 2007) alkalmazásával állítottak elő egy 0,1 fokos (kb. 10 km-es) felbontású, Magyarországot lefedő horizontális rácson.

A REMO validációs vizsgálataihoz a CarpatClim-HU egy olyan változatát használtuk fel, melyben az értékeket a rácshálózat által közrezárt területekre átlagolt (azaz boxátlagos) formában állították elő. Az ALADIN-Climate validációja korábban készült, melyhez a rácsponti (azaz nem boxátlagos) megfigyelési adatbázis került felhasználásra. Annak érdekében, hogy a két modell közös kiértékelése minden tekintetben konzisztens legyen egymással, összehasonlítottuk a megfigyelési adatbázis e két formáját, melynek során az eltérés elhanyagolható mértékűnek bizonyult (**4. táblázat**). Mindemellett fontos megjegyezni, hogy jelen beszámolóban a CarpatClim-HU önálló, megjelenített mennyiségeinek (pl. időbeli szórása, stb.) kiszámolása során a boxátlagos változatot tekintettük.

4. táblázat: A CarpatClim-HU boxátlag és rácsponti adatokból számított éves és évszakos országos átlagok eltérése.

	Csapadékösszeg Relatív eltérés (%)	Hőmérséklet eltérés (°C)
Éves	0,6	-0,01
Tavaszi	0,8	-0,04
Nyári	1,2	-0,00
Őszi	-0,9	0,01
Téli	1,9	-0,02

5. Eredmények

5.1. Hőmérséklet

Korábbi vizsgálatok során, melyekben külön-külön értékeltük az ALADIN5.2 és a REMO2015 modelleket, megállapítottuk, hogy az ALADIN5.2 Európa nagy részén alulbecsli, míg a REMO2015 inkább felülbecsli az átlaghőmérsékletet. Az ALADIN5.2 esetében a nyári évszakban ez az alulbecslés mérsékeltebben jelentkezik, míg a kontinens keleti-északkeleti, illetve középső tájain (így hazánkban is) inkább a pozitív előjelű hibák jellemzőek. Az európai REMO2015_MPI eredményeiben előfordul alulbecslés, a re-analízis meghajtású szimuláció eredményei azonban továbbra is felülbecslést mutatnak. A legnagyobb mértékű eltérések a REMO2015 modellben – mind pozitív, mind negatív irányba – télen fordulnak elő.

Magyarországra vonatkozóan az ALADIN5.2 két kísérletének éves eredményei egyaránt enyhe, 0,6 fokos alulbecslést mutatnak (**5. táblázat**), mindemellett egyértelmű nyári felülbecslés, a többi évszakra pedig alulbecslés figyelhető meg. Évszakos viszonylatban a GCM meghajtású ALADIN5.2 nagyobb negatív és nagyobb pozitív hibákkal terhelt, melyek az éves statisztikát tekintve kiegyenlítik egymást. A REMO2015-ben a felülbecslés alól az északkeleti országrész képez kivételt mind éves, mind évszakos tekintetben, valamint a Duna völgye, a Balaton és a Tisza-tó térsége, ahol a vízfelszín felett alulbecslés is megjelenik, mely inkább az MPI-ESM-LR kezdeti feltételekkel futatott kísérletre jellemző. A nyári felülbecslés mértéke átlagosan 0–2,5 °C (**5. táblázat**), ahol a legkisebb eltérés a GCM meghajtású REMO2015 szimulációhoz tartozik. A többi évszakban azonban az abszolútértékben kisebb eltérések a re-analízis határfeltételekkel készült szimulációkhoz köthetők. A hibák hazánk nagy részén szignifikánsak (**4. ábra**), eltekintve az ALADIN5.2 néhány rácspontjától a déli és keleti országrészben, valamint a REMO2015 több rácspontjától a keleti és középső országrészben, ahol azonban a megfigyelésektől vett eltérés nem haladja meg a 0,5 fokot. A különböző kezdeti feltételekkel meghajtott kísérletek között nagyobb különbség nyáron és télen tapasztalható. A REMO2015 esetében nyáron az ERA-Interim-mel, télen az MPI-ESM-LR globális klímamoddellel futatott kísérletnél figyelhető meg szignifikáns felülbecslés Magyarország egész területére.

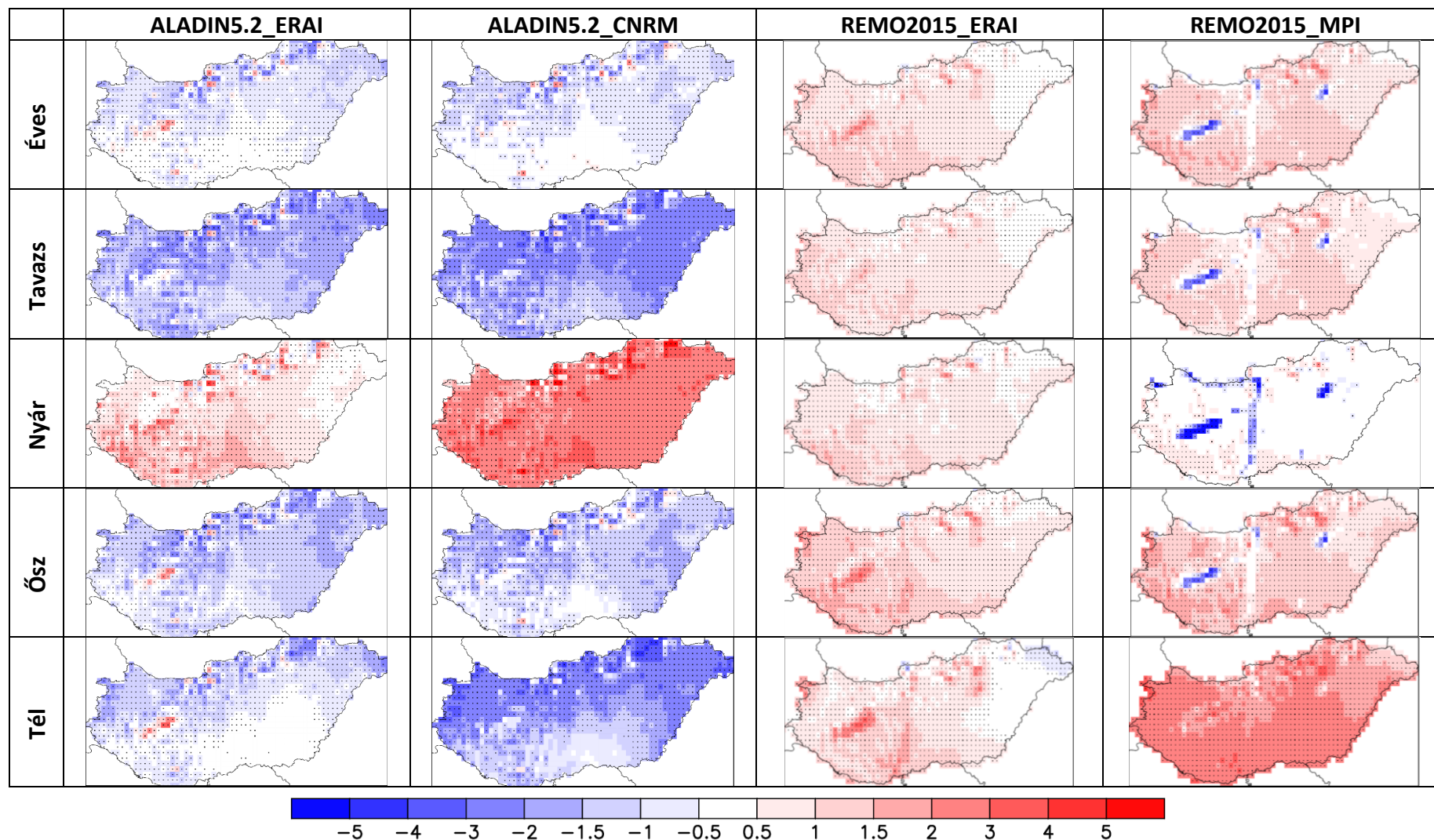
Számos magyarországi mezőből kiemelkedik a Balaton térsége: az ERA-Interim határfeltételekkel előállított modelleredmények esetében a Balaton felett felülbecslést – a REMO2015 mellett a környező rácspontokban megmutatkozóhoz képest nagyobb mértékű felülbecslést – tapasztalunk mindkét regionális modellben. Ennek oka, hogy a magyarországi vizsgálatokhoz referenciaként használt CarpatClim-HU hőmérsékleti mérésekben a Balatonra eső rácspontokban nem jelenik meg a tó hatása, mivel állomási megfigyelések – melyekből az interpoláció történt – csak a szárazföldön állnak rendelkezésre. Ellenben mindkét regionális klímamodell valamilyen formában figyelembe veszi a vízfelszín jelenlétét: az ALADIN5.2 modellben a vízfelszín hőmérséklete a meghajtó mezőből származik, a rácscellákon belüli vízfelszín arányát a SURFEX felszíni almodell segítségével határozzuk meg, s a felette zajló fluxusok leírására külön parametrizációt alkalmazunk; a REMO2015 modell pedig a Balti-, valamint a Földközi-tenger hőmérsékletének átlagát veszi a kisebb kontinentális vízfelületekre eső rácspontokban. Így mindkét modell a tó felszínére a valósághoz (ami jelen esetben NEM egyezik meg a mérésekkel) közelebbi hőmérsékleti értékeket szolgáltat. A REMO2015 GCM meghajtású eredményeinél is megjelennek a tavak és folyók, azonban egyrészt, sokkal pontosabban, másrészt, ellentétes előjellel. Ennek oka a REMO modell explicit tó parametrizációjának hiánya és a meghajtó modellben már benne lévő hiba. A hibák csökkentése érdekében figyelem kívül hagytuk a folyókat és tavakat magukba foglaló rácspontokat az átlagolás során, azonban így sem értünk el szignifikánsan különböző eredményt. Ezért jelen beszámolóban minden REMO2015 eredmény a tavakat és folyókat lefedő rácspontok beszámításával került kiértékelésre.

A hőmérséklet hazánkban jellemző átlagos éves menetét mindegyik adatsor jól visszatükrözi az 1981–2000 időszakra (**5. ábra**): a legalacsonyabb értéket januárra, míg a legmagasabbat júliusra (kivéve a REMO2015_MPI, mely augusztusra) adják. Mindkét ALADIN5.2 szimuláció szeptembertől májusig 1–2°C-kal alulbecsli a hőmérséklet havi átlagértékeit, majd – ahogyan azt már a térképeken is láthattuk – júniustól augusztusig felülbecslés jellemző, ami elérheti a 4°C-ot. A REMO2015 ezzel szemben a szeptembertől májusig tartó időszakban alulbecsli a havi átlagértékeket, a re-analízissel meghajtott kísérlet a nyári hónapokban szinte együtt fut a mérésekkel, az MPI-ESM-LR globális klímamodell meghajtott szimuláció pedig enyhe felülbecslést mutat. A CarpatClim-HU hőmérsékleti menetét nem csak nyáron, hanem egész évben legjobban a REMO2015 ERAI követi, mely eredményt a Taylor-diagram (**6. ábra**) is alátámasztja: bár a havi átlaghőmérséklet-értékek korrelációja mind a négy kísérlet esetében eléri a 99%-ot és körülbelül 0,9–1,2 közötti szórás aránnyal rendelkezik, elhanyagolható négyzetes hibával, a REMO2015 ERAI eredmények után meglepő módon nem a re-analízis meghajtott ALADIN5.2, hanem a GCM meghajtott REMO2015 szimuláció produkálta a legjobb eredményt.

Az évszakos átlaghőmérséklet évenkénti értékeit csak a re-analízisekkel meghajtott kísérletek eredményeire tudjuk megfigyelésekkel összevetni, ugyanis az egyes múltbeli évek sajátosságait egy globális klímamodell eredményeinek leskálázása nem képes visszaadni. Mindkét modell esetében megállapíthatjuk, hogy azok a hibajellemzők, amik a térképeken megfigyelhetők, szisztematikusak, azaz nemcsak 20-éves átlagban, de minden évben érvényesek: az ALADIN5.2 a nyár kivételével mindig alulról, a REMO2015 pedig felülről közelíti az átlaghőmérsékletet (**7. ábra**). Hasonló átlagos hibát mutatnak a globális modelleredmények leskálázásával készített kísérletek is, eltekintve nyáron a REMO2015_MPI átlagtól, mely szinte teljesen egybeesik a CarpatClim-HU átlaggal. A megfigyelések menetét mindkét ERA-Interim-es szimuláció alapvetően jól követi, a melegebb és a hűvösebb éveket egyaránt visszaadják: a legjobban a téli évszakban teljesítenek, a legkevésbé pedig nyáron.

A szórás mindkét modell esetében mind a négy évszakban 1 feletti, leszámítva a nyarat a REMO2015 modellel, azonban ekkor a CarpatClim-HU 0,8 szórásértékéhez ezek az 1 alatti értékek állnak közelebb. Az évek közötti legnagyobb változékonyság mind a CarpatClim-HU, mind a modellkísérleteket tekintve télen adódott: ezt a box-whisker diagramok (**8. és 9. ábra**) mellett az időbeli szórásértékek is alátámasztják: a legnagyobb szórásértéket (2 °C) az ALADIN5.2_CNRM adta (**6. táblázat**), illetve e szimuláció mellett adódik minden téli hónapban a legelnyúltabb minimum–maximum intervallum a **9. ábra** box-whisker diagramján. A REMO2015 szimulációk és a CarpatClim-HU változékonysága hasonlóan alakul, eltekintve a téltől és az ősztől: előbbi esetén a re-analízissel és a GCM-mel meghajtott eredmények is (utóbbi nagyobb mértékben) elmaradnak a mérésektől; utóbbi évszakban viszont a REMO2015 (főleg az MPI-ESM-LR GCM-mel meghajtott) szimuláció nagyobb változékonyságot mutat, mint a mérés. Az ALADIN5.2 modellben a mértnél magasabbak a szórásértékek, kivéve télen az ERA-Interim meghajtással (**6. táblázat**). Tehát a szórásokat tekintve inkább a re-analízissel meghajtott szimulációk állnak közelebb a referencia adatbázis értékeihez, míg az ALADIN5.2_CNRM túlmutat, a REMO2015_MPI pedig elmarad a változékonyságot illetően.

A nyári napok és a fagyos napok számának térképes összehasonlításánál elmondható, hogy a modellkísérletek általában alulbecsülték a referencia adatbázist (**10. ábra**), mely különbség a REMO2015 kísérleteknél nagyobb. E két hőmérsékleti index esetében a legjobban teljesítő kísérlet az ALADIN5.2_CNRM, míg a legrosszabbul (akár 60–80%-os eltérés a mérésektől) a REMO2015_MPI volt. Az országos átlagos eltérésnél (**7. táblázat**) az ALADIN5.2 és a REMO2015 kísérletek alulbecslése látható, éves szinten a legkisebb eltérést a CarpatClim-HU adatbázistól szintén a ALADIN5.2_CNRM mutatta, míg a legnagyobbat a REMO2015_MPI. Hőségnapok esetén a modellszimulációk közül az ALADIN5.2 ERAI teljesített a legjobban (**11. ábra**), az ország nyugati felében enyhe felülbecsléssel, a keleti felében pedig enyhe alulbecsléssel, míg az ALADIN5.2_CNRM felülbecsülte, a két REMO2015 kísérlet pedig alulbecsülte a hőségnapok számát. Ezen hőmérsékleti éghajlati index esetében a REMO2015 szimulációk térképes összehasonlításánál nem látható markáns különbség a két kísérlet között, és az országos átlagoknál is elenyésző volt a különbség. A REMO2015 szimulációk az átlaghőmérsékletet jól közelítik, azonban a hőmérsékleti maximumok és minimumok külön-külön jelentős szisztematikus hibával terheltek (maximum esetén alulbecslés, minimum esetén felülbecslés), emiatt a hőmérsékleti klímaindexek nagyon pontatlanok.



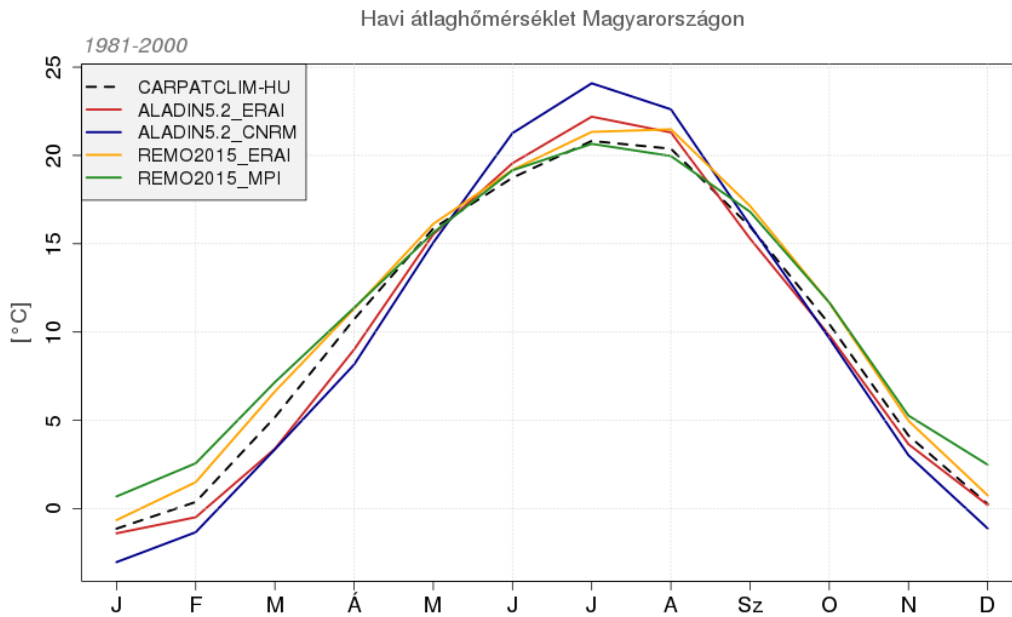
4. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos eltérése (°C) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. Az ALADIN5.2 esetében a rácsponti CarpatClim-HU, míg a REMO2015 esetében a box-átlagos CarpatClim-HU került figyelembevételre. A szignifikáns eltérések helyét pontozással jelöltük.

5. táblázat: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos magyarországi átlaghőmérséklet átlagos eltérése (°C) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

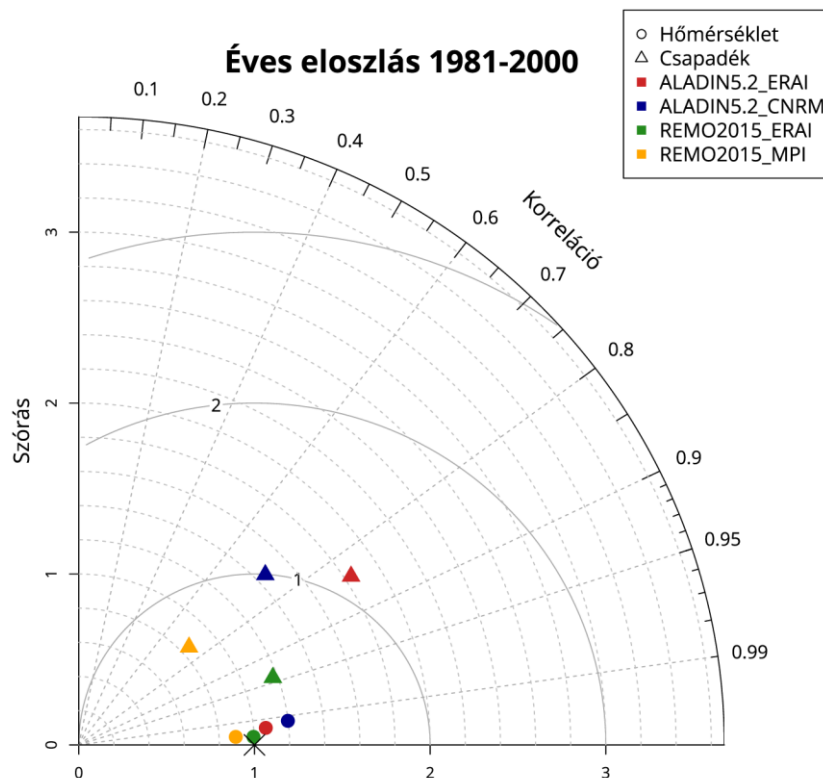
Hőmérséklet átlagos eltérése (°C)					
	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
ALADIN5.2_ERAI	-0,6	-1,5	0,9	-1,1	-0,7
ALADIN5.2_CNRM	-0,6	-2,0	2,5	-1,1	-1,9
REMO2015_ERAI	0,8	0,8	0,7	1,0	0,7
REMO2015_MPI	0,9	0,8	0	1,1	2,1

6. táblázat: A CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos magyarországi átlaghőmérséklet térbeli és időbeli szórása (°C) az 1981–2000 időszakban.

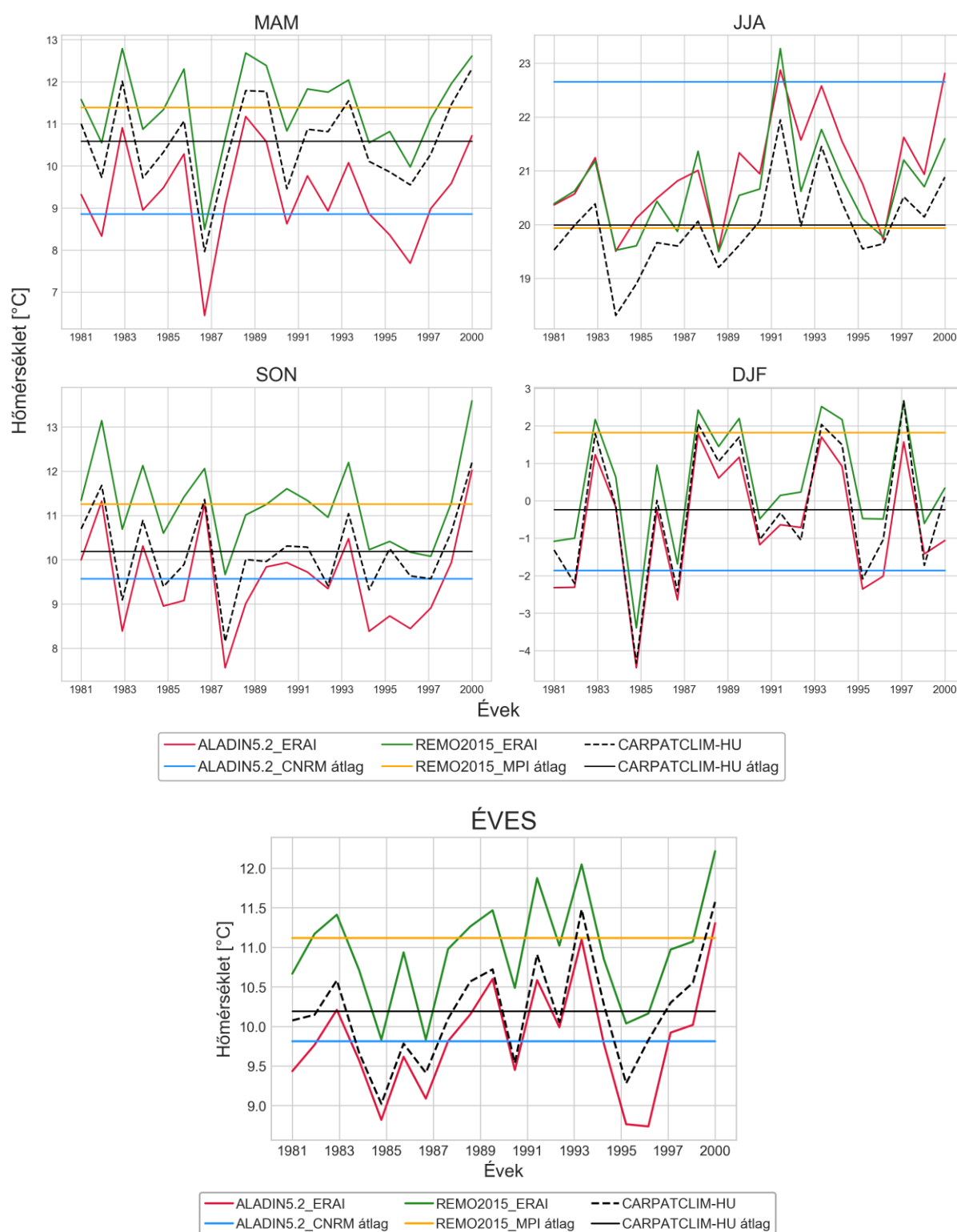
Hőmérséklet időbeli szórása (°C)					
	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
CARPATCLIM-HU	0,7	1,0	0,8	0,9	1,8
ALADIN5.2_ERAI	0,7	1,1	1,0	1,1	1,7
ALADIN5.2_CNRM	0,9	1,2	1,5	1,1	2,0
REMO2015_ERAI	0,7	1,0	0,9	1,0	1,6
REMO2015_MPI	0,5	1,0	0,8	1,3	1,3
Hőmérséklet térbeli szórása (°C)					
CARPATCLIM-HU	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7
ALADIN5.2_ERAI	0,8	0,7	0,9	0,8	1,1
ALADIN5.2_CNRM	0,8	0,7	0,7	0,7	1,2
REMO2015_ERAI	0,8	0,7	0,8	0,8	1,2
REMO2015_MPI	0,9	0,9	1,4	1,0	1,0



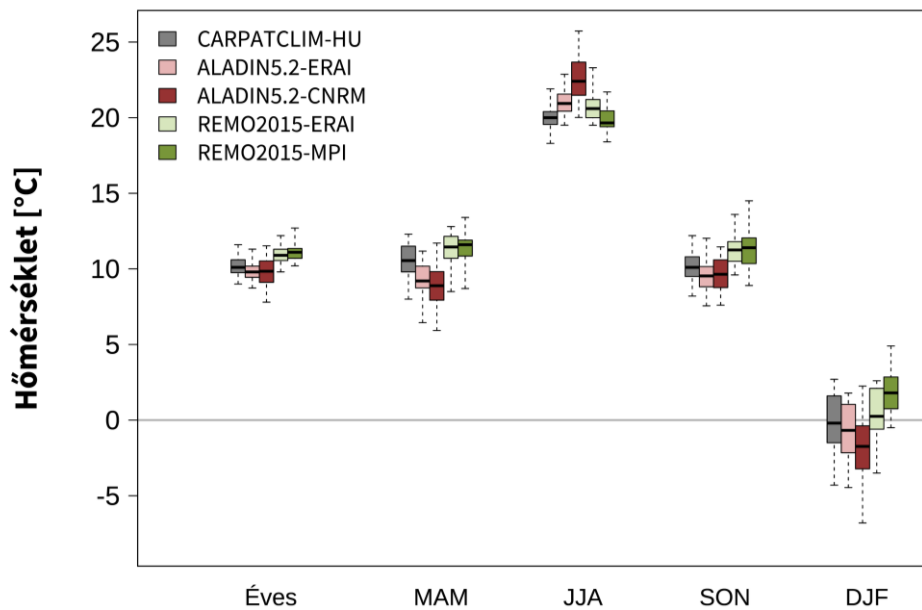
5. ábra: A hőmérséklet magyarországi havi átlagértékei (°C) az 1981–2000 időszakban a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján.



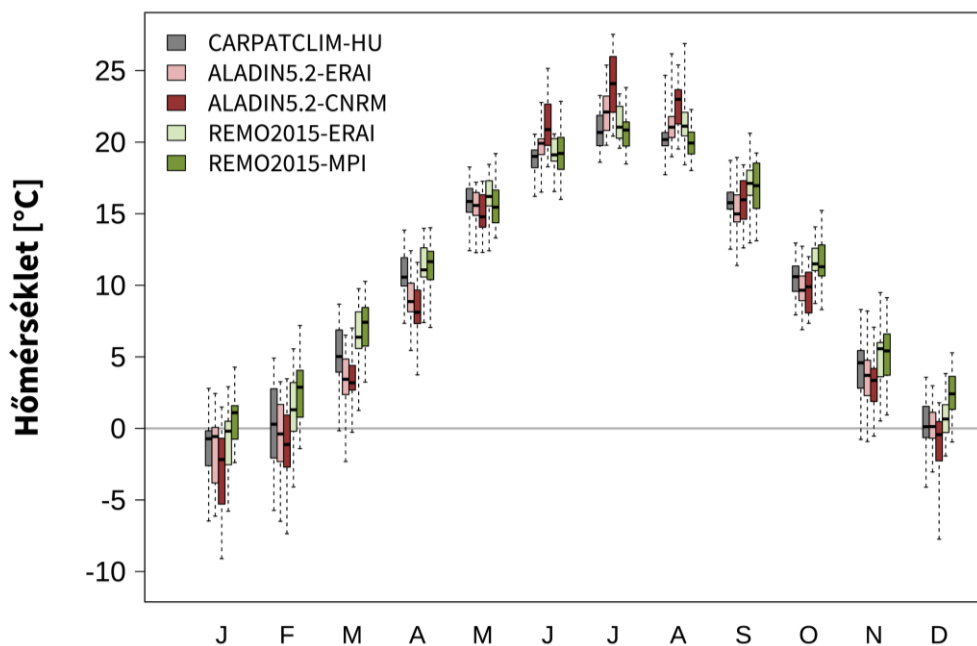
6. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk magyarországi havi átlagokon alapuló hőmérséklet- és csapadékbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázishoz képest.



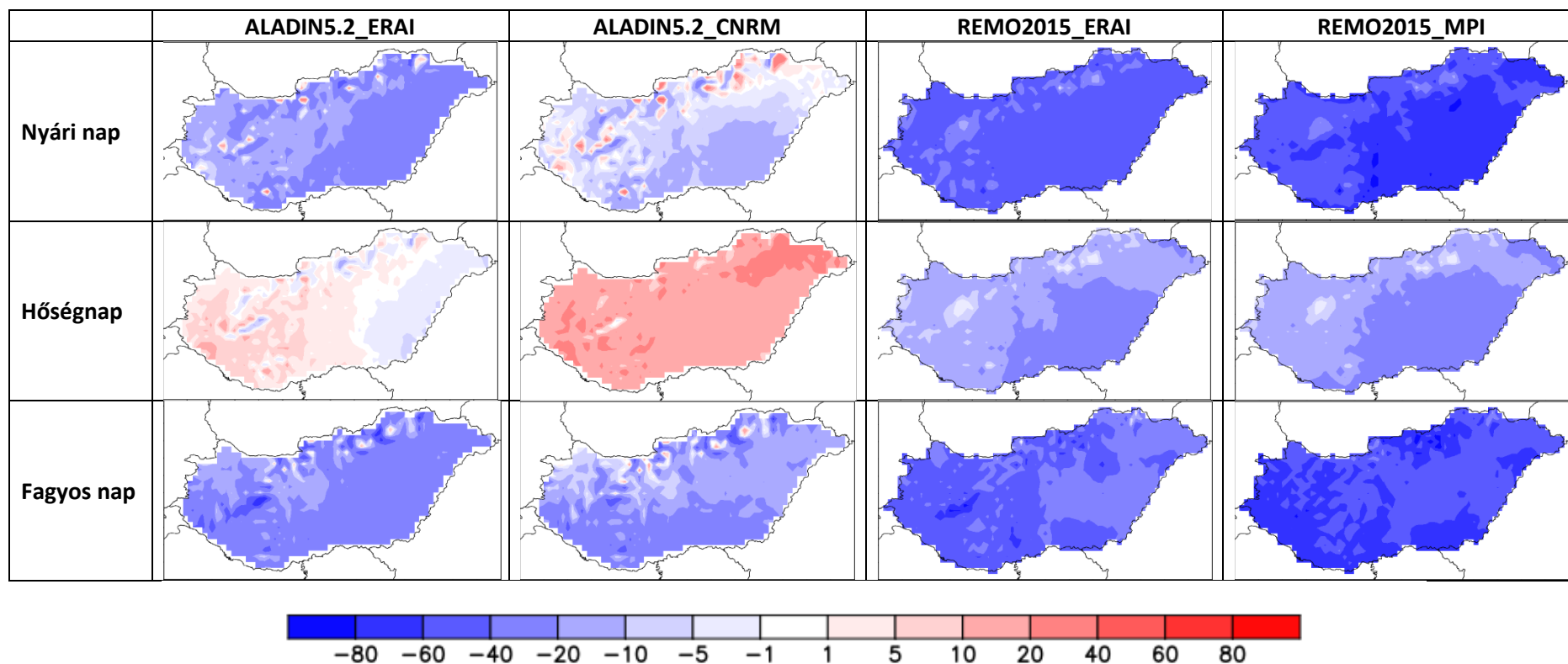
7. ábra: A magyarországi évszakos és éves átlaghőmérséklet évenkénti értékei (°C) az 1981–2000 időszakban a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI és a REMO2015_ERAI modellszimulációk eredményei alapján. Az ALADIN5.2_CNRM és REMO2015_MPI eredmények 20-éves átlagként kerültek feltüntetésre összevetve a CarpatClim-HU 20-éves átlagával.



8. ábra: A CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERA1, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERA1 és a REMO2015_MPI modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet értékei (°C).



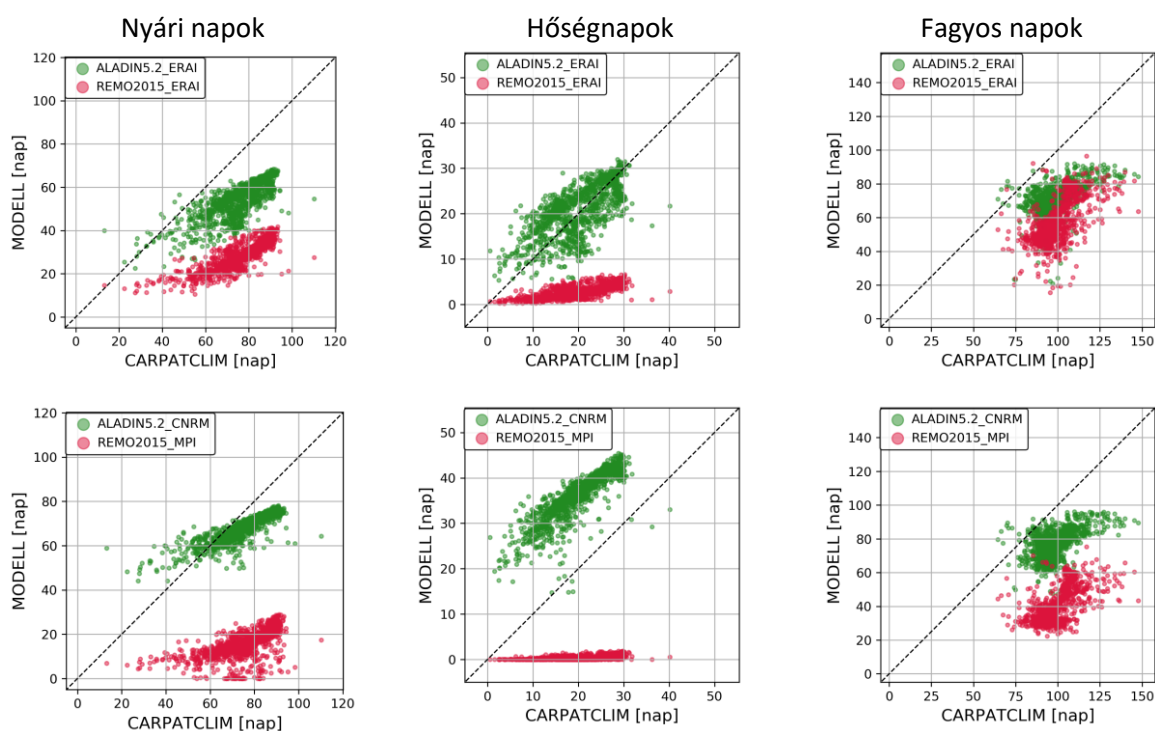
9. ábra: A CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERA1, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERA1 és a REMO2015_MPI modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi havi átlaghőmérséklet értékei (°C).



10. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított nyári napok ($T_{max} > 25\text{ °C}$), hőségnapok ($T_{max} \geq 30\text{ °C}$) és fagyos napok ($T_{min} < 0\text{ °C}$) éves számának eltérése (nap) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

7. táblázat: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos hőmérsékleti indexek átlagos magyarországi eltérése (nap) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

Hőmérsékleti éghajlati indexek átlagos eltérése					
Nyári napok száma (nap)					
	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
ALADIN52_ERAI	-20	-5	-15	0	0
ALADIN52_CNRM	-6	-3	-5	2	0
REMO2015_ERAI	-47	-9	-31	-7	0
REMO2015_MPI	-59	-9	-43	-8	0
Hőségnapok száma (nap)					
ALADIN52_ERAI	2	0	1	1	0
ALADIN52_CNRM	17	1	13	3	0
REMO2015_ERAI	-17	-1	-16	-1	0
REMO2015_MPI	-19	-1	-18	-1	0
Fagyos napok száma (nap)					
ALADIN52_ERAI	-26	-1	0	-4	-20
ALADIN52_CNRM	-20	0	0	-3	-16
REMO2015_ERAI	-42	-14	0	-10	-18
REMO2015_MPI	-60	-14	0	-12	-34



11. ábra: A nyári napok ($T_{max} > 25 \text{ }^\circ\text{C}$), a hőségnapok ($T_{max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) és a fagyos napok ($T_{min} < 0 \text{ }^\circ\text{C}$) 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos éves értékei (nap) a magyarországi rácspontokban (tehát egy jelölő egy rácspontban felvett értéket jelent) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.

5.2. Csapadék

Az ALADIN5.2 éves viszonylatban az ország nagyobb részén túl sok csapadékot ad, azonban alulbecslés is megjelenik az ország nyugati, alapvetően csapadékosabb éghajlatú része felett (**12. ábra**). A felülbecslés inkább a tavaszi és nyári időszakra jellemző, míg ősszel és télen a modellhibák előjelükben és nagyságukban is változatos képet mutatnak, például az ország nyugati tájain kifejezetten alacsonyok a csapadéértékek, emellett a hibamezőben egy egészen egyértelmű nyugat–kelet irányú gradienst figyelhetünk meg. Az eltérések az esetek többségében szignifikánsak, ez kifejezetten igaz a re-analízis meghajtású szimulációs eredményekre. A különböző határfeltételekkel készült kísérleteket tekintve a felülbecslés az ERA-Interim, az alulbecslés pedig a CNRM-CM5 meghajtású eredményekben nagyobb mértékű, országos átlagban 27–59 % (17–27 mm; **8. táblázat**) illetve -9 % (3–4 mm). A REMO2015 két modellkísérlete között éves szinten nem figyelhető meg nagy területi különbözőség (**12. ábra**): az ország keleti felét csapadékosabbnak, a nyugati felét szárazabbnak mutatta mindkét szimuláció, mely különbségek szignifikánsnak tekinthetők. Továbbá a Duna vonalán, a Balaton és a Tisza-tó térségében, valamint a középhegységeknél figyelhető meg csapadék alulbecslés. A megfigyeléstől vett eltérések térbeli mintázata sokkal változatosabb, mint az ALADIN5.2 esetén. A kísérletek között kiemelkedő különbségek az évszakos szignifikancia térképeken figyelhetők meg, ahol nyáron és ősszel a REMO2015_MPI szárazabbnak jelezte az évszakokat, míg télen csapadékosabbnak, mint az REMO2015_ERAI, mely az országos átlagok tekintetében a REMO2015_MPI eredményekben 0,3 (nyár) és 14 %-os (ősz) alulbecslést és 22 %-os (tél) felülbecslést jelent (**8. táblázat**).

A 20-éves időszakra vonatkozó havi csapadékösszeg megközelítésében mind a négy szimuláció elfogadhatóan teljesít, kisebb–nagyobb hibákkal. Az **13. ábrán** jól látszik az ALADIN5.2 tavaszi és nyári erős felülbecslése és az őszi-téli viszonylagos kiegyenlítődése. A re-analízis határfeltételű szimulációban a nyári csapadékmaximum egy hónappal korábbra esik, a novemberi másodmaximum azonban megjelenik. Ezzel szemben az ALADIN5.2_CNRM szimuláció realiztikusabban (és kisebb felülbecsléssel, amit a kisebb szórás hányados is mutat az **6. ábra** Taylor-diagramján) írja le az évi menetet. A REMO2015 eredményei márciustól egészen júliusig a CarpatClim-HU eredményeihez közel futnak (**13. ábra**), azonban a nyári menet és a novemberi másodmaximum esetében jelentősebb eltérés – egy-egy komplementer csúcs – tűnik fel a REMO2015_MPI szimulációnál. Habár a júniusi eltérés és csapadékmaximum okaként a korábban említett vízfelszín leírási problémát sejtettük, a maszkolt és nem maszkolt REMO adatsorok összevetése nem nyújtott szignifikáns bizonyítékot ennek a hipotézisnek az alátámasztására. A novemberi csapadék alulbecslés valószínűsíthetően a ciklonális tevékenység alábecslésének köszönhető (erre nem végeztünk külön kísérleteket). Az ERA-Interim-mel meghajtott REMO2015 modell jól visszaadja az éves csapadék karakterisztikáját 0,94-es korrelációval és kb. 1,1-es szórás aránnyal (**6. ábra**), azonban a négyzetes hiba itt már megközelíti a 0,5-öt, ami összhangban van a csapadék modellezésének általános bizonytalanságával. Emellett érdemes megemlíteni, hogy a négyzetes hiba a másik REMO2015 kísérletnél sem közelíti meg az 1-et, nem úgy, mint az ALADIN5.2 esetében. A szórás hányadosok is kedvezőbb értékeket mutatnak a REMO2015-el, mint az ALADIN5.2-vel, valamint a legjobb korrelációt tekintve a REMO2015_ERAI kísérlet után

az ALADIN5.2_ERAI következik, a GCM meghajtás mellett pedig már csak 0,7 körüli érték adódik mindkét modellre.

Az évszakos csapadékösszeg évenkénti értékeit csak a re-analízisekkel meghajtott kísérletek esetében tudjuk megfigyelésekkel összevetni. A 20-éves meneteket bemutató grafikonok (**14. ábra**) alapján már nem mondható el, hogy a hőmérséklethez hasonlóan egyértelmű szisztematikus alul- vagy felülbecslést tapasztalunk minden évszakban, a szimulációk menete különösen ősszel gyakran ingadozik a referencia-értékek körül. A CarpatClim-HU menetét télen adják vissza a legjobban a modellek: ezalól kivételt képez a REMO2015 az időszak utolsó pár évében, ekkor ugyanis pont ellentétes előjelű csapadékváltozást feltételez a modell: ahol a megfigyelés növekedést mutat, ott a REMO2015 enyhe csökkenést, majd ahol előbbi csökkenést, ott az utóbbi növekedést. Tavasszal is megfigyelhető hasonló időszakvégi eltérés, ekkor a CarpatClim-HU által jelzett csapadékcsökkenés helyett növekedés mutatkozik. A leggyengébben nyáron teljesítenek a modellek. Éves tekintetben mindkét re-analízis határfeltételű szimuláció láthatóan jól követi a nedvesebb és szárazabb évek váltakozását, az ALADIN5.2 teljes időátlaga (59 mm/hónap) azonban szisztematikusabban magasabb, mint a CarpatClim-HU. A GCM meghajtású kísérletekből csupán a húsz év átlagát tüntettük fel, melyek igencsak közel esnek egymáshoz. Ezeket tekintve érdekes eredmény, hogy az ALADIN5.2_CNRM szimuláció 52 mm/hónapos átlagos értékével közelebb esik a megfigyeléshez, mint az ERA-Interim határfeltételű kísérlet átlagos értéke (59 mm/hónap).

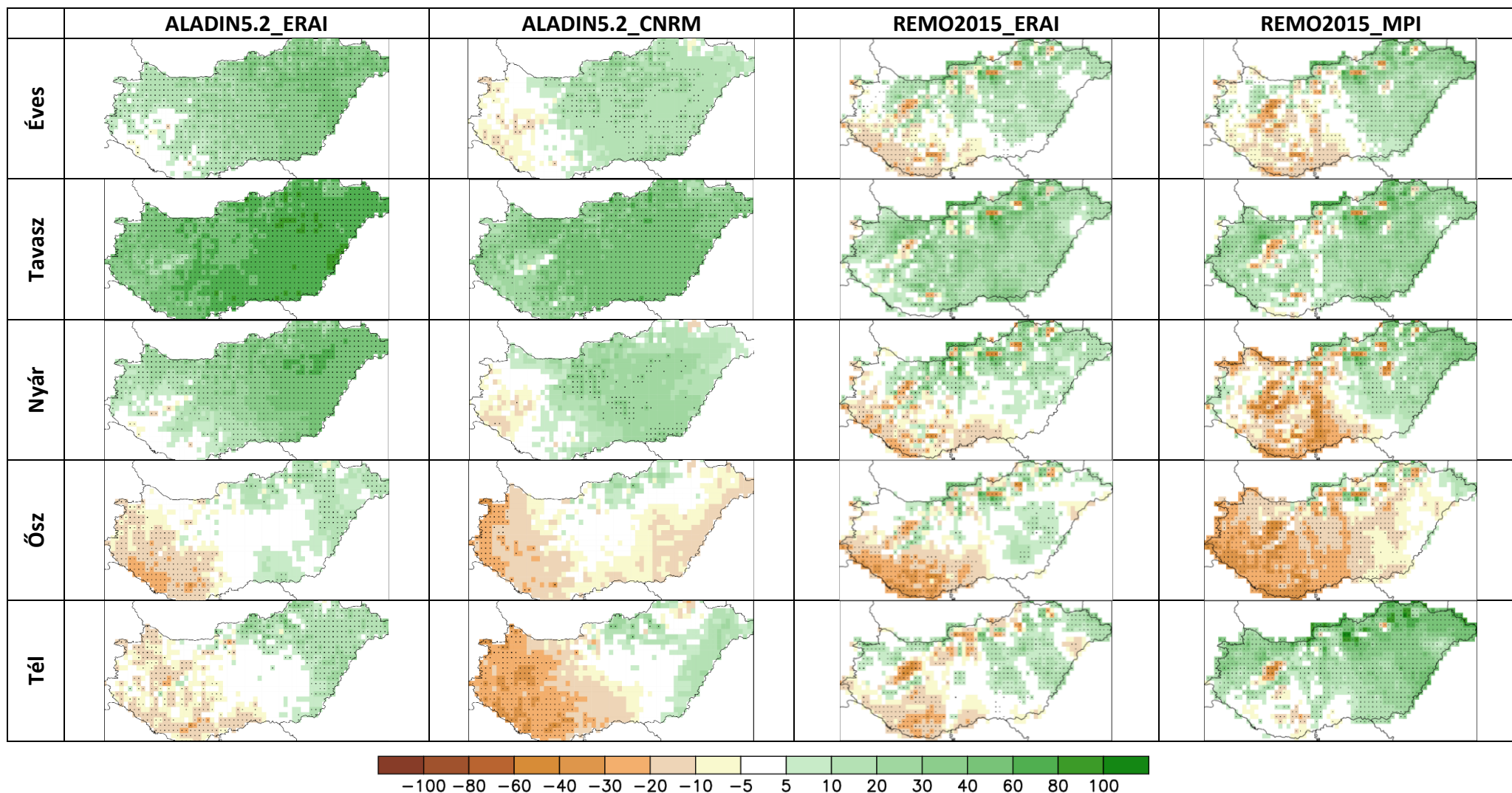
Az ERA-Interim meghajtású kísérletek alapján a csapadékösszeg évek közötti változékonyságában a két modell ősszel és télen megközelítően egyetért – mind az értékek, mind az intervallum nagyságában –, valamint a megfigyelést is viszonylag jól közelítik, habár ősszel gyenge alulbecslés figyelhető meg az időbeli szórásértékekben (**15. ábra, 9. táblázat**). Ezzel szemben a tavaszi és nyári időszakban változatosabb eredményeket láthatunk: míg a megfigyelés és a REMO2015 eredményei egészen hasonlóan alakulnak, addig az ALADIN5.2_ERAI az átlagosan 20 mm/hónappal magasabb értékeivel kiugrik közülük, meghaladva a CNRM meghajtású eredményeket is (sötétebb és világosabb bordó színárnyalattal jelölt téglalapok és a hozzájuk tartozó pálcikák a **16. ábrán**). Tavasszal az időbeli szórások (**9. táblázat**) mindkét re-analízis meghajtású kísérlet alapján jó egyezést mutatnak a megfigyeléssel, ez tehát azt jelenti, hogy az ALADIN5.2 esetén csak az időszakban előforduló értékek nagysága növekedett, változékonysági „intervallumuk” nem változott. Ezzel szemben nyáron az ALADIN5.2 időbeli szórása átlagosan 4 mm/hónappal haladja meg a megfigyelést, itt tehát a csapadékösszeg nagysága mellett a változékonyság mértéke is megnövekedett. A GCM meghajtású kísérleteket tekintve szintén tavasszal és nyáron láthatunk kiemelésre érdemes eltéréseket. A változékonyságot és a felvett értékek nagyságát az ALADIN5.2 mindkét évszakban egyaránt felülbecsli a megfigyeléshez képest, melyet az időbeli szórásértékek (**9. táblázat**) is alátámasztanak. A REMO2015 eredményei azonban a két évszakban különbözően viselkednek: tavasszal a modell a megfigyeléssel azonos szórásértékkel rendelkezik, az időszak során felvett csapadékösszeg értékei kissé magasabbak a megfigyelésnél, nyáron viszont épp ellenkező, alacsonyabb jelet (időbeli szórása 12 mm/hónap, míg a megfigyelésé 17) produkál. A REMO2015 szimulációk évek közötti változékonysága összességében tehát mérsékeltebbnek mutatkozik az ALADIN5.2-nél, az

időbeli szórás a legalacsonyabb értéket (12 mm/hónap) nyáron veszi fel a GCM meghajtás mellett. Havi bontásban (**16. ábra**) a fenti tulajdonságok már árnyaltabb képet mutatnak: például az idősor felét (a téglalapokat, tehát a 25. és a 75. percentilis közé eső értékek kiterjedését) tekintve augusztusban, szeptemberben és novemberben a GCM meghajtású REMO2015 nagyobb változékonyságot mutat, mint az ALADIN5.2.

A **17. ábrán** a két változó hibáit egymás függvényében vizsgáltuk. Az ALADIN5.2 futások tekintetében megfigyelhető, hogy a havi eltérés iránya és nagyságrendje hasonló az egyes évszakokon belül, tehát az egyes évszakok hónapjai hasonló eltéréssel rendelkeznek a mérésekhez képest. Ez különösen szépen kirajzolódik az ERA-Interim-es szimulációnál (bal felső panel), ahol a tavaszi hónapok esetében hőmérsékleti alulbecsléshez minden esetben csapadék felülbecslés tartozik, a nyári hőmérsékleti felülbecslés esetében pedig szintén csapadék felülbecslés figyelhető meg. A legkisebb eltéréssel a téli és őszi hónapok rendelkeznek, mindegyik esetben hőmérsékleti alulbecslés jelenik meg, mely elhanyagolható nagyságrendű és változó előjelű csapadék hibával terhelt. A CNRM-CM5 meghajtású ALADIN5.2 esetében (jobb felső panel) is megfigyelhető az évszacos minta, de némileg nagyobb szórással a hónapok között. A tavaszi, és egyes nyári hónapok esetében figyelhető meg a legnagyobb eltérés mind hőmérséklet, mind csapadék tekintetében: míg a kb. 2–3 fokok alulbecsléshez akár 15–20%-os relatív csapadék felülbecslés adódik, addig a nyári 2–3 fokok hőmérsékleti felülbecsléshez változó előjelű, 10–15%-os alul-, illetve felülbecslés jelenik meg. Összességében tehát megfigyelhető, hogy az egyes hónapok azonos térfélen, vagy negyedben helyezkednek el. A bal alsó panelen az ERA-Interim-mel meghajtott REMO2015 egyes hónapjainak szimulációs hibái nagy szórással jelennek meg a két paraméter egymáshoz való viszonyában. A téli hónapok esetében 0,5–0,9 °C közötti hőmérsékleti hibához -5,5–2,8%-os csapadék hiba jelenik meg, ami rendkívül alacsony. Az őszi hónapok esetében a csapadéknál hasonló a hiba nagyságrendje (-6,2–1,7%), de némileg magasabb (0,9–1,2°C) a hőmérsékleti hiba, és zömmel a csapadékösszegek felülbecsléséről beszélhetünk. Előbbiekből is láthatjuk, hogy legtöbbször a téli és őszi hónapokban járt a legkisebb hibával a csapadék modellezése. A tavaszi hónapokban a hőmérsékleti felülbecsléshez (0,3–1,5°C) 16,2–19,8%-os csapadék felülbecslés társul, ez a tavaszi, nagy csapadékot hozó ciklonok túlzott figyelembevételével is magyarázható. A jobb alsó panelen a REMO2015_MPI esetében az őszi hónapok hőmérsékleti felülbecslése a csapadékösszegek alulbecslésével párosul, mely magyarázható a magasabb hőmérsékletből fakadó légköri kiszáradással. A téli két utolsó és a két kora tavaszi hónap esetén a hőmérsékleti felülbecsléshez a csapadékok erős felülbecslése társul. Ennek egyik magyarázata lehet a hazánk időjárását nagyban befolyásoló mediterrán ciklonok hibás modellezése. A mediterrán ciklonok késő ősztől kora tavaszig is eltartó aktivitása nyomán az októberi és november csapadék alulbecslés ezen ciklonok elmaradását jelzi a szimulációban, míg ugyanez a január-február hónapok esetében azok túlzott figyelembevételére utalhat.

Az egymást követő száraz napok maximális számának (CDD) térképes elemzések megfigyelhető, hogy a modellkísérletek nagyon hasonlóak éves szinten: az ország nyugati részén előfordulnak szárazabb területek, míg az ország döntő hányadában csapadékosabb időszakról beszélhetünk. Télen figyelhető meg markáns különbség, ahol a REMO2015_MPI csapadékosabbnak, míg a többi kísérlet szárazabbnak mutatkozott (**18. ábra**). Az éves és

évszakos országos átlagos eltérések összehasonlításánál megfigyelhető, hogy mind az adott modell kísérletei között (0–6 nap), mind a modellek között (0–7 nap) kicsi az eltérés (**10. táblázat**). Az ALADIN5.2 és a REMO2015 is alulbecsülte a száraz napok számának maximális számát a CarpatClim-HU referencia adatbázis értékeivel összevetve. A **21. ábra** alapján télen figyelhető meg a legnagyobb eltérés a kísérletek között, ekkor az ALADIN5.2 ERAI és a REMO2015 ERAI nagyon hasonlóak és jól közelítik a referenciát, ellenben az ALADIN5.2 CNRM nagyobb, a REMO2015 MPI kisebb értékeket adott. Ugyanez mondható el a csapadékos napokról is (**22. ábra**), azzal a különbséggel, hogy ott az ALADIN5.2 ERAI is alulbecsülte ezen napok számát. A csapadékindexek átlagos eltérésénél a legnagyobbat a REMO2015 mutatta az 1mm csapadékot meghaladó napok számánál (RR1). Éves szinten 8–14 nappal becsülték fölé a RR1 értéket, míg az ALADIN kísérletek 3–7 nappal becsülték alá azt. A térképeken (**19. ábra**) szintén az látható, hogy az ALADIN5.2 szárazabbnak mutatkozott, mint a REMO2015. A nagy csapadékú napok számát (RR10) az ország döntő részén mind a négy modellkísérlet alulbecsülte (**20. ábra**), melyet az országos átlagos eltérések is alátámasztanak (**10. táblázat**). A scatter-plot diagram ebben az esetben is hasonlóan alakul, mint a CDD-nél: télen a re-analízis kísérletek nagyon hasonlóan és jól közelítik a megfigyelést, ellenben az ALADIN5.2 CNRM nagyobb, a REMO2015 MPI kisebb értékeket adott (**23. ábra**).



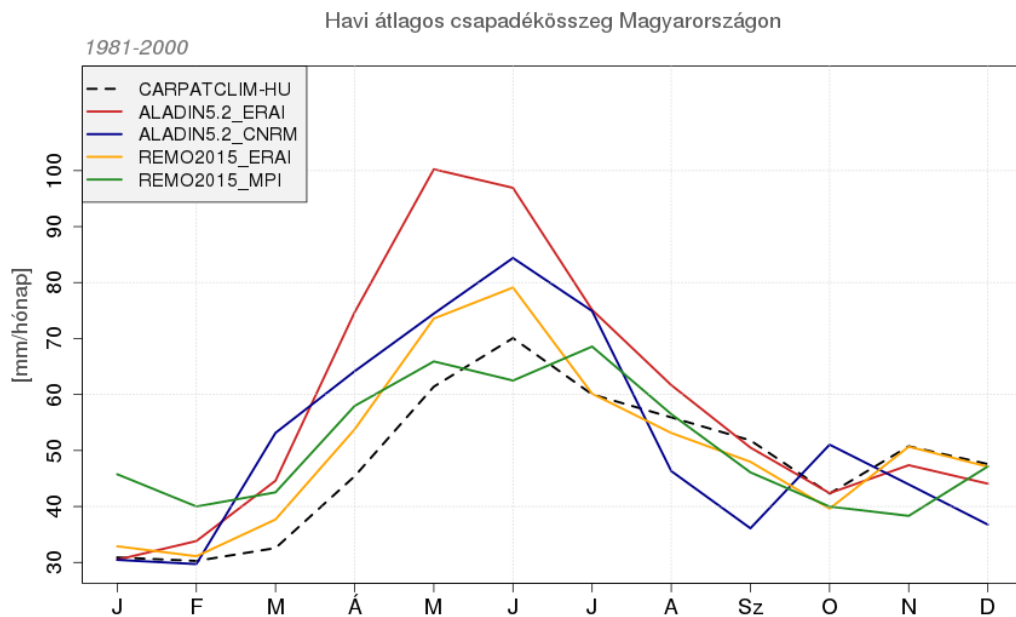
12. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakai csapadékösszeg átlagos eltérése (%) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. Az ALADIN5.2 esetében a rácsponti CarpatClim-HU, míg a REMO2015 esetében a box-átlagos CarpatClim-HU-t vettük figyelembe. A szignifikáns eltérések helyét pontozással jelöltük.

8. táblázat: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg átlagos magyarországi eltérése (mm/hónap és %) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

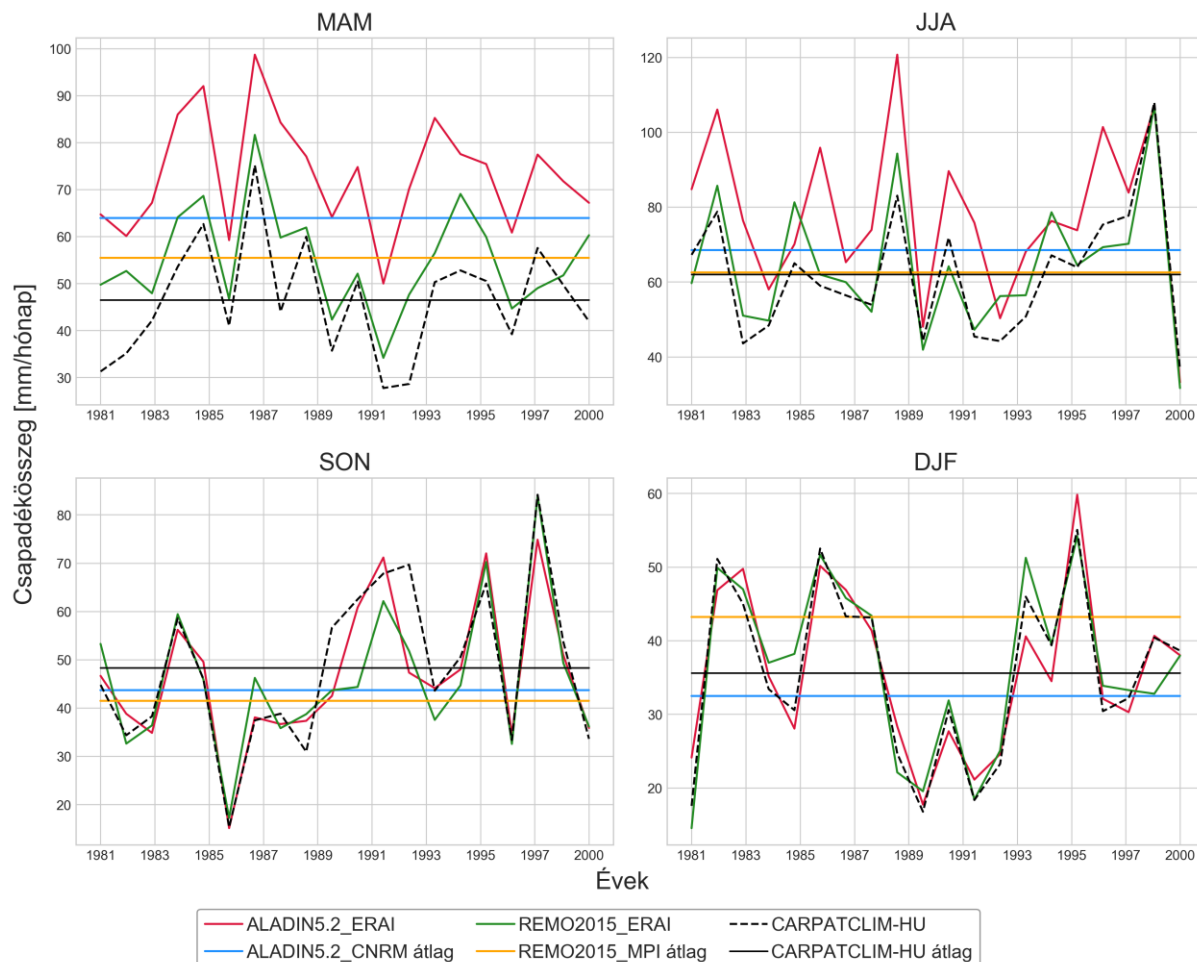
Csapadék átlagos eltérése (mm/hónap)					
	Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
ALADIN5.2_ERAI	11	27	17	-1,1	0,2
ALADIN5.2_CNRM	4,3	18	7,2	-4,1	-3,3
REMO2015_ERAI	1,9	8,1	1,4	-2,5	0,7
REMO2015_MPI	1,9	8,4	-0,6	-7,4	7,2
Csapadék átlagos eltérése (%)					
ALADIN5.2_ERAI	22	59	27	2,3	0,5
ALADIN5.2_CNRM	9,0	39	12	8,7	9,1
REMO2015_ERAI	4,9	18	3,3	-3,4	3
REMO2015_MPI	5,1	19	-0,3	-14	22

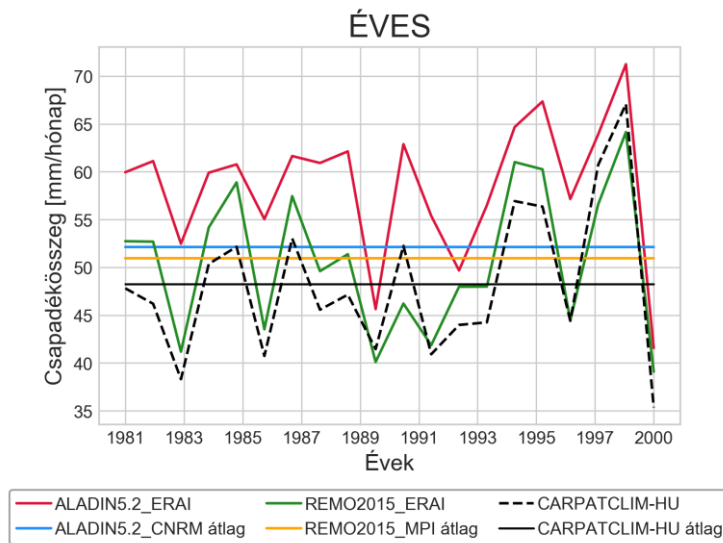
9. táblázat: A CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg térbeli és időbeli magyarországi szórása (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban.

Csapadék időbeli szórása (mm/hónap)					
	Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
CARPATCLIM-HU	7,7	12	17	16	11
ALADIN5.2_ERAI	6,9	12	21	14	11
ALADIN5.2_CNRM	11	20	22	16	12
REMO2015_ERAI	7,4	11	18	14	12
REMO2015_MPI	6,7	12	12	15	11
Csapadék térbeli szórása (mm/hónap)					
CARPATCLIM-HU	7,9	9,6	14	13	8,1
ALADIN5.2_ERAI	6,2	10	12	8,7	7,9
ALADIN5.2_CNRM	5,3	8,8	9,2	9,6	7,6
REMO2015_ERAI	8,7	12	19	11	9,3
REMO2015_MPI	11	13	22	11	11

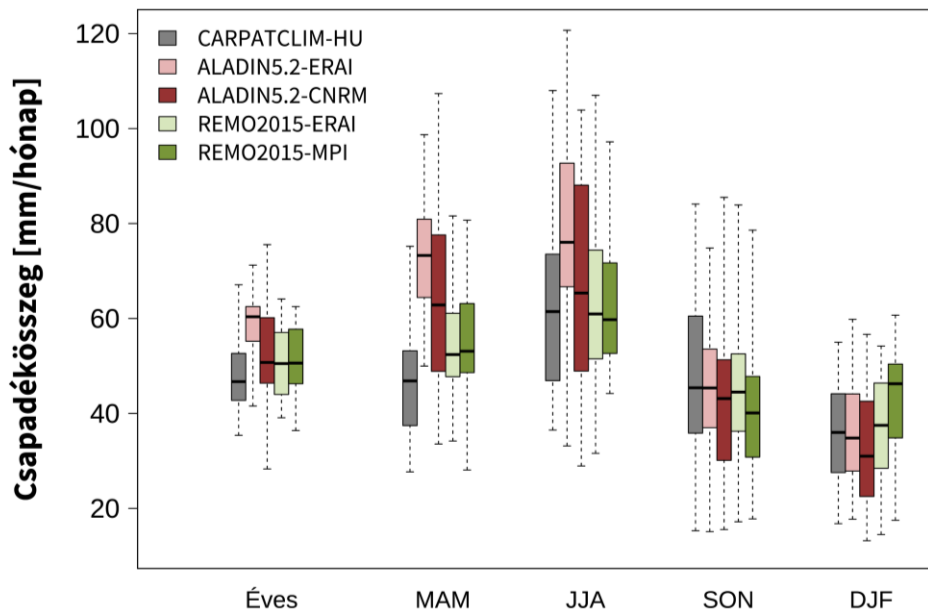


13. ábra: A csapadékösszeg magyarországi havi átlagértékei (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján.

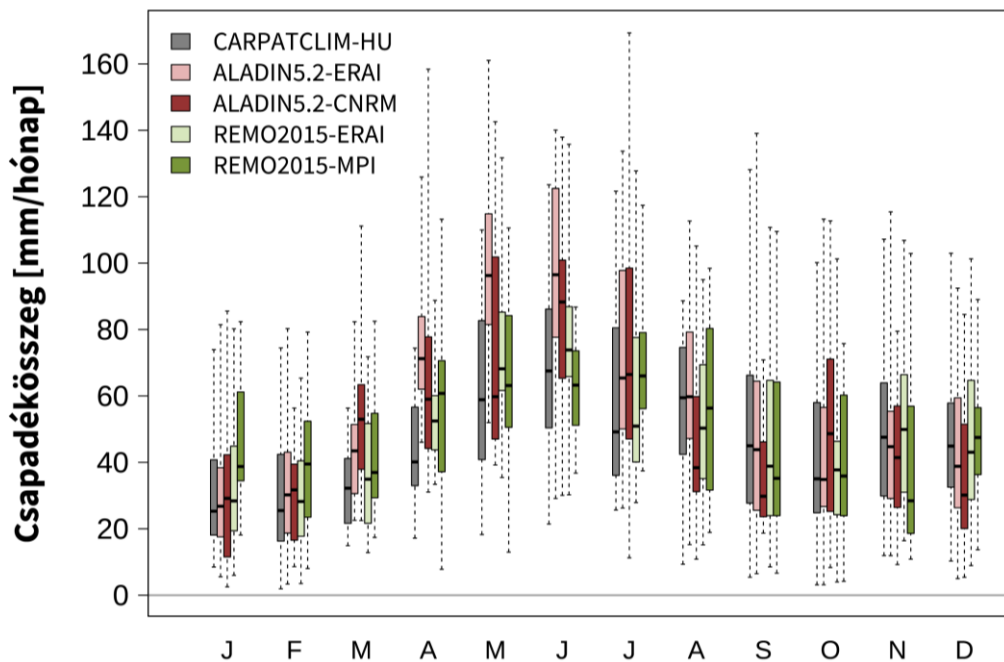




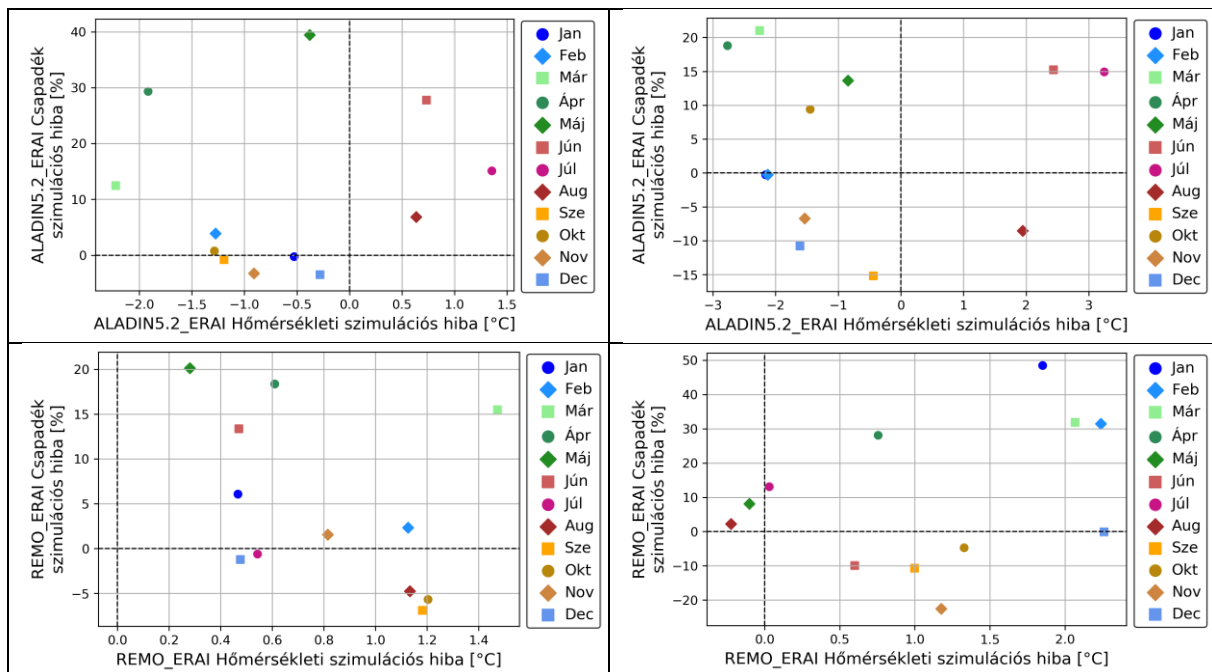
14. ábra: A magyarországi átlagos évszakos és éves csapadékösszeg évenkénti értékei (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI és a REMO2015_ERAI modellszimulációk eredményei alapján. Az ALADIN5.2_CNRM és REMO2015_MPI eredmények 20 éves átlagként kerültek feltüntetésre összevetve a CarpatClim-HU 20-éves átlagával.



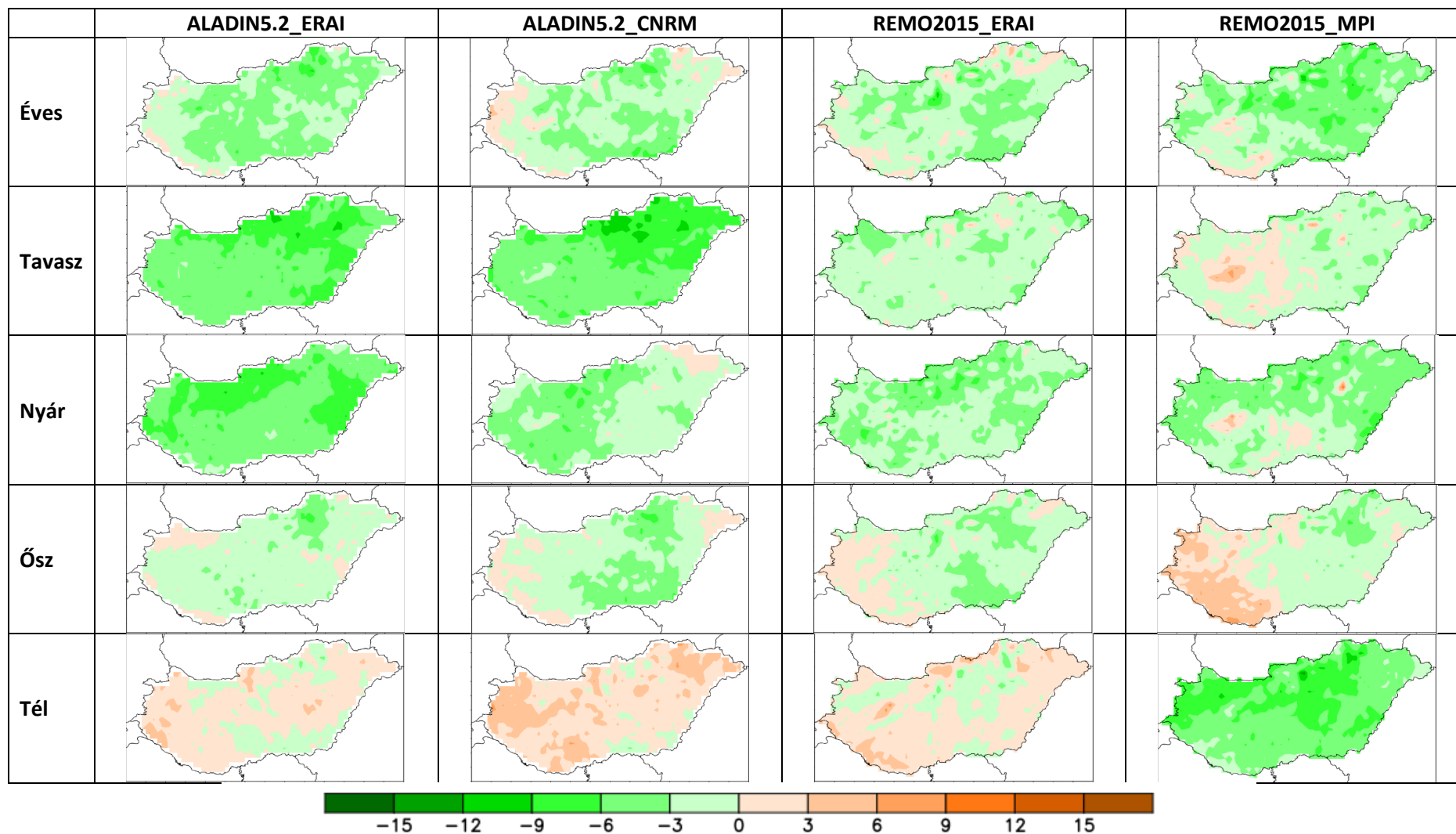
15. ábra: A CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg értékei (mm/hónap).



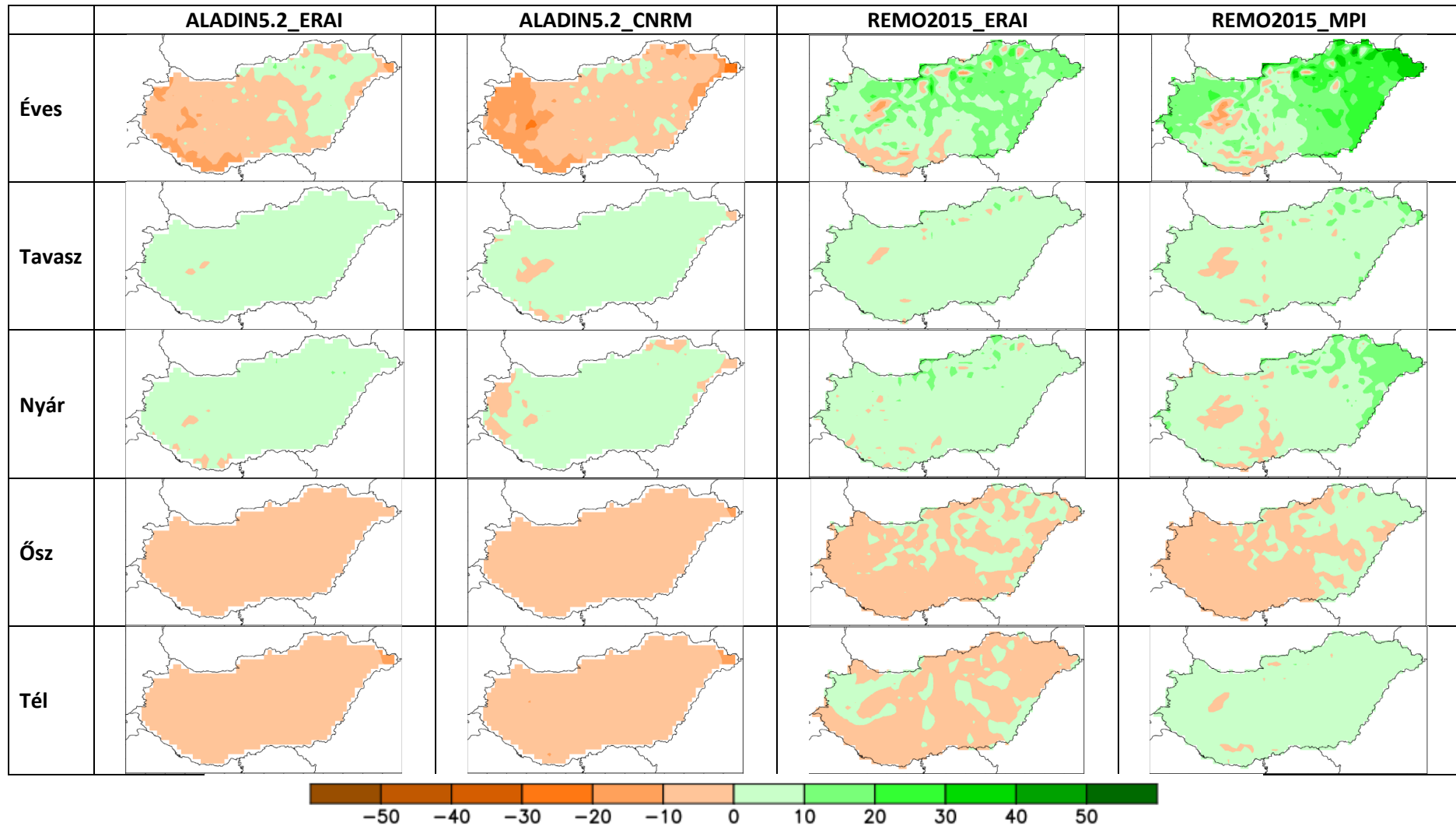
16. ábra: A CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis, az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi havi csapadékösszeg értékei (mm/hónap).



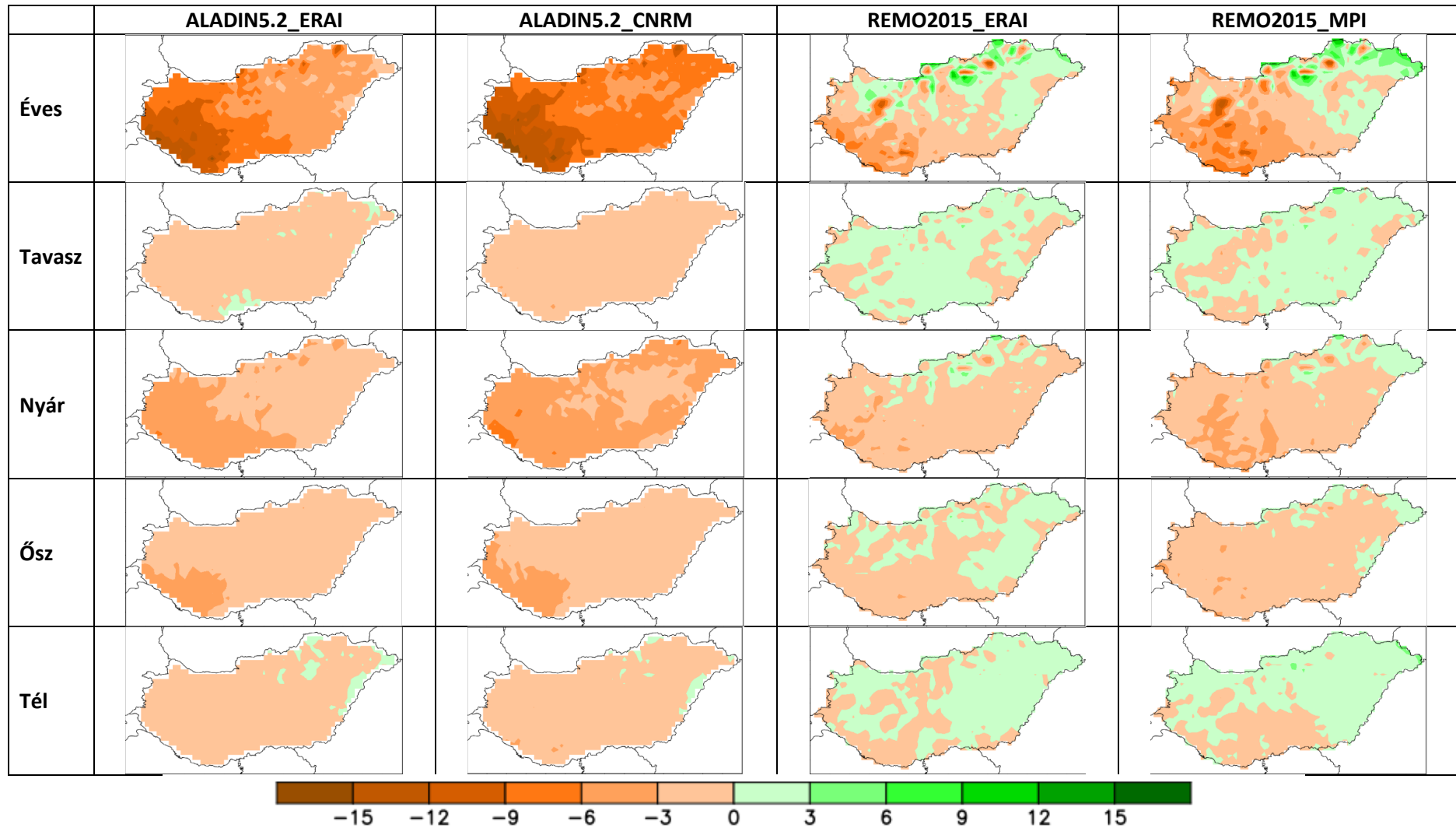
17. ábra: A havi magyarországi átlagos csapadék- és hőmérséklet hibája (% és °C) az ALADIN5.2_ERAI, ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és REMO2015_MPI modellszimulációkra alapján, az 1981–2000 időszakra. Referencia adatbázis: CarpatClim-HU.



18. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított egymást követő száraz napok ($R_{\text{nap}} < 1\text{mm}$) maximális éves és évszakos számának eltérése (nap) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.



19. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított 1 mm csapadékot meghaladó napok éves és évszakos számának eltérése (nap) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

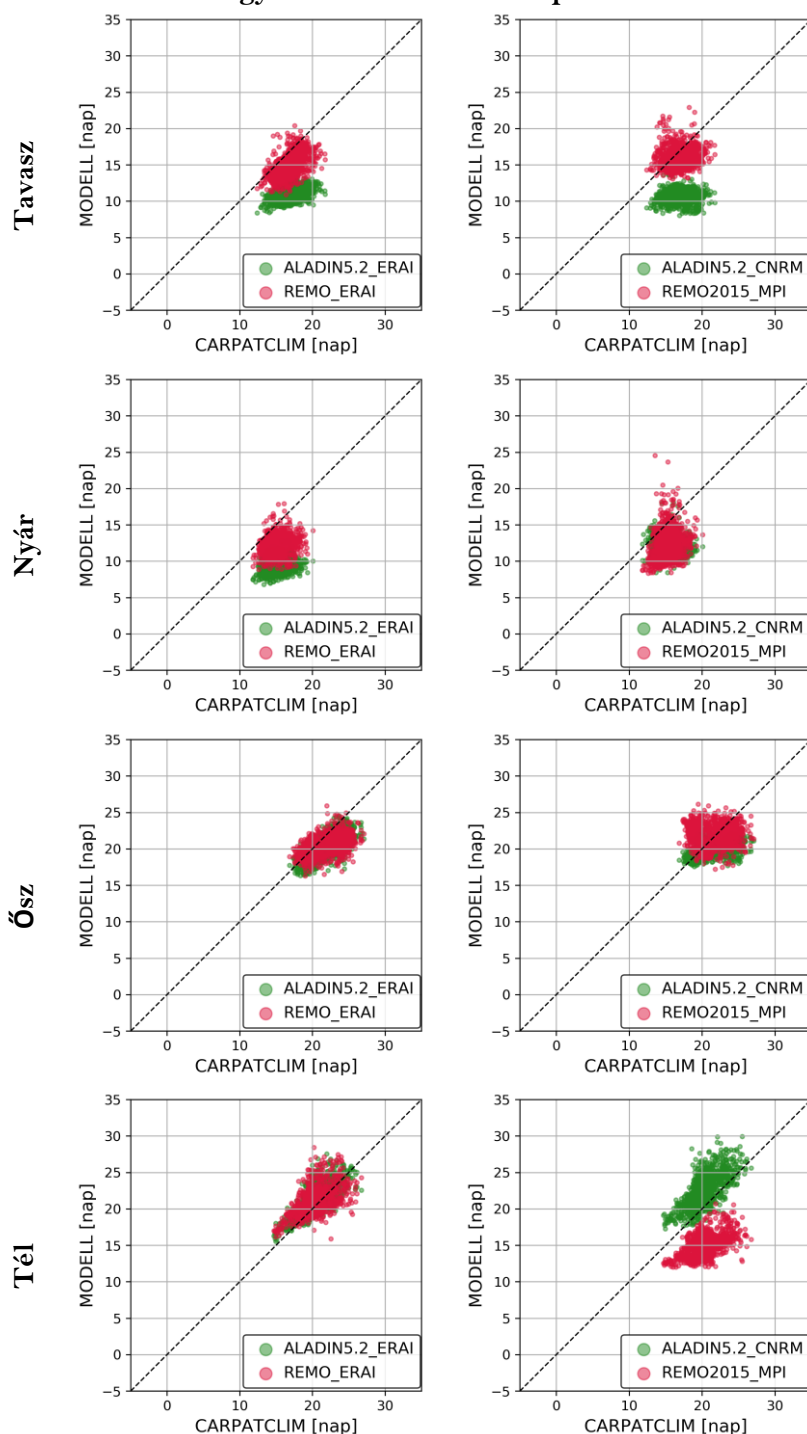


20. ábra: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított 10 mm csapadékot meghaladó napok éves és évszakos számának eltérése a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

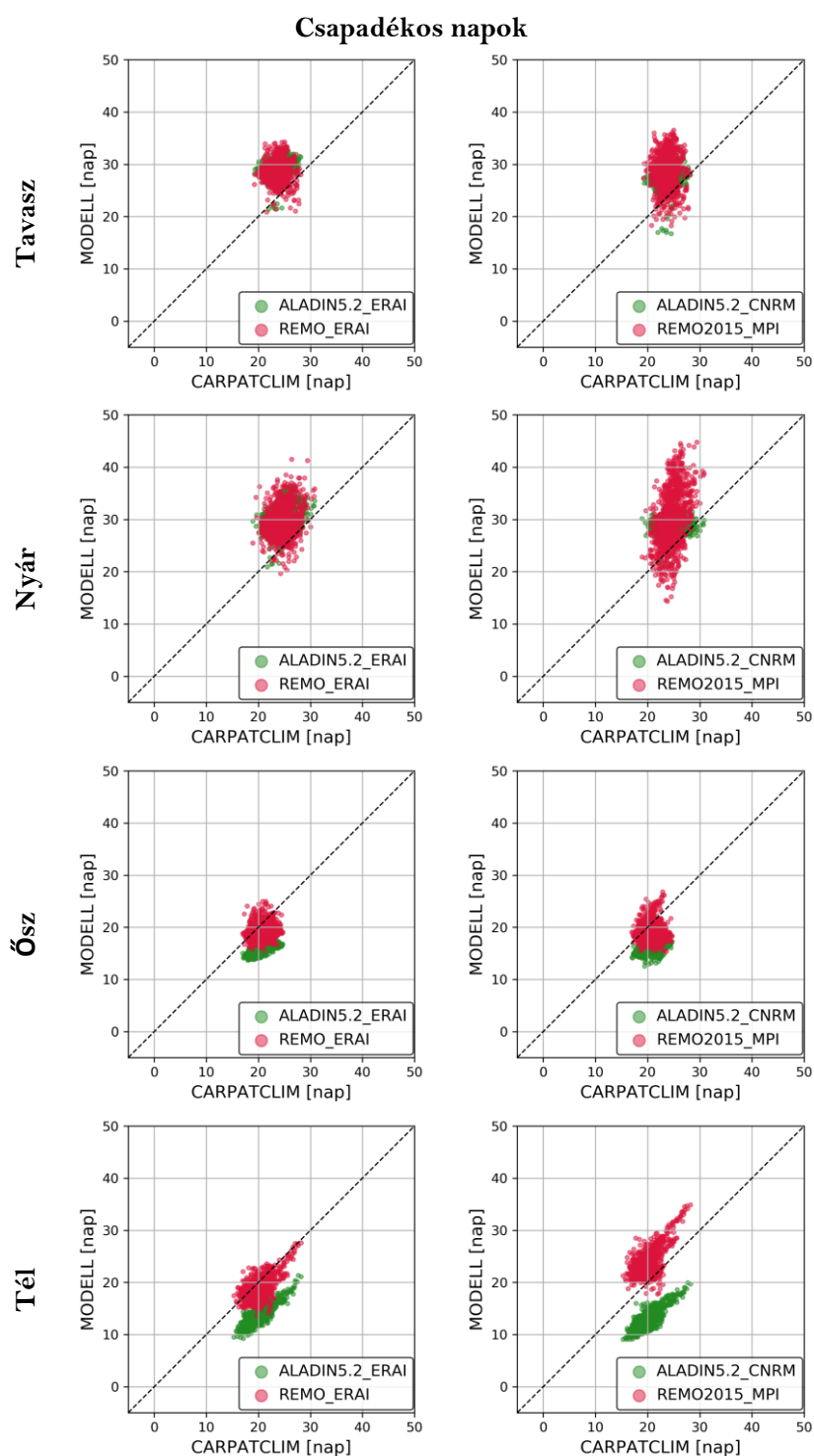
10. táblázat: Az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos csapadék indexek átlagos magyarországi eltérése (nap) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.

Csapadék éghajlati indexek átlagos eltérése					
Egymást követő száraz napok maximális száma (nap)					
	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
ALADIN52_ERAI	-3	-6	-5	-1	1
ALADIN52_CNRM	-2	-6	-3	-2	2
REMO2015_ERAI	-2	-2	-3	-1	1
REMO2015_MPI	-3	-1	-3	0	-5
1 mm csapadékot meghaladó napok száma (nap)					
ALADIN52_ERAI	-3	5	4	-5	-7
ALADIN52_CNRM	-7	3	3	-5	-7
REMO2015_ERAI	8	5	5	-1	-1
REMO2015_MPI	14	5	6	-1	4
10 mm csapadékot meghaladó napok száma (nap)					
ALADIN52_ERAI	-6	0	-3	-2	-1
ALADIN52_CNRM	-8	-1	-4	-2	-1
REMO2015_ERAI	-1	0	-1	0	0
REMO2015_MPI	-2	0	-1	-1	1

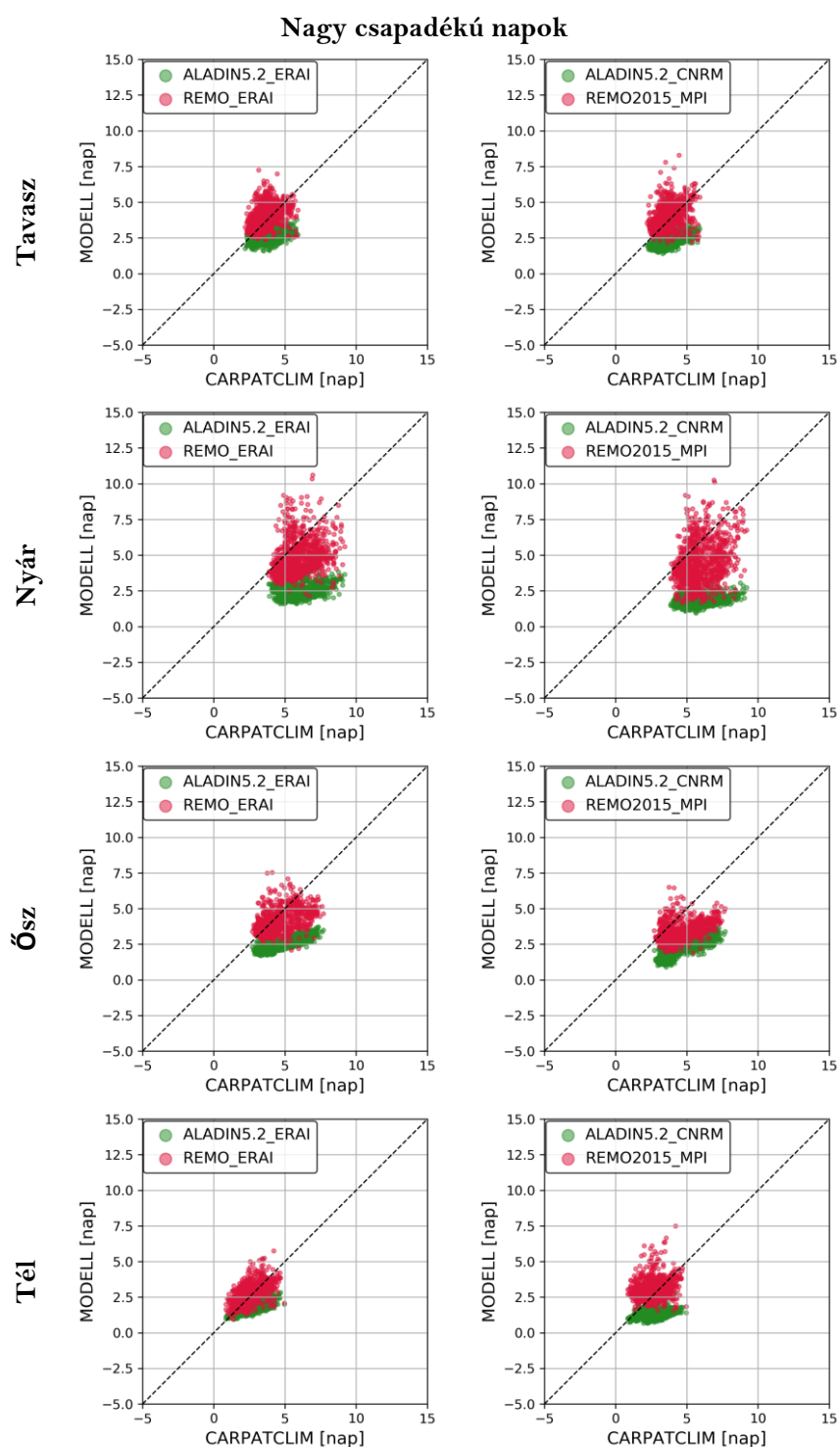
Egymást követő száraz napok



21 ábra: Az egymást követő száraz ($R < 1$ mm) napok maximális évszakos számának 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos értékei a magyarországi rácspontokban (tehát egy jelölő egy rácspontban felvett értéket jelent) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.



22. ábra: A csapadékos ($R \geq 1$ mm) napok évszakos számának 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos értékei a magyarországi rácspontokban (tehát egy jelölő egy rácspontban felvett értéket jelent) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.



23. ábra: A nagy csapadékú ($R \geq 10$ mm) napok évszakos számának 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos értékei a magyarországi rácspontokban (tehát egy jelölő egy rácspontban felvett értéket jelent) a CarpatClim-HU megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN5.2_ERAI, az ALADIN5.2_CNRM, a REMO2015_ERAI és a REMO2015_MPI modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.

6. Összefoglalás

Jelen beszámolóban az ALADIN5.2 és a REMO2015 regionális klímamodellekkel végrehajtott kísérletek validációs vizsgálatát mutattuk be az 1981–2000 múltbeli időszakon a modellek tesztelése céljából. Ez a vizsgálat nélkülözhetetlen a modellek viselkedésének és hibáinak megismeréséhez, valamint a jövőbeli eredmények értelmezéséhez.

Mindkét modellt 10 km-es horizontális rácsfelbontáson futtattuk, kétféle határfeltétellel: egyfelől az ERA-Interim re-analízis, másfelől az ALADIN5.2 esetében a CNRM-CM5, a REMO2015 esetében a MPI-ESM-LR globális klímamodellek eredményeinek leskálázására alapozva. A kísérletek eredményeit a homogenizált és rácsra interpolált értékeket tartalmazó CarpatClim-HU megfigyelési adatbázissal vetettük össze, mely során a hőmérséklet és a csapadékösszeg éves, évszakos és havi átlagértékeit, illetve a napi átlagértékekből származtatott éghajlati indexeket vizsgáltuk.

Megállapítottuk, hogy az ALADIN5.2 modell az év nagy részében túl alacsony hőmérsékleti értékeket ad, a megfigyelésektől átlagosan 1–2 °C-kal tér el. Nyáron azonban túl magas értékeket kaptunk, ami a GCM meghajtás mellett országos átlagban akár a 2,5 fokot is elérheti. A REMO2015 eredményei ezzel szemben felülbecslést mutatnak mind éves, mind évszakos tekintetben, ami nyáron átlagosan 0–2,5 fokot jelent. A hideg és meleg hőmérsékleti indexekben egyaránt alulbecslés figyelhető meg, kivételt képez az ALADIN5.2, mely az alulbecsült nyári napok száma mellett a hőségnapokat felülbecsli. Kimutattuk, hogy a REMO2015 minimum és maximum hőmérsékleti eredményei jelentős hibával terheltek, emiatt a belőlük származtatott mennyiségek (éghajlati indexek) meglehetősen pontatlanok.

Az ALADIN5.2 tavasszal és nyáron túl sok csapadékot ad, jelentős felülbecslés a re-analízis meghajtású eredményekben volt látható (tavasszal akár 27 mm/hónap). Ezzel szemben ősszel és télen inkább alulbecslés a jellemző, és a re-analízis meghajtású eredmények állnak közelebb a megfigyeléshez. A tavasz kivételével a hibák területi strukturájában megfigyelhető egy nyugat-kelet irányú gradiens, ahol nyugaton alacsonyabb, kelet felé magasabb csapadékmennyiségeket láthatunk. A hibák területi eloszlása, és a tavaszi csapadékoság a REMO2015-ben is hasonlóan alakul, ekkor a csapadéktöbblet átlagosan 8 mm/hónap. Mind a négy kísérlet alulbecsülte az olyan extrém indikátorokat, mint a nagy csapadékú napok, illetve az egymást követő száraz napok maximális száma.

Irodalomjegyzék

- Bán, B., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., Somot, S., 2021: ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results. *Időjárás* 125, 4, 647–673, doi: 10.28974/idojaras.2021.4.6.
- Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., 2017: Felszíni megfigyelésekből készített rácsponti adatbázisok az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. *Légekör* 62 (4) 148–151.
- Bougeault, P., 1985: A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.* 113, 2108–2121.
- Buntemeyer, L., Koldunov, N., Sieck, K., Teichmann, C., Kotlarski, S., Remedino, A.: REMO 2015 MPI User Guide. Kézirat.
- Charnock, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 81, 639–640.

- Colin, J., Déqué, M., Radu, R., Somot, S., 2010: Sensitivity study of heavy precipitations in Limited Area Model climate simulation: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus-A* 62, 591–604, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- Davies, H.C., 1976: A lateral boundary formulation for multi-level prediction models. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 102, 405–418.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137, 553–597.
- Fouquart, Y., Bonnel, B., 1980: Computations of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization. *Contrib. Atmos. Phys.* 53, 35–62.
- Giorgi, F., Bates, G., 1989: The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Mon. Wea. Rev.* 117, 2325–2347.
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K. D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.-H., Claussen, M., Marotzke, J., Stevens, B., 2013: Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 5, 572–597, doi: [10.1002/jame.20038](https://doi.org/10.1002/jame.20038).
- IPCC AR5 WGI, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, Egyesült Királyság és New York, NY, USA, 1535 p.
- Illy T., Sábitz J., Szépszó G., 2015: Az ALADIN-Climate modellkísérletek eredményeinek validációja. RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 19 p. http://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C13-10_ALADIN_validacio.pdf
- Jacob, D., Podzun, R., 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 119–129.
- Majewski, D., 1991: The Europa Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar of Numerical Methods in Atmospheric Models II, ECMWF, 147–191.
- Manabe, S., 1969: Climate and the ocean circulation 1: I. The atmospheric circulation and the hydrology of earth's surface. *Mon. Weather Rev.* 97, 739–774.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouysse, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., Voldoire, A., 2013: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform

- for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* 6, 929–960, doi: 10.5194/gmd-6-929-2013.
- McGill, R., Tukey, J.W., Larsen, W.A., 1978: Variations of Box Plots. *The American Statistician* 32, 12–16.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.* 102D, 16663–16682.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756, doi: 10.1038/nature08823.
- Monin, A.S., Obukhov, A.M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Doklady Akademii Nauk SSSR Trudy Instituta Geofiziki* 151, 163–187.
- Morcrette, J.-J., Smith, L., Fourquart, Y., 1986: Pressure and temperature dependence of the absorption in longwave radiation parametrizations. *Beitr. Phys. Atmos.* 59, 455–469.
- Morcrette, J.-J., 1989: Description of the radiation scheme in the ECMWF model. In: *ECMWF Technical Memorandum*, 165, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H. H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000: *IPCC special report on emissions scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Noilhan, J., Planton, S., 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.* 117, 536–549, doi: 10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2
- Nordeng, T.E., 1994: Extended versions of the convective parametrization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics. *ECMWF Research Department, Technical Memorandum* 206, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK.
- Ricard, J.L., Royer, J.F., 1993: A statistical cloud scheme for use in an AGCM. *Annales Geophysicae* 11, 1095–1115.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., Schulzweida, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. *Report No. 18*, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.
- Smith, R.N.B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116, 435–460.
- Suga, R., Megyeri-Korotaj, O. A., Allaga-Zsebeházi, G., 2021: Sensitivity study of the REMO regional climate model to domain size. *Adv. Sci. Res.* 18, 157–167, doi: 10.5194/asr-18-157-2021.
- Sundqvist, H., 1978: A parametrization scheme for non-convective condensation including precipitation including prediction of cloud water content. *Quart. J. R. Met. Soc.* 104, 677–690.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). *Proceedings of the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology* (eds.: S.

- Szalai, Z. Bihari, T. Szentimrey, M. Lakatos) 2007, COST Office, Luxemburg, ISBN 92-898-0033-X, 17–28.
- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data. Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 2006, WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 123–130.
- Szépszó G., 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz–Meteorológia Program.
- Szopa, S., Balkanski, Y., Schulz, M., Bekki, S., Cugnet, D., Fortems-Cheiney, A., Turquety, S., Cozic, A., Déandréis, C., Hauglustaine, D., Idelkadi, A., Lathièrre, J., Lefevre, F., Marchand, M., Vuolo, R., Yan, N., Dufresne, J.-L., 2013: Aerosol and ozone changes as forcing for climate evolution between 1850 and 2100. *Clim. Dyn.* 40, 2223–2250.
- Tanré, D., Geleyn, J. F., Slingo, J., 1984: First results of the introduction of an advanced aerosol-radiation interaction in the ECMWF low resolution global model, in *Aerosol and Their Climatic Effects*, edited by H. E. Gerber and A. Deepak, Hampton, Va., pp. 133-177.
- Taylor, K.E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in single diagram. *J. Geophys. Res.* 106, D7, 7183–7192.
- Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M., Fung, I., Jacob, D., and Penner, J., 1997: Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results, *J. Geophys. Res.*, 102, 23895–23915, doi: 10.1029/97JD01864.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large scale model. *Mon. Wea. Rev.* 117, 1779–1800.
- Tukey, J. W., 1977: *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Pub. Co.
- Uppala, S.M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Berg, L. V. D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, L., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J., 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961-3012., ISSN 1477-870X
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., Chauvin, F., 2013: The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation. *Clim. Dyn.* 40, 2091–2121, doi: 10.1007/s00382-011-1259-y.
- Warrilow, D.A., Sangster, A.B., Slingo, A., 1986: Modelling of land surface processes and their influence on European climate. Technical Note DCTN 38, Dynamical Climatology Branch, United Kingdom Meteorological Office.