

Múltbeli időszakra vonatkozó modelleredmények validációja

Csorvási Anett, Illy Tamás, Sábitz Judit, Szabó Péter,
Szépszó Gabriella, Zsebeházi Gabriella

Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2016. február

Tartalom

Ábrajegyzék	3
Táblázatjegyzék.....	5
Motiváció	6
Bevezetés.....	6
Módszertan	9
Alkalmazott modellek.....	9
ALADIN-Climate	9
RegCM.....	10
Modellkísérletek	11
Megfigyelési adatok.....	13
Validációs eszközök	13
Eredmények.....	16
Hőmérséklet.....	16
Csapadék.....	18
Összefoglalás.....	38
Köszönetnyilvánítás	38
Irodalom	38

Ábrajegyzék

1. ábra: Az iparosodás (kb. 1765) előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer alakulása 2000 és 2300 között különböző RCP (teli görbék; sötétkék: RCP2.6, világoskék: RCP4.5, narancs: RCP6.0, piros: RCP8.5) és SRES (szaggatott görbék; kék: B1, zöld: A1B és piros: A2) forgatókönyvek alapján (IPCC AR5 WGI, 2013). 8
2. ábra: A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis (Mitchell és Jones, 2005) alapján 1961–1990-re. 9
3. ábra: A 10 km-es felbontású ALADIN modellkísérletek (bal) illetve a 10 és 50 km-es felbontású RegCM modellszimulációk integrálási tartománya és domborzata. 12
4. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos eltérése (°C) az E-OBS megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. 20
5. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos eltérése (°C) a CARPATCLIM megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. A szignifikáns eltérések helyét pontozással jelöltük. 21
6. ábra: A hőmérséklet magyarországi havi átlagértékei (°C) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján. 23
7. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk magyarországi havi átlagokon alapuló hőmérséklet-és csapadékbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CARPATCLIM megfigyelési adatbázishoz képest. 23
8. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet évenkénti értékei (°C) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján. 24
9. ábra: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk magyarországi évszakos átlagokon alapuló évenkénti hőmérsékletbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CARPATCLIM megfigyelési adatbázishoz képest. 25
10. ábra: A CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi évszakos és éves átlaghőmérséklet értékei (°C) alapján számolt Whisker-box diagramok. 25
11. ábra: A januári és júliusi napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján. 26

12. ábra: Scatter-plot diagramok a fagyos napok ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), a nyári napok ($T_{\max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) és a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos éves értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján. 27
13. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos csapadékösszeg átlagos eltérése (%) az E-OBS megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. 28
14. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos csapadékösszeg átlagos eltérése (%) a CARPATCLIM megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. A szignifikáns eltérések helyét pontozással jelöltük. 29
15. ábra: A csapadékösszeg magyarországi havi átlagértékei (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján. 31
16. ábra: A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékösszeg évenkénti értékei (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján. 32
17. ábra: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk magyarországi évszakos átlagokon alapuló évenkénti csapadékbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CARPATCLIM megfigyelési adatbázishoz képest. 33
18. ábra: A CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi évszakos és éves csapadékösszeg értékei (mm/hónap) alapján számolt Whisker-box diagramok. 33
19. ábra: A januári és júliusi napi csapadékösszeg értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimuláció eredményei alapján. 34
20. ábra: Scatter-plot diagramok a csapadékos ($R \geq 1\text{ mm}$) napok 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos évszakos értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján. 35
21. ábra: Scatter-plot diagramok a nagy csapadékú ($R \geq 10\text{ mm}$) napok 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos évszakos értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján. 36
22. ábra: Scatter-plot diagramok az egymást követő száraz ($R < 1\text{ mm}$) napok maximális hosszának 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos évszakos értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján. 37

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A modellkísérletek jellemzői.....	13
2. táblázat: A vizsgált hőmérsékleti és csapadékindexek.....	16
3. táblázat: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos magyarországi eltérése (°C) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.....	22
4. táblázat: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos négyzetes eltérése Magyarországra (°C) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.....	22
5. táblázat: Az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisok, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet térbeli és időbeli magyarországi szórása (°C) az 1981–2000 időszakban.....	22
6. táblázat: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg átlagos magyarországi eltérése (mm/hónap és %) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.....	30
7. táblázat: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg négyzetes eltérése Magyarországra (mm/hónap) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.....	30
8. táblázat: Az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisok, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg térbeli és időbeli magyarországi szórása (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban.....	31

Motiváció

Az éghajlatváltozás hatásaihoz való hazai alkalmazkodási stratégiák és az ezzel kapcsolatos klímapolitikai döntéshozatal támogatására 2013-ban létrehozták a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszert (NATÉR). A NATÉR legfontosabb rétegét a meteorológiai adatok jelentik: a múltbeli mérések és a jövőre vonatkozó modellbecslések. Ezekre az éghajlati információkra épülnek az objektív hatásvizsgálatok, melyek eredményei kijelölik az adaptáció legfontosabb területeit és irányait.

A NATÉR első változatában a jövőbeli éghajlatváltozás hazai jellemzőinek leírásához az ALADIN 4.5 és a RegCM 3.1 regionális klímamodellek szimulációs eredményei szolgálnak alapul (Sábitz et al., 2015). A modellkísérletek 10 km-es rácsfelbontással készültek egy Magyarországot lefedő tartományra, az emberi tevékenység leírására a közepes SRES¹ (Nakicenovic et al., 2000) A1B kibocsátási forgatókönyv alkalmazásával. „*A sugárzási kényszer változásán alapuló új éghajlati scenáriók a Kárpát-medence térségére*” című RCMTÉR projekt keretében a rendelkezésre álló éghajlati scenáriók fejlesztését végezzük el. A két modellel új modellszimulációkat hajtunk végre a legfrissebb modellváltozatok segítségével, egy nagyobb integrálási tartomány és új határfeltételek alkalmazásával, és az IPCC² legújabb RCP³ (Moss et al., 2010) kibocsátási forgatókönyveinek használatával.

A projekt keretében több lépésben hajtjuk végre a szimulációkat: a modellekkel először érzékenységi szimulációkat futtattunk az integrálási tartomány és a parametrizációk optimális beállításainak meghatározásához (Szépszó et al., 2015; Bartholy et al., 2015), majd az új modellváltozat és a beállítások teszteléséhez validációs vizsgálatokat végeztünk egy 20-éves múltbeli időszakra (Illy et al., 2015), s ezt követik később a projekciós kísérletek. A jelen beszámolóban az ALADIN-Climate és a RegCM modell eredményein végrehajtott átfogó validáció eredményeit mutatjuk be.

Bevezetés

Az éghajlati rendszert a légkör és négy ún. *geoszféra* (a felszíni és felszín alatti vizek, a szárazföld, a jégtakaró és az élővilág) kölcsönható együttese alkotja. Az egyes szférák tehetetlensége igen eltérő, közülük a legváltozékonyabb komponens a légkör, míg az óceánok és jégtakarók lassú folyamatokkal jellemezhetőek. Az éghajlati rendszer elemei között bonyolult kölcsönhatások és visszacsatolások lépnek fel, s az eltérő tehetetlenségük következtében a rendszer soha nem képes elérni egyensúlyi állapotát. Mindegyik komponens folyamatait a légkörihez hasonló megmaradási törvények kormányozzák, s működésük tanulmányozására ugyanúgy a numerikus modellezés eszköztára szolgálhat objektív módszert, mint az időjárás előrejelzésére. 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 ún. *forgatókönyveket* (scenáriókat) állítanak fel, amelyek az antropogén tevékenység eltérő jövőbeli fejlődési lehetőségeit jelenítik meg (l. később).

Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett kapcsolt globális éghajlati modellek tudományos és technikai kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek ké-

¹ Special Report on Emissions Scenarios

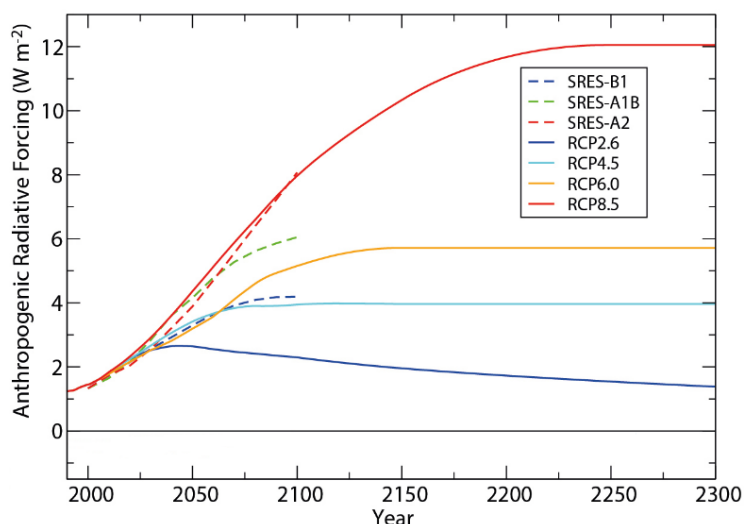
² Intergovernmental Panel on Climate Change

³ Representative Concentration Pathways

pesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeinek viselkedését és kölcsönhatásait, továbbá jól használhatók az éghajlatváltozás planetáris jellemzőinek vizsgálatára. Komplexitásuk azonban nem teszi lehetővé azt, hogy egyedüli alkalmazásukkal az éghajlatváltozás regionális vonatkozásairól pontos információhoz jussunk (térbeli felbontásuk például még ma sem haladja meg a 100 km-t). A részletek feltárására ezért ún. *leskálázással* élünk, aminek segítségével egy az érdeklődésünkre számot tartó területen finomíthatjuk a nagyskálájú globális információkat. A globális információk regionális finomítására megfelelő eszközként szolgálnak a regionális éghajlati modellek (RCM: regional climate model), melyek egy kiválasztott terület folyamatait jellemzik a globális modellekhez hasonló, fizikailag megalapozott módon, s ehhez a globális modellek eredményei határfeltételt (a tartomány peremén oldalsó határfeltételt) szolgáltatnak. A kisebb integrálási tartománynak köszönhetően ugyanazzal a számítógépes kapacitással finomabb felbontáson futtathatók, így kisebb országok kutatóközpontjai is vállalkozhatnak alkalmazásukra. A finomabb felbontás lehetővé teszi a felszíni és azon kisskálájú folyamatok pontosabb leírását, amelyek lényeges szerepet játszanak a regionális éghajlati viszonyok alakításában. A regionális klímamodelleket a 90-es évek óta használják kisebb térségek éghajlati viszonyainak jellemzésére (Giorgi és Bates, 1989).

A globális és regionális éghajlati szimulációk számos bizonytalanságot tartalmaznak, melyek pontos ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy a projekciókat megfelelő módon tudjuk értelmezni. A jövőre vonatkozó 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 rendkívül linek 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 abból ered, hogy a fizikai folyamatok leírása különböző módon történik az egyes modellekben. 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 csapadékszimulációk nagyfokú bizonytalansága.)
3. Az éghajlatra hatással bíró külső kényszerek egyik legbizonytalanabb eleme az emberi tevékenység, mégpedig azért, mert ennek a XXI. században való alakulásáról nincs egyértelmű jövőképünk, csupán különböző (optimista, pesszimista, átlagos) forgatókönyveink vannak. Az egyes lehetőségeket a globális éghajlati modellek számára külső kényszerként, szén-koncentráció kibocsátás illetve sugárzási kényszer (**1. ábra**) formájában számszerűsítik a modellek számára, azaz az egyes scenáriók ezek különböző fejlődési menetét írják le. A globális modell az éghajlati rendszer egészének választ szimulálja a feltételezett külső kényszerre. A legújabb modellfuttatásokban a korábbi SRES scenáriókat felváltották az RCP forgatókönyvek. Ezek is részletesen megadják az aeroszol-részecskék és az üvegházhatású gázok koncentrációjának lehetséges jövőbeli értékeit, viszont már figyelembe veszik a kibocsátás-csökkentési (mitigációs) törekvéseket is. A scenárió-család négy reprezentatív (RCP2.6, RCP4.5, RCP6 és RCP8.5) tagját aszerint nevezték el, hogy az általuk leírt koncentrációnövekedés 2100-ra mekkora sugárzási kényszer változást (rendre 2,6, 4,5, 6 és 8,5 W/m²-t) jelent.



1. ábra: Az iparosodás (kb. 1765) előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer alakulása 2000 és 2300 között különböző RCP (teli görbék; sötétkék: RCP2.6, világoskék: RCP4.5, narancs: RCP6.0, piros: RCP8.5) és SRES (szaggatott görbék; kék: B1, zöld: A1B és piros: A2) forgatókönyvek alapján (IPCC AR5 WGI, 2013).

A numerikus szimulációkban lévő bizonytalanságok az ún. *ensemble* (együttes) technika segítségével számszerűsíthetők, aminek lényege, hogy nem egyetlen modellkísérletet végzünk, hanem több, egyforma valószínűségűnek tekintett szimuláció eredményét együttesen értékeljük ki. A klímaprojekciók esetében a bizonytalanságok számszerűsítése a multi-modell és/vagy multi-forgatókönyv ensemble módszerrel történik, azaz a kísérleteket több (globális és regionális) éghajlati modell és/vagy kibocsátási forgatókönyv segítségével hajtják végre.

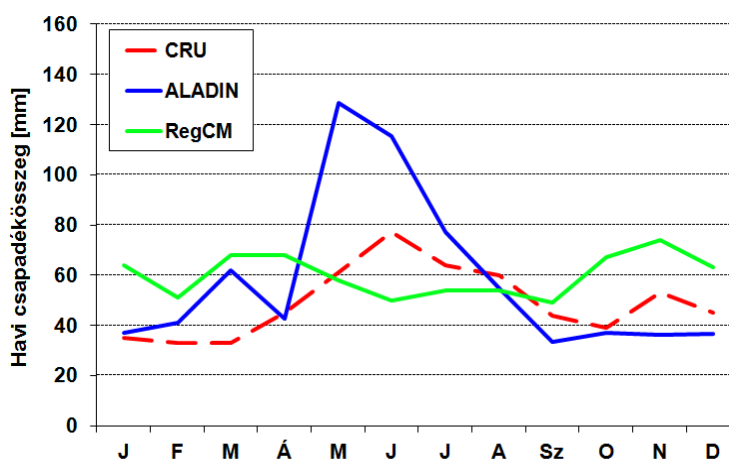
Hazánkban 2003-ban kezdődött meg a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás vizsgálatának dinamikai alapokra helyezése. Ehhez – két további modellel együtt – adaptálták az ALADIN-Climate modellt az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) és a RegCM modellt az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Meteorológiai Tanszékén. A modelleket intenzív tesztelésnek vetették alá a megfelelő beállítások megtalálása érdekében. Ezután hosszabb, több évtizedes múltbeli időszakon rácsra interpolált mérési adatbázisok felhasználásával vizsgálták, hogy a modellek alkalmasak-e klímaszimulációk készítésére (a projekciós eredmények ugyanis csak ezen validációs ismeretek birtokában értelmezhetők). A validációt követően éghajlatváltozási szimulációkat hajtottak végre a modellekkel a XXI. század végéig, a jövőbeli emberi tevékenység leírására az átlagos A1B kibocsátási forgatókönyvet alkalmazva a SRES forgatókönyvesaládból. A jövőre vonatkozó modellkísérletek a Kárpát-medencét 10-25 km-es horizontális felbontással fedik le, s a tartományon kívül zajló folyamatok leírását (azaz az oldalsó határfeltételeket) két különböző globális klímamodell szolgáltatotta mindehhez.

A Nemzeti Alkalmazkodási és Térinformatikai Rendszer számára a magyarországi éghajlatváltozás jellemzőinek leírását az ALADIN-Climate 4.5 és a RegCM 3.1 modell eredményei biztosítják. A korábbi projekciók azonban több szempontból fejlesztésre szorultak. Egyrészt a modellek integrálási területe túl kicsinek bizonyult az eredmények országhatárokon átívelő (pl. hidrológiai célú) hatásvizsgálatok felhasználására. Másrészt az ALADIN-Climate esetében a tartomány méretéből és elhelyezkedéséből fakadóan, a RegCM esetében beállítási problémák miatt az eredmények hibákkal terhelték (Csima és Horányi, 2008; Torma et al., 2011), melyeket az alábbiakban összegezünk:

- Az ALADIN 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 RegCM modell a hőmérsékletet a tél kivételével alábecsülte, s ezzel párhuzamosan az alacsony és magas hőmérsékleti küszöbértékekhez tartozó indexek előfordulását is.
- A havi átlagos csapadékösszegek évi menetét az ALADIN jól követte (**2. ábra**), ugyanakkor a május–július időszakban jelentős felülbecslést mutatott. A RegCM szimuláció eredményeiben a hazánkra jellemző éves csapadékmenet egyáltalán nem jelent meg, ugyanis az éves eloszlását egyenletesnek írta le.
- A 10 mm-t meghaladó csapadékösszegű napok előfordulását a RegCM ősszel és télen kissé felül-, nyáron viszont jelentősen alulbecsülte, míg az ALADIN-Climate többnyire jól visszaadta a mérések alapján számított értékeket. A száraz időszakok hosszát a modellek a valóságnál rövidebbnek jellemezték.

Mindezeket figyelembe véve az RCMTÉR projekt keretében a legfrissebb kibocsátási forgatókönyveket felhasználva új kísérleteket hajtunk végre a modellek legújabb verzióival egy Közép- és Kelet-Európát 10 km-es felbontással lefedő integrálási tartományon.



2. ábra: A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis (Mitchell és Jones, 2005) alapján 1961–1990-re.

Módszertan

Alkalmazott modellek

Az RCMTÉR projektben az ALADIN-Climate és a RegCM modellek legújabb változatait használjuk. Az alábbiakban röviden áttekintjük ezek jellemzőit.

ALADIN-Climate

Az ALADIN-Climate egy korlátos tartományú éghajlati modell, melyet a nemzetközi együttműködés keretében fejlesztett ALADIN rövidtávú előrejelző modell (Horányi et al., 2006) és az ARPEGE-Climate globális éghajlati modell (Déqué, 2003) kombinálásával alkottak. A dinamikai egyenletek megoldásának módszere azonos az időjárás-előrejelző modellével, a modell „fizikáját”, vagyis a parametrizált folyamatokat (pl.: sugárzás, konvekció, mikrofizika) viszont a kifejezetten éghajlati időskálájú szimulációkra kifejlesztett ARPEGE-Climate általános cirkulációs légköri modell parametrizációs csomagja biztosítja. Az ALADIN-Climate modellt 2005-ben adaptálta az Országos Meteorológiai Szolgálat, és jelenleg az 5.2-es verzióját futtatjuk.

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 légnyomás. Az ALADIN-Climate hidrosztatikus közelítést alkalmaz, ami elhanyagolja a vertikális irányú gyorsulásokat, ezért a vertikális sebesség diagnosztikus módon kerül kiszámításra. A horizontális derivált-operátorokat spektrális módszerrel közelíti, melynek során az állapothatározókat 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. Az ALADIN-Climate korlátos tartományú modell, tehát az integrálási tartományon kívül zajló folyamatok hatását a peremfeltételeken keresztül veszi figyelembe. A peremfeltételek csatolása a Davies séma (Davies, 1976) alkalmazásával egy 8 rácspont szélességű ún. *relaxációs zónában* történik, ahol összesítjék a prognosztikai változóknak a „meghajtó” modell által a zóna külső peremén határfeltételként előírt és a regionális modell által a zóna belső határpontjaiban megadott értékeit, kiszűrve az ezek eltéréseiből eredő zajokat.

A fizikai parametrizációs sémák az ARPEGE-Climate modellből származnak. A sugárzás-átviteli folyamatokat leíró csomag hosszuhullámú sugárzást leíró része az RRTM (Rapid Radiation Transfer Model; Mlawer et al., 1997) sémán alapul, mely figyelembe veszi a hosszuhullámú sugárzás emisszióját, abszorpcióját, és egyes légköri gázok illetve aeroszolok 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.

RegCM

A RegCM korlátos tartományú hidrosztatikus éghajlati modellt eredetileg az NCAR⁴-ban fejlesztették ki, s jelenleg a Triesztben működő ICTP⁵ közvetítésével hozzáférhető kutatási célokra. Az ELTE Meteorológiai Tanszékén alkalmazott 4.3-as modellverzió adaptációs lépéseit Torma et al. (2008; 2011) részletezi.

A modell első generációjának kidolgozásához az NCAR és a PSU⁶ 4-es verziószámú mezoskálájú modellje (MM4) szolgált alapul az 1980-as évek végén (Dickinson et al., 1989). Az MM4 klímakutatásokhoz való átalakítása során több fizikai parametrizációt módosítottak, illetve lecseréltek. Ezek döntően a sugárzási energia-átviteli és a felszíni fizikai folyamatokat érintik, s így jutottak a RegCM első generációjához (Giorgi, 1990). A további modellfejlesztés során a meglévő egyenleteket úgy korrigálták, hogy csökkentsék a nagy topográfiai gradiensekből fakadó túlzott mértékű horizontális diffúziót (Giorgi et al., 1993a, b). Az így létrehozott

⁴ National Center for Atmospheric Research (amerikai Nemzeti Légkörkutató Központ)

⁵ Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ)

⁶ Pennsylvania State University (Pennsylvania Állami Egyetem)

RegCM2 modellverzióban a fizikai folyamatokat leíró eljárásokhoz az alapot a CCM3⁷ klíma-modell és az MM5 hidrosztatikus mezoskálájú modell (Grell et al., 1994) szolgáltatta.

A korábbi verziókhöz képest az általunk újonnan adaptált modellverzió (Elguindi et al., 2011) új felszíni, planetáris határréteg és légkör-tengerfelszín fluxus sémákat tartalmaz, továbbá a korábbi sugárzás-átviteli és határréteg sémák is módosításra kerültek. A jelenlegi modell már párhuzamos futtatásra is alkalmas, ami lényeges a futtatások minél rövidebb gépidő alatt történő kivitelezéséhez.

A RegCM rácsponthoz tartozó modell, a térbeli deriváltakat véges különbségekkel közelíti. Számításait Lambert-féle kúpvetületet végzi, s a horizontális diszkretizációból eredő fázishibákat eltolt rács (B-típusú Arakawa-rács; Mesinger és Arakawa, 1976) alkalmazásával csökkenti. Függetlenül irányban szigma-koordinátákat (Phillips, 1957) alkalmaz, melyek a légkör alsó rétegeiben felszínkövetők, míg az alacsonyabb nyomású szintek már kisimult felületek mentén futnak. A középső szintek folyamatosan egyenesednek ki, ahogyan közeledünk a legalacsonyabb nyomási szint felé. A prognosztikai változók időbeli fejlődésének leírására egy split-explicit sémát használatával a RegCM külön kezeli az egyenletrendszer lineáris és nemlineáris tagjait. A határfeltételek kezelésére egy 24 rácsponthoz tartozó relaxációs zónát használ Davies és Turner (1977) sémája alapján.

Az elvégzett érzékenységi vizsgálatok (Bartholy et al., 2015) azt mutatták, hogy a BATS⁸ szubgrid sémáját aktiválva pontosabban tudjuk reprodukálni a múltbeli éghajlati viszonyokat. Ezzel a sémával egy finomabb rácsháló definiálásával vesszük figyelembe az eredeti rácsháló felbontásánál kisebb skálán zajló folyamatokat, amelyekhez a földhasználat, a domborzat és a talajtextúra megadása szükséges. Ezután kerül sor a BATS séma alkalmazására a finomabb rácson, végül a felkálázásra, a finomabb rácshálóra kapott értékek összegzésével.

A RegCM-szimulációk csapadék outputjainak parametrizációs beállításra való érzékenységi vizsgálata alapján (Bartholy et al., 2015) a múltbeli validációs és a jövőbeli projekciós futtatásainkhoz a kevert MIT-Emanuel/Grell sémát alkalmazzuk. Ebben a tengeri felszínnek esetén az MIT-Emanuel közelítés (Emanuel, 1991, Emanuel and Zivkovic-Rothman, 1999) szerepel, a szárazföldi felszínnek felett viszont a Grell (1993) sémával számolunk, Fritsch–Chappell lezárással (1980). A Grell sémában a felhők leírására két stabil cirkulációt használnak: egy felszálló, illetve egy leszálló áramlást. Amikor egy telített légréteg emelkedik, akkor megtörténik a kondenzáció. Az FC lezárás a konvektív fluxusok és a légkör instabilitási foka közötti összefüggést használja fel. Az MIT-Emanuel közelítésben a konvekció akkor következik be, amikor a semleges felhajtóerő szintje a felhőalap felett található. Ez a séma a szárazföldi felszínnek felett általában felülbecsüli a csapadékot, a Grell séma pedig a trópusi óceánok felett kevésbé pontos (Davis et al., 2009). Emiatt javasolt a két séma kombinációjaként beépített kevert MIT-Emanuel/Grell sémát használni.

Modellkísérletek

Az éghajlati modellek jövőre vonatkozó eredményei nem értelmezhetők addig, amíg a modellek validációja nem történik meg. Nem értékelhetők ugyanis a jövő éghajlatát becsülő modellszimulációk, ha nem ismerjük, mennyire képes a modell reprodukálni a jelenlegi klímát jellemző paramétereket. A validáció során egy hosszabb (néhány évtizedes) múltbeli időszakon kétféle modellfuttatást végzünk el:

1. Az első kísérletben a regionális modell számára a kezdeti- és peremfeltételeket ún. *re-analízisek* szolgáltatják, melyeket a légkör múltbeli állapotának legpontosabb realizáci-

⁷ Climate Community Model

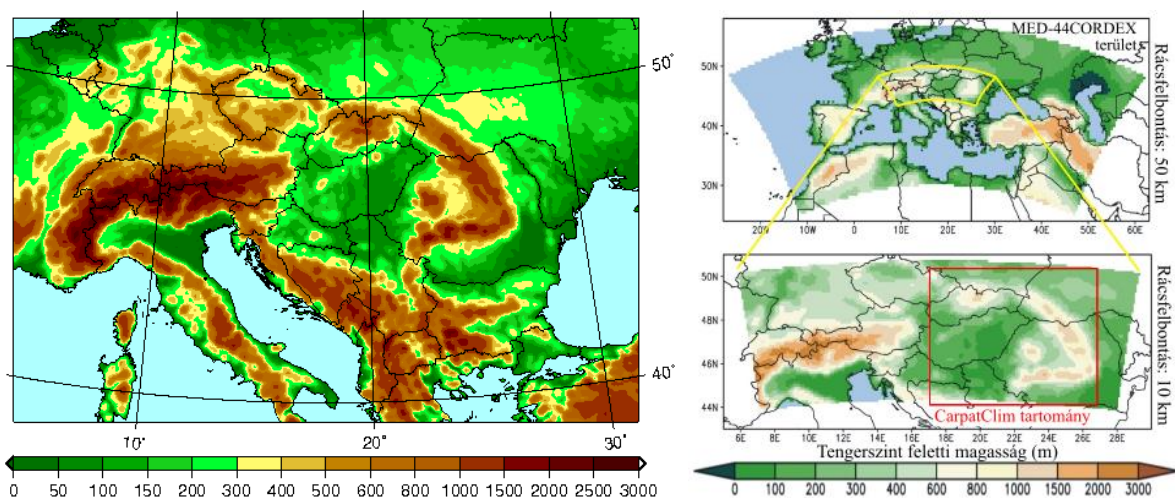
⁸ Bioszféra-Atmoszféra-Transzfer-Séma

ójának tekintünk. Előállításuk ugyanis a teljes 3 dimenziós légkörre vonatkozóan számos (földfelszíni, műholdas, stb.) mérési információt, valamint rövid távú előrejelzéseket felhasználva adatasszimilációs módszerek alkalmazásával történik. Mivel a méréseken alapuló re-analízisek (többnyire) csekély hibával közelítik a valóságot, ezért az ezekkel meghajtott kísérlet azt mutatja meg, hogy a regionális modell milyen pontosan tudja becsülni egy térség jelenlegi klímáját, s az így készült eredmények az egyes évek jellemzőit is visszaadják.

2. Mivel a jövőre vonatkozó vizsgálatoknál az oldalsó peremfeltételek – mérések hiányában – értelemszerűen csak globális klímamodellekből származhatnak, így meg kell vizsgálni az ezekkel meghajtott regionális modell viselkedését is. Ezek az eredmények a globális és a regionális modell együttes hibáira világítanak rá. A re-analízis határfeltételekkel készített kísérlettel ellentétben az értékelést ebben az esetben csak az adott térség több évtizedre vett átlagos éghajlati viszonyait tekintve végezhetjük el, ugyanis a globális modell csak a légköri gázok koncentrációján keresztül van kapcsolatban a valósággal.

Az RCMTÉR projektben végrehajtott szimulációknál az első kísérlethez mindkét regionális klímamodell számára az ERA-Interim re-analízis adatbázis szolgáltatta a meghajtó feltételeket (Dee et al., 2011), melyet az Európai Középtávú Előrejelző Központban (ECMWF⁹) állítottak elő. Az adatbázis horizontális rácsfelbontása hozzávetőlegesen 80 km 60 vertikális szinttel, s az 1979–2015 időszakot 6-órás időbeli sűrűséggel fedi le. (A RegCM modell esetében először egy 50 km-es felbontású szimuláció készült a re-analízis határfeltételekkel, majd ennek leskálázása történt meg egy kisebb, 10 km-es felbontású tartományra.)

A második kísérletben a határfeltételeket mindkét modell számára egy korábban futtatott, kapcsolt légkör–óceán általános cirkulációs modell mezőinek dinamikus leskálázásával előállított ALADIN illetve RegCM szimuláció eredményei biztosították, azaz mindkét esetben egy szintén korlátos tartományú éghajlati szimulációt skáláztunk le finomabb felbontásra. A közvetlen határfeltételek 50 km-es felbontású térbeli rácson, 31 illetve 23 vertikális szinten, 6-órás időbeli sűrűséggel álltak rendelkezésre, ezek számára pedig az ALADIN-Climate esetében az ARPEGE-Climate/OPA, míg a RegCM esetében a HadGEM2 modell adta a kezdeti- és peremfeltételeket. A modellintegrálások tartományát a **3. ábra**, a kísérletek jellemzőit pedig az **1. táblázat** mutatja.



3. ábra: A 10 km-es felbontású ALADIN modellkísérletek (bal) illetve a 10 és 50 km-es felbontású RegCM modellszimulációk integrálási tartománya és domborzata.

⁹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

1. táblázat: A modellkísérletek jellemzői.

	ALADIN_ERAI	ALADIN_ARP	RegCM_ERAI	RegCM_HadG
Határfeltétel	ERA-Interim	ARPEGE-Climat → ALADIN-Climate	ERA-Interim → RegCM	HadGEM2 → RegCM
Horizontális felbontás	10 km	10 km	10 km	10 km
Szintek száma	31	31	23	23
Határfeltételek felbontása	80 km	50 km	50 km	50 km
Időszak	1980–2000	1950–2005	1980–2000	1950–2005
Integrálási időlépcső	300 s	300 s	30 s	30 s

Megfigyelési adatok

Az eredmények validációját két területre is elvégeztük, amihez két különböző megfigyelési adatbázist használtunk referenciaként:

1. Egy mindkét modell által lefedett európai területre azt vizsgáltuk, hogy a kontinens nagytérségű éghajlati jellemzőit hogyan adják vissza a modellek. Ehhez az E-OBS v10.0 (Haylock et al., 2008; van den Besselaar et al., 2011) 0,25-fokos (kb. 25 km-es) térbeli felbontású adatsorait használtuk referenciaként. Az adatbázis homogenizálatlan, többnyire publikus adatsorok felhasználásával készült. (Hazánkra vonatkozóan ez csak néhány állomást jelent, ezért az E-OBS a tartomány magyarországi részén helyenként nagy eltéréseket mutathat a hazai adatoktól.)
2. Magyarország területére külön validációt végeztünk a CARPATCLIM megfigyelési adatok (Lakatos et al., 2013) felhasználásával. A napi adatokat tartalmazó adatbázist a hazai és környező országok állomási mérési adataiból a speciálisan meteorológiai célokra kifejlesztett MASH¹⁰ homogenizációs (Szentimrey, 2008) és MISH¹¹ interpolációs eljárás (Szentimrey és Bihari, 2007) alkalmazásával állították elő egy 0,1-fokos (kb. 10 km-es) felbontású rácson. A vizsgálatok többségét ezzel a referencia-adatbázissal hajtottuk végre, mert fő célunk annak vizsgálata, hogy a modellek hogyan írják le a magyarországi éghajlati viszonyokat.

Validációs eszközök

A validáció során az előállt eredményeket különböző mérési adatbázisokkal hasonlítjuk össze, s a modellek jóságát több statisztikai mutató 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 kiértékelésnél két meteorológiai változóra, a hőmérsékletre és csapadéokra koncentráltunk, s az 1981–2000 referencia-időszakra végeztük el azt éves, évszakos, havi és napi adatok felhasználásával. Az alkalmazott validációs eszközöket és módszertani jellemzőket az alábbiakban összefoglaljuk:

¹⁰ Multiple Analysis of Series for Homogenization

¹¹ Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis

- **Szisztematikus hiba és szignifikancia:** minden rácspontban kiszámítottuk a modelleredmények és a mérési adatok átlagos éves és évszakos különbségét. Az összevetést a referencia adatbázis rácshálózatán végeztük el – mind a 25 km-es felbontású E-OBS, mind a 10 km-es felbontású CARPATCLIM referencia-adatok esetében. (Ezzel elkerüljük, hogy a megfigyelések finomabb felbontásra történő interpolációjával zajt hozunk az eredményekbe.) A térképeken az alul-, illetve felülbecslés mértékét a színárnyalatok reprezentálják. 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 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 szisztematikus és négyzetes hiba:** kiszámítottuk az éves és évszakos szisztematikus hibák magyarországi átlagértékeit, illetve az éves és évszakos modelleredmények és a megfigyelések közötti évenkénti négyzetes eltérések (azaz a négyzetes hiba, RMSE¹²) magyarországi átlagát. A négyzetes hibaértékeket csak a re-analízis határfeltételekkel készült kísérletekre határoztuk meg, ugyanis a GCM-meghajtású kísérletek nem tükrözik vissza az egyedi évek jellemzőit, így ezekre nincs értelme az évenkénti eltéréseket kiszámítani.
- **Átlagos térbeli és időbeli szórás:** a térbeli szórás esetében a referencia-időszakra vonatkozó éves és évszakos átlaghőmérséklet valamint csapadékösszeg magyarországi rácspontokban felvett értékeinek az országos átlag körüli szórását számítottuk ki, míg az időbeli szórás esetében az éves és évszakos országos átlagok évenkénti értékeinek a referencia-időszak átlagértéke körüli szórását határoztuk meg.
- **Éves menet:** összevetettük a modelleredmények illetve a mérések alapján a havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg referencia-időszakra kiszámított átlagos magyarországi értékeit.
- **Évenkénti (vagy 20-éves) menet:** összevetettük a modelleredmények illetve a mérések alapján az éves és évszakos átlaghőmérséklet és csapadékösszeg magyarországi átlagának évenkénti értékeit. Mindezt csak a re-analízis határfeltételekkel készült kísérletekre végeztük el, ugyanis ahogyan fent említettük, a GCM-meghajtású kísérletek nem tükrözik vissza az egyedi évek jellemzőit, így ezekre nincs értelme évenkénti összehasonlítást tekinteni.
- **Whisker-box diagramok:** ezek a diagramok lehetővé teszik az éves és évszakos magyarországi átlagok eloszlásának összehasonlítását a mérési adatokra és a modelleredményekre (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 %-os valószínűségeit) jelölik, míg a dobozok közepén lévő vonal a mediánértékeket (a minták középső elemét) mutatja. A dobozok alatt, illetve felett lévő függőleges szaggatott vonalak a referencia-időszak 20 éve alatt előforduló minimális és maximális éves és évszakos átlagértékeket jelzik (azaz a fennmaradó 25-25 %-ot). Értelemszerűen a téglalap illetve a függőleges szaggatott vonal elnyúló hossza az évek közötti változékonyság nagyságára utal az adott modellkísérletben valamint a megfigyelésekben.

¹² Root mean squared error

- **Taylor-diagram:** a diagram lehetőséget ad a modellszimulációk gyors összevetésére, mivel egyszerre mutatja a referencia idősor időbeli szórásával normalizált referencia és szimulált idősorok korrelációját, szórásuk arányát, s a modell-szimulációk 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 jellemzik. Azok a szimulációk, amelyek jelei a fekete kereszthez közelebb helyezkednek el, jobban reprodukálják a mért értékeket, mint amelyek távolabb vannak. A felhasznált adatsorok időbeli felbontása alapján két-féle diagramot készítettünk:
 1. Az első típusnál a bemenő adatokat a hőmérséklet és a csapadék magyarországi 20-éves havi átlagértékei adták, s a 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, ezen belül a teli szimbólumok a re-analízis, az üres szimbólumok a GCM-határfeltételekkel készült modellszimulációk eredményeit jelölik.
 2. A második típusnál a bemenő adatokat a hőmérséklet és a csapadék évenkénti magyarországi évszakos átlagértékei adták, s az eredményeket a két meteorológiai változóra külön diagramon mutatjuk be. Különböző szimbólumokkal jelöltük az egyes modellkísérleteket, az ALADIN esetében körrel, a RegCM-nél pedig háromszöggel, az évszakokat pedig színekkel különítettük el. Ezen a diagramon a modellkísérletek közül csak a re-analízis határfeltételekkel készített szimulációk eredményeit tüntettük fel, mert ahogyan már említettük, a GCM-meghajtású kísérletek nem tükrözik vissza az egyedi évek jellemzőit.
- **Hisztogramok:** a magyarországi napi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg eloszlását hisztogramok segítségével vizsgáltuk, melyeket két hónapra, a hideg és száraz januárra valamint a meleg és csapadékos júliusra állítottunk elő. Az átlaghőmérséklet esetében a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti intervallumot 1 fokként, a csapadékösszeg esetében pedig a 0 mm és 30 mm közötti intervallumot 1 mm-enként osztottuk fel (kivéve a csapadék legelső kategóriáját, mely a 0 és 0,1 mm közötti csapadékú, csapadékmentesnek tekintett napokat jelöli), és ezekre a kategóriákra számítottuk ki a modelleredmények és a mérési adatok gyakoriságát. Az eredményeket a re-analízis illetve GCM határfeltételekkel készült kísérletekre külön diagramon jelenítettük meg. A csapadék esetében az eloszlások szemléletes ábrázolása problémásabb, ugyanis az egyes kategóriák előfordulási gyakorisága meredeken csökken a nagyobb napi csapadékösszegek irányába. Ezért itt a hisztogramok 10 mm-t és 20 mm-t meghaladó részeit kinagyítottuk annak érdekében, hogy a gyakoriságértékek közötti különbségek vizuálisan láthatók legyenek ezekben a kategóriákban is.
- **Scatter-plot diagramok:** a napi adatok felhasználásával különböző hőmérsékleti és csapadék éghajlati indexek (**2. táblázat**) éves és évszakos gyakoriságát vizsgáltuk. Ehhez meghatároztuk a napi modelleredményekből és a napi mérésekből a teljes időszakra vonatkozó éves és évszakos gyakoriságokat, s az eredményeket scatter-plot diagramokon jelenítettük meg a magyarországi rácpontokra, az x-tengelyen a méréseket, az y-tengelyen a modelleredményeket ábrázolva. Ideális esetben a szimuláció-mérés párokat reprezentáló pontok az átló közelében helyezkednek. 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.

2. táblázat: A vizsgált hőmérsékleti és csapadékindexek.

Index	Definíció
Nyári nap	A napi maximumhőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot.
Hőségnap	A napi maximumhőmérséklet eléri a 30 °C-ot.
Fagyos nap	A napi minimumhőmérséklet 0 °C alatti.
Csapadékos nap	A napi csapadékösszeg eléri az 1 mm-t.
Nagy csapadékú nap	A napi csapadékösszeg eléri a 10 mm-t.
Száraz időszakok maximális hossza	Azon egymást követő napok maximális száma, amikor a napi csapadékösszeg 1 mm-nél kisebb.

Eredmények

Hőmérséklet

Az Európa területére rendelkezésre álló E-OBS adatbázissal való összehasonlítás (**4. ábra**) alapján megállapítható, hogy az ALADIN modell a kontinens nagy részén alábecsli az átlaghőmérsékletet, a RegCM eredményeit pedig többnyire fölébecslés jellemzi. A magasan fekvő területeken mindkét modell mindkét kísérletében az eredmények kiugró negatív eltéréseket mutatnak a megfigyelésektől, például az Alpok területén a hiba a -4 fokot is elérheti. Az ALADIN esetében az alábecslés a nyári évszakban mérsékeltebb, kontinens keleti-északkeleti illetve közép-tájain (így hazánkban is) pedig a pozitív hibák jellemzők. Az eredményeket a CARPATCLIM megfigyelésekkel összevetve a nyári fölébecslés mértéke Magyarországon átlagosan 1-3 °C (**3. táblázat**), s a kisebb eltérések a re-analízis határfeltételekkel készült szimulációhoz tartoznak. Ez egyébként nemcsak a nyárra igaz: a többi évszakban ugyanúgy az alábecslés mértéke akár 1 fokkal is kisebb lehet, mint az ARPEGE határfeltételekkel készült szimuláció eredményeiben. A hibák hazánk nagy részén szignifikánsak (**5. ábra**), eltekintve néhány rácsponttól a déli és keleti országrészben, ahol a megfigyelésektől vett eltérés nem haladja meg a 0,5 fokot. A magyarországi mezőkből kiemelkedik a Balaton térsége: elsősorban az ERA-Interim határfeltételekkel előállított modelleredmények esetében a Balaton felett fölébecslést tapasztalunk. Ennek oka, hogy a magyarországi vizsgálatokhoz referenciaként használt CARPATCLIM hőmérsékleti mérésekben a Balatonra eső rácspontokban nem jelenik meg a tó hatása, mivel állomási megfigyelések – amikből az interpoláció történt – csak a szárazföldön állnak rendelkezésre. Ellenben az ALADIN modellben használt SURFEX felszínleíró modul külön parametризációt alkalmaz a tavi folyamatokra, ami a tó felszínére eső rácspontokban a valósághoz (ami jelen esetben nem egyezik meg a mérésekkel) közelebbi hőmérséklet-értékeket szolgáltat.

A RegCM esetében ugyancsak érdemes a nyári évszakot kiemelni, amikor a modell-eredményekben a legnagyobb fölébecslést tapasztaljuk. Ez hazánk területén a déli-délkeleti tájakon a 3 °C-ot is meghaladja. Az őszi és kisebb mértékben a téli évszakban a re-analízis és a HadGEM határfeltételekkel készült szimuláció eredményei eltérő jelleget mutatnak: míg az előbbi kísérletnél alábecslést csak a hegyvidéki területeken láthatunk (**4. ábra**), addig utóbbiban ez kiterjed a tartomány nyugati és északi részeire. Ez a kettősség hazánk területén is megfigyelhető, ahogyan az is, hogy a magasabban fekvő tájakon inkább az alábecslés jellemzi az ered-

ményeket (ez jobban látszik abban az esetben, amikor az eredményeket a CARPATCLIM adatokkal vetjük össze; **5. ábra**). A hibák kevesebb rácspontban szignifikánsak, mint az ALADIN-nál, különösen a HadGEM meghajtású szimuláció esetében. Ezt egyébként az átlagos hibák és időbeli szórásértékek összevetése is jelzi (**3. táblázat** és **5. táblázat**): a GCM-meghajtású szimuláció évenkénti értékei minden évszakban nagyobb változékonyságot mutatnak, mint a re-analízis határfeltételekkel előállított eredmények, felülbecsülve a mérések alapján kiszámított szórásértékeket. A RegCM esetében a Balaton térségének hibaértékei nem emelkednek ki a környezetükből, aminek oka az, hogy a RegCM-ben nem alkalmaznak speciális leírást a tó folyamatainak modellezésére, így eredményei jobban összhangban vannak a mérésekkel.

A hőmérséklet hazánkban jellemző átlagos éves menetét mindegyik adatsor jól visszatükrözi az 1981–2000 időszakra (**6. ábra**): a legalacsonyabb értéket többnyire januárra (a RegCM_HadG decemberre), míg a maximumot júliusra adják. A referencia adatbázisok hőmérsékleti menetét legjobban a re-analízis meghajtású futtatások követik, amit a Taylor-diagramok (**7. ábra**) is alátámasztanak: bár a havi átlaghőmérséklet-értékek korrelációja minden kísérlet esetében eléri a 99%-ot, a re-analízis határfeltételekkel mindkét modell kissé jobb eredményeket produkál. Ez nemcsak a korrelációra igaz, hiszen a szórás- és a normalizált négyzetes hiba-értékek is ezekben a szimulációkban adnak jobb eredményeket. Az 1-nél valamivel nagyobb szóráshányados jelzi, hogy alá- és fölébecslés egyaránt előfordul az év során.

Az évszakai átlaghőmérséklet évenkénti értékeit csak a re-analízisekkel meghajtott kísérletek eredményeire tudjuk megfigyelésekkel összevetni. Mindkét modell esetében megállapíthatjuk, hogy azok a hibajellemzők, amiket a térképeken tapasztaltunk, szisztematikusak, azaz nemcsak 20-éves átlagban, de minden évben érvényesek: az ALADIN a nyár kivételével mindig alulról, a RegCM pedig felülről közelíti az átlaghőmérsékletet (**8. ábra**). A megfigyelések menetét jól követi mindkét szimuláció, a melegebb és a hűvösebb éveket egyaránt visszaadják. A legjobban ez a téli évszakban sikerül, ekkor a legmagasabb a korreláció értéke a Taylor-diagramon, és a legkevésbé nyáron (**9. ábra**). A szóráshányados a RegCM esetében a nyarat leszámítva 1 alatti, azaz az évek közötti változékonyság kissé elmarad a mérések változékonyságától; az ALADIN esetében pedig a tél kivételével a mértnél magasabbak a szórásértékek (mindez látható az **5. táblázatban** is). Az évek közötti változékonyság többnyire nagyobb a GCM határfeltételekkel készült szimulációk eredményeinél; ez nemcsak az időbeli szórásértékekből olvasható ki, de a Whisker-box diagramokon (**10. ábra**) az ezekhez a kísérletekhez tartozó elnyúltabb téglalapok és intervallumok is ugyanezre utalnak.

Megvizsgáltuk a január és július hónapok napi középhőmérsékleteinek gyakorisági eloszlását a két modell eredményeire és a referencia adatbázisra vonatkozóan. Az eloszlások ismeretében képet kapunk arról, hogy a hibaterképeken megismert átlagos hibák a modellben mely események (pl.: a fagypontra alatti középhőmérsékletű napok) túlzott gyakoriságához vagy hiányához köthetőek. A januári napi középhőmérsékletek eloszlásán (**11. ábra**, felső két panel) jól látható a két modell eltérő viselkedése. Az ALADIN eredményekben az alacsony hőmérsékletekhez nagyobb, a magasabb hőmérsékletekhez kisebb relatív gyakoriság társul, mint a referencia adatok esetében. A GCM-meghajtású szimulációban az extrém alacsony napi hőmérsékletek előfordulása különösen erősen túlbecsült: olyan értékek is előfordulnak, amelyek a megfigyelésekben nem. Ezzel szemben a RegCM eredmények eloszlásgörbéi a referenciához képest pozitív irányba tolódtak el: a 0 °C-nál magasabb középhőmérsékletű napok gyakoriságában láthatunk felülbecslést, az alacsonyabb értékek esetében pedig alulbecslést. A napi minimumhőmérséklettel jellemzett fagyos napok éves száma (**12. ábra**, bal panelek) ehhez hasonló az ALADIN esetében, a RegCM-nél viszont eltérő a kép a különböző határfeltételekkel készült kísérleteknél: a re-analízis meghajtású esetben a fagyos napok előfordulásának alábecslése jellemző, a GCM meghajtású esetben pedig zömében fölébecslést tapasztalunk.

A júliusra vonatkozó hisztogramok nemcsak az értékek eltolódását mutatják a modell-eredményekben, hanem az eloszlásgörbék is "laposabbak" a referencia eloszlásánál (**11. ábra**,

alsó két panel). A RegCM modell eredményei erősen felülbecslik a 25 °C-nál magasabb, s alábecslik az alacsonyabb középhőmérsékletű napok előfordulását. Ez az ALADIN_ERAI kísérlet esetében kisebb mértékű, viszont a két modell GCM meghajtású szimulációjának eredményei nagy hasonlóságot mutatnak (az ALADIN-nál egy másodmaximum jelenik meg a 27-28 °C középhőmérsékletű napoknál, ami a referenciában nem fordul elő). A 25 °C-ot meghaladó maximumhőmérséklettel jellemzett nyári napok, valamint a 30 fokot elérő maximumhőmérséklettel jellemzett hőségnapok becslése ezzel egybevág (**12. ábra**, középső és jobb panelek): mindkét modell eltúlozza ezek gyakoriságát, az ALADIN esetében a két kísérlet közül a re-analízis határfeltételekkel készült szimulációk eredményei közelítik jobban a megfigyeléseket.

Csapadék

A modellszimulációk csapadékeredményeit az E-OBS adatbázissal összevetve megállapíthatjuk, hogy minkét modellre az évszakos csapadékmennyiségek fölülbecslése jellemző (**13. ábra**). Ez alól kivételt képez az ALADIN esetében az integrálási tartomány északkeleti és északnyugati része, valamint ősszel és télen Dél-Európa magasabban fekvő területei, Magyarország délnyugati határvonala és az Adriai-tenger közötti régió. A RegCM esetében ősszel és télen elsősorban hazánk déli-délnyugati tájain, illetve az országtól délnyugatra fekvő területeken, nyáron pedig a tartomány nagy részén mutatkozik kiterjedt alulbecslés. A magas domborzattal tagolt területeken (pl. az Alpokban, a Kárpátokban) a felülbecslés fokozottabban jelentkezik, és helyenként a 80-100 %-os értéket is elérheti.

A modelladatokat Magyarországra összehasonlítva a CARPATCLIM adatbázis mérési adataival (**14. ábra**), az ALADIN esetében a csapadék fölőbecslését tapasztaljuk az év első felében, míg ősszel és télen az ország nyugati tájain a modell túl száraz. A különböző határfeltételekkel készült kísérleteket tekintve a fölőbecslés a re-analízis, az alábecslés pedig a GCM meghajtású szimuláció eredményeiben nagyobb mértékű, országos átlagban 27–58 % (17–27 mm; **6. táblázat**) illetve -9% (3–4 mm). A RegCM esetében a nyarat leszámítva az ország nagy részén a csapadék fölőbecslése jellemző, ami alól a délkeleti tájak jelentenek kivételt. Nyáron a modell túl száraz, az alábecslés mértéke országos átlagban közel 20%-os. Az év első felében a re-analízis, az ősszel és télen pedig a GCM határfeltételekkel készült szimuláció közelíti jobban a megfigyeléseket. A megfigyelésektől vett eltérések főként azokban a rácsponthoz és évszakokban szignifikánsak, ahol a hiba meghaladja a 10%-ot.

A csapadék esetében fontos szót ejteni a referencia-adatbázisok minőségéről, ugyanis a hőmérséklettel ellentétben a csapadékösszegre vonatkozó eredményeknél jelentős eltéréshez vezetett a különböző referenciák használata. A mérési adatok eltéréseinek számos oka van, többek között az adatbázisok különböző térbeli felbontása, az E-OBS adatbázis előállításához figyelembe vett csekély számú hazai állomás, illetve az, hogy a CARPATCLIM adatbázis homogenizált adatokat tartalmaz. Éves szinten az E-OBS és a CARPATCLIM adatbázis közötti eltérés Magyarországra átlagban 12-13 % mindkét modell esetén, a különbség télen a legnagyobb és ősszel a legkisebb. A RegCM esetén ősszel és télen Magyarország délnyugati területei nedvesebbnek adódtak az E-OBS adatokkal való összevetés során, mint a CARPATCLIM szerint. Az ALADIN esetén a téli modellhibák előjelükben is eltérnek az országos átlagban: ekkor a CARPATCLIM közel 20%-kal nagyobb csapadékösszeget mutat, mint az E-OBS.

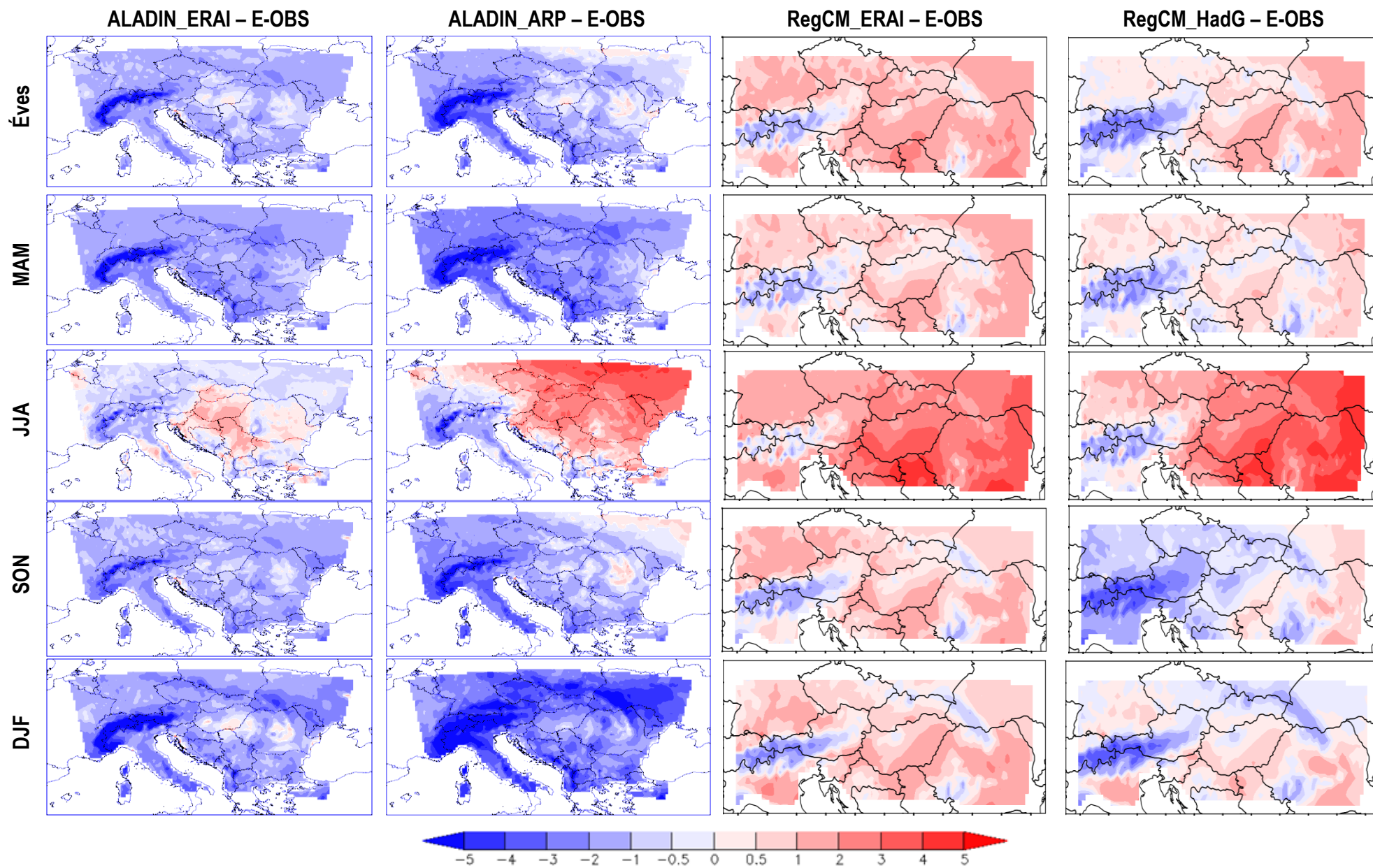
A csapadék hazánkban jellemző átlagos éves eloszlását nem mindegyik modellkísérlet tudja pontosan leírni (**15. ábra**). A RegCM a csapadék maximumát májusra adja, s a HadGEM határfeltételekkel októberre is mutat egy másodmaximumot. Ennek eredményeképpen a Taylor-diagramon (**7. ábra**) a RegCM-hez tartozó (hózzávetőlegesen 55%-os) korrelációs értékek kisebbek, mint az ALADIN esetében (ahol meghaladják a 70%-ot). A májusi maximum az ALADIN_ERAI kísérletben is megjelenik (egy erős fölőbecsléssel párosulva), az ALA-

DIN_ ARP szimuláció viszont realiztikusabban (és kisebb fölébecsléssel, amit a kisebb szórás-hányados is mutat a Taylor-diagramon) írja le az évi menetet.

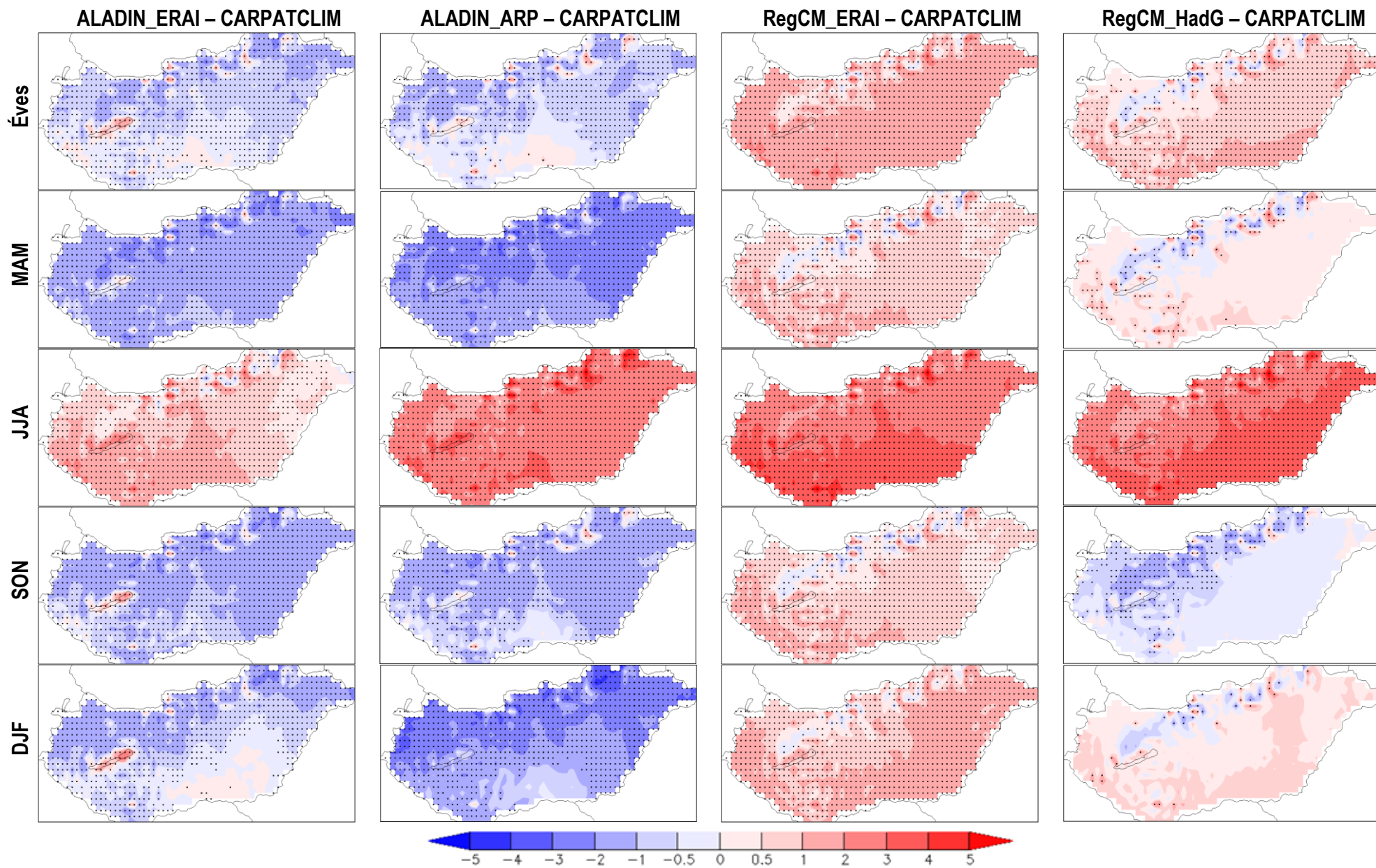
Az évszakos csapadékösszeg évenkénti értékeit szintén csak a re-analízisekkel meghajtott kísérletek esetében tudjuk megfigyelésekkel összevetni. A 20-éves meneteket bemutató grafikonok (**16. ábra**) alapján már nem mondható el minden évszakban, hogy a hőmérséklethez hasonlóan egyértelmű szisztematikus alul- vagy felülbecslés tapasztalunk, a szimulációk menete különösen ősszel gyakran ingadozik a referencia körül. Emiatt az évszakos Taylor-diagramokon (**17. ábra**) is jóval szétszórtabban helyezkednek el a modellkísérleteket reprezentáló szimbólumok. A megfigyelések menetét télen adják vissza a legjobban a modellek: az ALADIN esetében szinte teljes az egyezés, amit az évszakos Taylor-diagramok is jól illusztrálnak az 1-hez közeli szórás-hányadossal és a 95% fölötti korrelációértékkel. A leggyengébben nyáron követik a modellek az évek közötti menetet: a RegCM korrelációértéke például ekkor 40% alatt marad (**17. ábra**). Az évek közötti változékonyság a RegCM esetében egyértelműen nagyobb a HadGEM meghajtású kísérlet évszakos eredményeiben, mint a re-analízis határfeltételekkel készült szimuláció esetében, az ALADIN esetében viszont ez csak tavasszal és nyáron teljesül (ez mind az időbeli szórásértékekből, mind a Whisker-box diagramokon leolvasható; **7. táblázat** és **18. ábra**).

A csapadéknál is megvizsgáltuk a január és július hónapok napi csapadékmennyiségeinek gyakorisági eloszlását a két modell eredményeire és a referencia adatbázisra vonatkozóan. A vizsgálat szerint a RegCM januári eredményeiben a kisebb és a nagyobb (10-30 mm-es) napi csapadékmennyiségek is gyakoribbak, mint a referenciában, a csapadékmentes napok gyakorisága pedig túl alacsony (**19. ábra** felső két panelje). Az ALADIN szimulációk csapadékeredményei meglehetősen jól közelítik a CARPATCLIM januári eloszlását, a re-analízis határfeltételű szimulációban azonban a 20 mm-t meghaladó csapadékú napok gyakorisága kissé alacsony, a GCM meghajtású kísérletben pedig inkább magas. A júliusra vonatkozó ALADIN eredményekben a csapadékmentes napok száma erősen alulbecsült (**19. ábra** alsó két panelje), a 0,1 és 10 mm közötti csapadékok előfordulása meghaladja a referencia értéket, a 10-12 mm-t meghaladó napi csapadékösszegek gyakorisága viszont ismét alacsonyabb annál. A RegCM eredmények viszonylag jól közelítik a referencia júliusi eloszlását az alacsony csapadékmennyiségek esetén, de a 10 mm-t meghaladó napi csapadékösszegek ebben a modellben is túl ritkán fordulnak elő mindkét határfeltétel esetében.

A hisztogramokkal egybevágó képet mutatnak a különböző csapadékindexekre elvégzett vizsgálatok. A csapadékos napok számát az ALADIN tavasszal és nyáron jelentősen, ősszel kisebb mértékben eltúlozza (**20. ábra**), s a nyár kivételével a RegCM eredményeit is inkább a felülbecslés jellemzi. Ezzel párhuzamosan az említett évszakokban a száraz időszakok maximális hosszát a modellek szinte minden rácspontban alulbecslik (**22. ábra**); fölébecslés a RegCM-nél nyáron, az ALADIN-nál télen tapasztalható. A 10 mm-t meghaladó csapadékú napok esetében az ALADIN jelentős többlete eltűnik, sőt nyáron és ősszel inkább a mértéknél kissé alacsonyabb előfordulást jelez a megfigyelésekhez képest (**21. ábra**). A nyár kivételével a RegCM eredményeiben ezúttal is fölébecslést figyelhetünk meg. A különböző határfeltételek alkalmazása nem mutat jelentős különbséget az eredményekben.



4. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakai átlaghőmérséklet átlagos eltérése (°C) az E-OBS megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.



5. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos eltérése (°C) a CARPATCLIM megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. A szignifikáns eltérések helyét pontozással jelöltük.

3. táblázat: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos magyarországi eltérése (°C) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.

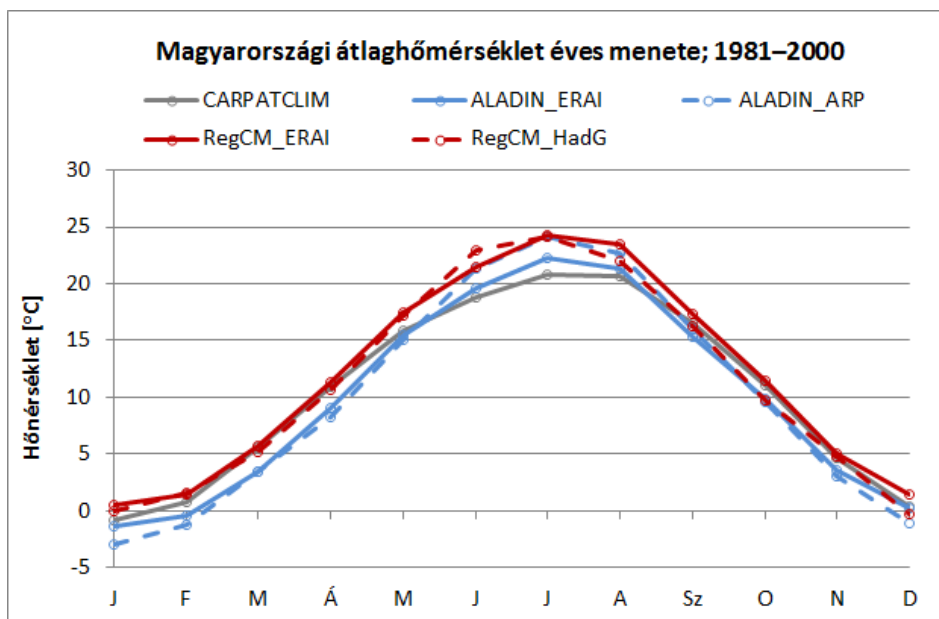
Hőmérséklet átlagos eltérése [°C]						
Kísérlet	Referencia	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
ALADIN_ERAI	E-OBS	-0,6	-1,5	0,8	-1,0	-0,7
	CARPATCLIM	-0,6	-1,5	0,9	-1,2	-0,7
ALADIN_ARP	E-OBS	-0,6	-1,9	2,5	-1,0	-1,9
	CARPATCLIM	-0,7	-2,0	2,5	-1,2	-1,9
RegCM_ERAI	E-OBS	1,3	0,7	2,9	0,8	1,0
	CARPATCLIM	1,3	0,7	2,9	0,6	0,9
RegCM_HadG	E-OBS	0,7	0,2	2,8	-0,4	0,3
	CARPATCLIM	0,7	0,2	2,9	-0,5	0,3

4. táblázat: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet átlagos négyzetes eltérése Magyarországra (°C) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.

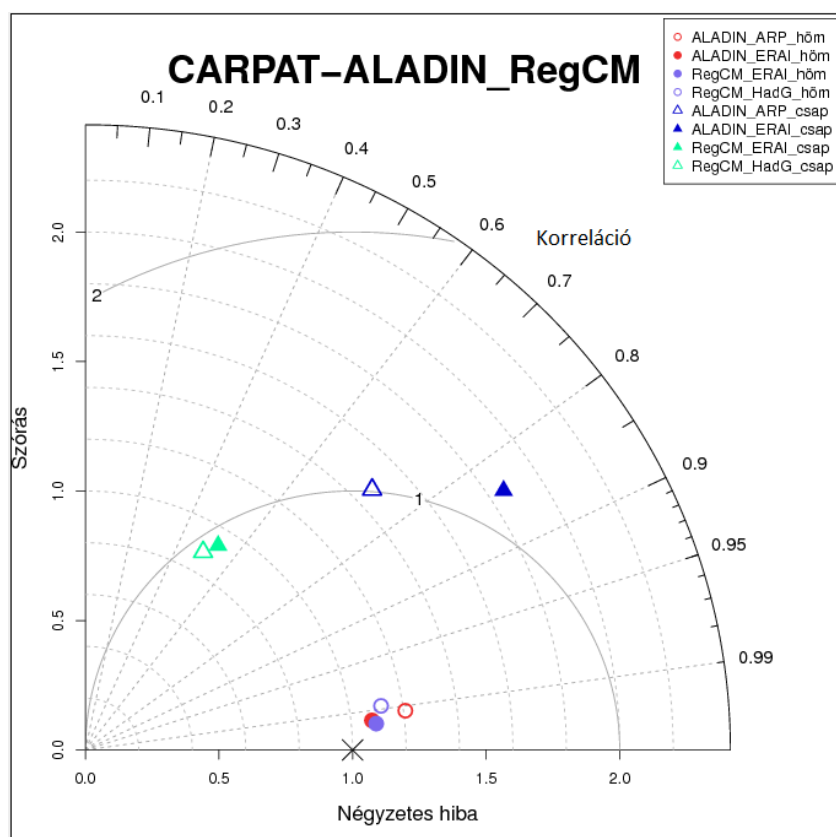
Hőmérséklet négyzetes eltérése [°C]						
Kísérlet	Referencia	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
ALADIN_ERAI	E-OBS	0,7	1,6	1,0	1,1	1,0
	CARPATCLIM	0,9	1,6	1,1	1,4	1,1
RegCM_ERAI	E-OBS	1,4	0,9	3,0	1,0	1,2
	CARPATCLIM	1,4	0,9	3,0	0,9	1,2

5. táblázat: Az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisok, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet térbeli és időbeli magyarországi szórása (°C) az 1981–2000 időszakban.

Hőmérséklet időbeli szórása [°C]					
Adatsor	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
E-OBS	0,7	1,1	0,8	1,0	1,9
CARPATCLIM	0,8	1,1	0,8	1,0	1,9
ALADIN_ERAI	0,7	1,1	1,0	1,1	1,7
ALADIN_ARP	1,0	1,3	1,6	1,1	2,0
RegCM_ERAI	0,7	1,0	1,0	0,9	1,7
RegCM_HadG	0,9	1,2	1,6	1,3	1,9
Hőmérséklet térbeli szórása [°C]					
E-OBS	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7
CARPATCLIM	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8
ALADIN_ERAI	0,7	0,7	0,8	0,7	1,0
ALADIN_ARP	0,7	0,7	0,7	0,6	1,2
RegCM_ERAI	0,7	0,7	1,0	0,8	0,7
RegCM_HadG	0,7	0,7	1,0	0,7	0,8



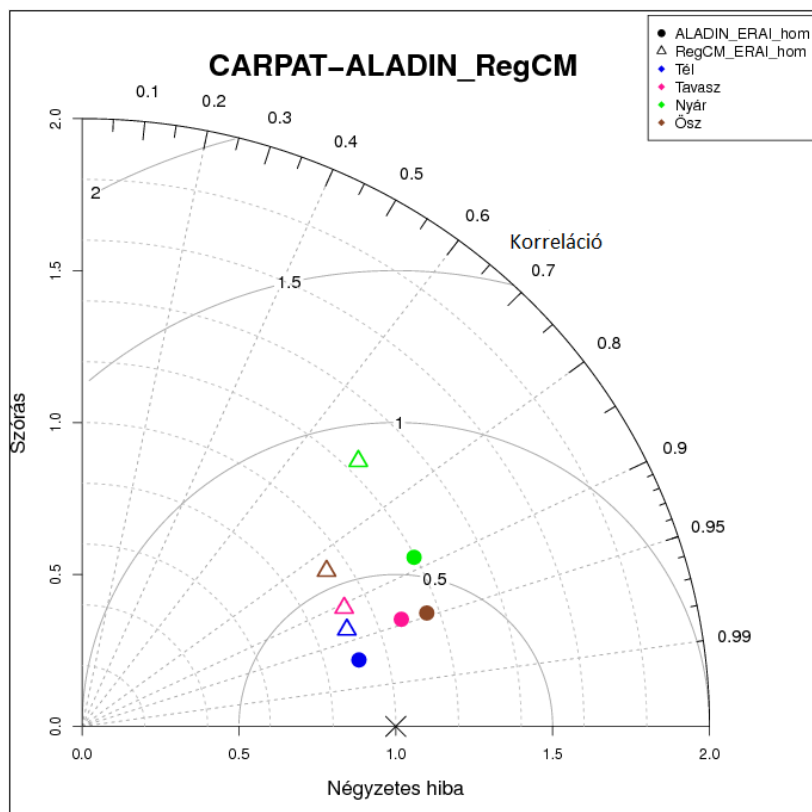
6. ábra: A hőmérséklet magyarországi havi átlagértékei (°C) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján.



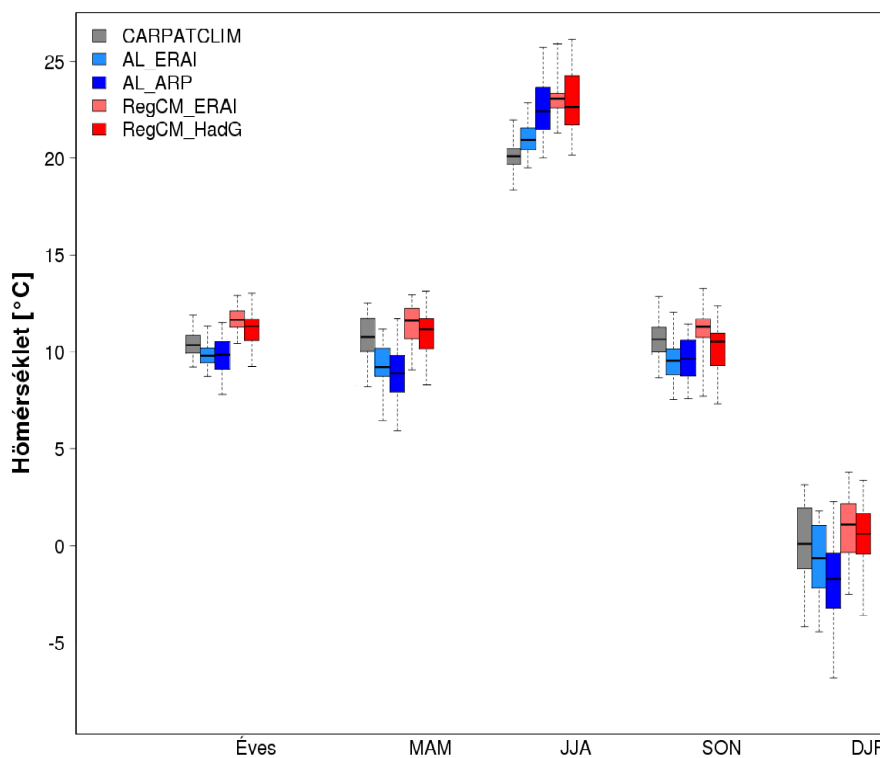
7. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk magyarországi havi átlagokon alapuló hőmérséklet-és csapadékbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CARPATCLIM megfigyelési adatbázishoz képest.



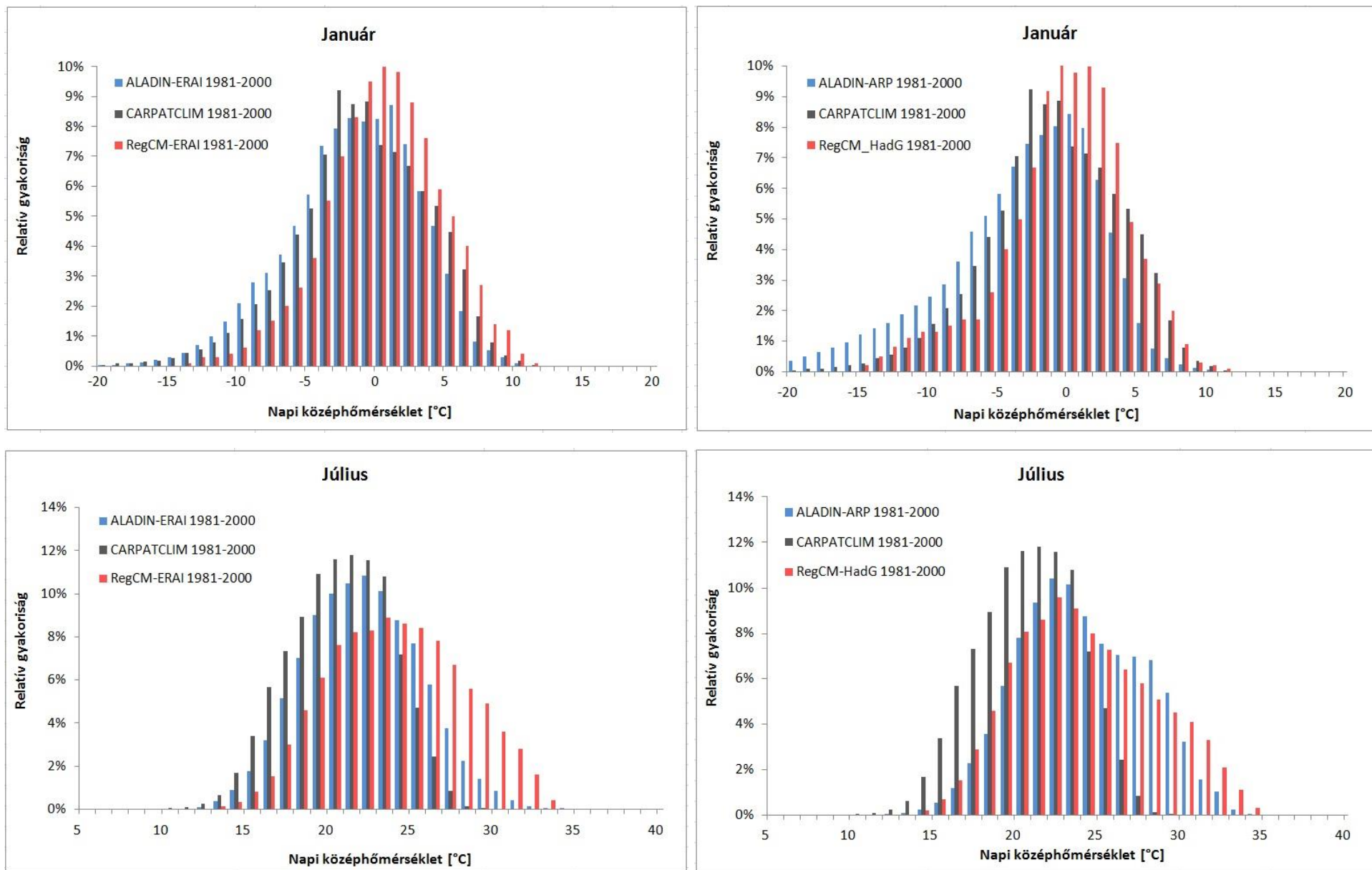
8. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet évenkénti értékei (°C) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján.



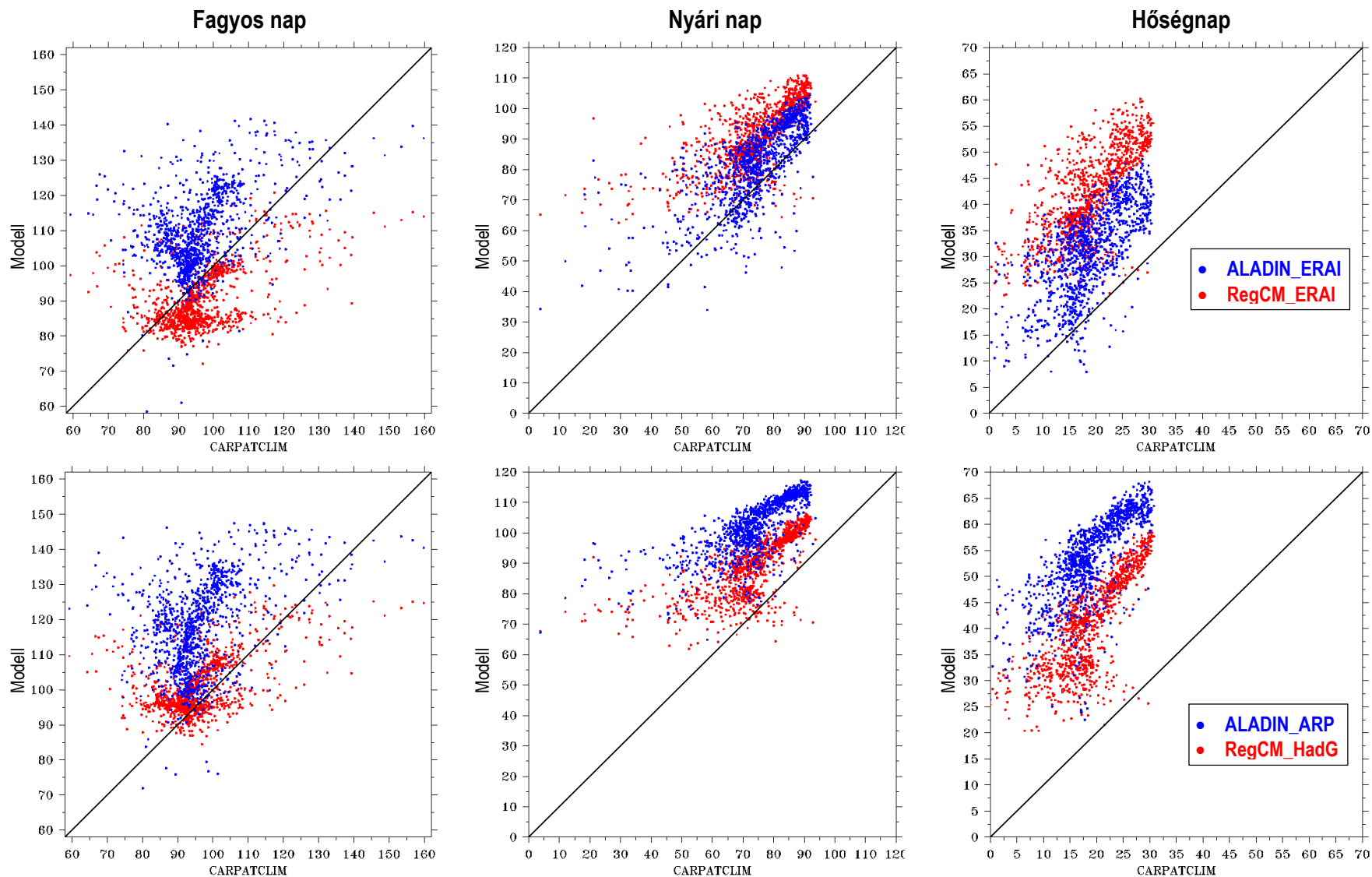
9. ábra: Az ALADIN ERAI és a RegCM ERAI modellszimulációk magyarországi évszakos átlagokon alapuló évenkénti hőmérsékletbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CARPATCLIM megfigyelési adatbázishoz képest.



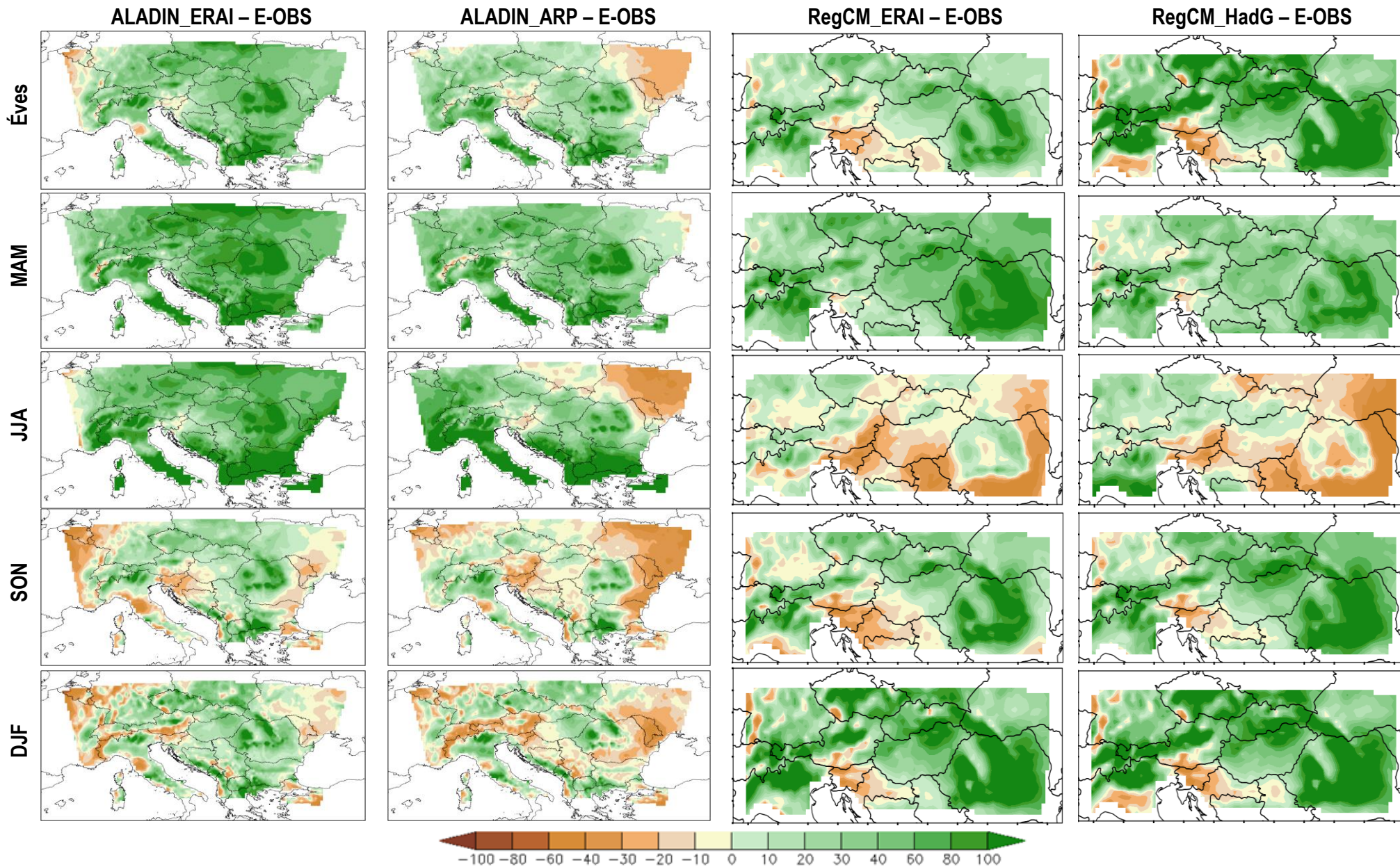
10. ábra: A CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN ERAI, az ALADIN ARP, a RegCM ERAI és a RegCM HadG modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi évszakos és éves átlaghőmérséklet értékei (°C) alapján számolt Whisker-box diagramok.



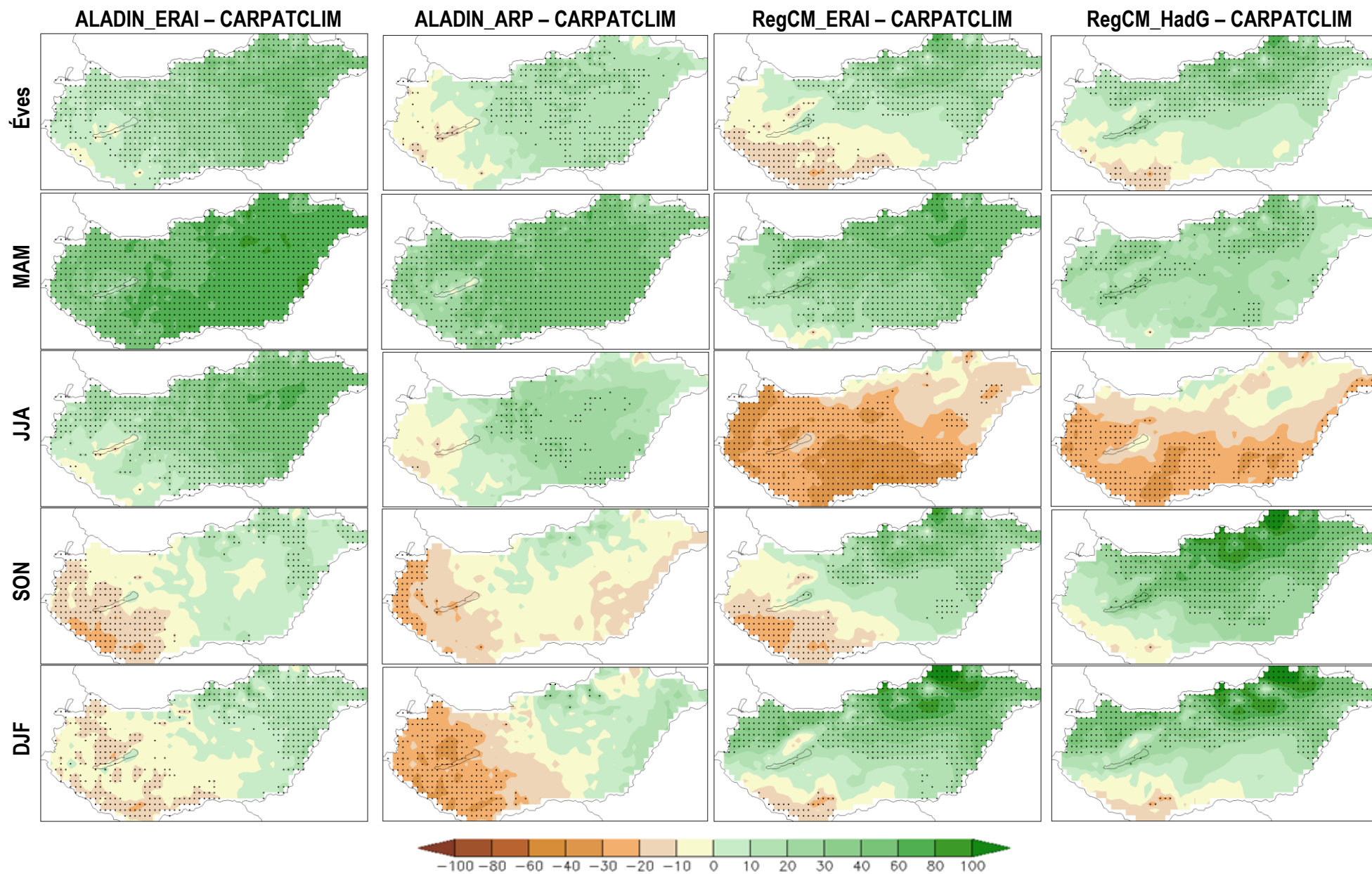
11. ábra: A januári és júliusi napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERA1, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERA1 és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján.



12. ábra: Scatter-plot diagramok a fagyos napok ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$), a nyári napok ($T_{\max} > 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) és a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos éves értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.



13. ábra: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos csapadékösszeg átlagos eltérése (%) az E-OBS megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban.



14. ábra: Az ALADIN ERAI, az ALADIN ARP, a RegCM ERAI és a RegCM HadG modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos csapadékösszeg átlagos eltérése (%) a CARPATCLIM megfigyelési adatbázistól az 1981–2000 időszakban. A szignifikáns eltérések helyét pontozással jelöltük.

6. táblázat: Az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg átlagos magyarországi eltérése (mm/hónap és %) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.

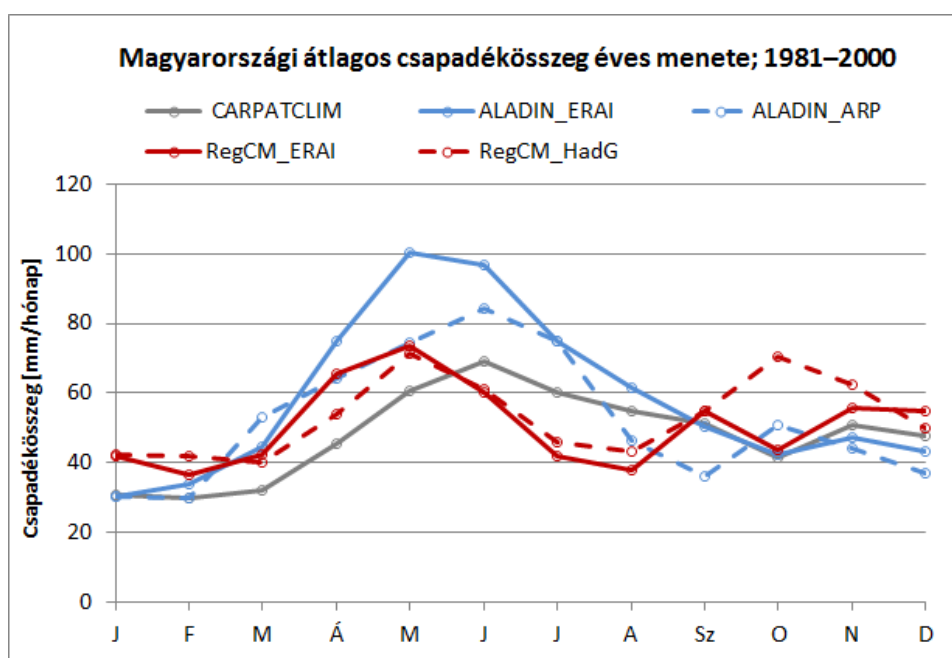
Csapadékösszeg átlagos eltérése [mm/hónap]						
Kísérlet	Referencia	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
ALADIN_ERAI	E-OBS	16	32	23	0,8	6
	CARPATCLIM	11	27	17	-1,1	0,1
ALADIN_ARP	E-OBS	9	23	14	-2,1	2,7
	CARPATCLIM	4,3	18	7	-4,1	-3,3
RegCM_ERAI	E-OBS	8	19	-8	5	15
	CARPATCLIM	2,8	14	-15	3,4	9
RegCM_HadG	E-OBS	10	14	-4,3	16	15
	CARPATCLIM	5	9	-11	14	9
Csapadékösszeg átlagos eltérése [%]						
ALADIN_ERAI	E-OBS	36	78	43	1,8	20
	CARPATCLIM	24	58	27	-2,3	0,2
ALADIN_ARP	E-OBS	22	55	26	-4,5	9
	CARPATCLIM	9	39	12	-9	-9
RegCM_ERAI	E-OBS	18	47	-15	11	50
	CARPATCLIM	6	31	-24	7	25
RegCM_HadG	E-OBS	24	34	-8	36	50
	CARPATCLIM	11	19	-18	30	25

7. táblázat: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékösszeg négyzetes eltérése Magyarországra (mm/hónap) az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisoktól az 1981–2000 időszakban.

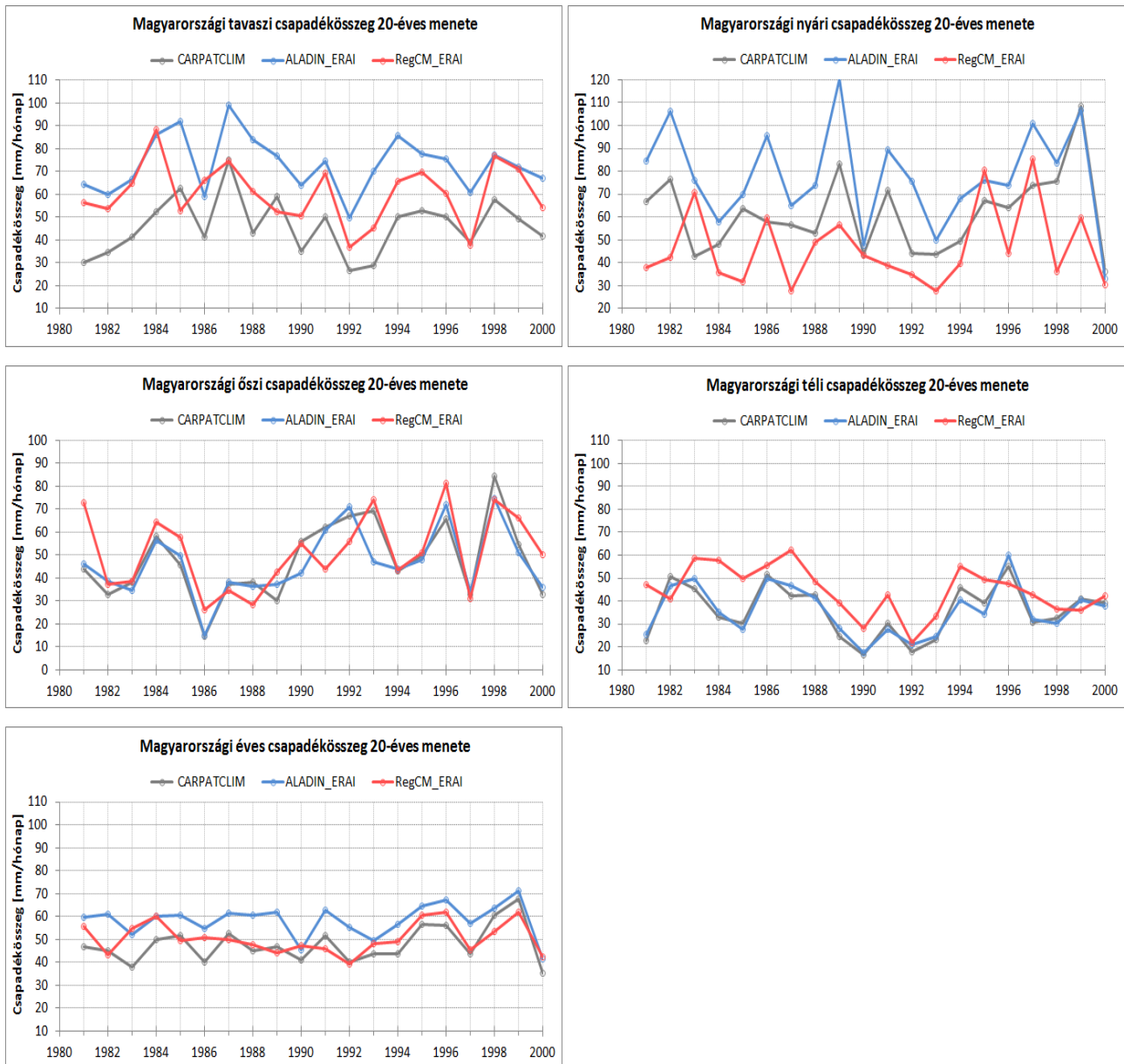
Csapadék négyzetes eltérése [mm/hónap]						
Kísérlet	Referencia	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
ALADIN_ERAI	E-OBS	17	34	30	17	9
	CARPATCLIM	13	30	26	13	7
RegCM_ERAI	E-OBS	15	26	27	24	20
	CARPATCLIM	12	23	30	19	18

8. táblázat: Az E-OBS és a CARPATCLIM megfigyelési adatbázisok, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján számított átlagos éves és évszakos csapadékosság térbeli és időbeli magyarországi szórása (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban.

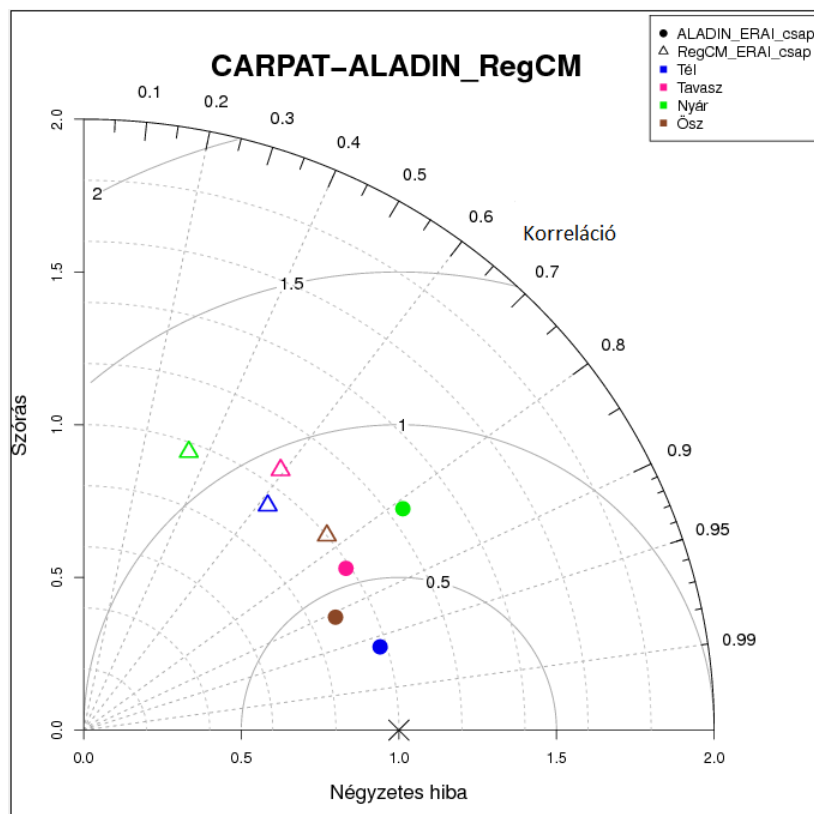
Csapadék időbeli szórása [mm/hónap]					
Adatsor	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
E-OBS	9	15	20	23	12
CARPATCLIM	9	14	20	18	13
ALADIN_ERAI	8	15	23	16	13
ALADIN_ARP	12	22	24	18	13
RegCM_ERAI	8	16	20	19	13
RegCM_HadG	10	18	27	18	12
Csapadék térbeli szórása [mm/hónap]					
E-OBS	7	4	8	8	5
CARPATCLIM	8	9	13	12	8
ALADIN_ERAI	6	10	12	8	7
ALADIN_ARP	5	8	9	9	7
RegCM_ERAI	6	7	8	6	5
RegCM_HadG	6	5	6	9	7



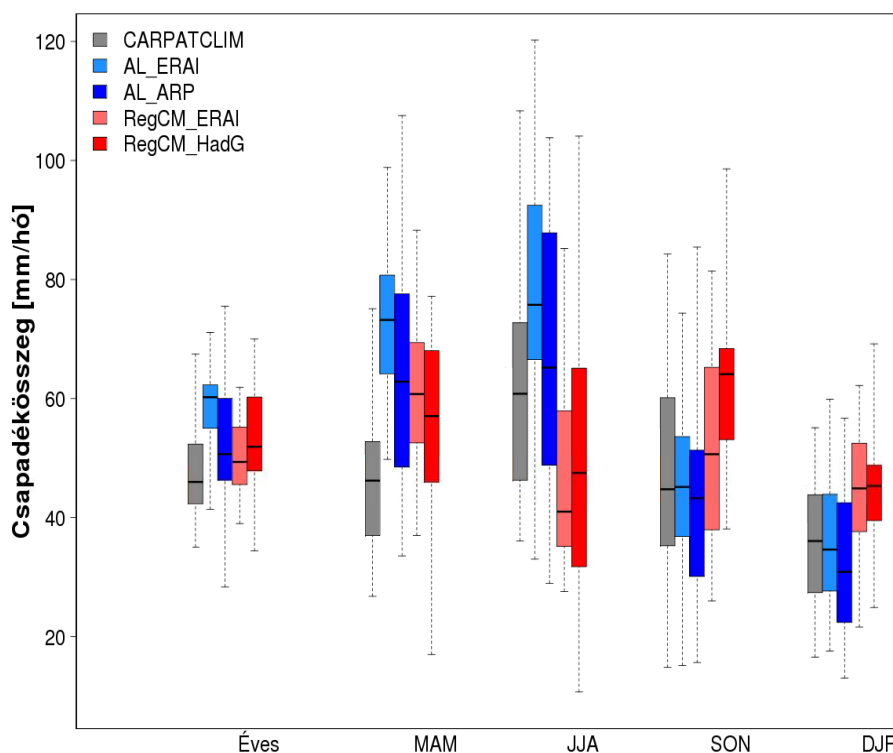
15. ábra: A csapadékosság magyarországi havi átlagértékei (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei alapján.



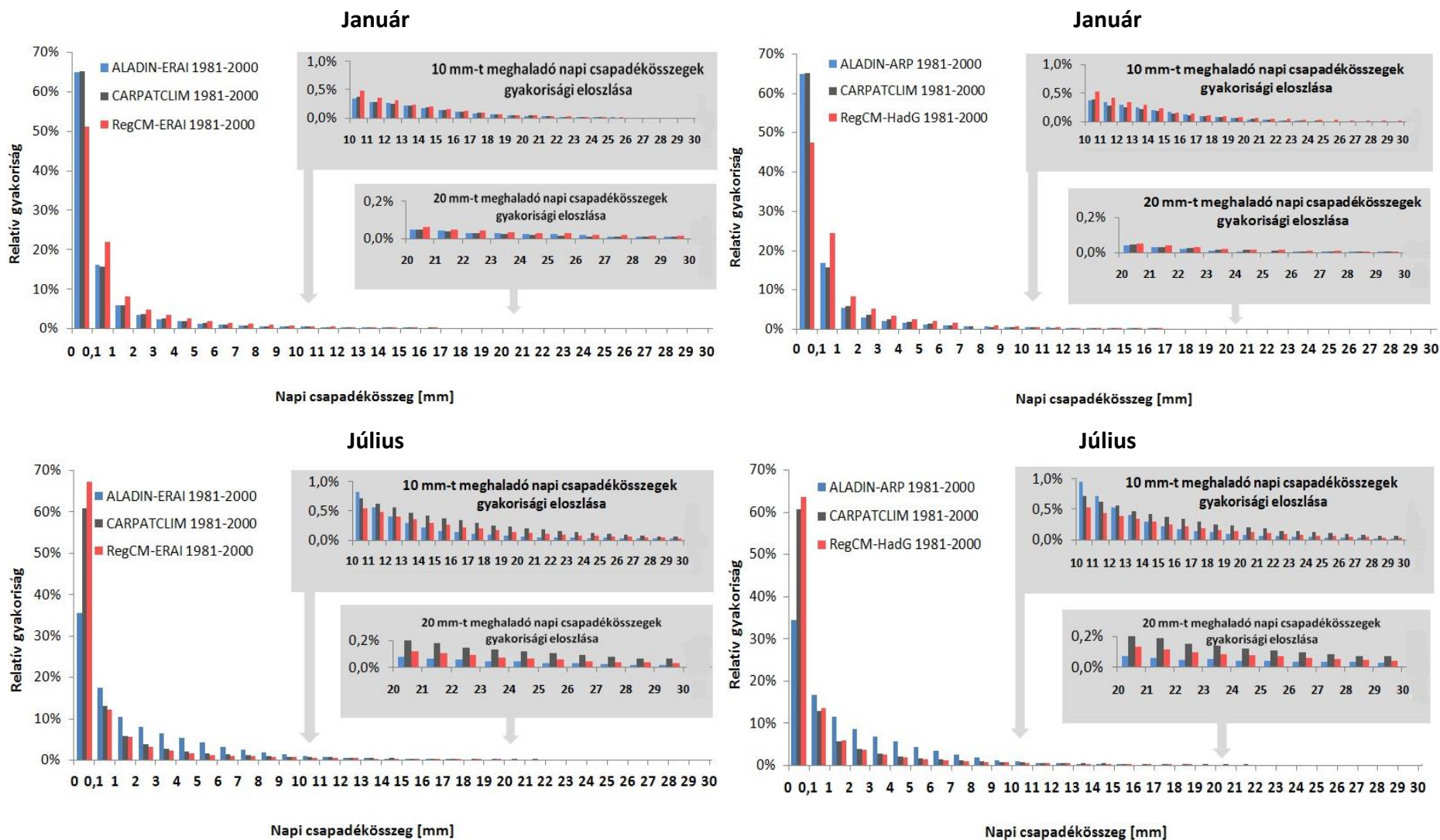
16. ábra: A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékösszeg évenkénti értékei (mm/hónap) az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk eredményei alapján.



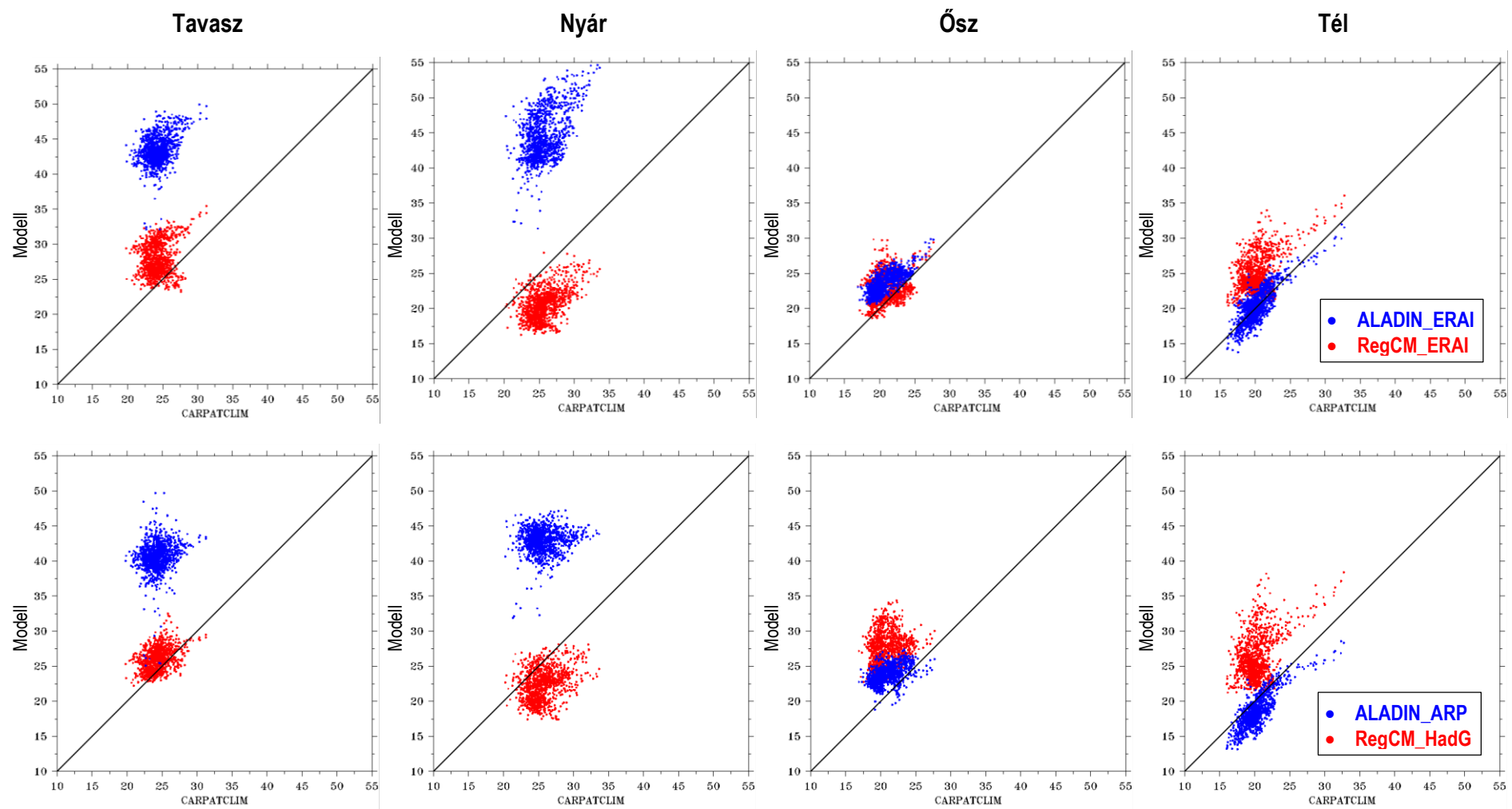
17. ábra: Az ALADIN_ERAI és a RegCM_ERAI modellszimulációk magyarországi évszakos átlagokon alapuló évenkénti csapadékbecslésének összehasonlító Taylor-diagramja az 1981–2000 időszakra a CARPATCLIM megfigyelési adatbázishoz képest.



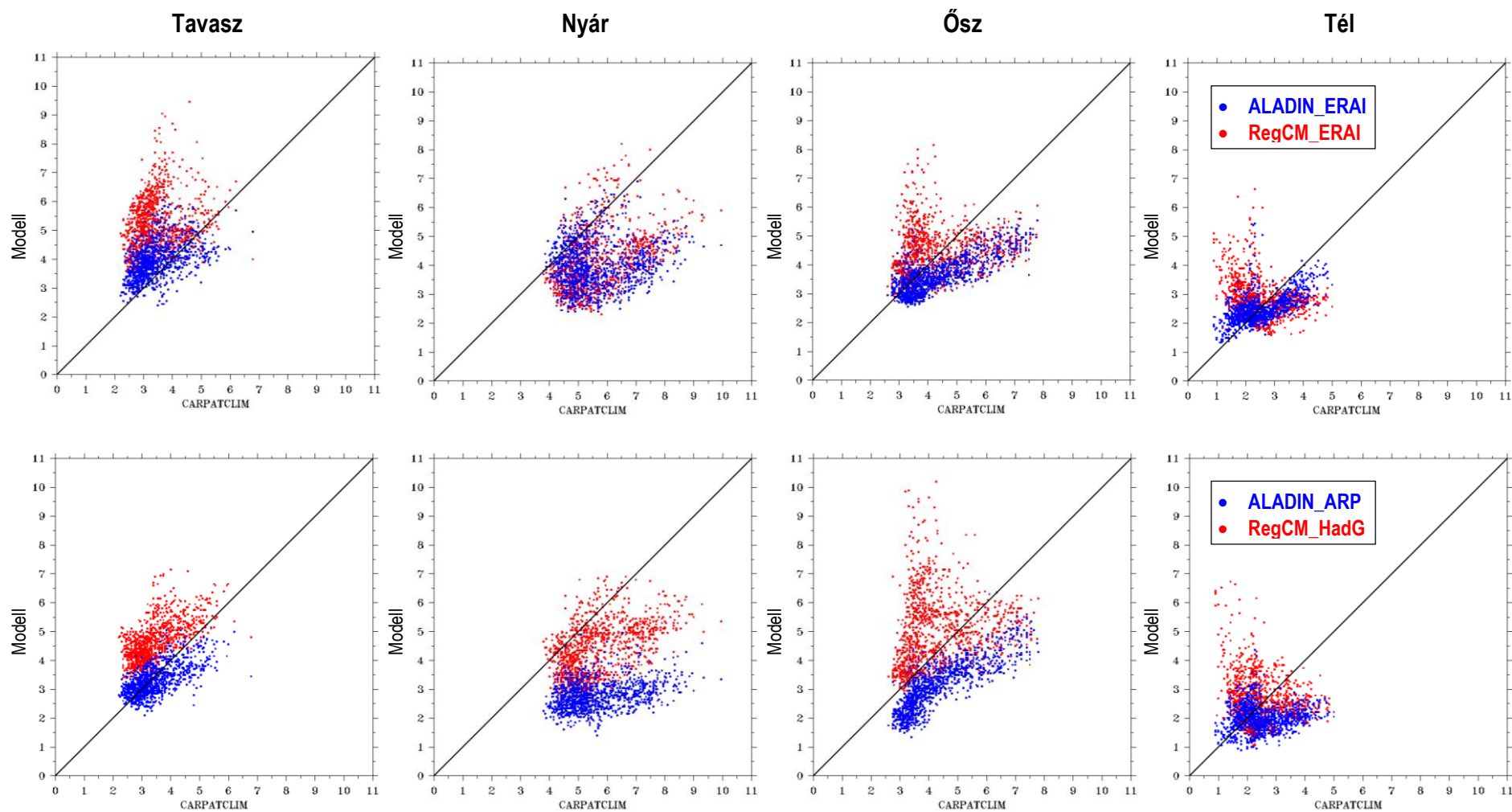
18. ábra: A CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk 1981–2000 időszakra vonatkozó évenkénti átlagos magyarországi évszakos és éves csapadékösszeg értékei (mm/hónap) alapján számolt Whisker-box diagramok.



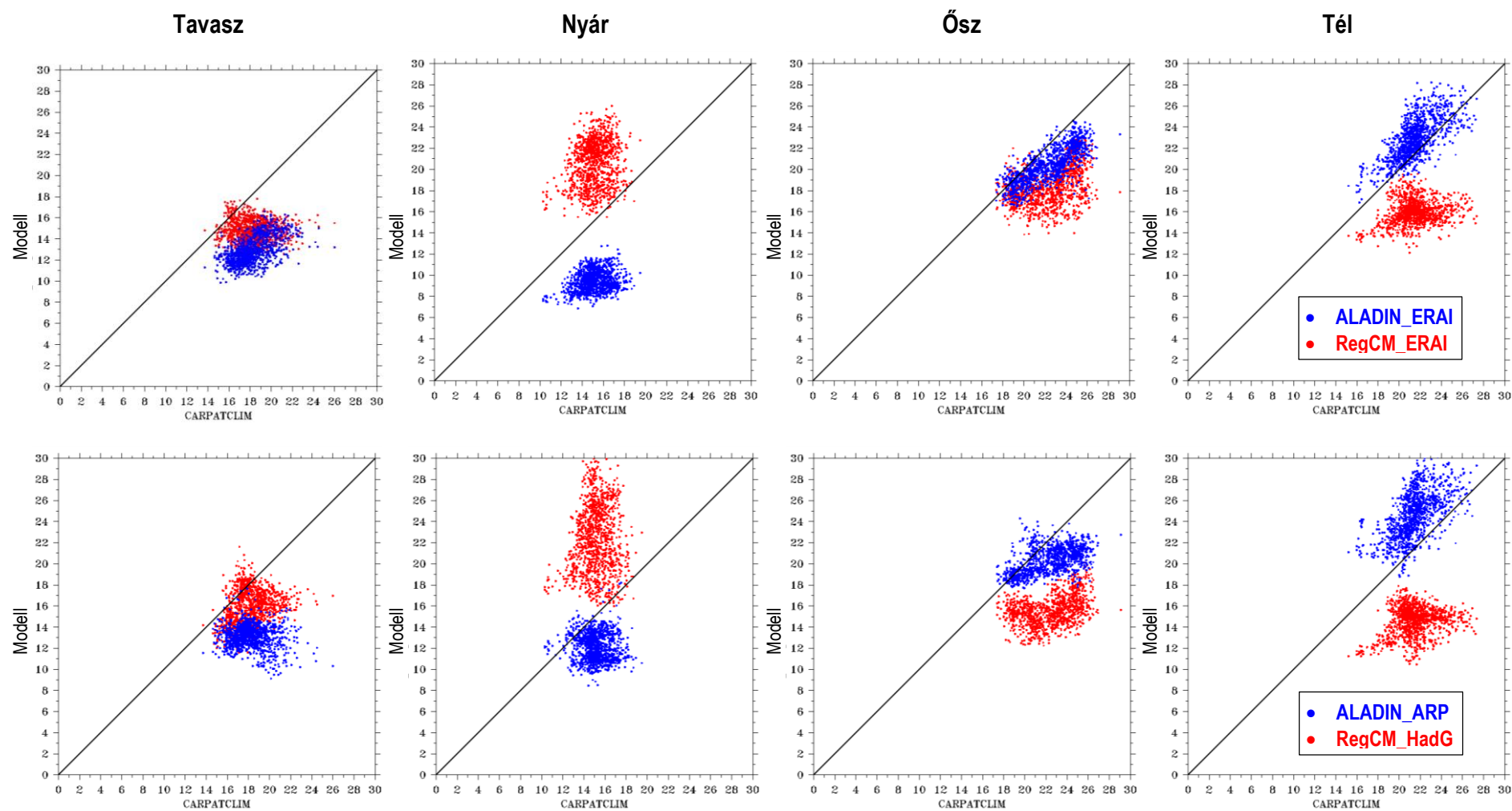
19. ábra: A januári és júliusi napi csapadékösszeg értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1981–2000 időszakban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis, az ALADIN_ERA, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERA és a RegCM_HadG modellszimuláció eredményei alapján.



20. ábra: Scatter-plot diagramok a csapadékos ($R \geq 1$ mm) napok 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos évszakos értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.



21. ábra: Scatter-plot diagrammok a nagy csapadékú ($R \geq 10$ mm) napok 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos évszaki értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.



22. ábra: Scatter-plot diagramok az egymást követő száraz ($R < 1$ mm) napok maximális hosszának 1981–2000 időszakra vonatkozó átlagos évszakos értékeire a magyarországi rácspontokban a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis (x-tengely), az ALADIN_ERAI, az ALADIN_ARP, a RegCM_ERAI és a RegCM_HadG modellszimulációk eredményei (y-tengely) alapján.

Összefoglalás

A jelen beszámolóban az ALADIN-Climate és a RegCM regionális klímamoddellel végrehajtott két-két kísérlet validációs vizsgálatát mutattuk be abból a célból, hogy teszteljük a modelleket egy múltbeli időszakon. Ez a vizsgálat nélkülözhetetlen a modell viselkedésének és hibáinak megismeréséhez, valamint a jövőbeli eredmények értelmezéséhez.

Mindkét modellt 10 km-es rácsfelbontáson futtattuk az 1981–2000 időszakra, kétféle határfeltétellel, melyek egyfelől az ERA-Interim re-analízisekből származtak, másfelől az ALADIN esetében az ARPEGE-Climate, a RegCM esetében a HadGEM globális klímamodellek eredményeinek leskálázásán alapultak. A kísérletek eredményeit mérésekkel vetettük össze, ennek során a hőmérséklet és a csapadékösszeg éves, évszakos és havi átlagértékeit vizsgáltuk. Bemutattuk az egyes változókra vonatkozóan a modelleredmények és a mérési információk eltérését ábrázoló hibaterképeket, a magyarországi éven belüli eloszlást és a 20 éven belüli menetet jellemző grafikonokat, valamint kiszámítottuk az országos átlagos hibákat. A modelleredményeket két rácsponti megfigyelési adatbázissal is összevetettük: egyrészt a Magyarország területére a legpontosabb információval szolgáló CARPATCLIM adatbázissal, amely hazánkra 10 km-es felbontással tartalmaz homogenizált napi adatokat, másrészt felhasználtuk az Európát lefedő, 25 km-es felbontású E-OBS adatbázis homogenizálatlan adatait is. Láttuk, hogy a két adatbázis különösen a csapadékadatok esetében mutat nagy eltéréseket Magyarország területén.

Megállapítottuk, hogy az ALADIN-Climate modell a nyarat kivéve túl alacsony hőmérsékleti értékeket ad, s a megfigyelésektől átlagosan 1-2 °C-kal tér el. Ez az eltérés azonban kisebb, mint a NATÉR első változatához információt szolgáltató korábbi ALADIN modellkísérletek esetében. A RegCM eredményeit ezzel szemben többnyire a hőmérséklet felülbecslése jellemzi, ami nyáron országos átlagban elérheti a 3 °C-ot is. A tapasztalt hőmérsékleti eltérések azokban a rácspontokban statisztikailag szignifikánsak, ahol meghaladják az 1 °C-ot.

A csapadékösszeg esetében gyakori a felülbecslés, ami alól a RegCM esetében a nyári évszak, az ALADIN-nál pedig ősszel és télen az ország nyugati tájai képeznek kivételt. Nemcsak a csapadék mennyiségében, de a csapadékos napok számában illetve a 10 mm-t meghaladó csapadékos napok gyakoriságában is fölébecslés jellemzi az eredményeket (kivéve az ALADIN nyári és őszi értékeit). Ezzel párhuzamosan a száraz időszakok maximális hosszát a modellek szinte minden magyarországi rácspontban alulbecslik. A NATÉR első változatához információt szolgáltató korábbi ALADIN modellkísérletek esetében tapasztalt nagymértékű nyári felülbecslés az új kísérletekben jelentős mértékben csökkent, a RegCM pedig a csapadék korábban gyengén leírt éves menetét az új eredményekben jobban közelíti.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az ELTE Meteorológiai Tanszék munkatársainak, *Szabóné André Karolinának, Pieczka Ildikónak, Bartholy Juditnak és Pongrácz Ritának* a RegCM modelldatok biztosításáért, valamint a RegCM modellt bemutató leírás elkészítéséért.

Irodalom

Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., André K., Bogárdi I., 2015: Érzékenységvizsgálatok a RegCM klímamoddellel a Kárpát-medence térségére. RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 2015. augusztus, 16 p.

http://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C13-10_RegCM_erzekenyseg.pdf

- Bougeault, P., 1985: A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.* 113, 2108–2121.
- 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.
- Davies, H.C., Turner, R.E., 1977: Updating prediction models by dynamical relaxation – An examination of the technique. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 103, 225–245.
- Davis, N., Bowden, J., Semazzi, F., Xie, L., Önl, B., 2009: Customization of RegCM3 regional climate model for eastern Africa and a tropical Indian Ocean domain. *J. Climate* 22, 3595–3616.
- 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, L., 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.
- Déqué, M., 2003: ARPEGE-Climate Version 4. Algorithmic Documentation. 365 p.
- Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. *Climatic Change* 15, 383–422.
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM user manual version 4.3. 32 p. ITCP, Trieste, Italy.
- Emanuel, K.A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.* 48, 2313–2335.
- Emanuel, K.A., Zivkovic-Rothman, M., 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.* 56, 1766–1782.
- Fritsch, J.M., Chappell, C.F., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.* 37, 1722–1733.
- Fouquart, Y., Bonnel, B., 1980: Computations of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization. *Con&b. 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.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate* 3, 941–963.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.* 121, 2794–2813.
- Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., DeCanio, G., 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.* 121, 2814–2832.

- Grell, G.A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.* 121, 764–787.
- Grell, G.A., Dudhia, J., Stauffer, D.R., 1994: Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). Tech. Rep. TN-398+STR, NCAR, Boulder, Colorado, USA. 121 p.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res. (Atmospheres)* 113, D20119, doi: 10.1029/2008JD10201.
- Horányi, A., Kertész, S., Kullmann, L., Radnóti, G., 2006: The ARPEGE/ALADIN mesoscale numerical modeling system and its application at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 110, 3–4, 203–227.
- Illy T., Sábitz J., Szépszó G., 2015: Az ALADIN-Climate modellkísérletek eredményeinek validációja. RCMTéR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 2015. augusztus, 19 p. http://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C13-10_ALADIN_validacio.pdf
- 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.
- Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., 2013: Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data. *Időjárás* 117, 1, 143–158.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, 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., and Voldoire, A.: 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, 2013.
- McGill, R., Tukey, J.W., Larsen, W.A., 1978: Variations of Box Plots. *The American Statistician* 32, 12–16.
- Mesinger, F., Arakawa, A., 1976: Numerical methods used in atmospheric models. GARP Publications Series 17 (1).
- Mitchell, T.D., Jones, P.D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.* 25, 693–712.
- 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 re-search and assessment. *Nature* 463, 747–756.

- 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.
- Phillips, N.A., 1957: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *J. Meteor.* 14, 184–185.
- Ricard, J.L., Royer, J.F., 1993: A statistical cloud scheme for use in an AGCM. *Annales Geophysicae* 11, 1095–1115.
- Sábitz J., Szépszó G., Zsebeházi G., Szabó P., Illy T., Bartholy J., Pieczka I., Pongrácz R.: A klímamodellekből levezethető indikátorok alkalmazási lehetőségei. NATÉR (EEA-C11-1) tanulmány (szerk.: Szépszó G.), 111 p.
http://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C11-1_indikatorok_tanulmany.pdf
- 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.
- 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.
- 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.
- Szépszó G., Krüzselyi I., Illy T., Sábitz J., 2015: Az ALADIN-Climate regionális klímamodell integrálási tartományának megválasztására vonatkozó érzékenységvizsgálat. RCMTÉR (EEA-C13-10) projekt beszámoló, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 19 p.
http://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C13-10_ALADIN_teruleterzekenyseg.pdf
- Taylor, K.E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in single diagram. *J. Geophys. Res.* 106, D7, 7183–7192.
- Torma, Cs., Bartholy, J., Pongrácz, R., Barcza, Z., Coppola, E., Giorgi, F., 2008: Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás* 112, 233–247.
- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2011: Validation of a high-resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeorol* 12, 84–100. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JHM1234.1>
- van den Besselaar, E.J.M., Haylock, M.R., van der Schrier, G., Klein Tank, A.M.G., 2011: A European Daily High-resolution Observational Gridded Data set of Sea Level Pressure. *J. Geophys. Res.* 116, D11110, doi: 10.1029/2010JD015468.