

A jövőre vonatkozó projekciók eredményeinek együttes kiértékelése, bizonytalanságok számszerűsítése

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

Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2016. május

Tartalom

Ábrajegyzék	3
Táblázatjegyzék.....	6
Motiváció	7
Bevezetés.....	7
Módszertan	11
Alkalmazott modellek.....	11
ALADIN-Climate	11
RegCM.....	13
Modellkísérletek	14
A projekciók értelmezése.....	15
Kiértékelési eszközök	16
Eredmények.....	18
A referencia-időszak bemutatása	18
Hőmérséklet.....	20
Csapadék.....	22
Összefoglalás.....	47
Köszönetnyilvánítás	48
Irodalom	49

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, piros: A2) forgatókönyvek alapján (IPCC AR5 WGI, 2013).....	9
2. ábra: A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg (mm) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	11
3. ábra: A 10 km-es felbontású ALADIN és RegCM modellkísérletek integrálási tartománya.	14
4. ábra: Nyári és téli átlaghőmérséklet (°C) 1961–1990-re és 1971–2000-re a CARPATCLIM-HU megfigyelési adatbázis alapján.....	19
5. ábra: Őszi és téli átlagos csapadékösszeg (mm/hónap) 1961–1990-re és 1971–2000-re a CARPATCLIM-HU megfigyelési adatbázis alapján.....	19
6. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	24
7. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) Magyarországon 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.	25
8. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	26
9. ábra: A hőmérséklet magyarországi havi átlagértékei (°C) 1971–2000-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.	27
10. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet évenkénti értékei (°C) az 1971–2100 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján, valamint az 1971–2000 időszakra vonatkozó átlag a mérések alapján.	28
11. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet 1971–2000-hez viszonyított változásának (°C) 30-éves mozgóátlaga az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.	29
12. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi évszakos és éves átlaghőmérséklet-változás értékei (°C) alapján számolt Whisker-box diagramok. Referencia-időszak: 1971–2000.....	30
13. ábra: A mérések 1971–2000-re, valamint az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi havi átlaghőmérséklet-értékei (°C) alapján számolt Whisker-box diagramok.....	30

14. ábra: A januári és júliusi napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.	31
15. ábra: A fagyos napok ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$), a nyári napok ($T_{\max} > 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) és a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) éves gyakoriságának változása (nap) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.	32
16. ábra: A fagyos napok ($T_{\min} < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$), a nyári napok ($T_{\max} > 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) és a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) éves gyakoriságának átlagos magyarországi változása (nap) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	33
17. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	34
18. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (%) Magyarországon 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.	35
19. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	36
20. ábra: A csapadékösszeg magyarországi havi átlagértékei (mm/hónap) 1971–2000-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.	37
21. ábra: A magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg évenkénti értékei (mm/hónap) az 1971–2100 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján, valamint az 1971–2000 időszakra vonatkozó átlag a mérések alapján.	38
22. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlagos csapadékösszeg 1971–2000-hez viszonyított változásának (%) 30-éves mozgóátlaga az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.	39
23. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi évszakos és éves csapadékváltozás értékei (%) alapján számolt Whisker-box diagramok. Referencia-időszak: 1971–2000.	40
24. ábra: A mérések 1971–2000-re, valamint az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi havi csapadékösszeg-értékei (mm/hónap) alapján számolt Whisker-box diagramok.	40
25. ábra: A januári és júliusi napi csapadékösszeg értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.	41

26. ábra: A csapadékos ($R \geq 1$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli. 42
27. ábra: A nagy csapadékú ($R \geq 10$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli. 43
28. ábra: Az extrém nagy csapadékú ($R \geq 20$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli. 44
29. ábra: Az átlagos évszakos csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli. 45
30. ábra: Az egymást követő száraz ($R < 1$ mm) napok maximális évszakos számának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli. 46
31. ábra: Az egymást követő száraz napok maximális évszakos számának (CDD), a nagy (RR10), az extrém nagy (RR20) csapadékú és a csapadékos (RR1) napok évszakos gyakoriságának és az átlagos évszakos csapadékintenzitás (SDII) magyarországi változása (nap illetve SDII esetén mm/nap) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. 47

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A modellkísérletek jellemzői.....	14
2. táblázat: A vizsgált hőmérsékleti és csapadékindexek.....	18
3. táblázat: Az éves és évszakos magyarországi átlaghőmérséklet és átlagos csapadékösszeg értékei (°C és mm/hónap) 1961–1990-re és 1971–2000-re a CARPATCLIM-HU megfigyelési adatbázis alapján.	18
4. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	26
5. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet magyarországi időbeli és térbeli szórásértékei (°C) az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban.....	27
6. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (mm/hónap és %) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.	36
7. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlagos csapadékösszeg magyarországi időbeli és térbeli szórásértékei (mm/hónap) az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban.	37

Motiváció

2013-ban létrehozták a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszert (NATÉR) és 2016-tól operatíván is megkezdte működését az éghajlatváltozás hatásaihoz való hazai alkalmazkodási stratégiák és az ezzel kapcsolatos klímapolitikai döntéshozatal támogatásában. 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 korábbi projekciók azonban több szempontból fejlesztésre szorultak (pl. az alkalmazott integrálási tartomány, a fizikai parametrizációs beállítások, a bizonytalanságok reprezentálása tekintetében), amit részletesen bemutattunk a korábbi kísérletek validációs és projekciós eredményeinek értékelésekor (Sábitz et al., 2015), valamint az érzékenységi vizsgálatok során (Szépszó et al., 2015; Bartholy et al., 2015). „A sugárzási kényszer változásán alapuló új éghajlati scenáriók a Kárpát-medence térségére” című RCMTÉR projektben a rendelkezésre álló éghajlati scenáriók fejlesztését végeztük el. A két modellel új modellszimulációkat hajtottunk 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 hajtottuk 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 követték később az éghajlatváltozási kísérletek.

A jelen beszámolóban az ALADIN-Climate és a RegCM modell projekciós eredményeit mutatjuk be. Elsőként az éghajlati modellezés szakmai hátterét foglaljuk röviden össze, kitérve az antropogén tevékenység hatásának modellekben való figyelembevételére valamint a modellezési bizonytalanságok forrásaira, számszerűsítési lehetőségeire. Ezt követően részletesen bemutatjuk az alkalmazott modellváltozatokat és az elvégzett szimulációkat. Tárgyaljuk a projekciós eredmények értelmezésének sarkalatos kérdéseit, áttekintjük a kiértékeléshez használt eszközöket, felelevenítjük a korábbi modellszimulációk eredményeit, s megmutatjuk a jelenleg használatban lévő, különböző referencia-időszakok klimatológiai jellemzőit. Ezt követi a hőmérsékletre és a csapadékra vonatkozó eredmények alapos elemzése.

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

¹ Special Report on Emissions Scenarios

² Intergovernmental Panel on Climate Change

³ Representative Concentration Pathways

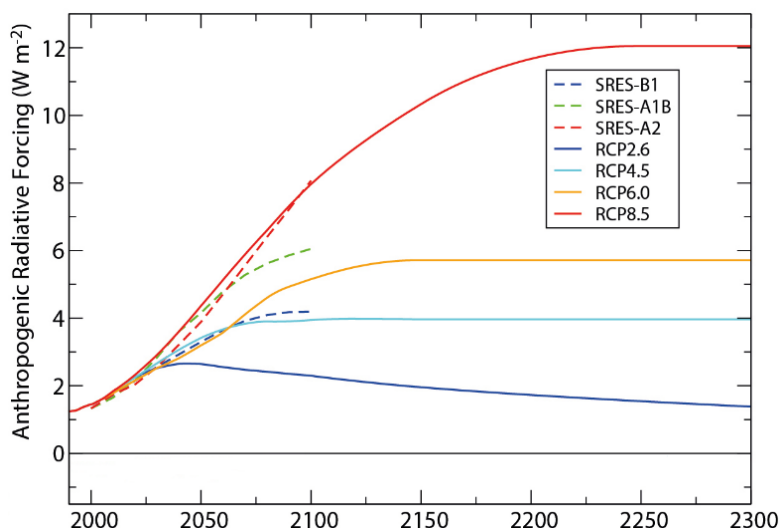
megmaradási törvények kormányozzák, s működésük tanulmányozására ugyanúgy a numerikus modellezés eszköztára szolgált objektív módszert, mint az időjárás előrejelzésére. Az összetevők fizikai folyamatainak és a közöttük levő kölcsönhatások és visszacsatolások leírására azok az ún. *kapcsolt globális modellek* (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, amelyet a légköri üvegházhatású gázok és aeroszol részecskék koncentrációjának változásával számszerűsítenek. Ennek alakulását nem ismerjük egy évszázadra előre, ezért ún. *forгатókönyveket* (scenáriókat) állítanak fel, amelyek az antropogén tevékenység eltérő jövőbeli fejlődési lehetőségeit jelenítik meg. A legújabb modellfuttatásokban a korábbi SRES scenáriókat felváltó RCP forгатókönyvek nemcsak az elmúlt időszak kibocsátás-értékeivel bővültek, hanem a legújabb kutatási eredményekre támaszkodva, korszerű eszközöket és módszereket alkalmazva készültek. Bár a két forгатókönyv-család trajektóriái alapvetően kevéssé térnek el egymástól (**1. ábra**), az RCP scenáriókat új elgondolások mentén alkották meg. A SRES forгатókönyvekkel készült klímamodell-futtatások szekvenciális sorrendet követtek: azaz először kialakítottak lehetséges jövőbeli társadalmi–gazdasági fejlődési pályákat, majd kiszámították az ezekből fakadó sugárzási kényszerváltozásokat, s végül a létrehozott forгатókönyvekkel elvégezték a klímamodell-futtatásokat. Az új forгатókönyvek esetében azonban első lépésként a korábbi tudományos eredményekre alapozva kijelöltek néhány, a jövőbeli sugárzási kényszer és légköri üvegházgáz-koncentráció változásának lehetséges, egymástól jól megkülönböztetett, reprezentatív menetét (Meinshausen et al., 2011). Az RCP trajektóriákhoz kötve a különböző társadalmi, gazdasági és technológiai fejlődési lehetőségek, valamint a politikai döntések hatásának számos permutációja tesztelhető, figyelembe véve az adaptációs és mitigációs döntéseket is. Az ilyen téren elért új eredményekkel viszont már nem szükséges új forгатókönyveket létrehozni és azokkal újra elvégezni az éghajlati modellfuttatást. Ez felgyorsítja, könnyebbé és költséghatékonyabbá teszi a modellezést, mivel a társadalomkutatók és a klímamodellezők párhuzamosan dolgozhatnak. 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 az iparosodás előtti értékhez képest.

Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett kapcsolt globális éghajlati modellek tudományos és technikai kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek képesek 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 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 biztosítják a tartományon kívül zajló folyamatok leírását (azaz a határfeltételeket). A szűkebb integrálási tartománynak köszönhetően ugyanazzal a számítógépes kapacitással részletesebb 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 számszerű 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 rendkívülinek nem tekinthető időszakot néhány, a szokásosnál jóval szárazabb vagy nedvesebb év sorozata követ, de hosszabb, évszázados-évezredes időskálán is találunk erre példát (pl. glaciális-interglaciális időszakok váltakozása). Ez tehát az éghajlati rendszer természetes, belső tulajdonsága.
2. A bizonytalanság másik lényeges összetevője abból ered, hogyan írjuk le a klímamodellekkel az éghajlati rendszerben zajló folyamatokat. Ugyan minden klímamodel az éghajlati rendszer viselkedését jellemzi közelítő módon, mégis 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. Ez a globális eredményekben eltérésekhez vezet, melyek a regionális leskálázás során tovább nőhetnek. A regionális modellek alkalmazása esetén a bizonytalanságot tovább növeli a tartomány mérete és elhelyezkedése is. (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 stb.) forgatókönyveink vannak. Az egyes lehetőségeket a globális éghajlati modellek számára külső kényszerként, széndioxid-koncentráció illetve sugárzási kényszer (**1. ábra**) formájában számszerűsítik, azaz az egyes scenáriók ezek különböző fejlődési menetét írják le. A globális modell az éghajlati rendszer egészének választ szimulálja a feltételezett külső kényszerre.



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, 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.

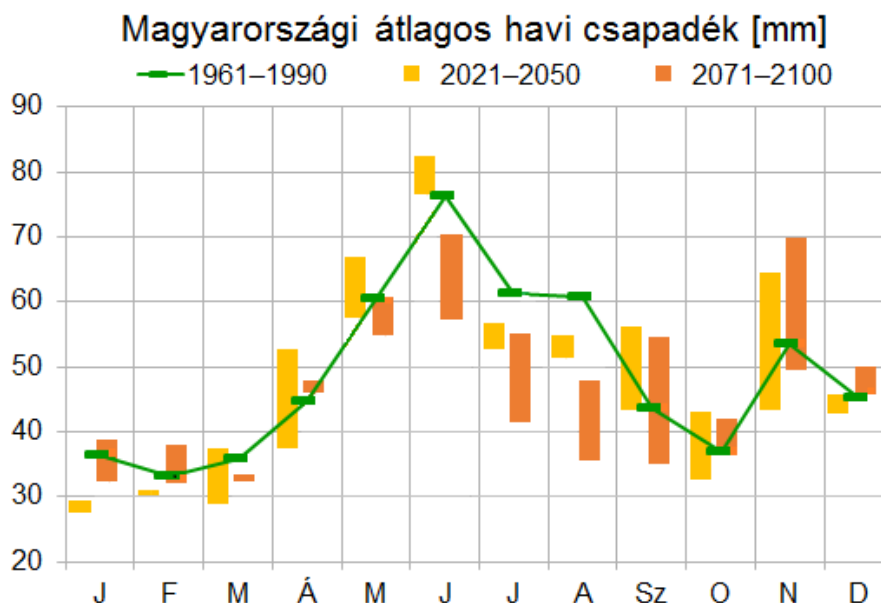
A bemutatott bizonytalansági típusok hozzájárulása a projekciókat jellemző teljes bizonytalansághoz eltérő mértékű, s az időtáv és a vizsgált változó függvényében különböző, illetve függ a vizsgált földrajzi területtől is. A kibocsátási forgatókönyvek bizonytalansága elsősorban hosszú távon, az évszázad második felében érezhető hatását, az első évtizedekben a modellek eltéréseiből és a természetes változékonyságból eredő bizonytalanság dominál. Minél kisebb területet vizsgálunk, a természetes változékonyság szerepe annál nagyobb (Hawkins és Sutton, 2009, 2011). A XXI. század első felében tehát mind a csapadék, mind a hőmérséklet esetében nagyobb az eltérés az azonos kibocsátási forgatókönyvvel, de különböző globális modellekkel végrehajtott szimulációk között, mint azok között, amelyek csak a forgatókönyv-választásban különböznek (például egy optimista, illetve egy pesszimista forgatókönyv felhasználásával készültek). Az egyes modellek eltéréseiből származó bizonytalanság minden időskálán és változónál jelentős, a csapadék esetében egyértelműen ez az összetevő felelős a szimulációkban lévő bizonytalanságok nagy részéért, s itt a forgatókönyv-választás bizonytalansága az egész évszázad során gyakorlatilag elhanyagolható. Ez fokozottan igaz, ha az eredményeket kisebb területre vizsgáljuk. A csapadékprojekciók esetében tehát az évszázad végéig nincs jelentősége annak, melyik kibocsátási forgatókönyvet tekintjük, sokkal lényegesebb a modellek közötti eltérésekből eredő bizonytalanság.

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 forgatókönyv-családból. 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 klímodell szolgáltatja mindehhez.

A Nemzeti Alkalmazkodási és Térinformatikai Rendszer számára a magyarországi éghajlatváltozás jellemzőinek leírását jelenleg az ALADIN-Climate 4.5 és a RegCM 3.1 modell eredményei biztosítják. A korábbi projekciók azonban több szempontból fejlesztésre szorultak és bizonyos alapvető célokra (pl. hidrológiai vizsgálatokra) nem alkalmazhatóak a túl kicsi integrálási területből fakadóan. A projekciós eredményekből (Sábitz et al., 2015) levont fő következtetések a következők:

- A modellek egybehangzóan a hőmérséklet szignifikáns emelkedését vetítik elő a teljes XXI. század során. A változás várható mértéke 2021–2050-re 1-2 °C, 2071–2100-ra 3-5 °C. A legjelentősebb melegedés nyáron és ősszel várható, ugyanakkor a nagyobb változásokhoz nagyobb bizonytalanság társul. Emellett a jövőben a magas maximumhőmérsékletű napok gyakoribbá válásával, illetve az alacsony minimumhőmérsékletű napok ritkábbá válásával kell számolnunk.

- Hazánkban az éves átlagos csapadék a két modell alapján várhatóan csökken, valamint kissé módosul az éven belüli eloszlása (**2. ábra**). A legcsapadékosabb évszakban, nyáron, egyértelműen kevesebb esőre kell számítani (az évszázad végére a csökkenés mértéke 20% körüli), azonban az évszázad végén ősszel a nyári hiány részben kompenzálódhat (10%-ot meg nem haladó mértékű növekedés várható). A napi csapadékmennyiségek eloszlása szintén módosulni fog. A jövőben a csapadék várhatóan kevesebb napon hullik, viszont (elsősorban az évszázad végére) a 10 és 20 mm-t meghaladó napi összegek előfordulása mindkét modell eredményei alapján megnő. Ezzel párhuzamosan különösen nyáron és ősszel jelentősen hosszabb száraz időszakokra számíthatunk.



2. ábra: A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg (mm) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

Módszertan

Alkalmazott modellek

A korábban felmerült problémák és hiányosságok megoldására törekedve az RCMTÉR projekt keretében a legfrissebb kibocsátási forgatókönyveket felhasználva új kísérleteket hajtottunk végre a modellek legújabb verzióival egy Közép- és Kelet-Európát 10 km-es felbontással lefedő integrálási tartományon (**3. ábra**). Az alábbiakban röviden áttekintjük a modellek 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 szélesség-komponensek, 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-Climat modellből származnak. A sugárzás-átviteli folyamatokat leíró csomagban a hosszúhullámú sugárzást leíró Fouquart-Morcrette sugárzási sémát (Morcrette, 1989) felváltotta az RRTM (Rapid Radiation Transfer Model; Mlawer et al., 1997) séma, mely figyelembe veszi a hosszúhullámú sugárzás emisszióját, abszorpcióját, illetve egyes légköri gázok és 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. Ugyancsak változott a felszín–légkör kölcsönhatás leírása: míg a 4.5-ös modellváltozatban a 4 talajréteggel dolgozó ISBA-séma (Noilhan és Planton, 1989) adott becslést a földfelszín és a légkör közötti turbulens hő- és nedvességáramokra, addig az 5.2-es verzióban ezt egy külön felszíni almodell végzi: a SURFEX (Masson et al., 2013) a növényzet, a tengerek, a városok és a tavak feletti áramok meghatározására különböző parametrizációkat alkalmaz.

Az emberi tevékenység hatását az üvegházhatású gázok és egyes aeroszolkok légköri koncentrációjának időbeli változásán keresztül veszi figyelembe az ALADIN-Climate modell. Ehhez öt különböző üvegházhatású gáz (CO₂, CH₄, N₂O, CFC-11, CFC-12) átlagos globális légköri koncentrációját igényli bemenetként, továbbá ötféle aeroszol részecske (feketeszén, szerves aeroszol, szulfát, tengeri só, por) háromdimenziós eloszlását. Az üvegházgázokra vonatkozó adatokat az aktuális szimulációhoz kiválasztott RCP forgatókönyv tartalmazza, az ezekhez tartozó aeroszol eloszlásokat pedig globális levegőkémiai (INCA Chemistry model) és általános cirkulációs modellekkel végzett szimulációk segítségével határozták meg (Szopa et al., 2013). Az aeroszolkok leírása 10-éves periódusokra vonatkozó havi eloszlások formájában történik, tehát megjelenik benne koncentráció jellemző éven belüli menete is.

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 verziójának 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 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 verziókhoz képest az ELTE Meteorológiai Tanszékén használatban lévő modellverzió (Elguindi et al., 2011) új felszíni, planetáris határreteg és légkör-tengerfelszín fluxus sémákat tartalmaz, továbbá a korábbi sugárzás-átviteli sémák is módosításra kerültek. A jelenlegi modell már párhuzamos futtatásra is alkalmas, ami lényeges a futtatások minél rövidebb gépidő alatt történő kivitelezéséhez.

A RegCM rácsponti 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. Független 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 séma használatával a RegCM külön kezeli az egyenletrendszer lineáris és nem-lineáris tagjait. A határfeltételek kezelésére egy 24 rácspontból álló relaxációs zónát használ Davies és Turner (1977) sémája alapján.

Az elvégzett érzékenységi vizsgálatok (Bartholy et al., 2015) azt mutatták, hogy a BATS⁸ szubgrid sémát aktiválva pontosabban tudjuk reprodukálni a múltbeli éghajlati viszonyokat. Ezzel a sémával egy finomabb rácsháló definiálásával veszik figyelembe az eredeti rácsfelbontásnál 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 feliskálázásra, a finomabb rácshálózatra 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 futtatásokhoz a kevert MIT-Emanuel/Grell sémát alkalmazzuk. Ebben a tengeri felszínnek esetén az MIT-Emanuel közelítés (Emanuel, 1991, Emanuel és Zivkovic-Rothman, 1999) szerepel, a szárazföldi felszínnek felett viszont a Grell (1993) sémával számol a modell, 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

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

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

⁶ Pennsylvania State University (Pennsylvania Állami Egyetem)

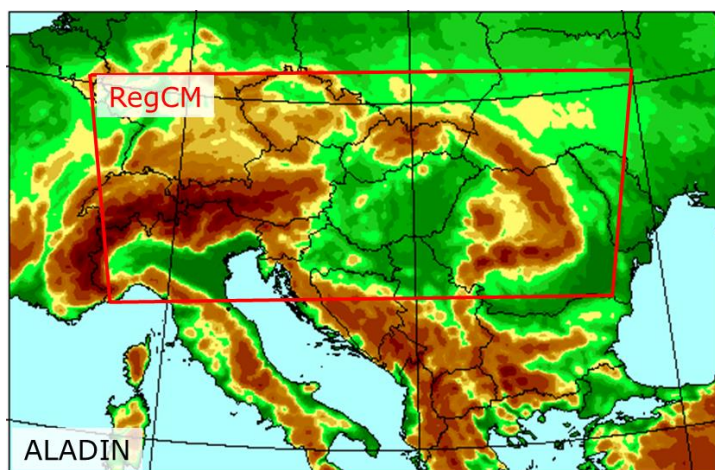
⁷ Climate Community Model

⁸ Bioszféra-Atmoszféra-Transzfer-Séma

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

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 (**1. táblázat**). 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-Climat/OPA, míg a RegCM esetében a HadGEM2 modell adta a kezdeti- és peremfeltételeket. Az alkalmazott kibocsátási scenáriók az ALADIN-Climate esetében a pesszimistának tekinthető RCP8.5, a RegCM esetében pedig az optimista RCP4.5 forgatókönyv (melyek rendre 8,5 és 4,5 W/m² sugárzási kényszert feltételeznek 2100-ra; **1. ábra**).



3. ábra: A 10 km-es felbontású ALADIN és RegCM modellkísérletek integrálási tartománya.

1. táblázat: A modellkísérletek jellemzői.

Kísérlet	ALADIN_8.5	RegCM_4.5
Határfeltétel	ARPEGE-Climat/OPA → ALADIN-Climate	HadGEM2 → RegCM
Horizontális felbontás	10 km	10 km
Szintek száma	31	23
Határfeltételek felbontása	50 km	50 km
Időszak	1950–2100	1970–2099
Integrálási időlépcső	300 s	30 s
Forgatókönyv	RCP8.5	RPC4.5

A projekciók értelmezése

A klímamodellek eredményei elkerülhetetlenül kisebb-nagyobb hibával terheltek, az ALADIN és a RegCM eredményeire vonatkozóan ezeket egy részletes validációs vizsgálat során tártuk fel (Csorvási et al., 2016). A hibákat figyelembe kell venni a jövőre vonatkozó projekciók kiértékelése során, amit megtehetünk úgy, hogy változásértékeket adunk meg: a jövőre vonatkozó modelleredményeket nem önmagukban, hanem a modellek saját referencia-időszakához viszonyítva értelmezzük (így a jövőre és a múltra vonatkozó szisztematikus modellhibák a különbség-képzéssel részben eliminálják egymást), majd a változásértékeket kombináljuk a referencia-időszakra a mérések alapján kiszámított értékekkel. Ez a kombinálás történhet additív módon (pl. az átlaghőmérséklet esetében a mérésekhez hozzáadjuk a változást) vagy multiplikatív módon (pl. a csapadék esetében a méréseket megszorozzuk a relatív változással). Ekkor az ún. *delta-módszert* (Hawkins et al., 2013) használjuk, aminek során feltételezzük, hogy a hibák az integrálás folyamán több évtized átlagában nem változnak lényegesen (ez nem feltétlenül van így). A modellhibák „eltüntetésére” sokan használnak különböző korrekciós eljárásokat (pl. Pieczka, 2012; Kis, 2013), melyek a szisztematikus hiba egyszerű kivonásán vagy a modelleredményekből előálló sűrűségfüggvény mérési adatsorokhoz való illesztésén alapulnak. A korrekciós eljárás a múltbeli megfigyelési információk segítségével állapítja meg a jövőbeli adatsorokra is alkalmazandó korrekciót, így nem tudja figyelembe venni, ha például az éghajlatváltozás következményeként mind a modellben, mind a valóságban megváltozik a sűrűségfüggvény alakja, és ezzel együtt a modellhibák jellemzői (Szépszó, 2014).

Ahogy a múltbeli modelleredmények, úgy a jövőre vonatkozó adatok sem értelmezhetők az „éghajlatváltozás előrejelzett idősoraként”, csupán a meteorológiai változók egyik lehetséges realizációjaként. A harmincéves időszakokon belül az évenkénti adatok olyan statisztikai sokaságot alkotnak, melyek időben felcserélhetők. Ez azt jelenti, hogy egy tetszőleges éves adatsor az időszak bármelyik évének megfeleltethető. [Egy adott éven belül ez természetesen nem tehető meg (azaz nem cserélhető fel például a januári adat a szeptemberivel), mert abban a dinamikai folyamatok révén vissza kell tükröződnie a térség klimatológiájának.] Ennélfogva az adott időszakra vonatkozó adatsor ugyanúgy várható értékek, szórások, eloszlásfüggvények stb. segítségével vizsgálható, mint a múltra vonatkozó modelleredmények. Nem illeszthető trend az időszakon belüli adatsorra, s az adott évre vonatkozó adat nem tekinthető hosszútávú időjárás-előrejelzésnek. Arra is fel kell hívni a figyelmet, hogy az éghajlati rendszer egy nem-lineárisan fejlődő rendszer, ezért egy adott időszak tendenciájából nem következtethetünk egy másik időszak jellemzőire. Például a mérések alapján megfigyelt tendenciák nem extrapolálhatók a jövőre, és ugyanígy két jövőbeli időszak közé eső évtizedekre sem végezhető hasonló statisztikai illesztés; ezeknek az időszakoknak a viszonyait dinamikus modellszimulációk elvégzésével kell felderíteni. Jelen vizsgálatban tehát a delta-módszer alkalmazásával az ALADIN és a RegCM modell által jelzett változásokat közöljük 30-éves átlagok formájában, szignifikancia-teszttel elkülönítve a változási „jelet” az éghajlat természetes változékonyságától a projekciós eredményekben.

Mint azt a bevezetésben ismertettük, a modellszimulációk többféle forrásból származó bizonytalansággal terheltek, melyet az ensemble technika segítségével számszerűsíthetünk. A modell ensemble vagy „modell együttes” összetételét a vizsgálni, megjeleníteni kívánt bizonytalansági tényezők határozzák meg. A fizikai folyamatoknak az éghajlati modellekben való eltérő leírásából eredő bizonytalanságot ún. *multi-modell ensemble* segítségével határozzuk meg, vagyis különböző modelleket futtatunk azonos kibocsátási forgatókönyv alkalmazása mellett. Az antropogén hatások bizonytalanságát a *scenárió ensemble* jellemzi, amikor egyazon modellt többféle forgatókönyvvel is lefuttatunk. Ezekon az alapvető párosításokon kívül számos más ensemble összetétel képezhető (pl. egyetlen modell többféle oldalsó határfeltétellel, vagy különböző fizikai parametrizációk alkalmazásával való futtatása). A NATÉR első változatához

alapot szolgáltató mindkét modellkísérletben a jövőbeli emberi tevékenység leírására egyaránt a SRES A1B forgatókönyvet alkalmaztuk, s az így előálló együttes nem reprezentálta a scenárió-választásból eredő bizonytalanságokat. A projekt során most az ALADIN-Climate modellt a pesszimista RCP8.5, a RegCM modellt pedig az átlagosnak mondható RCP4.5 forgatókönyvvel futtattuk. Ez a mini-ensemble rendszer már egyszerre jeleníti meg az emberi tevékenység leírásából származó bizonytalanságokat, melyek elsősorban a jövőbeli hőmérsékletváltozás mértéke szempontjából lényegesek, valamint a csapadékprojekciók szempontjából fontos modell-bizonytalanságokat. Arra azonban nem ad lehetőséget, hogy az egyes bizonytalansági faktorokat elkülönítsük és egymástól függetlenül számszerűsítsük. Erre abban az esetben volna lehetőség, ha mindkét modell eredménye mindkét forgatókönyv alkalmazásával rendelkezésre állna.

Kiértékelési eszközök

A Meteorológiai Világszervezet ajánlását követve a modellek eredményeit 30-éves időszakokra vizsgáljuk: a változásokat a következő évtizedekre szóló tervezés szempontjából lényeges 2021–2050 és a hosszútávú adaptációs stratégiák kidolgozásához fontos 2069–2098 időszakokra számszerűsítjük (a második időszak megválasztását az indokolja, hogy a RegCM klíma-modell eredményei 2098-ig állnak rendelkezésre), referenciaként az 1971–2000 időszakot tekintve. A vizsgálatokat két meteorológiai változóra, a hőmérsékletre és a csapadékra végeztük el napi, havi, évszakos és éves skálán. Az alkalmazott kiértékelési eszközöket és módszertani jellemzőket az alábbiakban összefoglaljuk:

- Változás és szignifikancia: minden rácspontban kiszámítottuk a jövőre és a referencia-időszakra vonatkozó modelleredmények átlagos (csapadék esetében relatív) éves és évszakos különbségét. A térképeken a pozitív, illetve a negatív változások mértékét színárnyalatok reprezentálják. Az átlagos változások meghatározása mellett szignifikancia vizsgálat segítségével számszerűsítettük, hogy a rácspontokban kapott változásérték miként viszonyul a referencia-időszak évszakos és éves átlagértékeinek szórásához. Ehhez rácspontonként kétoldali Welch-próbát hajtottunk végre 0,05-ös szignifikancia-szinttel, 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 a változás szignifikáns.
- Átlagos változás: kiszámítottuk az éves és évszakos változás magyarországi átlagértékeit.
- Átlagos térbeli és időbeli szórás: a szórásokat mind a jövőbeli, mind pedig a referencia-időszakokra meghatároztuk. A térbeli szórás esetében az adott 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 az adott időszak átlagértéke körüli szórását határoztuk meg.
- Éves menet: meghatároztuk a modelleredmények alapján a havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg átlagos magyarországi változásértékeit, s ezt kombináltuk (hőmérséklet esetén hozzáadtuk, csapadék esetén összeszorzottuk) a referencia-időszakra a mérések alapján kiszámított havi átlagértékekkel.
- Évenkénti (vagy 130-éves) menet: a modelleredmények alapján kiszámítottuk az éves és évszakos átlaghőmérséklet és csapadékösszeg magyarországi átlagának évenkénti értékeit az 1971–2100 (a RegCM esetében az 1971–2098) időszakra.

- 100-éves menet 30-éves mozgóátlagok alapján: meghatároztuk az éves és évszakos magyarországi hőmérsékleti átlagok és csapadékösszegek évenkénti változását a referencia-időszakhoz képest, majd egy 30-éves időablakra átlagoltuk ezeket, az időablakot évenként léptetve. Így az ábrán egy adott évhez tartozó változásérték a megelőző 30 év referencia-időszaktól vett átlagos eltérését reprezentálja.
- Whisker-box diagramok: ezek a diagramok lehetővé teszik az éves, évszakos és havi magyarországi átlagok eloszlásának összehasonlítását a mérési adatokra és a modelleredményekre (McGill et al., 1978). Két-két diagramot készítettünk a hőmérsékletre és a csapadéokra: az egyikben a jövőre vonatkozó éves és évszakos változásokat jelenítettük meg, a másikon a referencia-időszakra és a jövőbeli időszakokra vonatkozó havi átlagértékeket (melyeket előzőleg a referencia-időszak mérési adataival kombináltunk; 1. éves menet). A 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 és felett lévő függőleges szaggatott vonalak az adott időszak 30 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.
- 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 °C és 40 °C közötti intervallumot 1 fokenként, 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 modelledmények és a mérési adatok gyakoriságát. Az eredményeket a modellek referencia-időszakára és a két jövőbeli időszakra, modellenként külön diagramon jelenítettük meg. A csapadék esetében az eloszlások szemléletes ábrázolása problémásabb, ugyanis az egyes kategóriák előfordulási gyakorisága meredeken csökken a nagyobb napi csapadékösszegek irányában. 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.
- Extrém indexek térképes megjelenítése: a napi adatok felhasználásával különböző hőmérsékleti és csapadék éghajlati indexek éves és évszakos gyakoriságát vizsgáltuk (**2. táblázat**). Ehhez a magyarországi napi maximum- és minimumhőmérsékleteket, illetve napi csapadékösszegeket használtuk fel és különböző küszöbértékek átlépési gyakoriságát vizsgáltuk a rácspontokban, a hőmérsékleti indexek esetében napban, a csapadékindexek esetében százalékos formában megadva a változásokat a modellek referencia-időszakához képest. Minden indexnél végeztünk szignifikancia vizsgálatot is, a térképeken a szignifikáns változású rácspontokat pontozással jelöltük.
- Extrém indexek grafikonos megjelenítése: a két modell eredményei alapján a hőmérsékleti és csapadékindexek két jövőbeli időszakra számított átlagos magyarországi változásának lehetséges intervallumát grafikonokon ábrázoltuk, mindkét változó esetén napban megadva a változásokat a modellek referencia-időszakához képest.

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.
Extrém nagy csapadékú nap	A napi csapadékösszeg eléri a 20 mm-t.
Csapadékintenzitás	Az 1 mm-nél nagyobb csapadékú napokon hulló átlagos csapadék.
Száraz időszakok maximális hossza	Azon egymást követő napok maximális száma, amikor a napi csapadékösszeg 1 mm-nél kisebb.

Eredmények

A referencia-időszak bemutatása

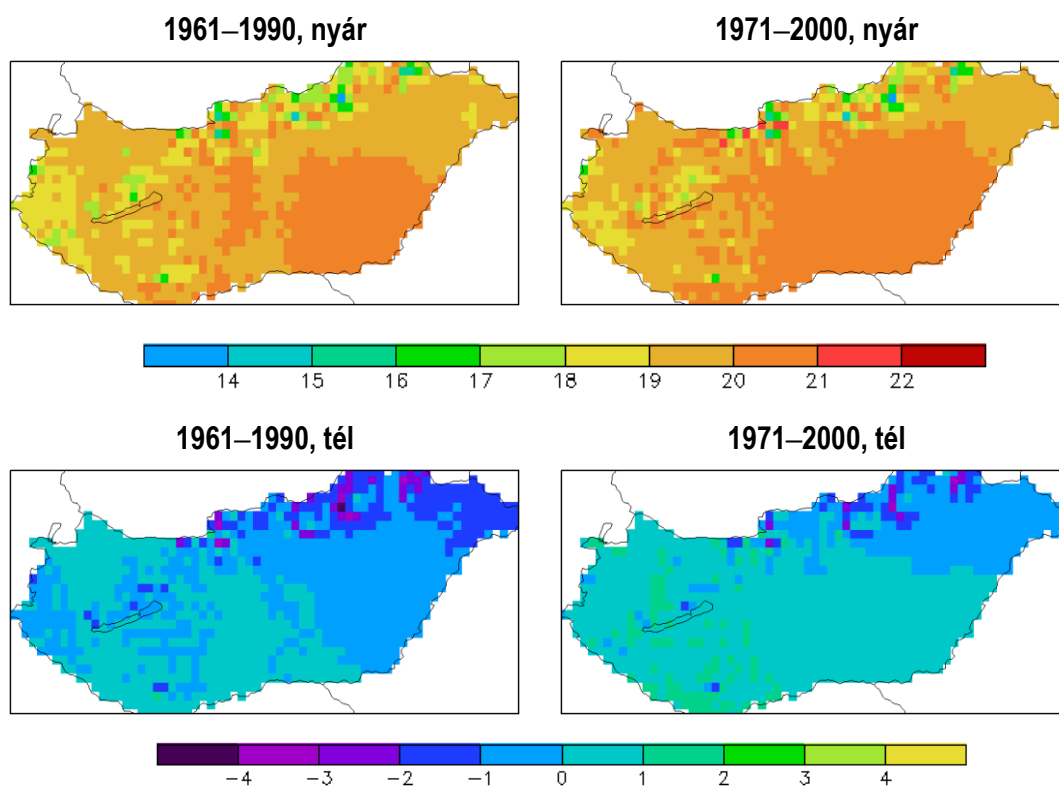
Ahogy említettük, a projekciók kiértékelésekor a delta-módszert alkalmazzuk, mely során összevetjük a modellek jövőre vonatkozó eredményeit a referencia-időszakra vonatkozó eredményekkel, majd az így kapott átlagos változásokat kombináljuk a referencia-időszakra vonatkozó mérésekkel. A vizsgálatainkban 1971–2000-et választottuk referenciának, azonban mivel számos korábbi tanulmányban az 1961–1990 időszakot tekintették viszonyítási alapnak, ezért röviden ismertetjük, hogy a tíz évvel eltolt időszak hőmérsékletre és csapadékre vonatkozó éghajlati jellemzői mennyiben térnek el a korábbi referenciától a CARPATCLIM-HU (Lakatos et al., 2013) homogénizált megfigyelési adatbázisban.

A hőmérséklet évszakos átlagai többnyire magasabbak az 1971–2000 időszakban. A különbség nyáron átlagosan 0,4 °C és leginkább az ország déli, délkeleti régióit érinti (**4. ábra**). A nyári országos átlaghőmérséklet ezzel hazánk területének csaknem felén meghaladta a 20 °C-ot ebben az időszakban. A téli átlaghőmérséklet több, mint fél fokkal emelkedett, a korábbi -0.3 °C-os értékről 0.3 °C-ra (**3. táblázat**), így nulla fok alatti értékek csak hegyvidéki területeken és az ország északkeleti részén maradtak jellemzők. Az átmeneti évszakok hőmérsékletének változása jóval kisebb, csupán egy-két tized fok.

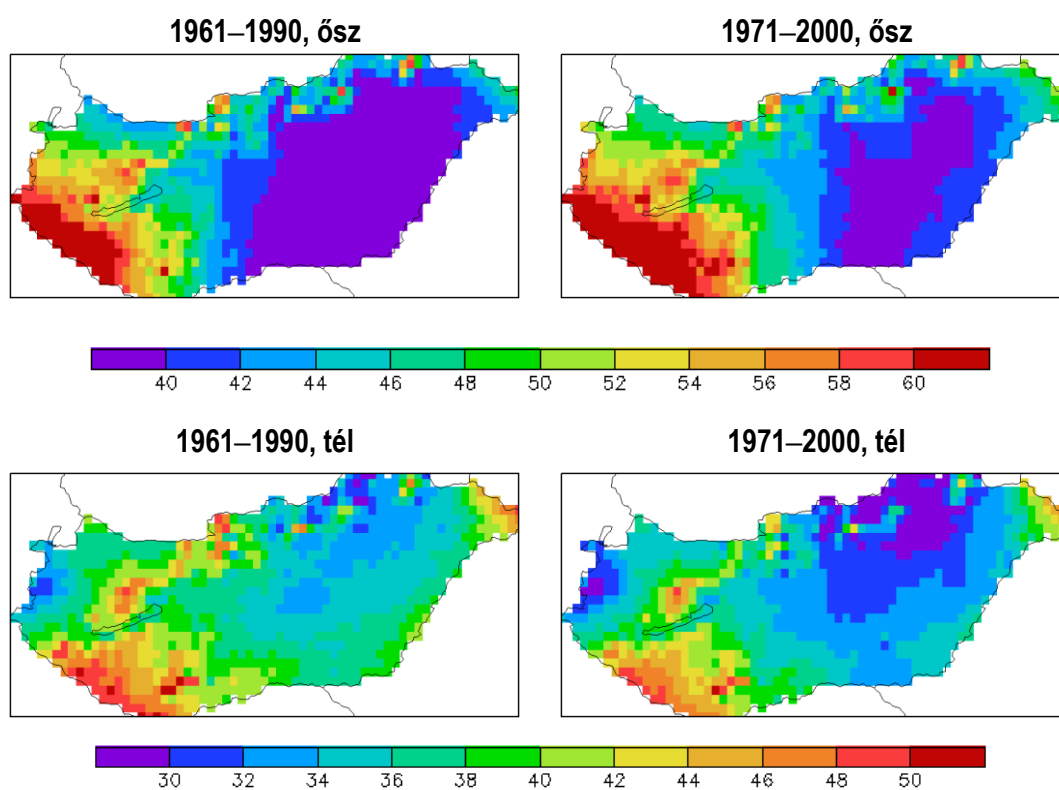
A csapadék az 1971–2000 időszakban az őszt kivéve átlagosan néhány százalékkal csökkent a korábbi referenciához képest. A különbség télen és ősszel a legnagyobb (helyenként -7 illetve 6 %; **5. ábra**), tavasszal és nyáron a legkisebb (3 % alatti). Az őszi csapadéktöbblet a délnyugati és a keleti országrészben a legmarkánsabb, a téli szárazodás pedig az Északi-középhegység területén és a Duna-Tisza-közén.

3. táblázat: Az éves és évszakos magyarországi átlaghőmérséklet és átlagos csapadékösszeg értékei (°C és mm/hónap) 1961–1990-re és 1971–2000-re a CARPATCLIM-HU megfigyelési adatbázis alapján.

	Időszak	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
Hőmérséklet	1961–1990	10.1	10.5	19.5	10.7	-0.3
	1971–2000	10.3	10.7	19.8	10.5	0.3
Csapadék	1961–1990	49	47	66	44	38
	1971–2000	48	46	64	47	35



4. ábra: Nyári és téli átlaghőmérséklet (°C) 1961–1990-re és 1971–2000-re a CARPATCLIM-HU megfigyelési adatbázis alapján.



5. ábra: Őszi és téli átlagos csapadékösszeg (mm/hónap) 1961–1990-re és 1971–2000-re a CARPATCLIM-HU megfigyelési adatbázis alapján.

Hőmérséklet

Az ALADIN-Climate és a RegCM regionális éghajlati modellek az eltérő forgatókönyvek „el- lenére” is egységesek abban, hogy a XXI. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelke- dése a Kárpát-medencében. Ezek a változások már az első projekciós időszakban is és mindkét modell esetében statisztikailag szignifikánsak. Az eredmények két regionális klímamodell-szi- muláció eredményei alapján az éves átlaghőmérséklet emelkedése a 2021–2050 időszakra 2 °C körüli, évszakos szinten azonban az ALADIN-Climate télre, a RegCM pedig nyárra adott a többi évszagnál valamelyest nagyobb melegedést. Ezzel együtt elmondható, hogy az évszázad közepéig a melegedés mértékében nincs jelentős térbeli, illetve évszakos változékonyság Eu- rópa területén (**6. ábra**). A 2069–2098 időszakra a modelleredmények közötti eltérés jóval mar- kánsabb, s az ALADIN-Climate kísérlet minden évszakban nagyobb mértékű melegedést mu- tat, mint a RegCM. Emellett az első projekciós időszakhoz képest jóval kontrasztosabban raj- zolódnak ki a magashegységek (pl. Alpok, Dinári-hegység) vonulatai, továbbá látható egy ki- terjedt lokális maximum a változásban a tartomány északkeleti részén is.

A modellek a hőmérséklet Magyarországon várható változását is hasonlóan írják le (**7. ábra**): a század közepéig éves átlagban 2 °C-os melegedés valószínűsíthető, kis területi és év- szakos változékonysággal. Az évszázad végére az éves átlagos változás az ALADIN eredmé- nyei alapján már 4 °C, a legnagyobb hőmérséklet-emelkedést továbbra is télen mutatva (4,7 °C; **4. táblázat**), valamint erősebb a változás térbeli tagoltsága is. A RegCM modell szerint ekkor a melegedés hozzávetőlegesen 3 °C, ami még nyáron sem haladja meg a 4 °C-ot és a térbeli változékonysága is kisebb.

A szimulációkhoz választott forgatókönyveknek elsősorban az átlagos hőmérsékletvál- tozásra van hatása. Ha összehasonlítjuk az egyes forgatókönyvekhez tartozó sugárzási kény- szerek idősorait (**1. ábra**), látható, hogy a forgatókönyvek már az évszázad közepét megelőzően egyértelműen elkülönülnek, mivel az RCP4.5 a sugárzási kényszer egyre lassuló ütemű növe- kedését, majd stagnálását írja elő, az RCP8.5 scenárió ezzel szemben a sugárzási kényszer nagyjából egyenletes növekedését jelzi a század végéig. Az eltérő tendenciák hatása a model- lekben csak késleltetve, 2070 után jelenik meg, ugyanis ekkortól kezd el lassulni a melegedés üteme a RegCM kísérletben (**11. ábra**), az ALADIN-Climate szimulációban a hőmérséklet vi- szont változatlanul növekszik tovább, ami a század végére jelentős eltérést okoz a két szimulá- ció között. Ez a késleltetett hatás szemlélteti az éghajlati rendszer külső kényszerekkel szem- ben tehetetlenségét, melyet a modellek is jól visszaadtak.

A hőmérséklet hazánkban jellemző éven belüli menete egyik modell szerint sem válto- zik a jövőben, továbbra is a január lesz a leghidegebb hónap és júliusban várható az éves ma- ximum mindkét projekció szerint (**9. ábra**). Az ALADIN télen nagyobb hőmérséklet-emelke- dést jelez, mint nyáron, így csökken a különbség a legmelegebb és a leghidegebb hónap átlag- hőmérséklete között, s ezzel az éves hőingás a referencia-időszakhoz képest. A RegCM szimu- lációban ezzel szemben a nyár melegszik jobban, ennek következtében az éves hőingás mértéke növekszik.

A havi, évszakos és éves átlaghőmérsékletek elemzésén kívül megvizsgáltuk a január és a júliusi hónap napi középhőmérsékleteinek gyakorisági eloszlását is a referencia-időszakra és a két jövőbeli időszakra vonatkozóan (**14. ábra**). Az eloszlások ismeretében egyrészt képet kapunk arról, hogy a hőmérséklet napi átlagai a szimulált adatsorokban milyen széles skálán mozognak, tehát mennyire változékonnyak, másrészt arról, hogy a megismert átlagos változások hogyan befolyásolják a napi értékek által meghatározott szélsőséges események jövőbeli gya- koriságát. Láthatjuk, hogy az eloszlások idővel a két kiválasztott hónapban fokozatosan elto- lódnak a pozitív irányba mindkét modell szerint, különösen júliusban.

Az ALADIN-Climate eredményekben a januári gyakorisági eloszlások a jövőben egyre

„keskenyebbek”, azaz csökken a napi átlaghőmérséklet-értékek változékonysága, ami megfigyelhető az évszakos Whisker-box diagramok (**13. ábra**) és a szórást bemutató táblázatok (**5. táblázat**) téli értékein is. A -2 °C alatti középhőmérsékletek előfordulása mindkét jövőbeli időszakban csökken, a fagypont felettié pedig növekszik. A század végére a legnagyobb gyakorisággal $1-2\text{ °C}$ közé esik a napi középhőmérséklet a korábbi 0 °C körüli értékhez képest. A 4 °C -nál magasabb középhőmérsékletű napok gyakorisága a modellbeli referencia-érték többszörösére nő, s olyan értékek is megjelennek, amilyenek a múltban egyáltalán nem fordultak elő, illetve ezzel párhuzamosan a referencia-időszakbeli hideg szélsőségek fokozatosan eltűnnek. A RegCM januári középhőmérsékleti eloszlásgörbéje jellegét tekintve kevesebbet változik, kissé laposabb lesz, ami a változékonyság enyhe növekedését jelenti. A legnagyobb gyakorisághoz tartozó hőmérséklet a század végére 3 fokkal emelkedik, és ebben a projekcióban is erősen növekszik a $4-5\text{ °C}$ -nál melegebb középhőmérsékletű napok gyakorisága. A januári szélsőségesen hideg napok számának csökkenése azonban jóval mérsékeltebb.

A júliusi középhőmérsékletek gyakorisági eloszlása hasonló módon alakul a két modell szerint, ám ebben az esetben a RegCM mutat nagyobb mértékű változást. Az eloszlás „szélesedése” ismét a jövőbeli változékonyság növekedését mutatja, ahogyan az a nyári hőmérséklet időbeli szórásában is megnyilvánul (**5. táblázat**). A referencia-időszakban a modellek szerint 22 és 24 °C közé esik leggyakrabban a júliusi napi középhőmérséklet értéke, ami a század végére az ALADIN esetében $27-28\text{ °C}$ -ra, a RegCM szimulációban $29-30\text{ °C}$ -ra módosul. Ennek megfelelően a szélsőségesen meleg napok gyakorisága igen erősen növekszik mindkét modell szimulációs eredményeiben.

A hőmérsékleti szélsőségekkel kapcsolatos változásokat három index, a fagyos napok, a nyári napok, valamint a hőségnapok országos átlagainak megváltozásán keresztül mutatjuk be (**2. táblázat**). A várakozásainknak, s az eddig bemutatott eredményeknek megfelelően a fagyos napok számának erős csökkenése valószínűsíthető, míg a magas hőmérsékleti küszöbértékkel jellemzett indexek előfordulása várhatóan jelentős mértékben növekedni fog mindkét modell projekciója alapján mindkét időszakban (**15. ábra**). Ugyanakkor az évszázad végére jelzett változások mértéke jóval nagyobb, mint amire a közeljövőben számíthatunk.

A fagyos napok számában várható változások minden időszakban az ország egészén szignifikánsnak bizonyultak (**15. ábra**). Az évszázad közepére várhatóan $25-30$ -cal, az évszázad végére pedig $55-60$ -nal kevesebb alkalommal csökken fagypont alá a napi minimumhőmérséklet az ALADIN-Climate szimulációs eredményeiben. Az erős századvégi csökkenés összhangban van a téli hónapok erőteljes átlaghőmérséklet-emelkedésével. A nagyarányú csökkenés nem eredményezi a fagyos napok eltűnését, mert a modell referencia-időszakában meglehetősen sok fagyos nap fordult elő (a téli átlaghőmérséklet szisztematikus negatív hibával terhelt; Csorvási et al., 2016). A RegCM a közeljövőre az ALADIN-hoz nagyon hasonló, a távoli jövőre pedig valamivel enyhébb, $35-40$ napos csökkenést mutat.

A nyári napok számának változása a RegCM eredményekben erőteljesebb, mint az ALADIN-ban: a projekció szerint az évszázad közepére mintegy 20 napos növekedés várható (**16. ábra**), ami a $2069-2098$ időszakra az ország északnyugati részén a $30-40$ napot is eléri. Az ALADIN szimulációban a nyári napok változása csak a századvégi projekciós időszakra válik szignifikánssá, ekkorra átlagosan 21 napos növekedést mutat. A hőmérsékleti indexek változását bemutató térképek közül egyedül a nyári napokra vonatkozó térképeken láthatunk egyértelmű térbeli szerkezetet: az ALADIN-nál egy kelet–nyugati irányú, a RegCM esetében pedig délkelet–északnyugat irányú gradiens jellemzi a változás mező szerkezetét (**15. ábra**). Ez a térbeli mintázat az átlaghőmérséklet megváltozását ábrázoló térképeken nem jelenik meg. A hőségnapok gyakoriságának változása hasonló a nyári napok jövőbeli alakulásához, ám mindkét modell szerint nagyobb mértékű annál. A század közepén mintegy $20-25$ nappal, a század végén pedig akár $30-40$ nappal növekedhet a hőségnapok száma, s ebben az esetben is a RegCM projekció mutat nagyobb növekedést.

Csapadék

A csapadék a hőmérséklethez képest nehezebben modellezhető meteorológiai elem, ebből adódóan jövőbeli megváltozása gyakran nagy bizonytalansággal terhelt – a különböző modellek eredményei nemcsak a változás mértékében, de annak előjelében sem mindig mutatnak egyezést. A 2021–2050 időszakra az ALADIN minden évszakban szinte a teljes tartományon (így hazánkban is; **17. ábra** és **18. ábra**) csapadéknövekedést jelez, az őszi kivételével csupán a mediterrán és nyugati területeken figyelhetők meg kis mértékben szárazodó térségek. Az egyes évszakokban a növekedés mértéke nem mutat nagy különbséget, általában 10-20 % körüli, bár ősszel a tartomány keleti felén intenzívebb, 40 %-ot elérő növekedés látható, amely hazánk délkeleti részét is érinti. Ez az egyirányú, homogén változás azonban havi skálán vizsgálódva már nem érvényes – márciusban, júliusban és októberben a tartomány kiterjedtebb területei (részben Magyarországot is beleértve) válnak szárazabbá (ábrán nem mutatjuk be). Az évszázad végére a korábban csapadéknövekedéssel jellemzett területeken általában a változás tovább folytatódik és intenzívebbé válik. Nyáron az Alpok felett a konvektív csapadékesemények változása okozhatja a góccokban megfigyelhető igen jelentős növekedést, bár ennek egyértelmű igazolása a modellbeli konvektív és nagyskálájú csapadék elkülönített vizsgálatát igényli. Az ALADIN-nal ellentétben a RegCM szerinti évszagos csapadékváltozás kevésbé egységes, a 2021–2050 időszakra az év első felében (téli és tavasszal) növekedésre, nyáron és ősszel viszont csökkenésre számíthatunk a teljes tartományon, ami az éves átlag 5 %-nál kisebb változását eredményezi. Az egyes évszakokban a változás mértéke a 30 %-ot csak néhány helyen (ősszel pedig egyáltalán nem) lépi át. A távolabbi jövőt tekintve szintén a változások fokozódását figyelhetjük meg, sőt az éves átlag ekkor már gyenge növekedésbe megy át (10-20 %), amiért az őszi csapadékváltozás pozitív irányba fordulása felelős.

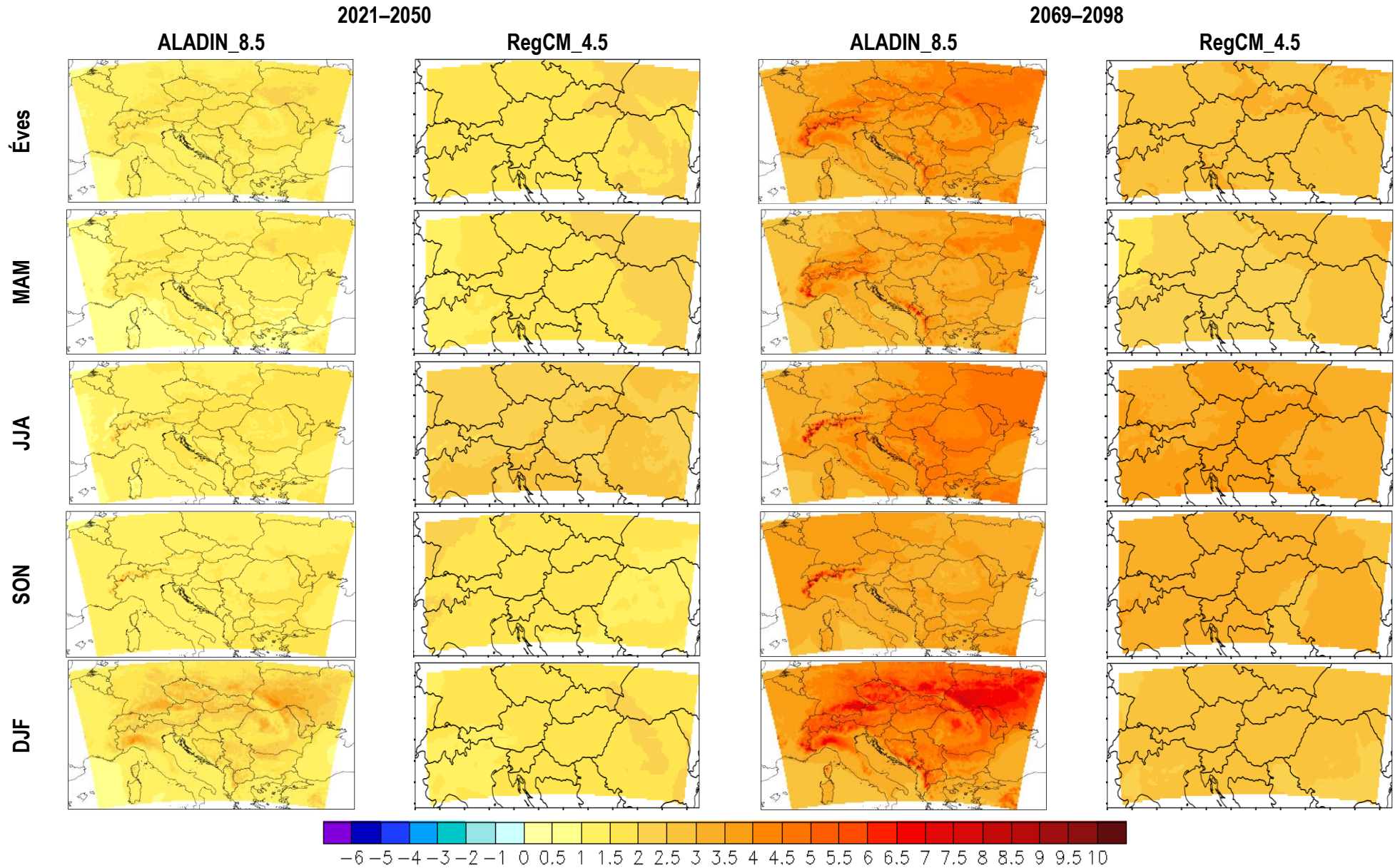
Magyarországra fókuszálva elmondhatjuk, hogy a század végéig az éves átlagos csapadékösszeg (az egyik modell eredményei alapján szignifikáns) növekedése várható (**18. ábra**), az országos átlagban a közeljövőre 3–17 %-os, a távolabbi időszakra 10–23 %-os mértékben (**6. táblázat**). Az egyes évszakokat vizsgálva az is egyértelmű, hogy a közeljövőre tavasszal és télen, valamint a 2069–2098 időszakon ősszel is a referencia-időszakbelinél több csapadék valószínű. A tavaszi és főként a téli növekedés esetében még hasonló mértékű változást is mutat a két modell (**19. ábra**). Az évszázad végére az évszagos csapadékösszeg átlagos emelkedése ősszel akár meghaladhatja a 30 %-ot, sőt, az ország délkeleti területein akár a 40-50 %-ot is. A XXI. század során a változás azonban a hőmérsékletnél megfigyelteknél jóval egyenetlenebbül fog történni, melyről a **22. ábra** 100-éves menetei tájékoztatnak. Tavasszal mindkét modell szerint a változás 2030-ig intenzíven fokozódik, majd a hátralévő évtizedekben várhatóan nem jeleznek további növekedést az eredmények. Ősszel és télen a RegCM előjelváltása figyelhető meg az évszázad végére. Érdemes külön figyelmet fordítani a nyári évszakra, ugyanis – a korábbi eredményekkel ellentétben, melyek egyértelmű szárazodást mutattak – a jelen tanulmányban vizsgált modellek alapján ugyanolyan mértékű (az évszázad végére kiterjedt területeken szignifikáns) csökkenés és növekedés egyaránt lehetséges. Míg korábban tehát szinte egyedül a nyári változások voltak nem voltak kérdésesek, addig a jelenlegi projekciókban ez tűnik a legbizonytalanabbnak.

A csapadék éven belüli menetét megvizsgálva az egyes jövőbeli időszakokon, illetve a múltbeli mérésekkel összevetve (**20. ábra**) az látható, hogy az ALADIN szerint változatlan marad a csapadék éven belüli eloszlása. Eszerint a maximum továbbra is júniusban várható (de különösen az évszázad végére erőteljesebben emelkedik ki a többi hónap közül), a minimum pedig február-március környékén jelentkezik, a közeljövőben markánsabban (márciusban alulmúlva a referencia-időszakra vonatkozó méréseket). A RegCM ettől igen eltérő eredményeket mutat. A 2021–2050 időszakon a csapadékmaximum áprilisban, a minimum szeptember-októ-

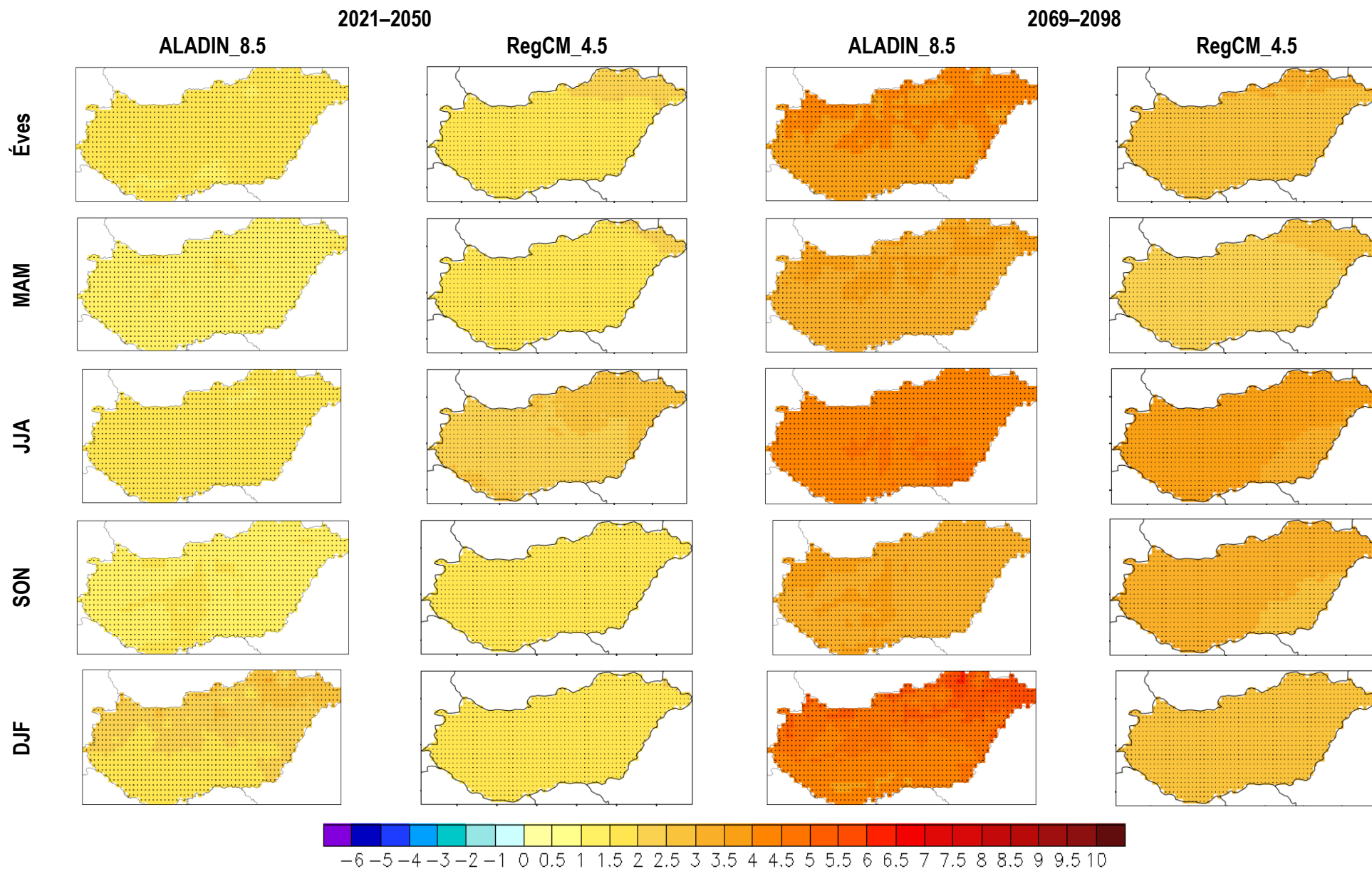
berben jelentkezik, a 2069–2098 időszakon pedig e két szélsőérték rendre júniusban és augusztusban várható. A mérések tanúsága szerint a XX. század utolsó évtizedeiben novemberben a csapadékhullásnak egy másodlagos maximuma volt. Ez a jellegzetesség az eredmények alapján azonban csak az évszázad első feléig marad meg, a század végére eltűnni látszik.

Megvizsgáltuk a csapadék időbeli szórásának változását is. Az eredmények azt mutatják, hogy a jövőben általában nagyobb lesz az egyes évek között a változékonyság, s a szórásértékek a nyár kivételével a 2069–2098 időszakban meghaladják az évszázad első felére kapott értékeket (**7. táblázat**). A Whisker-box diagramot tekintve (**24. ábra**) továbbá az is elmondható, hogy néhány hónapban a múltban jellemző legmagasabb csapadékösszeg a jövőben akár meg is kétszereződhet; ilyen a RegCM szerint március-áprilisban, az ALADIN szerint pedig augusztusban lehetséges. Ugyanakkor a megfigyelések szerint a 30 év során megfigyelt nagyon alacsony havi csapadékösszegek a jövőben továbbra sem tűnnek el, sőt a RegCM szerinti nyári-őszi szárazodásnak köszönhetően a júliustól szeptemberig tartó időszakban többször is bekövetkezhetnek közel csapadékmentes hónapok.

A 2021–2050 időszakban hazánkban a téli és tavaszi csapadéknövekedéssel párhuzamosan a csapadékos napok száma, valamint a 10 mm feletti, nagy csapadékú napok száma is emelkedni fog (**25. ábra, 26. ábra, 27. ábra** és **28. ábra**). A század végére már várhatóan ősszel is gyakrabban fordulnak elő nagy csapadékú napok. Ősszel és télen a változás helyenként meghaladja a 60%-ot, országos átlagban azonban ez mindössze 1-2 napot jelent (**31. ábra**). A nyári változások nem egyértelműek, ahogy maga a nyári átlagos csapadékösszeg-változás sem. Az extrém nagy (20 mm feletti) csapadékú napok számának változására a helyi tényezők nagy hatással vannak, ugyanis a nagymennyiségű csapadék jellemzően a helyi zivatartevékenységekhez köthető. Ebből adódóan megváltozása térben igen differenciált képet mutat (**28. ábra**). Egyértelműbb és szignifikáns változás a század végére látható, ekkor nyár kivételével minden évszakban gyakrabban fognak előfordulni ilyen nagy csapadékmennyiségű napok, és ez a változás ősszel és télen a modellek szerint az ország jelentős részén meghaladja a változékonyságot. Hozzá kell tenni azonban, hogy ugyan a relatív változások jelentősek, még a legnagyobb őszi növekedés is egy napnál kevesebbet jelent. Az egymást követő száraz (1 mm-nél kevesebb napi csapadékösszegű) napok maximális számának változásában a modellek az országon belül nagyon eltérő képet mutatnak (**30. ábra**). Az országos átlagokat tekintve (**31. ábra**) a 2021–2050 időszakon a modelleredmények egységesek abban, hogy a száraz időszakok télen és tavasszal 1-2 nappal rövidebbek lesznek, a 2069–2098 időszakon azonban már csak a tavaszi hasonló irányú változás bizonyos. A RegCM eredmények alapján annak ellenére, hogy az évszakai csapadékösszeg, valamint a nagy és extrém nagy csapadékú napok száma az évszázad végére ősszel és télen növekszik, a csapadékos napok száma kevesebb lesz és hosszabb száraz időszakok is várhatók. Ugyanez a következtetés olvasható le a csapadékintenzitás megváltozását vizsgálva is (**29. ábra**).



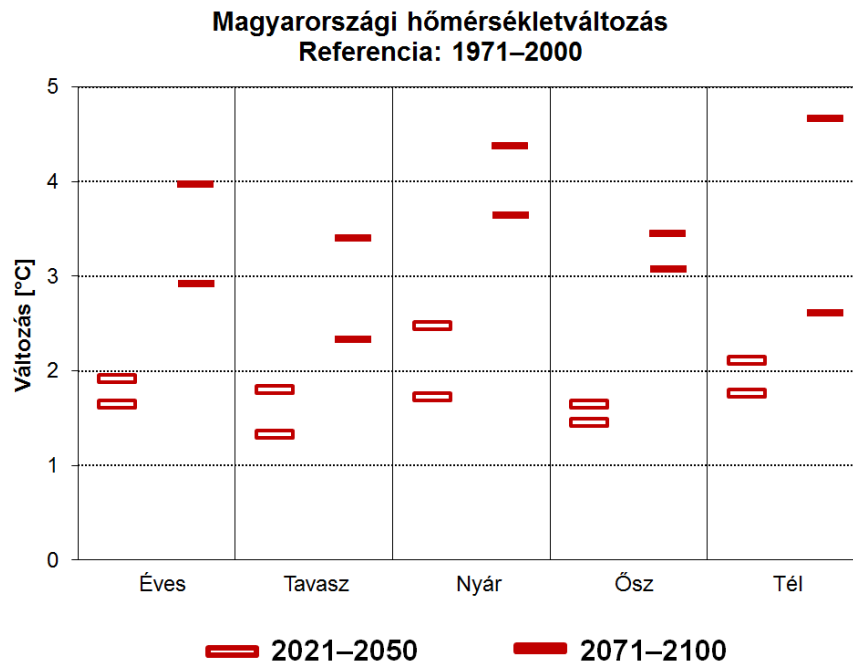
6. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



7. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) Magyarországon 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.

4. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

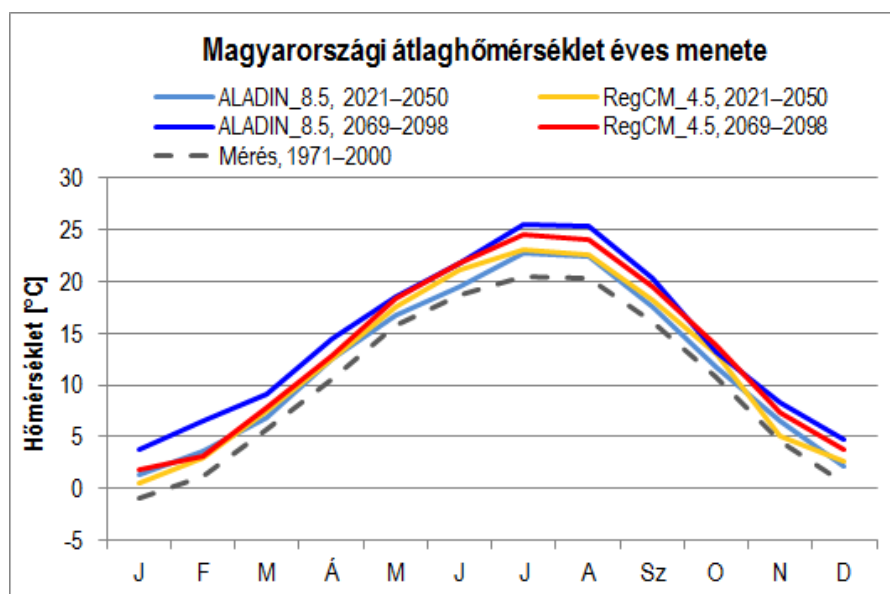
Átlagos hőmérsékletváltozás [°C]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
2021–2050	ALADIN_8.5	1,7	1,3	1,7	1,5	2,1
	RegCM_4.5	1,9	1,8	2,5	1,6	1,8
2069–2098	ALADIN_8.5	4,0	3,4	4,4	3,4	4,7
	RegCM_4.5	2,9	2,3	3,6	3,1	2,6



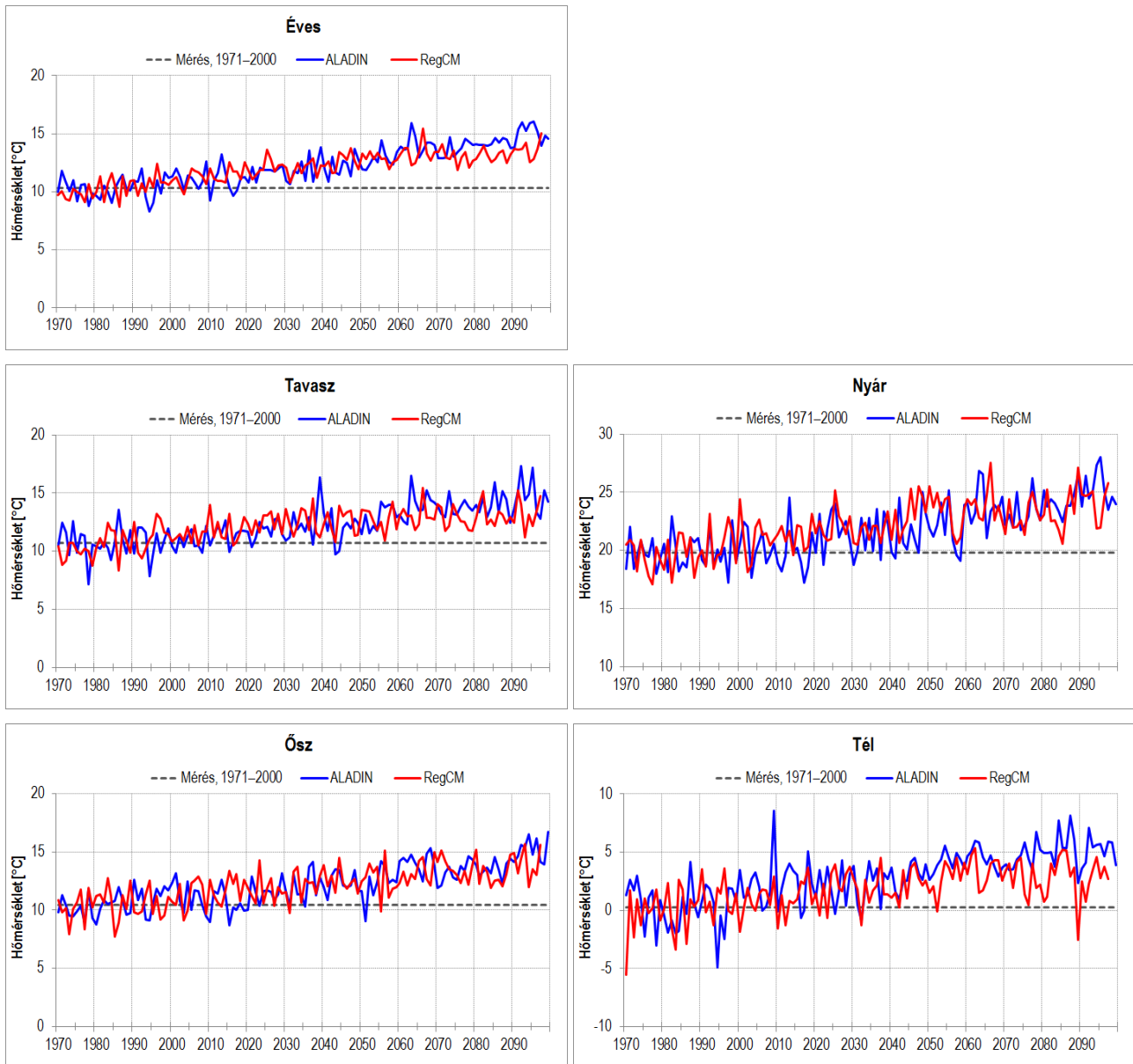
8. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

5. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet magyarországi időbeli és térbeli szórásértékei (°C) az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban.

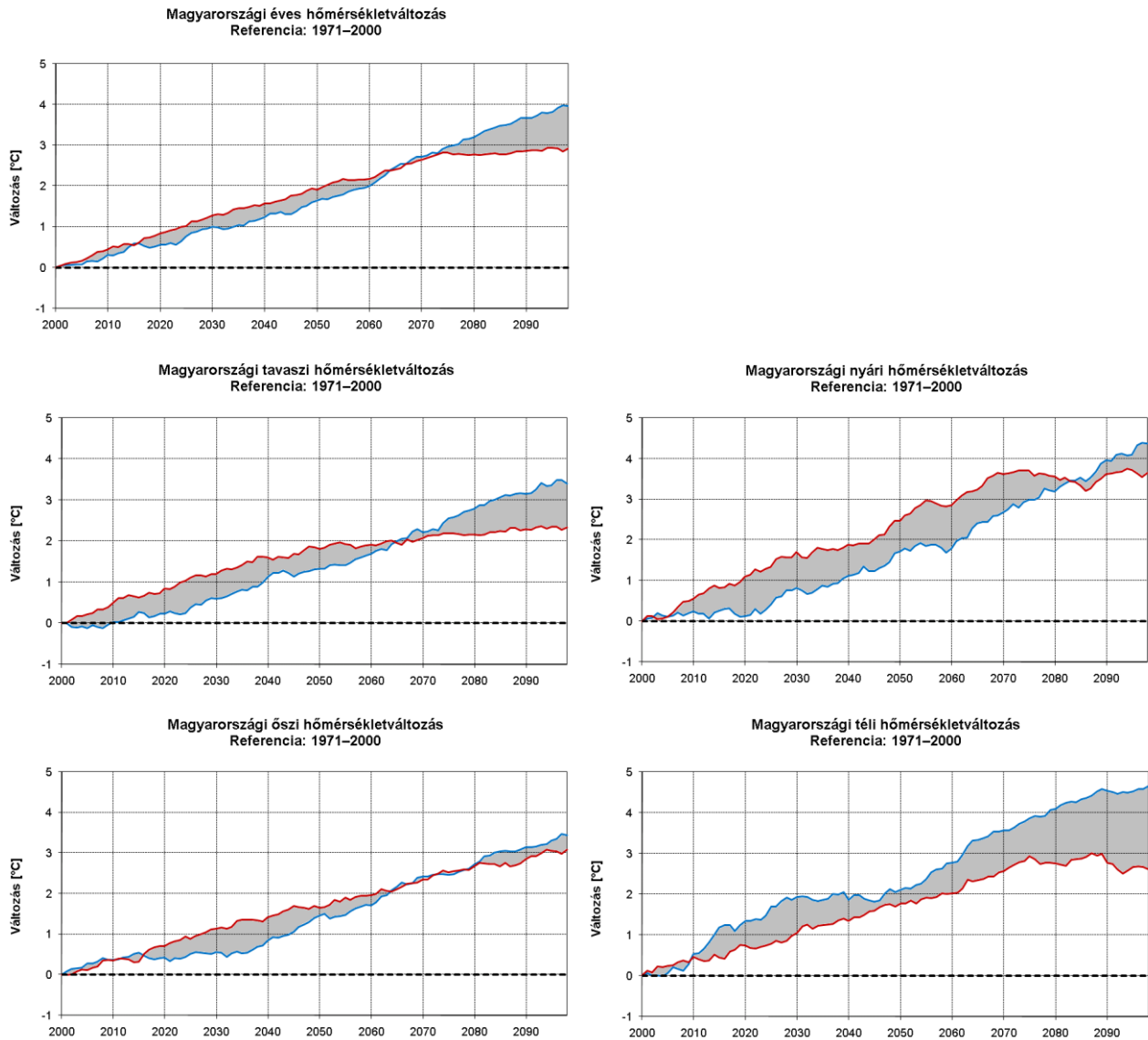
Hőmérséklet időbeli szórása [°C]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
1971–2000	ALADIN_8.5	0,9	1,4	1,5	1,1	2,0
	RegCM_4.5	0,8	1,2	1,6	1,3	2,0
2021–2050	ALADIN_8.5	0,9	1,3	1,8	1,1	1,5
	RegCM_4.5	1,0	1,3	2,1	1,7	2,5
2069–2098	ALADIN_8.5	0,9	1,2	1,6	1,1	1,4
	RegCM_4.5	1,0	1,6	2,4	1,9	2,5
Hőmérséklet térbeli szórása [°C]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
1971–2000	ALADIN_8.5	0,8	0,8	0,7	0,7	1,3
	RegCM_4.5	0,7	0,7	1,0	0,7	0,8
2021–2050	ALADIN_8.5	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0
	RegCM_4.5	0,2	0,3	0,4	0,2	0,4
2069–2098	ALADIN_8.5	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8
	RegCM_4.5	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4



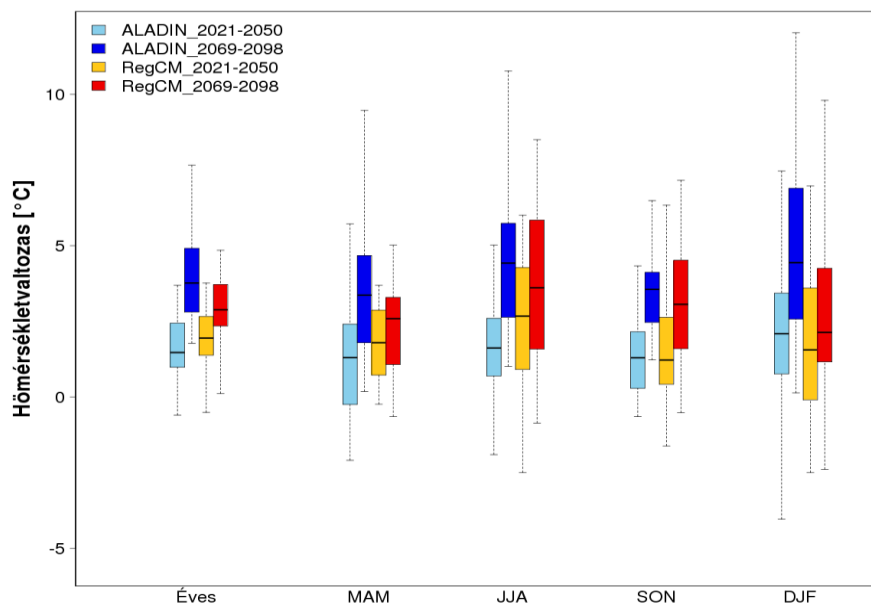
9. ábra: A hőmérséklet magyarországi havi átlagértékei (°C) 1971–2000-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.



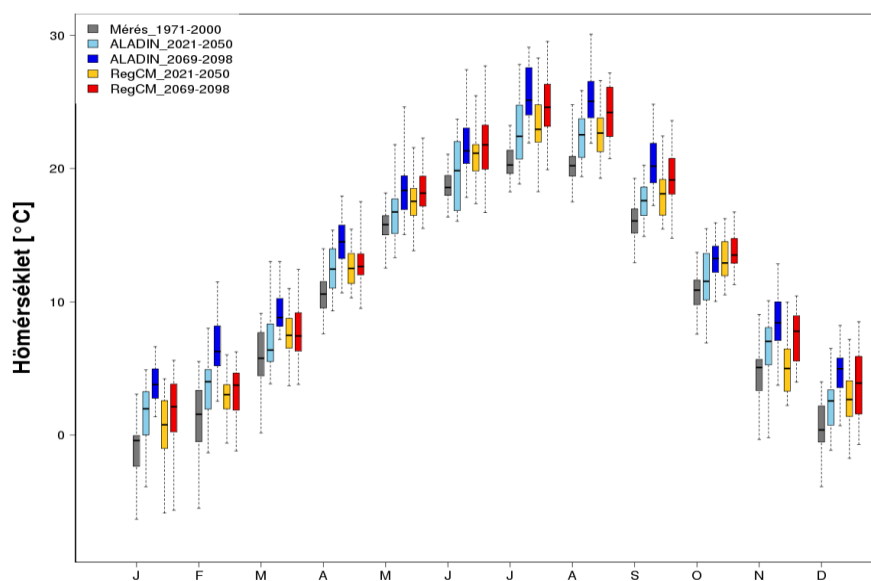
10. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet évenkénti értékei (°C) az 1971–2100 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján, valamint az 1971–2000 időszakra vonatkozó átlag a mérések alapján.



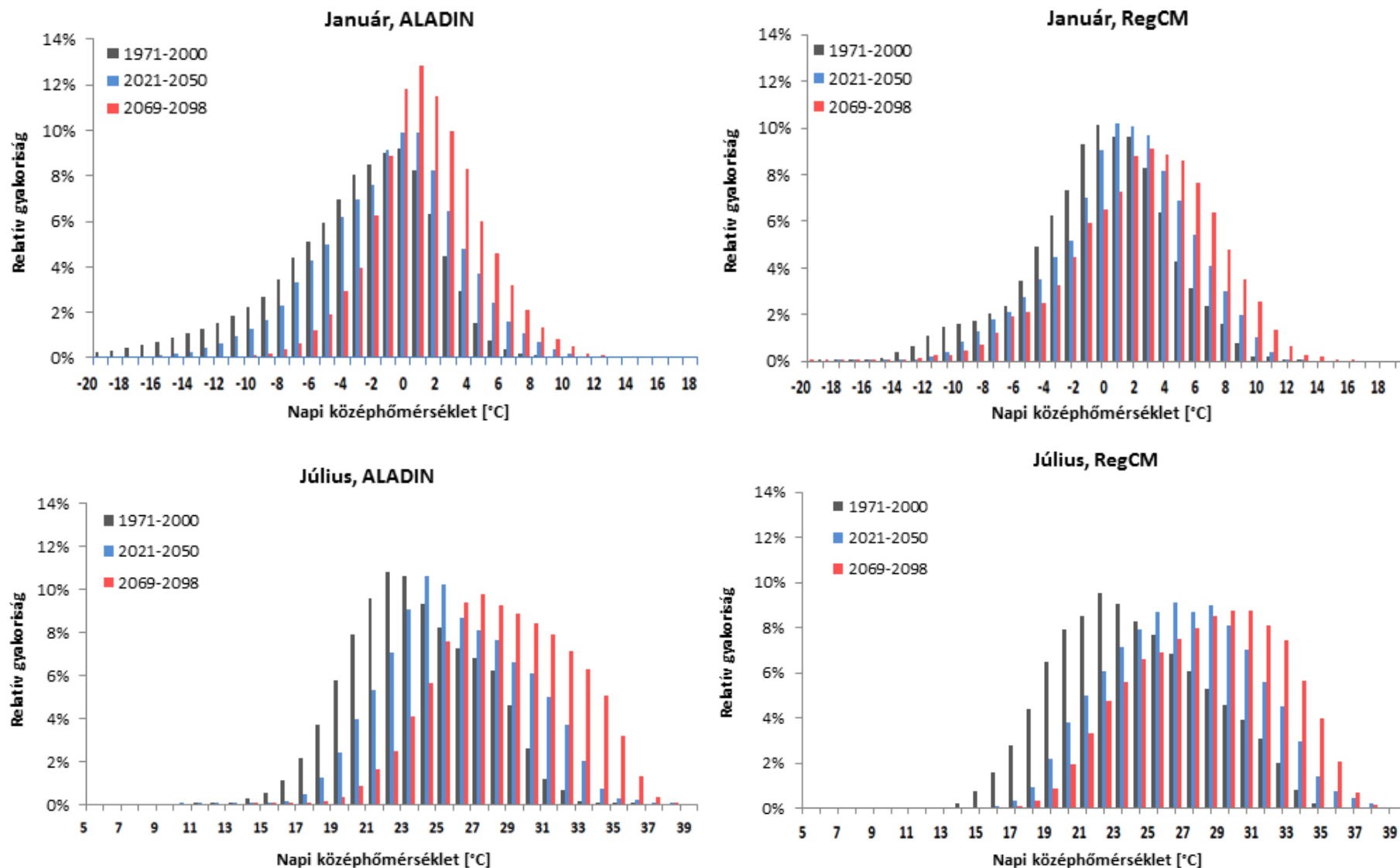
11. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet 1971–2000-hez viszonyított változásának (°C) 30-éves mozgóátlaga az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.



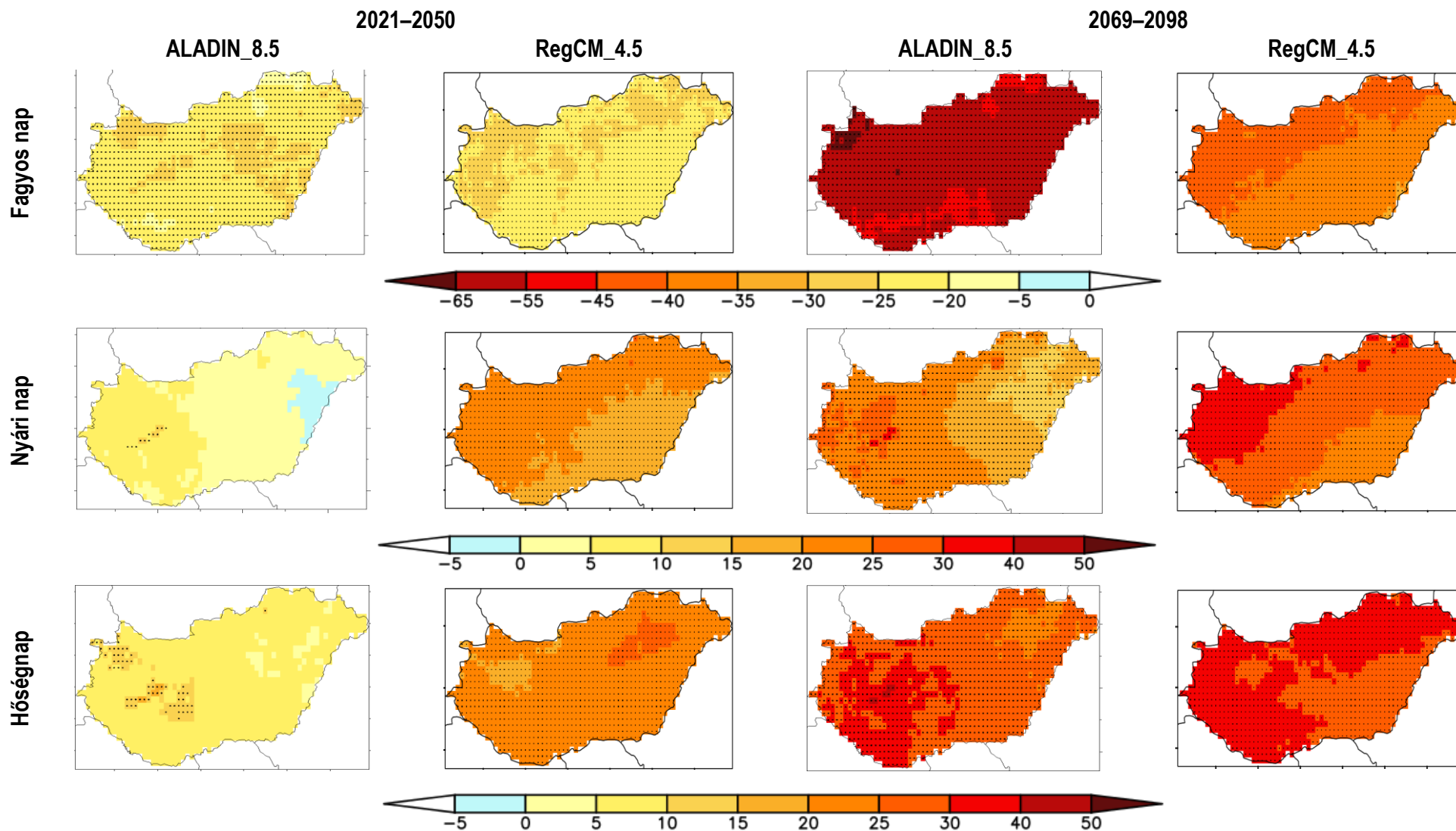
12. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi évszakos és éves átlaghőmérséklet-változás értékei (°C) alapján számolt Whisker-box diagramok. Referencia-időszak: 1971–2000.



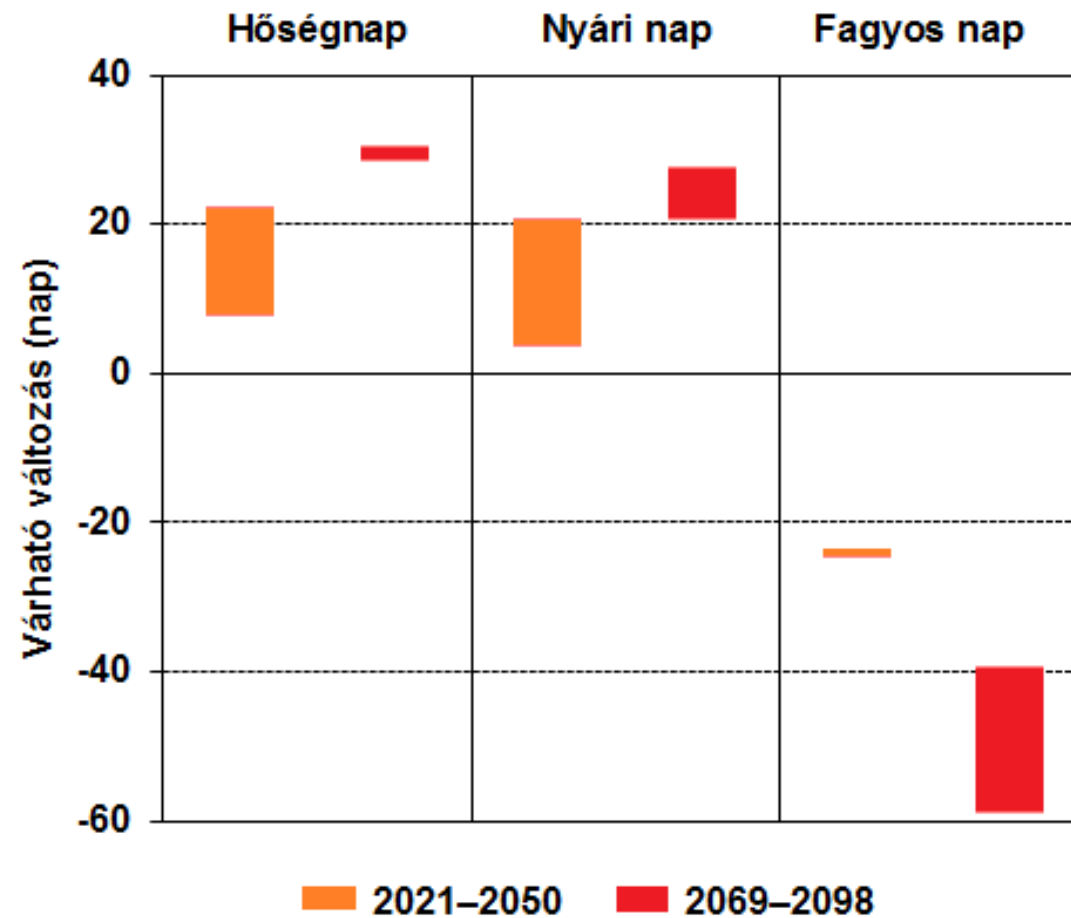
13. ábra: A mérések 1971–2000-re, valamint az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi havi átlaghőmérséklet-értékei (°C) alapján számolt Whisker-box diagramok.



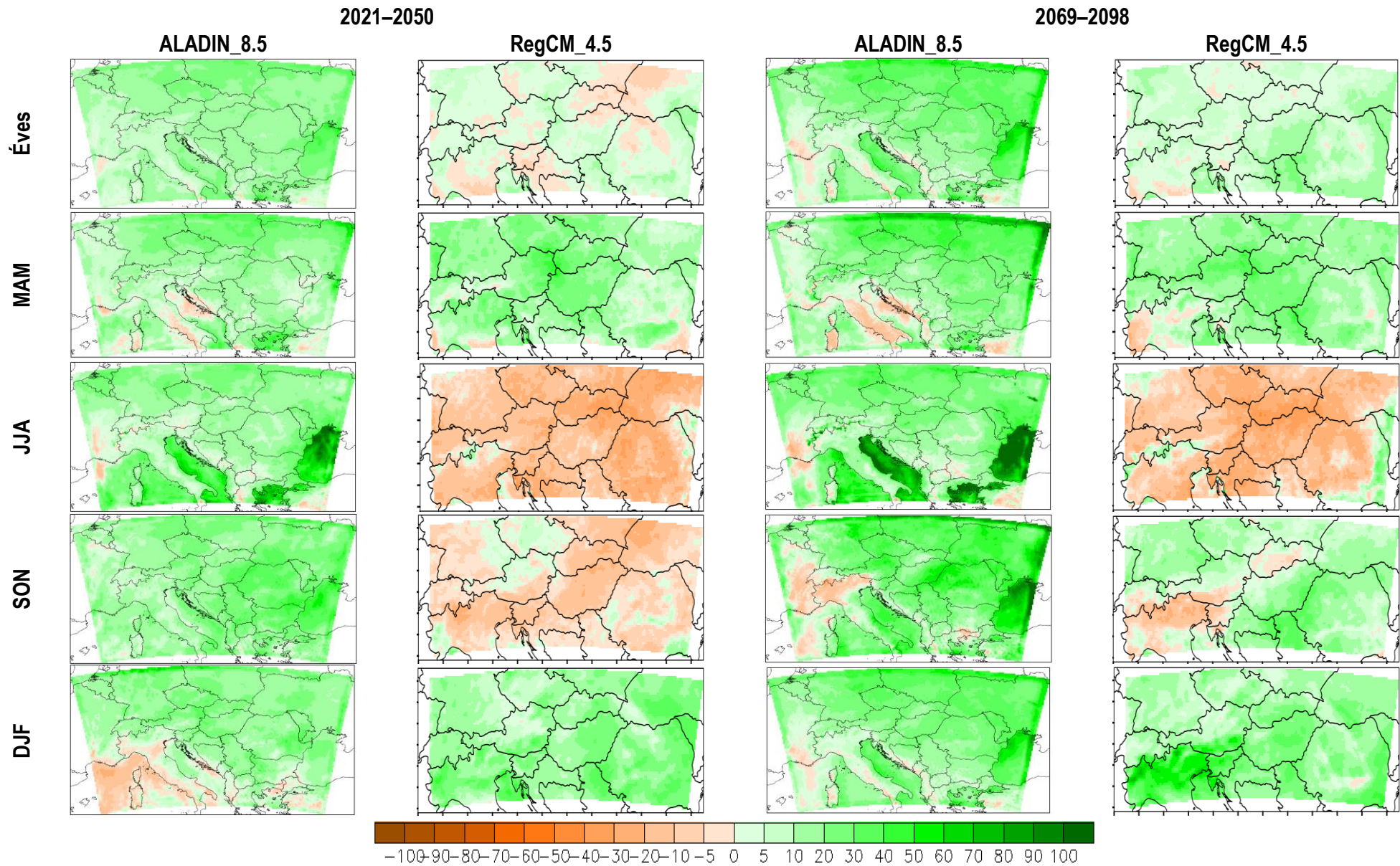
14. ábra: A januári és júliusi napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.



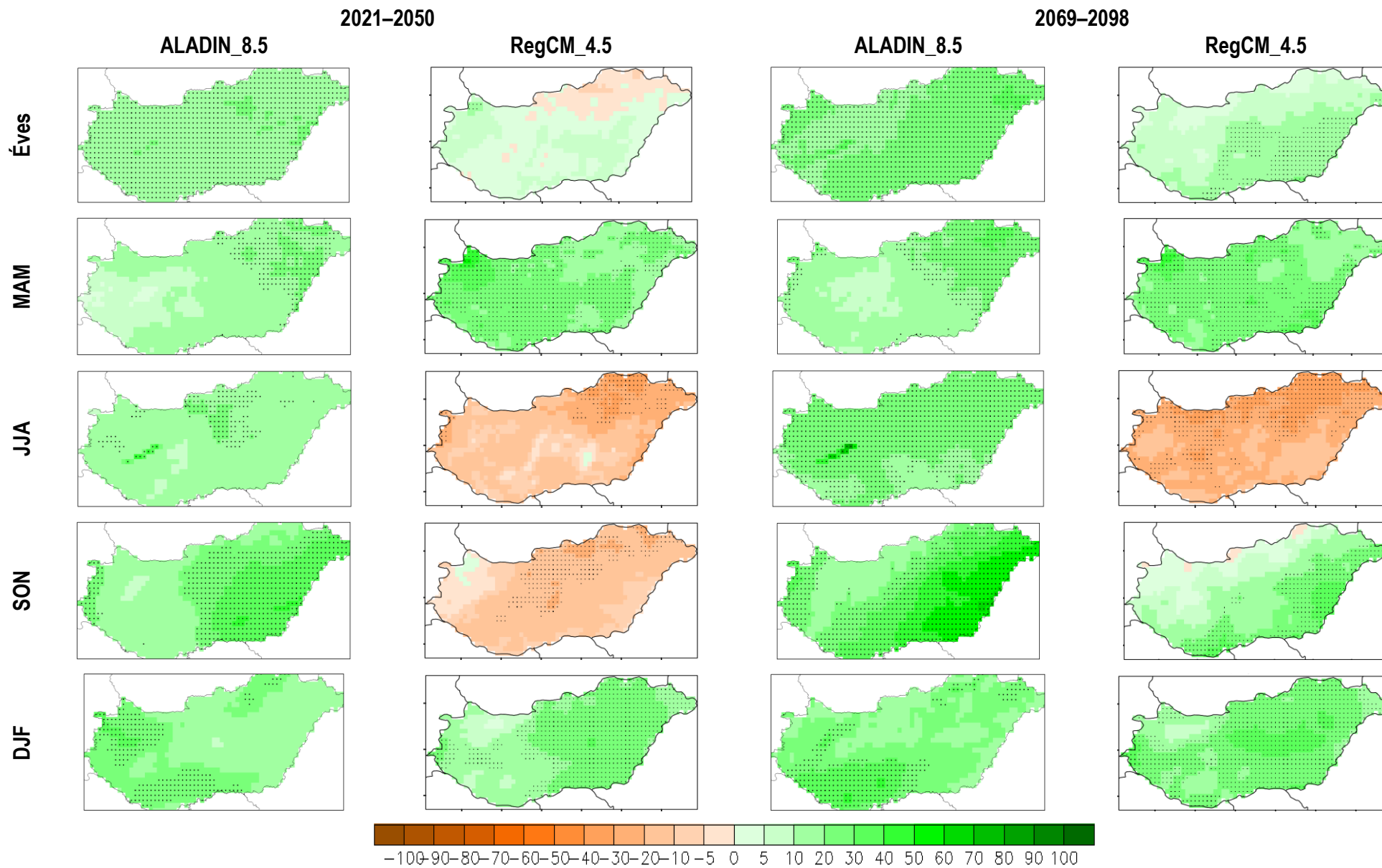
15. ábra: A fagyos napok ($T_{\min} < 0\text{ °C}$), a nyári napok ($T_{\max} > 25\text{ °C}$) és a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) éves gyakoriságának változása (nap) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.



16. ábra: A fagyos napok ($T_{\min} < 0 \text{ }^\circ\text{C}$), a nyári napok ($T_{\max} > 25 \text{ }^\circ\text{C}$) és a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) éves gyakoriságának átlagos magyarországi változása (nap) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



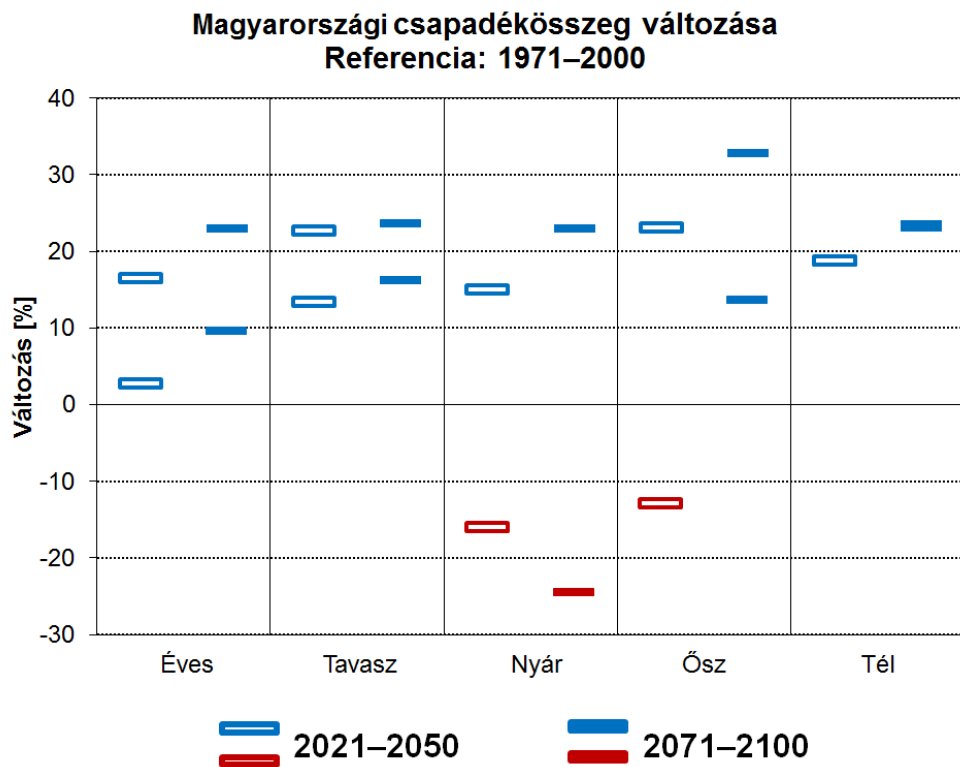
17. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referenciaidőszakhoz viszonyítva.



18. ábra: Az éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (%) Magyarországon 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.

6. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (mm/hónap és %) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

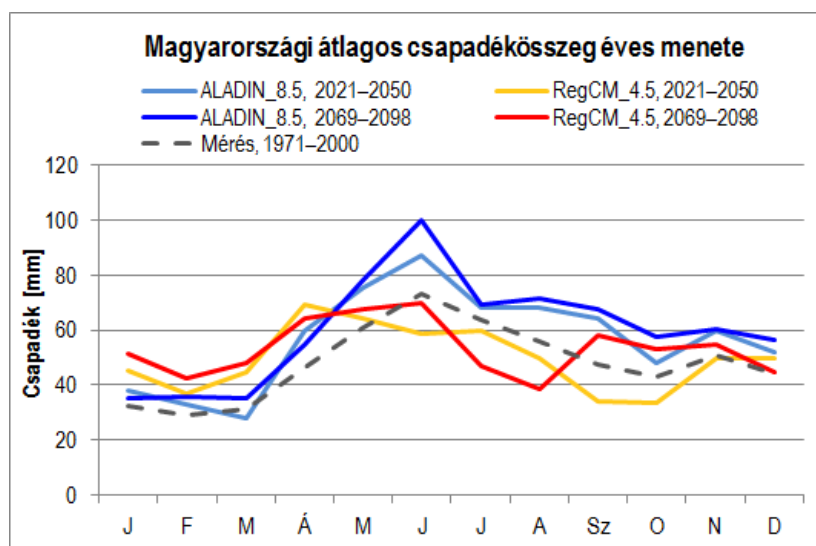
Csapadékösszeg átlagos változása [mm/hónap]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
2021–2050	ALADIN_8.5	9	8	10	10	6
	RegCM_4.5	1,5	13	-8	-8	9
2069–2098	ALADIN_8.5	12	10	16	15	7
	RegCM_4.5	5	14	-12	8	11
Csapadékösszeg átlagos változása [%]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
2021–2050	ALADIN_8.5	17	13	15	23	19
	RegCM_4.5	2,7	23	-16	-13	19
2069–2098	ALADIN_8.5	23	16	23	33	24
	RegCM_4.5	10	24	-24	14	24



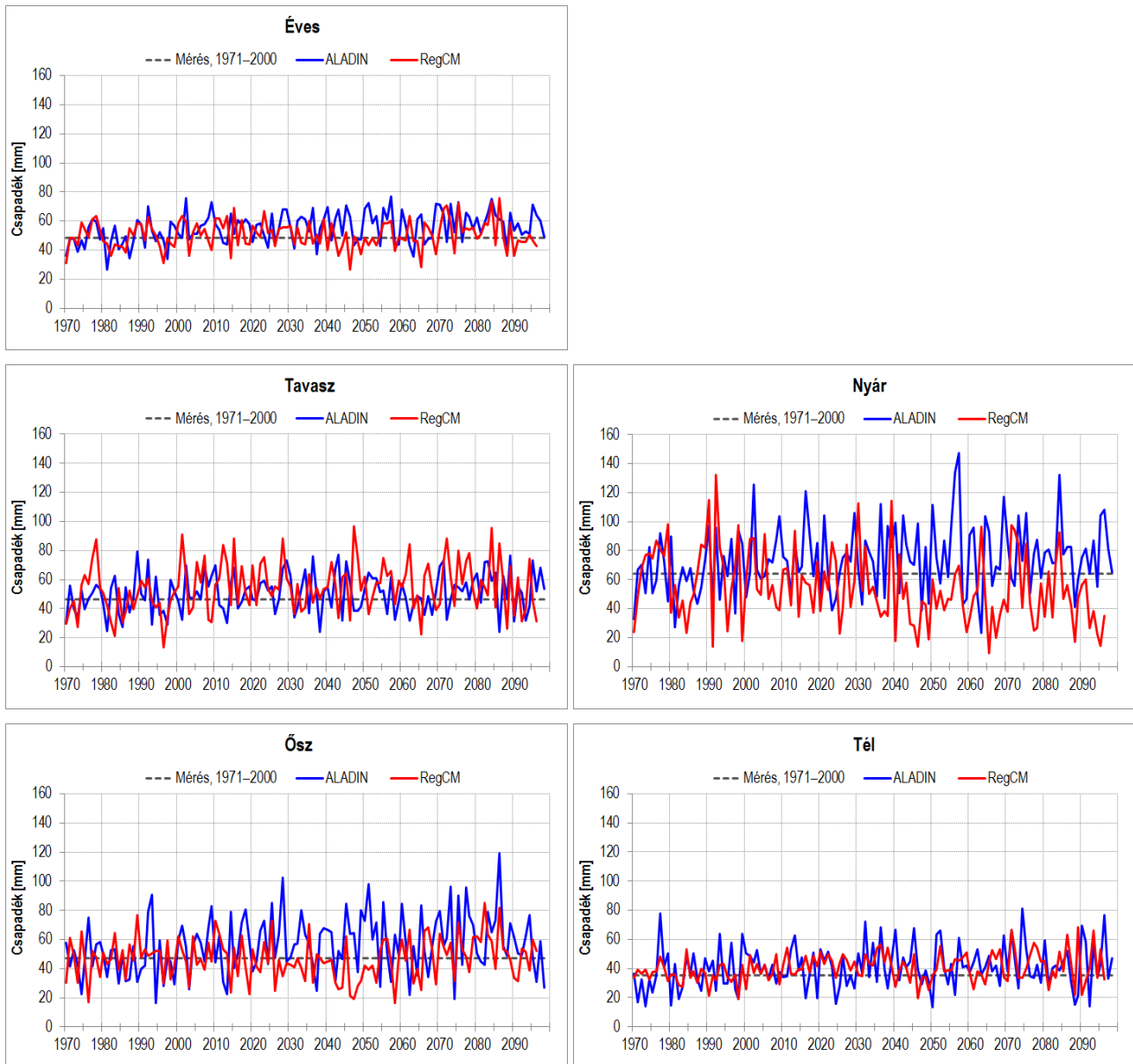
19. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg átlagos változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

7. táblázat: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlagos csapadékösszeg magyarországi időbeli és térbeli szórásértékei (mm/hónap) az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban.

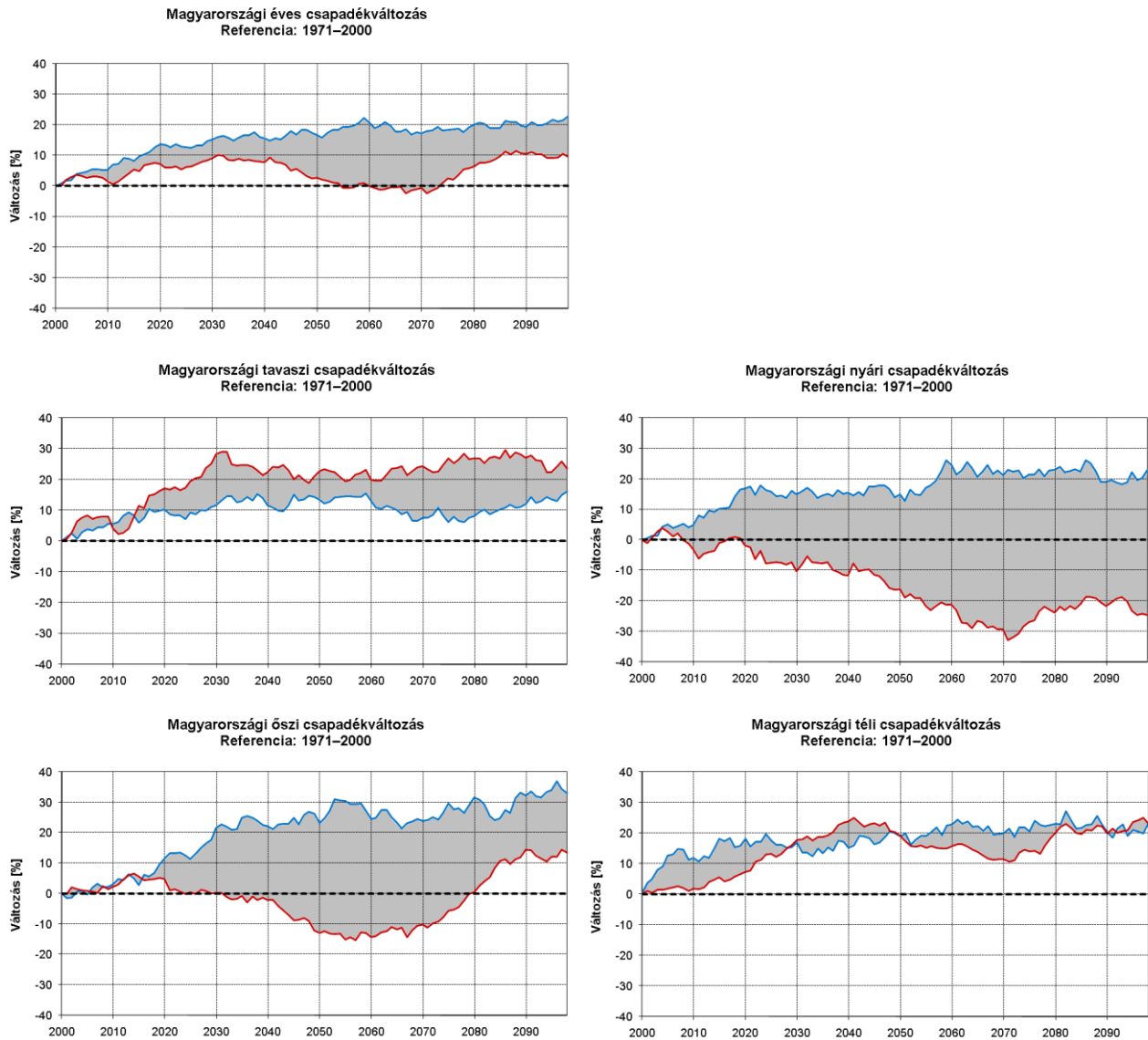
Csapadék időbeli szórása [mm/hónap]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
1971–2000	ALADIN_8.5	11	20	23	17	14
	RegCM_4.5	11	22	25	20	11
2021–2050	ALADIN_8.5	11	21	25	18	14
	RegCM_4.5	15	29	36	28	17
2069–2098	ALADIN_8.5	11	21	24	22	16
	RegCM_4.5	18	35	32	30	22
Csapadék térbeli szórása [mm/hónap]						
Időszak	Kísérlet	Éves	MAM	JJA	SON	DJF
1971–2000	ALADIN_8.5	5	9	9	10	7
	RegCM_4.5	9	12	14	15	10
2021–2050	ALADIN_8.5	6	10	11	10	7
	RegCM_4.5	8	17	18	17	12
2069–2098	ALADIN_8.5	6	10	11	11	8
	RegCM_4.5	9	17	17	19	13



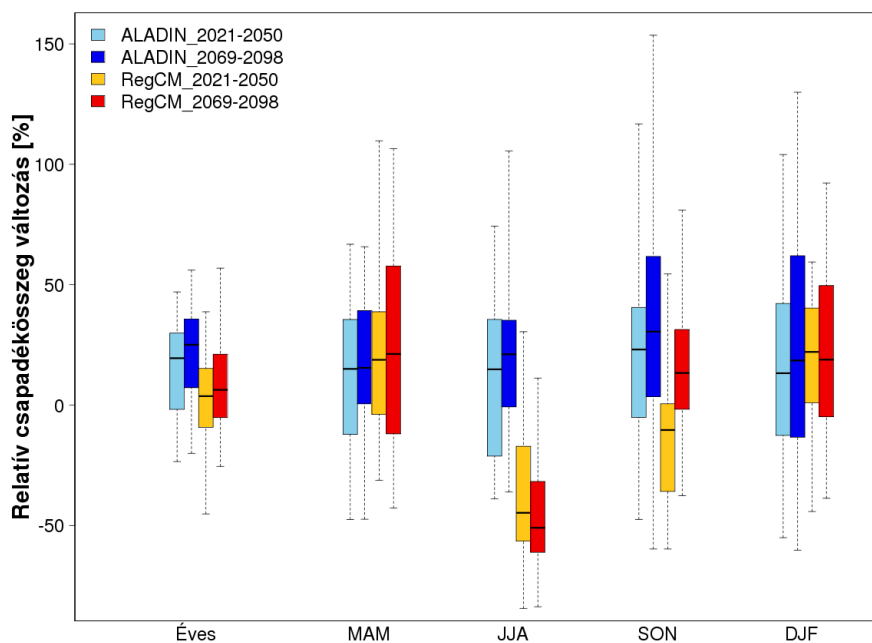
20. ábra: A csapadékösszeg magyarországi havi átlagértékei (mm/hónap) 1971–2000-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.



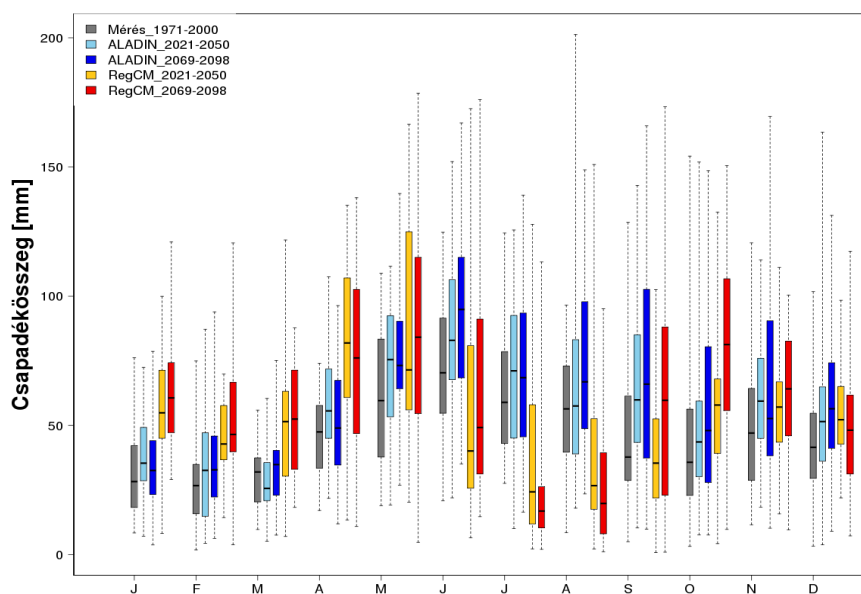
21. ábra: A magyarországi éves és évszakos csapadékösszeg évenkénti értékei (mm/hónap) az 1971–2100 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján, valamint az 1971–2000 időszakra vonatkozó átlag a mérések alapján.



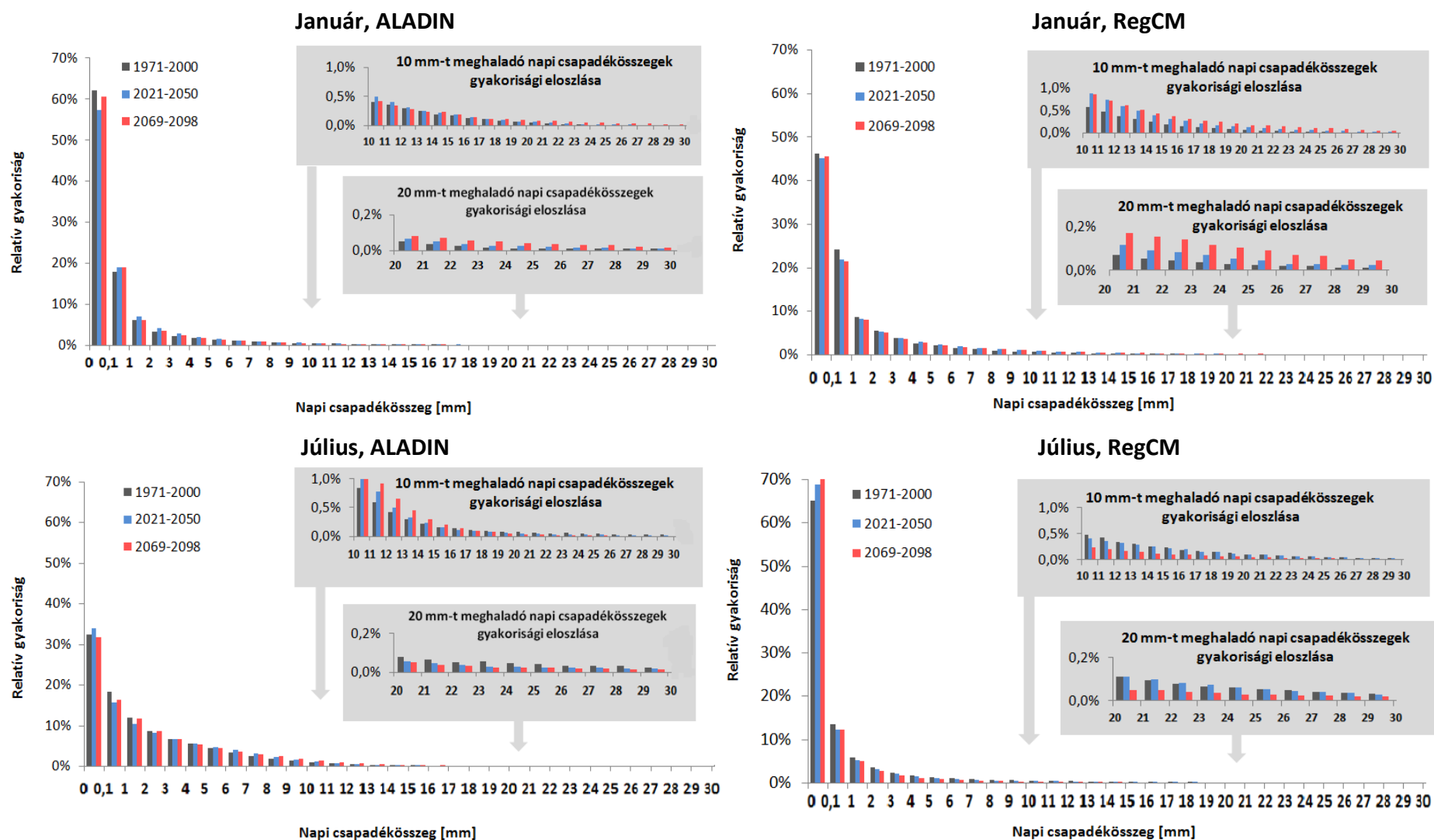
22. ábra: A magyarországi éves és évszakos átlagos csapadékösszeg 1971–2000-hez viszonyított változásának (%) 30-éves mozgóátlaga az ALADIN és a RegCM modell-szimulációk eredményei alapján.



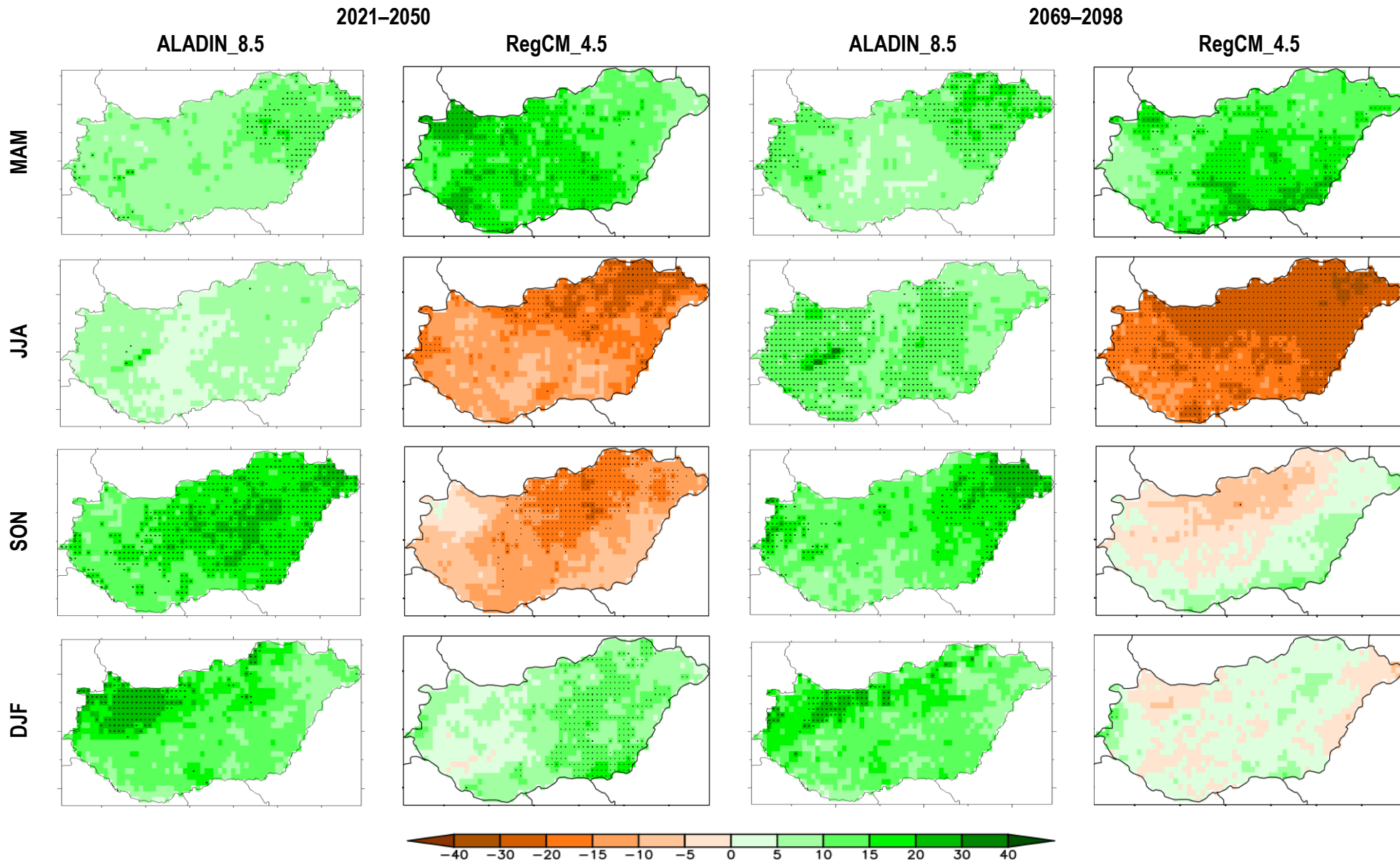
23. ábra: Az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi évszakos és éves csapadékváltozás értékei (%) alapján számolt Whisker-box diagramok. Referencia-időszak: 1971–2000.



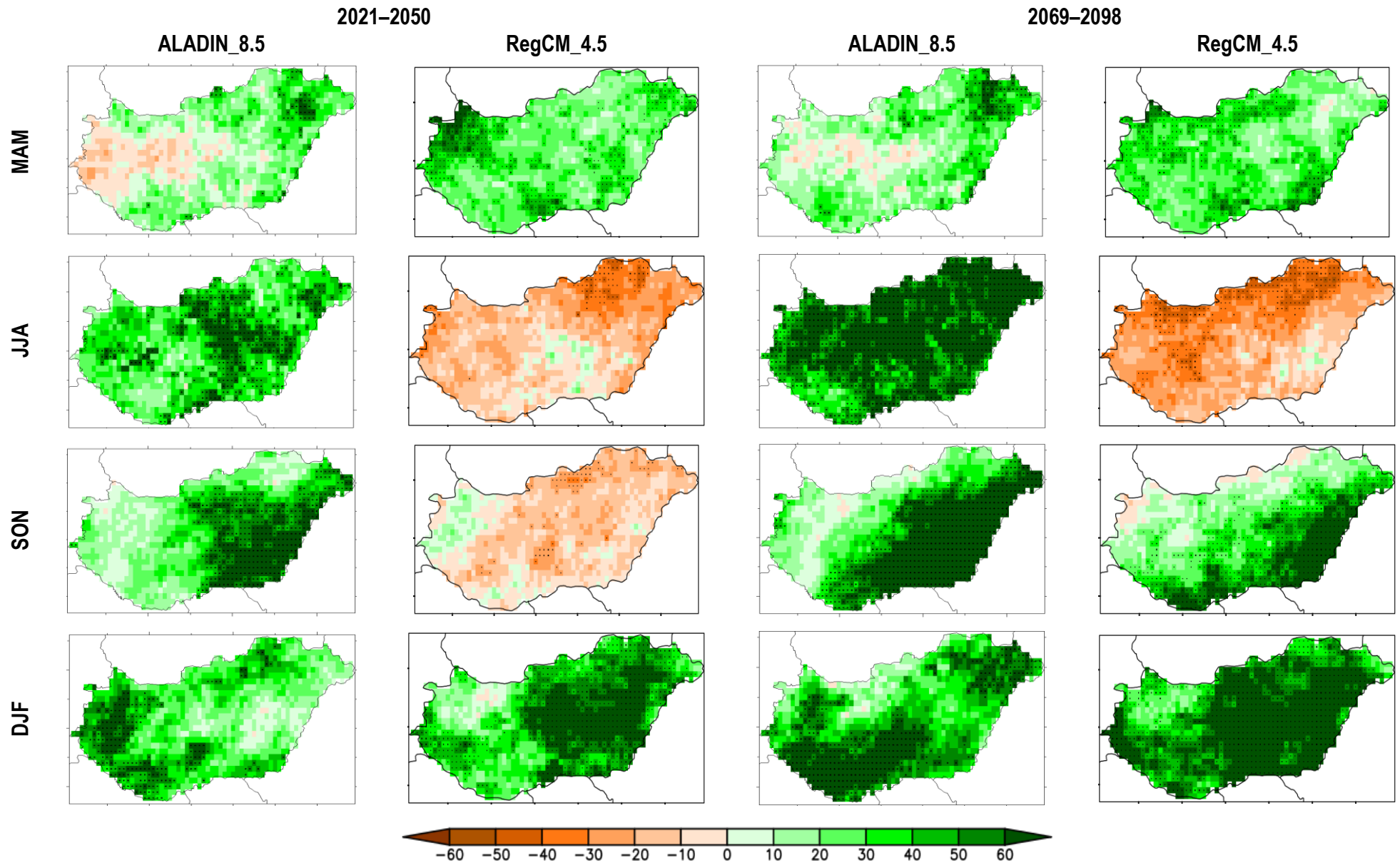
24. ábra: A mérések 1971–2000-re, valamint az ALADIN és a RegCM modellszimulációk 2021–2050-re és 2069–2098-ra vonatkozó évenkénti magyarországi havi csapadékösszeg-értékei (mm/hónap) alapján számolt Whisker-box diagramok.



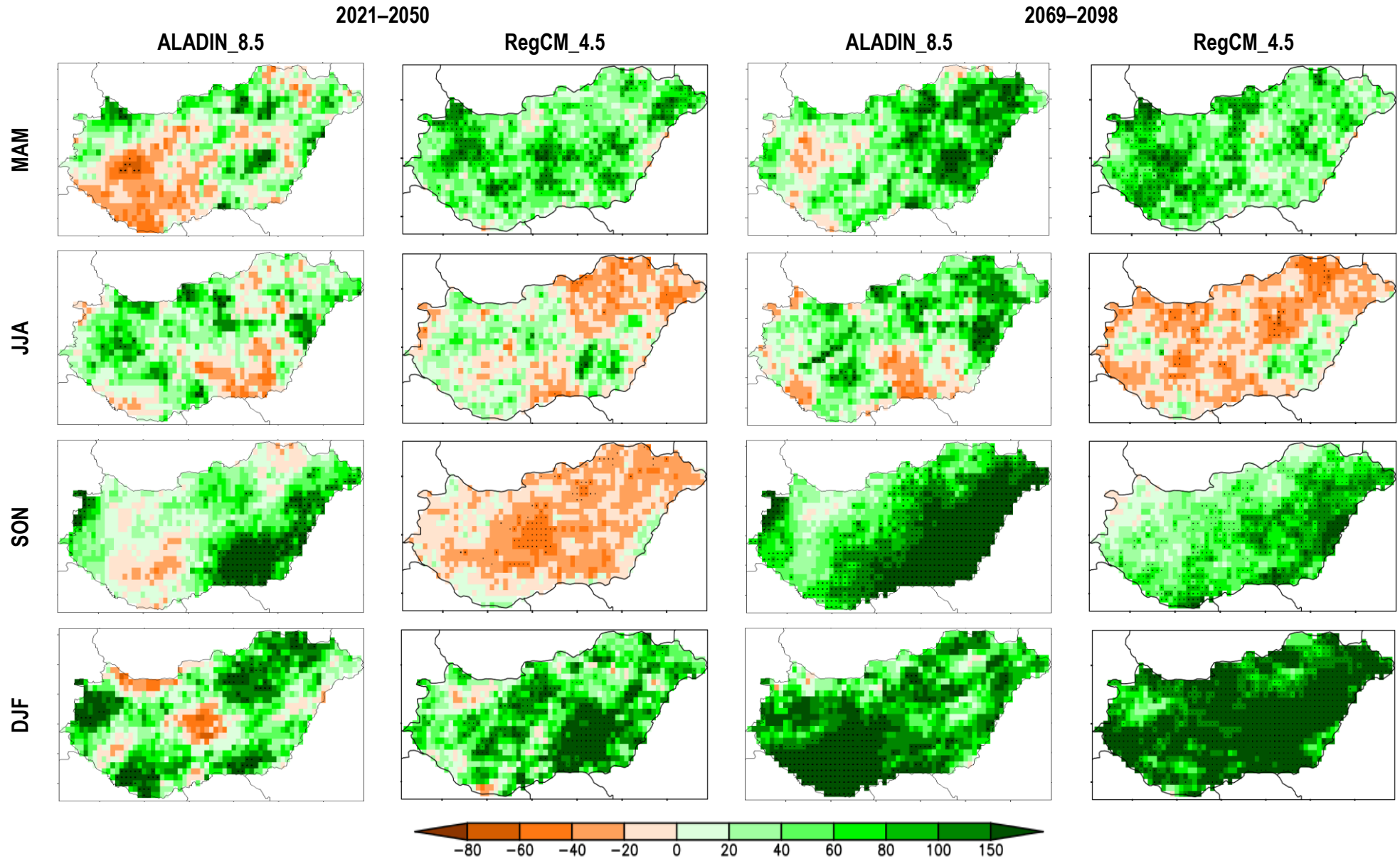
25. ábra: A januári és júliusi napi csapadékösszeg értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1971–2000, a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakban az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján.



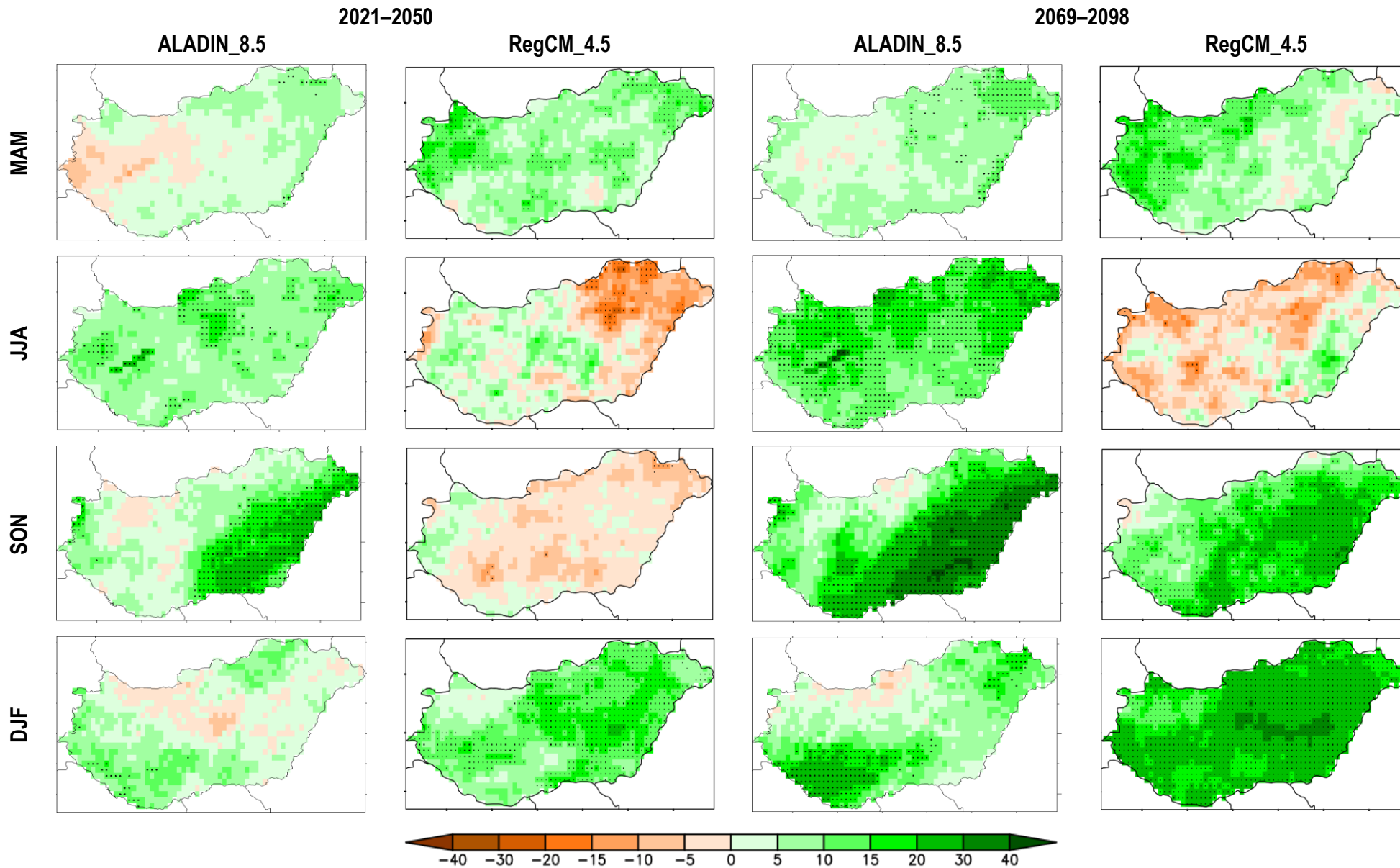
26. ábra: A csapadékos ($R \geq 1$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.



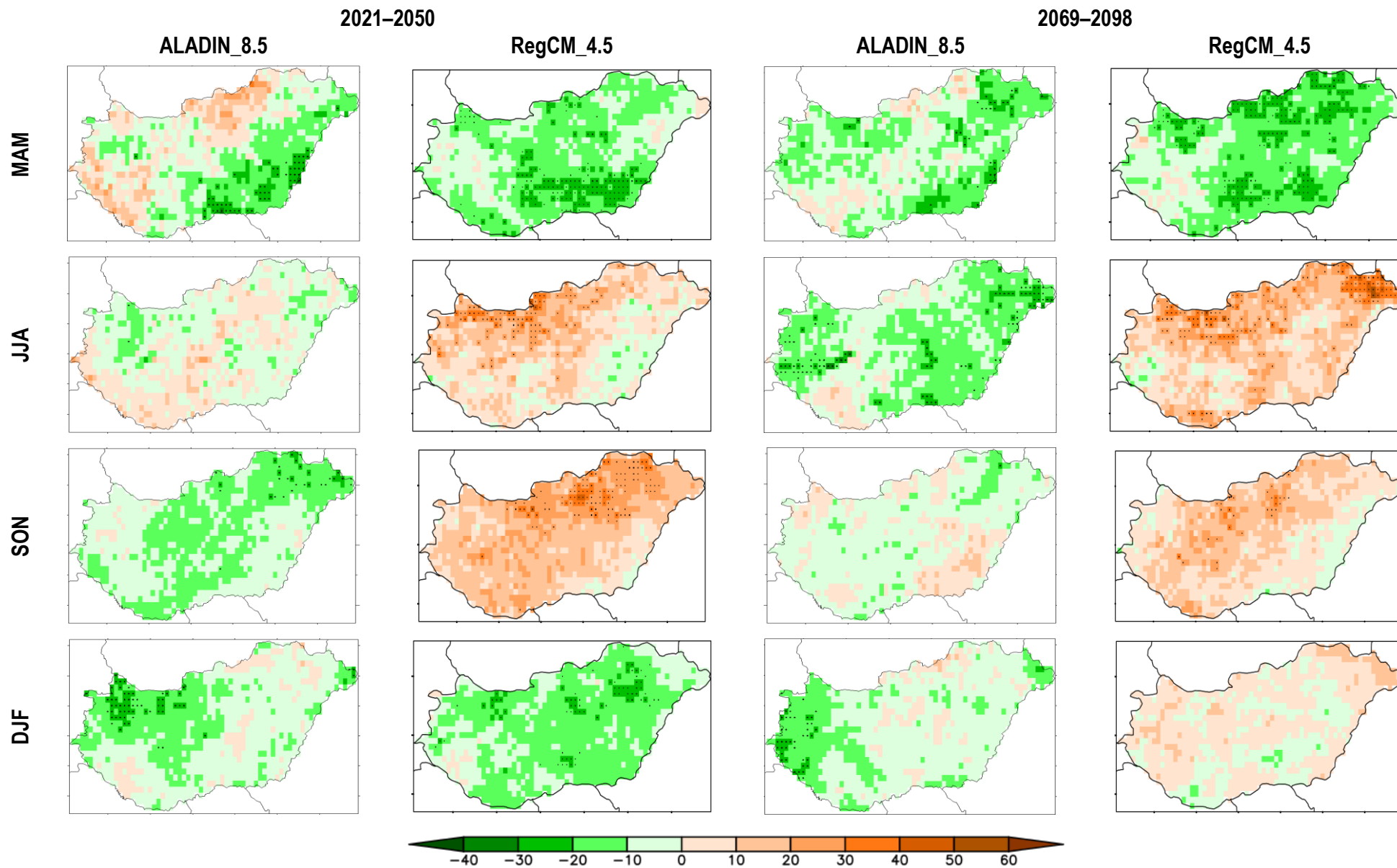
27. ábra: A nagy csapadékú ($R \geq 10$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.



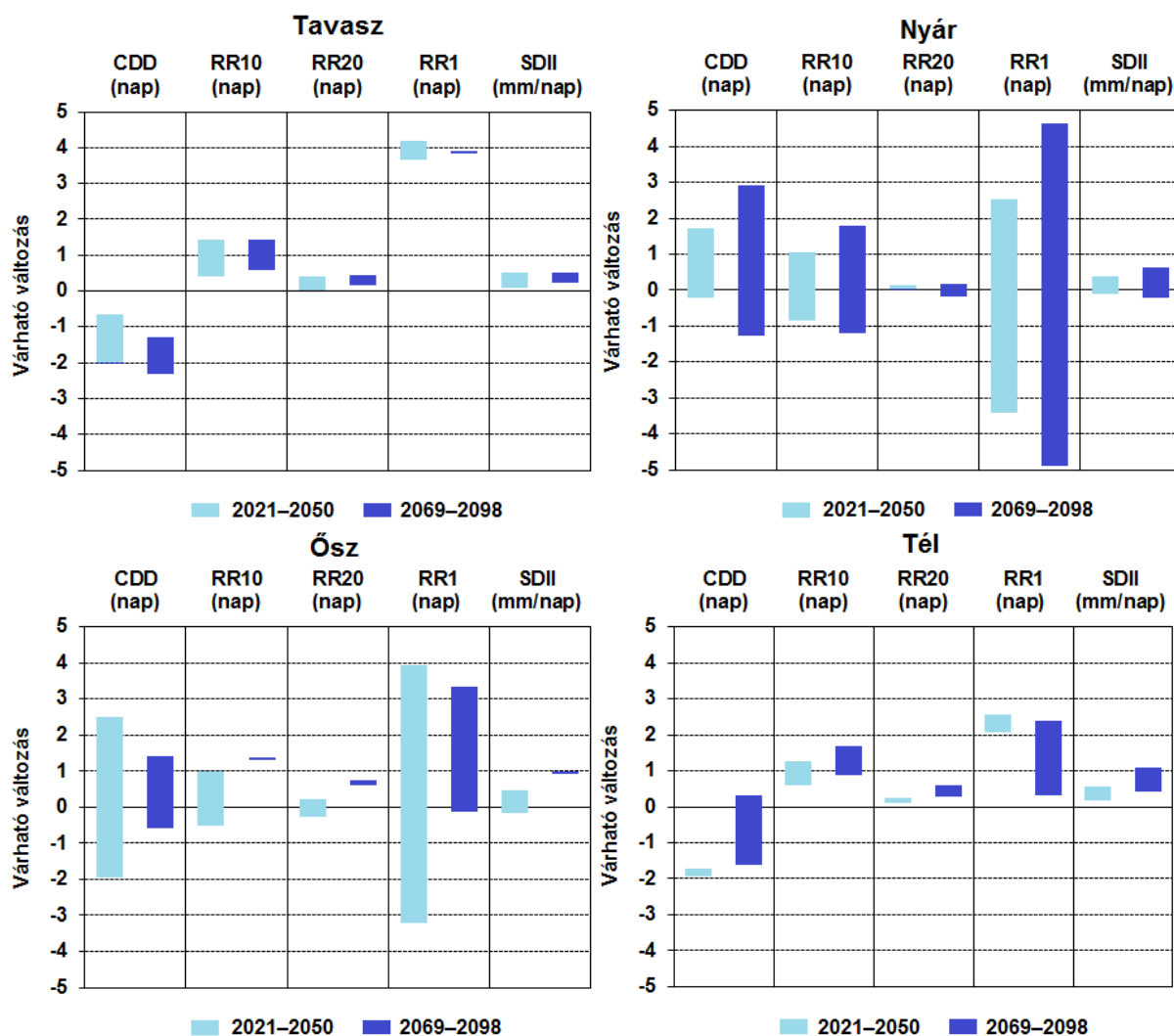
28. ábra: Az extrém nagy csapadékú ($R \geq 20$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.



29. ábra: Az átlagos évszakos csapadékkéntesség változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.



30. ábra: Az egymást követő száraz ($R < 1$ mm) napok maximális évszakos számának változása (%) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. A szignifikáns változást pontozás jelöli.



31. ábra: Az egymást követő száraz napok maximális évszakos számának (CDD), a nagy (RR10), az extrém nagy (RR20) csapadékú és a csapadékos (RR1) napok évszakos gyakoriságának és az átlagos évszakos csapadékkéntességének (SDII) magyarországi változása (nap illetve SDII esetén mm/nap) 2021–2050-re és 2069–2098-ra az ALADIN és a RegCM modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

Összefoglalás

A jelen beszámolóban az ALADIN-Climate és a RegCM regionális klímamoddellel végrehajtott egy-egy éghajlatváltozási (projekciós) kísérlet vizsgálatát mutattuk be. Mindkét modellt 10 km-es rácsfelbontáson futtattuk az ARPEGE-Climate/OPA illetve a HadGEM globális klímamodellek eredményeiből származó határfeltételekkel. A kísérletek eredményei alapján a hőmérséklet és a csapadékösszeg éves, évszakos, havi átlagait, illetve napi minimum-, maximum- és átlagértékeit, valamint összegeit vizsgáltuk a 2021–2050 és a 2069–2098 időszakokra, referencia-ként az 1971–2000 időszakot tekintve. Bemutattuk a változásokat ábrázoló térképeket, a magyarországi éven belüli eloszlást és a 130 éven belüli menetet jellemző grafikonokat, valamint kiszámítottuk az országos átlagos változásokat.

Megállapítottuk, hogy mindkét modell az átlaghőmérséklet szignifikáns és folyamatos növekedését mutatja, az évszázad közepére mintegy 2 fokkal, az évszázad végére 3-4 fokkal. Az éves hőingás az egyik modell szerint csökkenni fog, a másik modell növekedést jelez. A modelleredmények a fagyos napok ritkább előfordulását és a magas hőmérsékleti értékek gya-

koribbá válását vetítik előre. A fagyos napok száma az évszázad végén akár 60 nappal is csökkenhet, ez azonban nem jelenti a teljes eltűnésüket. Az az előzetes várakozás, hogy a magasabb kibocsátással számoló forgatókönyvekhez nagyobb melegedés társul, nem minden esetben igazolják az eredmények: míg az átlaghőmérséklet esetében ez valóban így van, addig a nyári vagy a hőségnapok növekedése nagyobb lehet az optimistább forgatókönyvvel készült modellkísérlet eredményeiben. Ez rámutat arra, hogy a várható hőmérsékleti változások meghatározásánál nem elegendő egyedül az átlaghőmérsékletre koncentrálni, az összkép kialakításához a teljes eloszlásfüggvényt meg kell vizsgálni.

A csapadék esetében az új modellkísérletek lényeges eltéréseket mutatnak a korábbi eredményekhez képest. Korábban a nyári csökkenés egyértelmű volt, az új eredményekben viszont döntően a csapadékmennyiség növekedése dominál, s a nyári változások rendkívül bizonytalanok. Ez nemcsak az átlagos csapadékösszegre igaz, de a különböző indexeket megvizsgálva is a csapadékosabb éghajlat irányába mutatnak az eredmények, s amíg korábbi szimulációk alapján a száraz időszakok növekvő hosszúsága valószínű volt, jelenleg ezzel kapcsolatban nem tudunk egyértelmű kijelentést tenni. A korábbi eredmények alapján megállapított csapadéktendenciáktól való eltéréseket elsősorban az alkalmazott új regionális modellváltozatok valamint a globális modellek által nyújtott határfeltételek okozhatják. Ennek feltérképezésére tervezzük a meghajtó határfeltételek, valamint további ALADIN és RegCM modellszimulációk eredményeinek vizsgálatát.

Ez a két kísérletből álló ensemble rendszer egyszerre jeleníti meg az emberi tevékenység leírásából származó bizonytalanságokat, melyek elsősorban a jövőbeli hőmérsékletváltozás mértéke szempontjából lényegesek, valamint a csapadékprojekciók szempontjából fontos modell-bizonytalanságokat. Ugyanakkor egy csupán két modellkísérletre és két modellre alapozott projekcióval szemben nem lehetnek túlzott elvárásaink. Egy kéttagú ensemble nem elegendő a bizonytalanságok teljes spektrumának feltérképezésére, ugyanis miközben a lehető legfinomabb felbontású magyarországi regionális klímamodelleket alkalmazzuk, nem tudjuk, hogy a regionális modellek a kapcsolódó határfeltételekként használt globális modellel együtt a bizonytalanságok mely részét mutatják be; továbbá nem tudjuk elkülöníteni az emberi tevékenység illetve a fizikai folyamatok leírásának nehézségeiből eredő bizonytalanságokat. Az optimális szimuláció-együttes legalább 8-10 körültekintően kiválasztott tagot tartalmaz, amelyek kiegyensúlyozottan megjelenítik a jövőbeli emberi tevékenységre vonatkozó kibocsátási forgatókönyvek megválasztásából eredő, a regionális modellek számára határfeltételt szolgáltató globális klímamodellekből származó, valamint magukból a regionális klímamodellek eltéréseiből adódó bizonytalanságokat. Ezért tervezzük a NATÉR-nak alapot szolgáltató ensemble rendszer fentiek alapján való kiterjesztését. A hatásvizsgálatokhoz a tagok kiválasztása előtt mindenképpen javasolt konzultálni a modellező szakemberekkel egy szakmailag elfogadható és hatékony ensemble rendszer kialakítása érdekében.

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, a 16. ábra és a 31. ábra első változatának elkészítéséért.

Irodalom

- Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., André K., Bogárdi I., 2015: Érzékenységvizsgálatok a RegCM klímamodellel a Kárpát-medence térségére. RCMTÉR (EEA-C13-10) projekt beszámoló, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 16 p.
http://www.met.hu/RCMTeR/doc/reports/C13-10_RegCM_erzenyseg.pdf
- Csorvási A., Illy T., Sábitz J., Szabó P., Szépszó G., Zsebeházi G., 2016: Múltbeli időszakra vonatkozó modelleredmények validációja. RCMTÉR (EEA-C13-10) projekt beszámoló, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 41 p.
- Bougeault, P., 1985: A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.* 113, 2108–2121.
- 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. R. Meteorol. Soc.* 103, 225–245.
- Davis, N., Bowden, J., Semazzi, F., Xie, L., Önel, B., 2009: Customization of RegCM3 regional climate model for eastern Africa and a tropical Indian Ocean domain. *J. Clim.* 22, 3595–3616.
- 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. *Clim. Chang.* 15, 383–422.
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zaakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM user manual version 4.3. ITCP, Trieste, Italy, 32 p.
- 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. *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.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Clim.* 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.
- Hawkins, E., Osborne, T.M., Ho, C.K., Challinor, A.J., 2013: Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agric. For. Meteorol.* 170, 19–31.
- Hawkins, E., Sutton, R., 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *B. Am. Meteorol. Soc.* 90, 1095–1107.
- Hawkins, E., Sutton, R., 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Clim. Dyn.* 37, 407–418.
- 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, Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 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.
- Kis A., 2013: Csapadékindexek XXI. századra becsült trendjei Közép-Kelet-Európában korrigált csapadékmezők felhasználásával. XXXI. OTDK dolgozat, Budapest, 35 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., 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. *Am. Stat.* 32, 12–16.
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, Daniel, K.J.S., Kainuma, J-F., Lamarque, M.L.T., Matsu-moto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., van Vuuren, D.P.P., 2011: The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Chang.* 109, 213–241.
- Mesinger, F., Arakawa, A., 1976: Numerical methods used in atmospheric models. GARP Publications Series 17 (1).
- 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.

- Morcrette, J.-J., 1989: Description of the radiation scheme in the ECMWF model. ECMWF Technical Memorandum 165, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, Egyesült Királyság.
- 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.
- 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. Wea. Rev.* 117, 536–549.
- Phillips, N.A., 1957: A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *J. Meteor.* 14, 184–185.
- Pieczka I., 2012: A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scenáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 95 p.
- 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., 2015: 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.
- 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, 163 p.
- 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
- Szopa, S., et al., 2013: Aerosol and ozone changes as forcing for climate evolution between 1850 and 2100. *Clim. Dyn.* 40, 2223–2250.
- 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>.