



# A REMO2015 és az ALADIN5.2 regionális klímamodellek projekciós eredményeinek közös kiértékelése

Megyeri-Korotaj Otília, Bán Beatrix, Suga Réka

Országos Meteorológiai Szolgálat



Budapest, 2022. március

**SZÉCHENYI** 2020



MAGYARORSZÁG  
KORMÁNYA

**Európai Unió**  
Kohéziós Alap



**BEFEKTETÉS A JÖVŐBE**

## Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék.....	3
Táblázatjegyzék.....	6
1. Motiváció .....	7
2. Bevezetés .....	7
3. Módszertan .....	12
3.1 ALADIN-Climate .....	12
3.2 REMO .....	13
3.3 Modellkísérletek.....	14
3.4 Kiértékelési eszközök.....	16
4. Eredmények .....	18
4.1 Hőmérséklet.....	18
4.2 Csapadék.....	33
5. Összefoglalás.....	51
Irodalomjegyzék .....	52

## Ábrajegyzék

<b>1. ábra.</b> Az iparosodás (kb. 1765) előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer alakulása 2000 és 2300 között különböző RCP (teli görbék; sötétkék: RCP2.6, világoskék: RCP4.5, narancs: RCP6.0, piros: RCP8.5) és SRES (szaggatott görbék; kék: B1, zöld: A1B és piros: A2) forgatókönyvek alapján (IPCC AR5 WGI, 2013).....	9
<b>2. ábra.</b> A magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) az A1B forgatókönyvekkel készített ALADIN4.5 és REMO5.0 modellszimulációk mérésekkel korrigált eredményei alapján a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra és a mérések (CARPATCLIM-HU) alapján 1971–2000-re.....	10
<b>3. ábra.</b> A magyarországi átlagos havi csapadékösszeg (mm/hónap) az A1B forgatókönyvekkel készített ALADIN4.5 és REMO5.0 modellszimulációk mérésekkel korrigált eredményei alapján a 2021–2050 (bal oldali ábra) és 2071–2100 (jobb oldali ábra) időszakokra és a mérések (CARPATCLIM-HU) alapján 1971–2000-re. ....	11
<b>4. ábra.</b> A 10 km-es felbontású ALADIN5.2 (bal) és REMO2015 (jobb) modellszimulációk integrálási tartománya és domborzata.....	15
<b>5. ábra.</b> Magyarországi éves és évszakos átlagos hőmérsékletváltozás (°C) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	19
<b>6. ábra.</b> A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változásának (°C) 30 éves mozgóátlaga a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	20
<b>7. ábra.</b> Éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	22
<b>8. ábra.</b> Éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	23
<b>9. ábra.</b> Magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakon a négy modellszimuláció mérésekkel korrigált eredményei alapján és 1971–2000-ra mérések (CARPATCLIM-HU) alapján.....	24
<b>10. ábra.</b> Az évenkénti magyarországi havi átlaghőmérséklet értékei (°C) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korrigált eredményei alapján 2021 és 2050 között.....	24
<b>11. ábra.</b> Az évenkénti magyarországi havi átlaghőmérséklet értékei (°C) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korrigált eredményei alapján 2071 és 2100 között.....	25
<b>12. ábra.</b> Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet-változás értékei (°C) 2021 és 2050 között. Referencia-időszak: 1971–2000.....	26
<b>13. ábra.</b> Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet-változás értékei (°C) 2071 és 2100 között. Referencia-időszak: 1971–2000.....	26
<b>14. ábra.</b> A januári napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) Magyarországon az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.....	27
<b>15. ábra.</b> A júliusi napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) Magyarországon az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.....	28
<b>16. ábra.</b> A nyári napok (Tmax > 25 °C) éves számának változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.....	29

<b>17. ábra.</b> A hőségnapok ( $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) éves számának változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. ....	30
<b>18. ábra.</b> A fagyos napok ( $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ ) éves számának változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. ....	31
<b>19. ábra.</b> A fagyos napok ( $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ ) éves számának relatív változása (%) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.....	32
<b>20. ábra.</b> A fagyos napok ( $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ ), a zord napok ( $T_{min} < -10^{\circ}\text{C}$ ), a nyári napok ( $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ ) és a hőségnapok ( $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) éves számának átlagos magyarországi változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.....	33
<b>21. ábra.</b> A magyarországi éves és évszakos csapadékváltozás (%) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000. ....	34
<b>22. ábra.</b> A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változásának (%) 30 éves mozgóátlagja a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	35
<b>23. ábra.</b> Éves és évszakos átlagos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	36
<b>24. ábra.</b> Éves és évszakos átlagos csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.....	37
<b>25. ábra.</b> Magyarországi átlagos havi csapadékösszeg (mm/hónap) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra a négy modellszimuláció mérésekkel korrigált eredményei alapján és 1971–2000-ra mérések (CARPATCLIM-HU) alapján.....	38
<b>26. ábra.</b> Az évenkénti magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korrigált eredményei alapján 2021 és 2050 között.....	39
<b>27. ábra.</b> Az évenkénti magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korrigált eredményei alapján 2071 és 2100 között.....	39
<b>28. ábra.</b> Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlagos csapadékváltozás értékei (%) 2021 és 2050 között. Referencia-időszak: 1971–2000. ....	40
<b>29. ábra.</b> Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlagos csapadékváltozás értékei (%) 2071 és 2100 között. Referencia-időszak: 1971–2000. ....	40
<b>30. ábra.</b> A januári napi csapadékösszeg értékeinek logaritmikus relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácpontokban az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.....	42
<b>31. ábra.</b> A júliusi napi csapadékösszeg értékeinek logaritmikus relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácpontokban az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.....	43
<b>32. ábra.</b> A csapadékos ( $R \geq 1\text{ mm}$ ) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. ....	44

<b>33. ábra.</b> A csapadékos ( $R \geq 1$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. ....	45
<b>34. ábra.</b> A nagy csapadékú ( $R \geq 10$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. ....	46
<b>35. ábra.</b> A nagy csapadékú ( $R \geq 10$ mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva. ....	47
<b>36. ábra.</b> Az egymást követő száraz ( $R < 1$ mm) napok maximális évszakos számának változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.....	48
<b>37. ábra.</b> Az egymást követő száraz ( $R < 1$ mm) napok maximális évszakos számának változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.....	49
<b>38. ábra.</b> Az egymást követő száraz napok maximális évszakos számának ( $R < 1$ mm), a nagy ( $R \geq 10$ mm) csapadékú és a csapadékos ( $R \geq 1$ mm) napok évszakos gyakoriságának magyarországi változása (nap) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.....	50

## Táblázatjegyzék

<b>1. táblázat.</b> Hőmérsékleti indexek éves értékei Magyarországra az A1B forgatókönyvekkel készített ALADIN4.5 és REMO5.0 modellek kísérletei alapján. Referencia: 1971–2000. ....	10
<b>2. táblázat.</b> Az ALADIN4.5 és REMO5.0 modellek A1B scenáriójával végzett kísérleteiből számolt csapadék indexek éves értékei. Referencia: 1971–2000. ....	11
<b>3. táblázat.</b> Az ALADIN5.2 és a REMO2015 regionális klímamodellek legfontosabb jellemzői. ....	14
<b>4. táblázat.</b> A modellkísérletek jellemzői. ....	15
<b>5. táblázat.</b> A vizsgált hőmérsékleti és csapadékindexek. ....	18
<b>6. táblázat.</b> A REMO2015 és ALADIN5.2 modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet térbeli szórása [°C]. ....	21
<b>7. táblázat.</b> A REMO2015 és ALADIN5.2 modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlagos csapadékösszeg időbeli és térbeli szórása (mm/hónap). ....	41

## 1. Motiváció

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

A modelleket kezdetben egy Kárpát-medencét lefedő tartományon 10-25 km-es horizontális felbontáson használtuk. A kísérletekben az emberi tevékenység leírása az IPCC 3. és 4. jelentésében alkalmazott SRES kibocsátási forgatókönyv-családon alapult. 2016-ban adaptáltuk az ALADIN-Climate modell egy frissebb verzióját, s a korábbi, csak Kárpát-medencét lefedő tartományát kiterjesztettük egy Közép- és Kelet-Európát magában foglaló tartományra, hogy olyan hatásvizsgálatok számára is kiindulási információval szolgálhasson, amelyek vizsgálati területe országhatárokon átnyúlik (pl. a hidrológia esetében a Duna vízgyűjtője fontos vizsgálati terület; Szépszó et al., 2015; Illy et al., 2015). A jövőre vonatkozó projekciós kísérlet során az emberi tevékenység leírására az IPCC 5. jelentésében alkalmazott RCP forgatókönyv-család magas üvegházgáz-koncentráció növekedést feltételező RCP8.5 tagját alkalmaztuk (Csorvási et al., 2016).

„Az éghajlatváltozás magyarországi hatásainak feltérképezése regionális klímamodell-szimulációk elvégzésével és reprezentatív adatbázis fejlesztésével” című KlimAdat (KEHOP-1.1.0) projektben a projekciók további, átfogó fejlesztését tűztük ki célul. A REMO modellnek egy új változatát adaptáltuk, felbontását 10 km-esre növeltük, és érzékenységi vizsgálatot hajtottunk végre a tartományának megválasztására (Suga and Megyeri-Korotaj, 2021). Validációs kísérletek elvégzésével hosszabb múltbeli időszakon vizsgáltuk, hogyan írja le az éghajlatot és az eredményeket összevetettük az ALADIN-Climate validációs eredményeivel (Bán et al., 2021b). Projekciókat készítettünk az ALADIN-Climate esetében a közepes kibocsátást feltételező RCP4.5 forgatókönyvvel (Bán et al., 2021a), a REMO esetében az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel.

Jelen beszámolóban a két modell projekciós kísérleteinek eredményeit mutatjuk be a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakokra. Az eredmények egy részletes meteorológiai adatokkal feltöltött térinformatikai adatbázis alapjául szolgálnak, melynek célja, hogy objektív háttérként segítse az alkalmazkodással kapcsolatos tervezést és döntéshozatalt.

## 2. Bevezetés

Az éghajlati rendszert a légkör, a felszíni és felszín alatti vizek, a szárazföld, a hó- és jégtakaró, valamint az élővilág kölcsönható együttese alkotja. Folyamataikat fizikai törvények kormányozzák, működésük tanulmányozására a numerikus modellezés eszköztára szolgált objektív módszert. Az összetevők fizikai folyamatainak és a közöttük levő kölcsönhatások és visszacsatolások leírására a kapcsolt globális modellek (GCM – General Circulation Model) képesek, melyek a teljes éghajlati rendszer válaszát leírják egy feltételezett jövőbeli kényszerre. A modellszimulációkban a természetes éghajlatalakító folyamatok mellett figyelembe veszik az emberi tevékenység hatását is. Ennek alakulását nem ismerjük egy

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

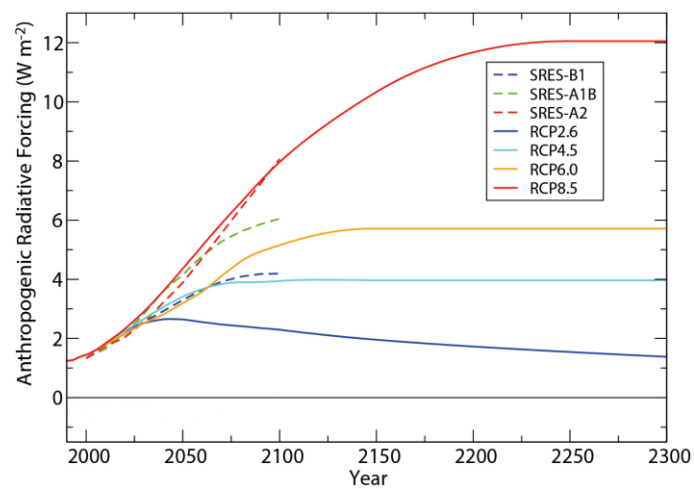
A regionális részletek feltárására a globális modellek eredményeit regionális éghajlati modellek (RCM – Regional Climate Model; Giorgi és Bates, 1989) alkalmazásával finomítjuk az érdeklődésünkre számot tartó területen, amihez a globális modellek eredményei határfeltételt szolgáltatnak. A regionális modellek finomabb felbontása lehetővé teszi a felszíni és azon kisskálájú folyamatok részletesebb leírását, amelyek lényeges szerepet játszanak a helyi éghajlati viszonyok alakításában.

A globális és regionális éghajlati szimulációk számos bizonytalanságot tartalmaznak, melyek ismerete elengedhetetlen a projekciók megfelelő értelmezéséhez. 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. Ez tehát az éghajlati rendszer természetes, belső tulajdonsága.
2. A bizonytalanság másik lényeges összetevője abból ered, hogy a **fizikai folyamatok leírása különböző módon történik az egyes modellekben**. A modellek között a legnagyobb eltérés a térbeli rácsfelbontásnál kisebb skálán zajló fizikai folyamatok leírására használt parametrizációkban van. (A parametrizációkon keresztül megjelenő bizonytalanságok közül a felhő- és csapadékképződéssel kapcsolatosak a legjelentősebbek, így elsősorban ennek köszönhető a csapadék szimulációk nagyfokú bizonytalansága.)
3. Az éghajlatra hatással bíró külső kényszerek egyik legbizonytalanabb eleme az **emberi tevékenység**, mégpedig azért, mert ennek a XXI. században való alakulásáról nincs egyértelmű jövőképünk, csupán különböző forgatókönyveink vannak (1. ábra). Az egyes lehetőségeket a globális és regionális éghajlati modellek számára külső kényszerként, az üvegházhatású gázok és aeroszol részecskék koncentrációjának különböző jövőbeli meneteként írják le. A globális modell az éghajlati rendszer egészének választ szimulálja a feltételezett külső kényszerre. Az IPCC 3. és 4. jelentésében alkalmazott kibocsátás-alapú SRES scenáriókat (Nakicenovic et al., 2000) az IPCC 5. jelentésében felváltották a sugárzási kényszer megváltozását leíró RCP forgatókönyvek (Moss et al., 2010). Ezek szintén részletesen megadják az aeroszol részecskék és az üvegházhatású gázok koncentrációjának lehetséges jövőbeli értékeit, viszont már figyelembe veszik a kibocsátás-csökkentési (ún. mitigációs) törekvéseket is. A scenárió-család négy reprezentatív (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 és RCP8.5) tagját az alapján nevezték el, hogy az általuk leírt koncentráció-növekedés 2100-ra mekkora sugárzási kényszer változást (rendre 2,6, 4,5, 6 és 8,5 W/m<sup>2</sup>-t) jelent.



A numerikus szimulációkban lévő bizonytalanságok az ún. ensemble technika segítségével számszerűsíthetők, aminek lényege, hogy nem egyetlen modellkísérletet végzünk, hanem több, egyforma bekövetkezési 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.

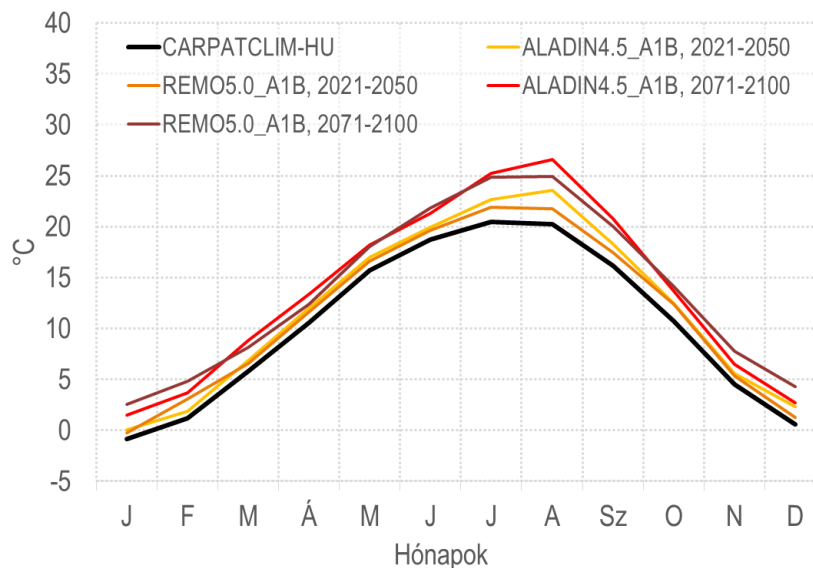


**1. ábra.** Az iparosodás (kb. 1765) előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer alakulása 2000 és 2300 között különböző RCP (teli görbék; sötétkék: RCP2.6, világoskék: RCP4.5, narancs: RCP6.0, piros: RCP8.5) és SRES (szaggatott görbék; kék: B1, zöld: A1B és piros: A2) forgatókönyvek alapján (IPCC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

Szolgálatunknál elsőként az ALADIN-Climate4.5 (Krüzselyi et al., 2011; Csorvási et al., 2016) és a REMO5.0 (Krüzselyi et al., 2011; Szépszó, 2014) regionális éghajlati modelleket alkalmaztuk a hazánkban várható éghajlatváltozás feltérképezésére. A 10 és 25 km-es felbontású projekciókban a jövőbeli emberi tevékenység leírására a közepes A1B kibocsátási forgatókönyvet alkalmaztuk a SRES forgatókönyvcsaládból. A modelleket az ARPEGE-Climate/OPA illetve az ECHAM5/MPI-OM globális klímamodellek eredményeiből származó határfeltételekkel futtatták.

Az 1971–2000 időszakhoz viszonyítva mindkét modellkísérlet az átlaghőmérséklet szignifikáns és folyamatos növekedését mutatja (**2. ábra**), az évszázad közepére mintegy 2 fokkal, az évszázad végére 3-4 fokkal. A fagyos napok éves száma (**1. táblázat**) az évszázad végén akár 39 nappal is csökkenhet, ez azonban nem jelenti a teljes eltűnésüket. A nyári napok éves száma 41-45, a hőségnapok száma 34-47 nappal növekedhet meg a század végére. Az eredményekben a nyár végi csapadékmennyiség csökkenését láthatjuk (**3. ábra**), amit a REMO5.0 esetében jelentős téli csapadéknövekedés „kompenzál” a század végére, de az ALADIN4.5-nél ez kevésbé jelenik meg. A csapadékindexek (**2. táblázat**) az egyenetlenné váló csapadékeloszlásra hívják fel a figyelmet, hiszen a csökkenő csapadékos napok számához a 10 mm feletti csapadékos napok növekedése és a száraz időszakok hosszabbodása társul.

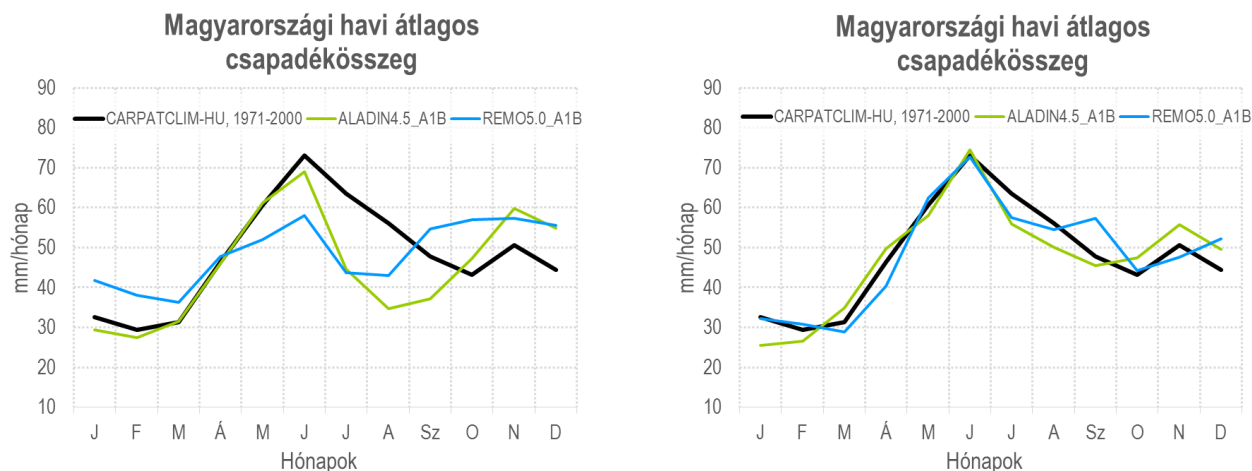
### Magyarországi havi átlaghőmérséklet



**2. ábra.** A magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) az A1B forgatókönyvekkel készített ALADIN4.5 és REMO5.0 modellszimulációk mérésekkel korrigált eredményei alapján a 2021–2050 és 2071-2100 időszakokra és a mérések (CARPATCLIM-HU) alapján 1971–2000-re.

**1. táblázat.** Hőmérsékleti indexek éves értékei Magyarországra az A1B forgatókönyvekkel készített ALADIN4.5 és REMO5.0 modellek kísérletei alapján. Referencia: 1971–2000.

Modell	Változás [nap]			
	ALADIN4.5	REMO5.0	ALADIN4.5	REMO5.0
Időszak	2021–2050		2071–2100	
<b>Nyári napok száma</b>	21	17	41	45
<b>Hőségnapok száma</b>	23	9	47	34
<b>Zord napok száma</b>	-4	-2	-7	-4
<b>Fagyos napok száma</b>	-18	-12	-35	-39



**3. ábra.** A magyarországi átlagos havi csapadékösszeg (mm/hónap) az A1B forgatókönyvekkel készített ALADIN4.5 és REMO5.0 modellszimulációk mérésekkel korrigált eredményei alapján a 2021–2050 (bal oldali ábra) és 2071–2100 (jobb oldali ábra) időszakokra és a mérések (CARPATCLIM-HU) alapján 1971–2000-re.

**2. táblázat.** Az ALADIN4.5 és REMO5.0 modellek A1B scenáriójával végzett kísérleteiből számolt csapadék indexek éves értékei. Referencia: 1971–2000.

	Változás [%]											
	Csapadékos napok száma				10 mm feletti csapadékos napok száma				Egymást követő száraz napok maximális száma			
Modell	ALADI N4.5	REMO 5.0	ALADIN 4.5	REMO 5.0	ALADIN 4.5	REMO 5.0	ALADIN 4.5	REMO 5.0	ALADIN 4.5	REMO 5.0	ALADIN 4.5	REMO 5.0
Időszak	2021–2050		2071–2100		2021–2050		2071–2100		2021–2050		2071–2100	
Tavaszi	1	-7	-5	-7	5	-5	4	12	-7	14	10	19
Nyári	-6	-8	-21	-28	4	0	-5	-23	4	10	38	39
Őszi	-2	-2	-11	0,4	14	11	19	37	-2	-7	8	-0,5
Téli	-13	2	-5	10	3	13	12	61	27	-5	18	-6

A szimulációkat több lépésben fejlesztettük. Az ALADIN-Climate integrálási területét kiterjesztettük, hogy az eredmények használhatók legyenek az országhatárokon átívelő (pl. hidrológiai célú) hatásvizsgálatokban. A REMO modell felbontását 25 km-ről 10 km-esre finomítottuk, amivel térben részletes információkat tudunk szolgáltatni a hatásvizsgálatokhoz. A kísérletekben a modellek új verzióit alkalmaztuk: az ALADIN-Climate 5.2-es és a REMO 2015-ös modelleket. A projekciókban az antropogén tevékenység figyelembevételére az RCP forgatókönyvcsalád két tagját használtuk: a közepes és a magas kibocsátáshoz tartozó RCP4.5 és RCP8.5 scenáriókat, s ez lehetővé teszi az emberi tevékenység leírásából eredő bizonytalanság reprezentációját az eredményekben.

A 3. fejezetben részletesen bemutatjuk az alkalmazott regionális klímamodelleket (3.1-3.2), az elvégzett modellkísérletek beállításait, jellemzőit (3.3), illetve a felhasznált kiértékelési eszközöket (3.4). A kiértékelés eredményeit a 4. fejezetben fejtjük ki, az 5. fejezetben pedig összefoglaljuk a legfontosabb megállapításokat.

### 3. Módszertan

#### 3.1 ALADIN-Climate

Az ALADIN-Climate egy hidrosztatikus, regionális éghajlati modell, melynek jelenleg az 5.2-es verzióját (Colin et al., 2010; a továbbiakban ALADIN5.2) alkalmazzuk az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. A dinamikai egyenletek megoldásának módszere az ALADIN numerikus időjárás-előrejelző modellen alapszik, a parametrizált folyamatok leírását pedig a CNRM-CM5 általános cirkulációs modell légköri tagja, az ARPEGE-Climate 5. verziója (Voldoire et al., 2013) biztosítja.

A hidrosztatikus modell elhanyagolja a vertikális irányú gyorsulásokat, ezért a vertikális sebesség diagnosztikus módon kerül kiszámításra. A közelítést alkalmazó modellek legnagyobb horizontális felbontása 8-10 km lehet. A modell számításait egy Lambert-féle kúpvetületen definiált horizontális rácshálózaton végzi; vertikális irányban felszínkövető-nyomási hibrid koordinátákat használ, ami a felszín közelében követi a domborzatot, a légkör tetején tisztán nyomási rendszer, a közbülső hibrid modellszintek pedig folytonos átmenetet képeznek e két reprezentáció között. A modell prognosztikai változói a horizontális sebességkomponensek, a hőmérséklet, a specifikus nedvesség és a felszíni légnyomás. Az ALADIN5.2 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 összesimítődnek a prognosztikai változóknak a „meghajtó” modell által a zóna külső peremén határfeltételként előírt és a regionális modell által a zóna belső határpontjaiban megadott értékei, kiszűrve az ezek eltéréséből eredő zajokat.

A hosszúhullámú sugárzást leíró RRTM (Rapid Radiation Transfer Model; Mlawer et al., 1997) séma figyelembe veszi a hosszúhullámú sugárzás emisszióját, abszorpcióját, és egyes légköri gázok, illetve aeroszolok hatását. A sugárzási fluxus rövidhullámú komponensének számítása a Fouquart és Bonnel (1980) sémát követi, mely leírja a rövidhullámú sugárzás visszaverődését, szóródását és abszorpcióját, továbbá figyelembe veszi az egyes légköri nyomgázok elnyelését és a felhőzet módosító hatását is. A nagyskálájú felhőzet meghatározása Ricard és Royer (1993) statisztikus módszerével történik, az ebből származó nagyskálájú csapadékot pedig a Smith-séma (1990) írja le a modellben. A konvekció parametrizációja Bougeault (1985) sémáján alapul, mely leírja a konvektív felhőzet képződését, a felhőn belüli fel- és leáramlásokat, figyelembe veszi a felhő és környezete közötti légtömegcserét, a kihulló konvektív csapadék párolgását és az ehhez köthető hőcsere folyamatokat. A felszín és a légkör közötti turbulens hő- és nedvességáramok számítását a SURFEX (Masson et al., 2013) felszíni almodell végzi, melyben a növényzet és a tavak feletti áramok meghatározása külön séma szerint történik.

Az emberi tevékenység hatását különböző üvegházhatású gázok (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC-11, CFC-12) éves globális légköri koncentrációján, illetve bizonyos (szén, szulfát, organikus aeroszol, tengeri só, füst) aeroszolon keresztül vesszük figyelembe. Az aeroszolok leírása

egy 10 éves periódusra, havi felbontásban történik mind a múltbeli időszakra (Tegen et al., 1997), mind a scenáriókat alkalmazó időszakra (Szopa et al., 2013).

## 3.2 REMO

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

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál jelenleg a REMO 2015-ös verzióját (továbbiakban REMO2015) használjuk. A modell prognosztikai változói a horizontális szélkomponensek, a felszíni légnyomás, a hőmérséklet, a specifikus nedvesség és a felhővíztartalom. A modell a hidro-termodinamikai egyenletrendszert egy elforgatott szférikus koordináta rendszerben oldja meg, mely módszerrel a hatékonyabb modellfuttatás érdekében a tartományt az Egyenlítő fölé transzformáljuk úgy, hogy az északi sarkot eltoljuk. Vertikális irányban hibrid nyomási-felszínkövető koordináta rendszert használ. Az oldalsó határfeltételek, valamint a REMO integrálási eredmények – az ALADIN-Climate modellhez hasonlóan – egy 8 rácspontról álló relaxációs zónában simítódnak össze.

A talajhőmérséklet kiszámítása öt rétegben történik a diffúziós egyenlet megoldásával (Warrilow et al., 1986). A talajnedvességet a lehulló csapadék, a felszíni párolgás, a talajban történő transpiráció, a hó olvadása és a felszíni lefolyás határozza meg. A felszíni vertikális turbulens fluxusok meghatározása a Monin-Obukhov séma (1954) szerint alakul. A nagyskálájú felhőzet és csapadék leírása Sundqvist (1978) módszerét követi, a konvekció parametrizációja pedig a Tiedtke-féle tömegfluxus sémára (1989) támaszkodik, Nordeng (1994) módosításaival. A sugárzási folyamatok kezelésére a Morcrette et al. (1986) által kidolgozott eljárást adaptálták a modellbe, majd több üvegházgáz, az ózon és az aeroszolok elnyelő-szóró hatásának figyelembevételével bővítették. Nagy számításigénye miatt a sugárzási parametrizációt a REMO óránként alkalmazza. Ezzel az egyszerűsítéssel azonban nem veszítünk lényeges információt, mert a sugárzási folyamatok alapvetően hosszú távon fejtik ki hatásukat.

A REMO modellről részletes leírást ad Szépszó (2014), a két vizsgált modell legfontosabb jellemzőit pedig a **3. táblázatban** foglaljuk össze.

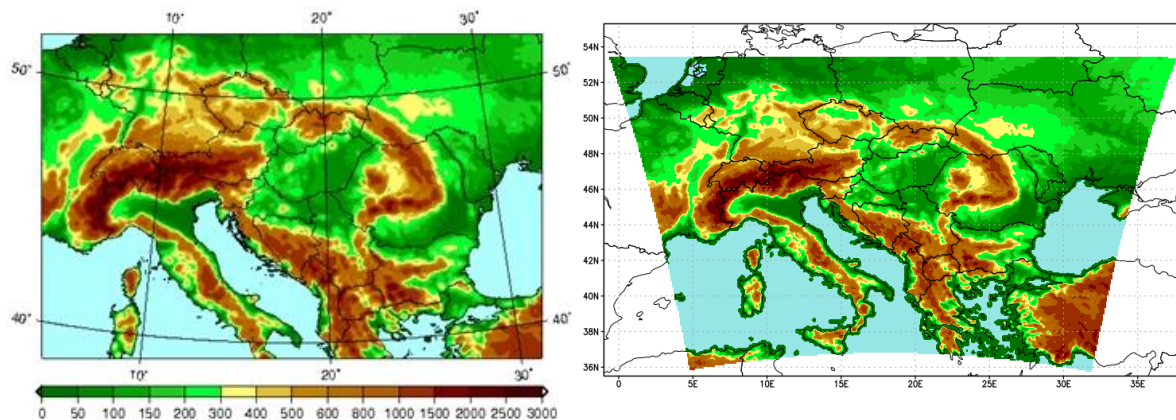
**3. táblázat.** Az ALADIN5.2 és a REMO2015 regionális klímamodellek legfontosabb jellemzői.

	<b>ALADIN5.2</b>	<b>REMO2015</b>
<b>Kiindulási modell</b>	Dinamika: ALADIN	Dinamika: Europa-Modell
	Parametrizációk: CNRM-CM5	Parametrizációk: ECHAM4 AGCM
<b>Dinamika</b>		
<b>Horizontális deriváltak kezelése:</b>	Spektrális módszer	Véges differencia módszer
<b>Vertikális koordináta rendszer:</b>	Felszínkövető–nyomási hibrid	
<b>Vertikális irányú gyorsulás leírása</b>	Hidrosztatikus közelítés	
<b>Prognosztikai változók</b>	Horizontális szélesség-komponensek Felszíni légnyomás, Hőmérséklet, Specifikus nedvesség	Horizontális szélesség-komponensek, Felszíni légnyomás, Hőmérséklet, Specifikus nedvesség, Felhővíztartalom
<b>Időbeli sémák</b>	Szemi-implicit és a szemi-Lagrange sémák kombinációja	Leapfrog séma szemi-implicit korrekcióval és Asselin szűrővel
<b>Fizikai parametrizációk</b>		
<b>Sugárzás</b>	Rövidhullámú sugárzás: Foucart and Bonnel (1980) Hosszúhullámú sugárzás: Mlawer et al., (1997)	Rövidhullámú sugárzás: Foucart and Bonnel (1980) Hosszúhullámú sugárzás: Morcrette (1989)
<b>Felszíni modell</b>	SURFEX: Masson et al., (2013)	Tiling módszer: 3-féle felszín típus (föld-, víz- és jégfelszín) relatív aránya egy rácscellán belül Talajhőmérséklet: 5-rétegű séma Talajnedvesség: Manabe (1969)
<b>Vertikális diffúzió és turbulens fluxusok</b>	Természetes felszín felett: ISBA séma Vízfelszín felett : Charnock formula (1955)	Monin and Obukhov (1954)
<b>Konvekció</b>	Bougeault (1985)	Tiedtke (1989)

### 3.3 Modellkísérletek

A jövőre vonatkozó vizsgálatoknál az oldalsó peremfeltételeket mindkét modell számára egy kapcsolt általános cirkulációs modell mezőinek dinamikus leskálázásával előállított ALADIN, illetve REMO szimuláció eredményei biztosították, azaz mindkét esetben egy korlátos

tartományú éghajlati szimulációt skáláztunk le 10 km-es felbontásra. A közvetlen határfeltételek 50 km-es felbontású térbeli rácson, az ALADIN esetében 31, a REMO esetében 23 vertikális szinten, 6-órás időbeli sűrűséggel álltak rendelkezésre, ezek számára pedig rendre a CNRM-CM5 (Voldoire et al., 2013), míg az MPI-ESM-LR (Giorgetta et al., 2013) modell adta a kezdeti- és peremfeltételeket. Az integrálási tartományokat az **4. ábra**, a kísérletek jellemzőit pedig az **4. táblázat** mutatja.



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

**4. táblázat.** A modellkísérletek jellemzői.

Regionális modell	ALADIN5.2	REMO2015
Határfeltétel	CNRM-CM5 → ALADIN5.2	MPI-ESM-LR → REMO2015
Horizontális felbontás	10 km	
Vertikális szintek száma	31	27
Határfeltételek felbontása	50 km	
Időszak	1950–2100	
Forgatókönyvek	RCP4.5 és RCP8.5	

### 3.4 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 2071–2100 időszakokra számszerűsítjük, referenciaként az 1971–2000 időszakot tekintve. A vizsgálatokat két meteorológiai változóra, a hőmérsékletre és a csapadéokra végeztük el napi, havi, évszakos és éves skálán. Az alkalmazott kiértékelési eszközöket és módszertani jellemzőket az alábbiakban foglaljuk össze:

- **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, s ezeket táblázatban vagy grafikonon jelenítettük meg.
- **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.
- **Korrigált havi átlagértékek:** meghatároztuk a modelleredmények alapján a havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg átlagos magyarországi változásértékeit, s ezt kombináltuk (hőmérséklet esetén hozzáadtuk, csapadék esetén összeszoroztuk) a referencia-időszakra mérések (CarpatClim-HU (1961–2010), Bihari et al. 2017) alapján kiszámított havi átlagértékekkel. A CarpatClim-HU egy olyan napi felszíni megfigyelési adatokat tartalmazó adatbázis, melyet speciálisan meteorológiai célokra kifejlesztett homogenizációs és interpolációs módszerek (Szentimrey, 2008; Szentimrey és Bihari, 2007) alkalmazásával állítottak elő egy 10 km-es felbontású Magyarországot lefedő horizontális rácson.
- **Változás időbeli fejlődése 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. Az ábrákon egy adott évnél a megelőző 30 év referencia-időszaktól vett átlagos eltérését tüntettük fel.

- **Boxplot/box-whisker diagram:** ezek a diagramok lehetővé teszik az éves, évszakos és havi magyarországi átlagok adott 30-éves időszakon belüli eloszlásának összehasonlítását a mérési adatokra és a modelleredményekre (McGill et al., 1978). Két-két diagramot készítettünk a hőmérsékletre és a csapadékra: az egyiken a jövőre vonatkozó éves és évszakos változásokat jelenítettük meg évenként, a másikon a referencia-időszakra és a jövőbeli időszakokra vonatkozó évenkénti havi átlagértékeket (melyeket előzőleg a referencia-időszak mérési adataival kombináltunk; I. a korrigált havi átlagértékeket). A modellkísérletenként különböző színnel jelölt téglalapok alsó és felső határai rendre a minta alsó és felső kvartiliseit (25. és 75. percentiliseit, melyek között a minták 50%-a helyezkedik el) 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 átlagértékekig nyúlnak (azaz a fennmaradó 25-25 %-ot fedik le). A téglalap illetve a függőleges szaggatott vonal hossza az évek közötti változékonyság nagyságára utal az adott modellkísérletben, valamint a megfigyelésekben.
- **Relatív gyakorisági hisztogram:** 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. A januári átlaghőmérséklet esetében a  $-20\text{ °C}$  és  $20\text{ °C}$  közötti intervallumot, július esetében a  $10\text{ °C}$  és  $40\text{ °C}$  közötti intervallumot 1 fokként osztottuk fel. A csapadékösszeg esetében a  $0\text{ mm}$  és  $30\text{ mm}$  közötti intervallumot 1 mm-enként osztottuk fel (kivéve a csapadék első kategóriáját, mely a  $0$  és  $0,1\text{ mm}$  közötti csapadékú, csapadékmentesnek tekintett napokat jelöli), és ezekre a kategóriákra számítottuk ki a modelleredmények és a referencia-időszak gyakoriságát. Az ábrázolásnál az eltérő nagyságrendek miatt logaritmikus skálát használtunk. A hőmérsékleti és csapadék eredményeket a modellek referencia-időszakára és a két jövőbeli időszakra, modellenként és scenáriónként külön diagramon jelenítettük meg.
- **Éghajlati indexek térképes megjelenítése:** a napi adatok felhasználásával különböző hőmérsékleti és csapadék éghajlati indexek éves és évszakos gyakoriságát vizsgáltuk (**5. táblázat**). Ehhez a magyarországi napi maximum- és minimumhőmérsékleteket, illetve napi csapadékösszegeket használtuk fel és különböző küszöbértékek átlépési gyakoriságát számszerűsítettük a rácspontokban, a hőmérsékleti indexek esetében napban, a csapadékindexek esetében százalékos formában megadva a változásokat a modellek referencia-időszakához képest.
- **Éghajlati indexek grafikonos megjelenítése:** a négy modellszimuláció 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.

**5. táblázat.** A vizsgált hőmérsékleti és csapadékindexek.

Index	Név	Definíció	Mértékegység
TN10LT	Zord napok száma	$T_{\min} < -10 \text{ °C}$	nap
FD	Fagyos napok száma	$T_{\min} < 0 \text{ °C}$	
SU	Nyári napok száma	$T_{\max} > 25 \text{ °C}$	
TX30GE	Hőségnapok száma	$T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$	
CDD	Egymást követő száraz napok maximális száma	Az a leghosszabb időszak, amikor $R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$	nap
RR1	1 mm-t meghaladó csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$	%
RR10	Nagy csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 10 \text{ mm}$	

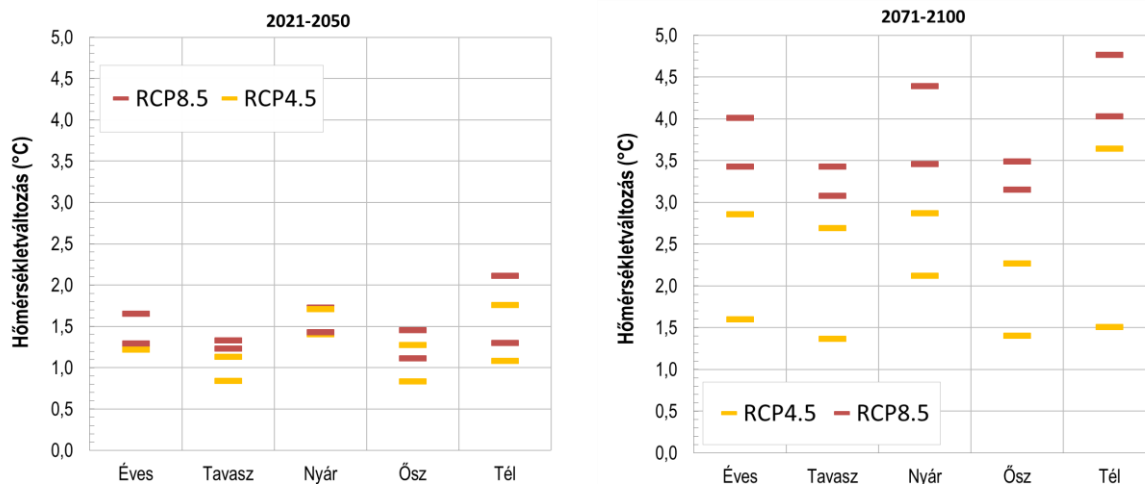
## 4. Eredmények

### 4.1 Hőmérséklet

Vizsgálataink során mind az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel meghajtott ALADIN5.2 és REMO2015 modellek eredményeiben szignifikáns melegedő tendenciát figyelhetünk meg. A 2021–2050 időszak átlaghőmérséklete 1-2 fok körüli emelkedést mutat az 1971–2000 időszakhoz képest (**5. ábra** bal oldali panel), a legnagyobb melegedés nyáron (1,4-1,7 °C) és télen (1,1-2,1 °C) várható. A box-whisker diagramok alapján (**12. ábra**) az évszakos átlaghőmérséklet kb. az évek 25%-ában még alacsonyabb lesz a referencia-időszak átlagánál. Egyes években akár 6 fokos nyári melegedésre is számíthatunk, ugyanakkor a referenciánál 6 fokkal hidegebb tél is előfordulhat. A 2071–2100 időszak esetén 3 és 5 fok közötti növekedés jelenik meg a projekciókban (**5. ábra** jobb oldali panel), a legmagasabb értékek ebben az esetben is nyáron (2,1-4,4 °C) és télen (1,5-4,8°C) valószínűek. Ekkor már szinte minden évben az 1971–2000-re vonatkozó átlagértéknél magasabb évszakos hőmérséklet várható (**13. ábra**), egyes nyarakon és teleken akár 6-8 fokkal is több lehet az átlaghőmérséklet.

Az évszázad első évtizedeiben a forgatókönyveknek még nincs hatása, sokkal inkább a modellek közötti eltéréseknek. Ez természetes következménye a scenáriókban feltételezett sugárzási kényszer csökkenésnek, habár az ALADIN5.2 modell erre kevésbé reagál és kisebb mértékű, de továbbra is emelkedő hőmérsékletet vetít előre egészen a 21. század végéig. A fentiekből adódóan nem feltétlenül a magasabb kibocsátású scenárióval kapjuk a nagyobb hőmérséklet-emelkedést: a REMO2015 RCP4.5 forgatókönyvvel készült kísérlete nyárra és őszre 2021–2050-re nagyobb változást mutat, mint az RCP8.5-tel végzett kísérlet. Előbbiekből szintén következik, hogy a század közepén nincs nagy eltérés a különböző forgatókönyvekkel készült kísérletek eredményei között, de ez a század végére megváltozik és az eredmények a

szenáriók szerint rendeződnek. A modellszimulációk tekintetében az időszak elején az ALADIN5.2\_RCP4.5 mutatja a nagyobb melegedést, majd a század második felére az ALADIN5.2\_RCP8.5 és a REMO2015\_RCP8.5 (6. ábra).

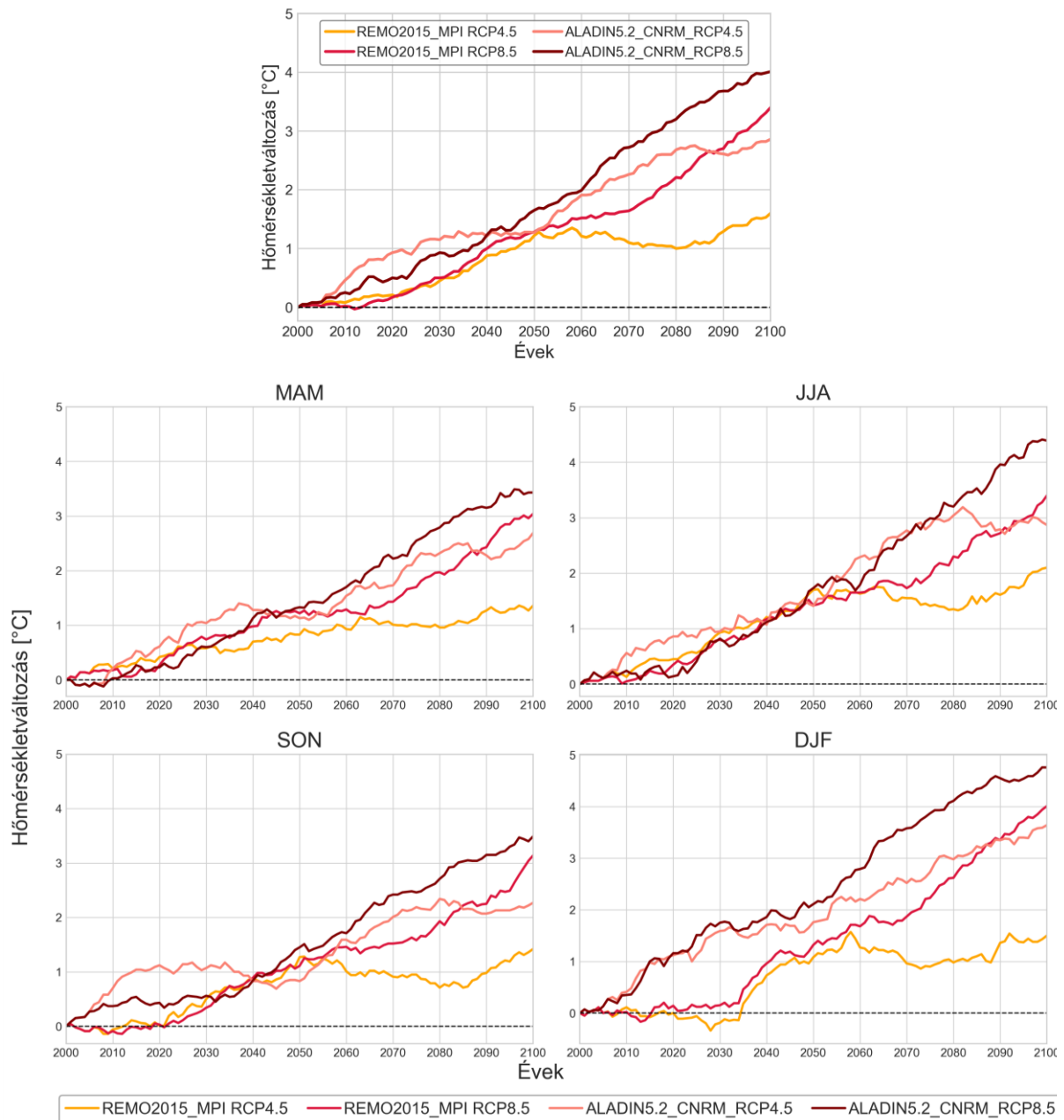


5. ábra. Magyarországi éves és évszakai átlagos hőmérsékletváltozás (°C) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

A térképeken (7. ábra) a következő 30 évben nagyobb melegedés figyelhető meg a REMO2015 esetében a keleti, az ALADIN5.2 esetében pedig az északi területeken. Összességében az ALADIN5.2 modell országszerte nagyobb melegedést jelez előre, mint a REMO2015. Az utóbbi által jelzett változásokban megjelennek a domborzat és a felszín sajátosságai, melyről részletesebben a modell érzékenység-vizsgálatánál már beszámoltunk (Suga et al., 2021). A 2071–2100-as időszakra (8. ábra) országosan nagyobb melegedés várható a 2021-2050-es időszakhoz képest, és itt is megjelennek a modellekre jellemző minták. Mindemellett a legnagyobb hőmérséklet-növekedés az ország keleti felén várható. A legnagyobb térbeli változékonyságot a REMO2015 nyáron, az ALADIN5.2 télen és nyáron mutatja (6. táblázat).

A havi átlaghőmérséklet korrigált értékei (9. ábra) 2021-2050-ben kis eltérést mutatnak a négy modellkísérlet eredményei alapján. A század második felében a legmagasabb havi átlaghőmérsékletet többnyire az ALADIN szimulációi mutatják, a REMO2015\_RCP8.5 eredményei az ALADIN5.2\_RCP4.5-höz közeledek. A leghidegebb hónapnak továbbra is a januárt tekinthetjük, ugyanakkor a század végére 3 szimuláció szerint (REMO2015\_RCP4.5, REMO2015\_RCP8.5 és ALADIN5.2\_RCP8.5) megfigyelhetünk egy egy hónapos eltolódást a legmelegebb hónap esetében júliusról augusztusra. Ez a 2021–2050-ben csak a REMO2015\_RCP4.5 szimuláció esetén teljesül, mely, mint korábban említettük, minden összehasonlításban nagyobb melegedést mutat. Megnézve a 10-11. ábrán a boxplotok értékeit, a két hónap között a különbség nem jelentős, így az előbbieken alapján bizonytalan, hogy melyik hónapban várható majd a legmagasabb hőmérséklet. Azonban mindenképpen 20 fok feletti átlaghőmérsékletre számíthatunk. Tekintve a júliusi gyakorisági hisztogramokat (15. ábra) látható, hogy a század hátralevő részében a referencia időszakhoz képest jelentősen

gyakrabban tapasztalhatunk majd magasabb hőmérsékleti értékeket, különösen a század vége felé, amikor 33 fok feletti napi átlaghőmérsékletek is előfordulhatnak.



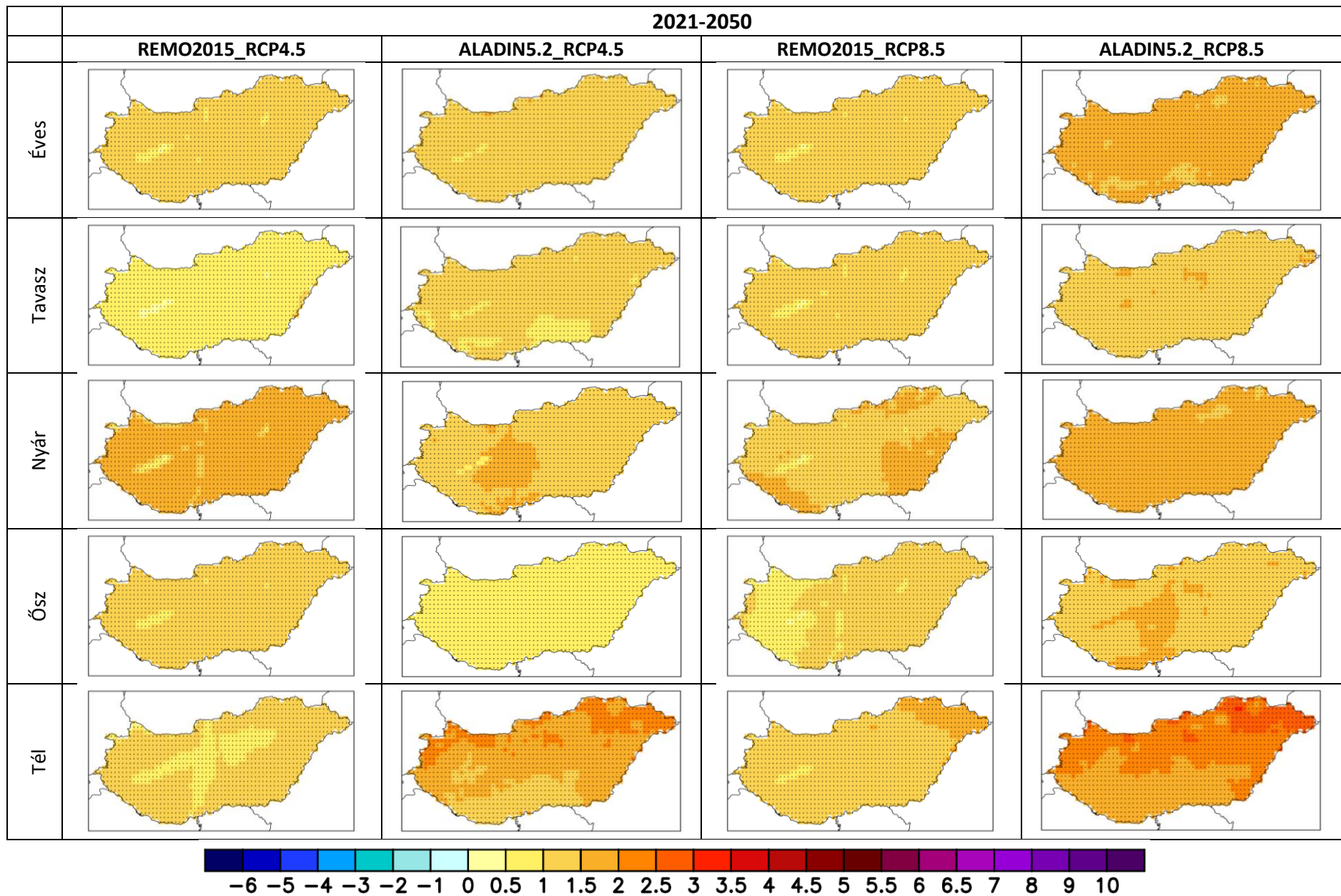
**6. ábra.** A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változásának (°C) 30 éves mozgóátlaga a négy modell-szimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

A januári várható átlaghőmérséklet minden szimuláció szerint 0 °C fölé fog esni és erre már a következő 30 évben számítanunk kell. Ezt alátámasztják a januári hőmérsékleti gyakorisági hisztogramok is (**14. ábra**), ahol látható az eloszlás pozitív tartományba való eltolódása. A **10-11. ábra** alapján a mérési adatsor januári értékei a referencia-időszak nagy

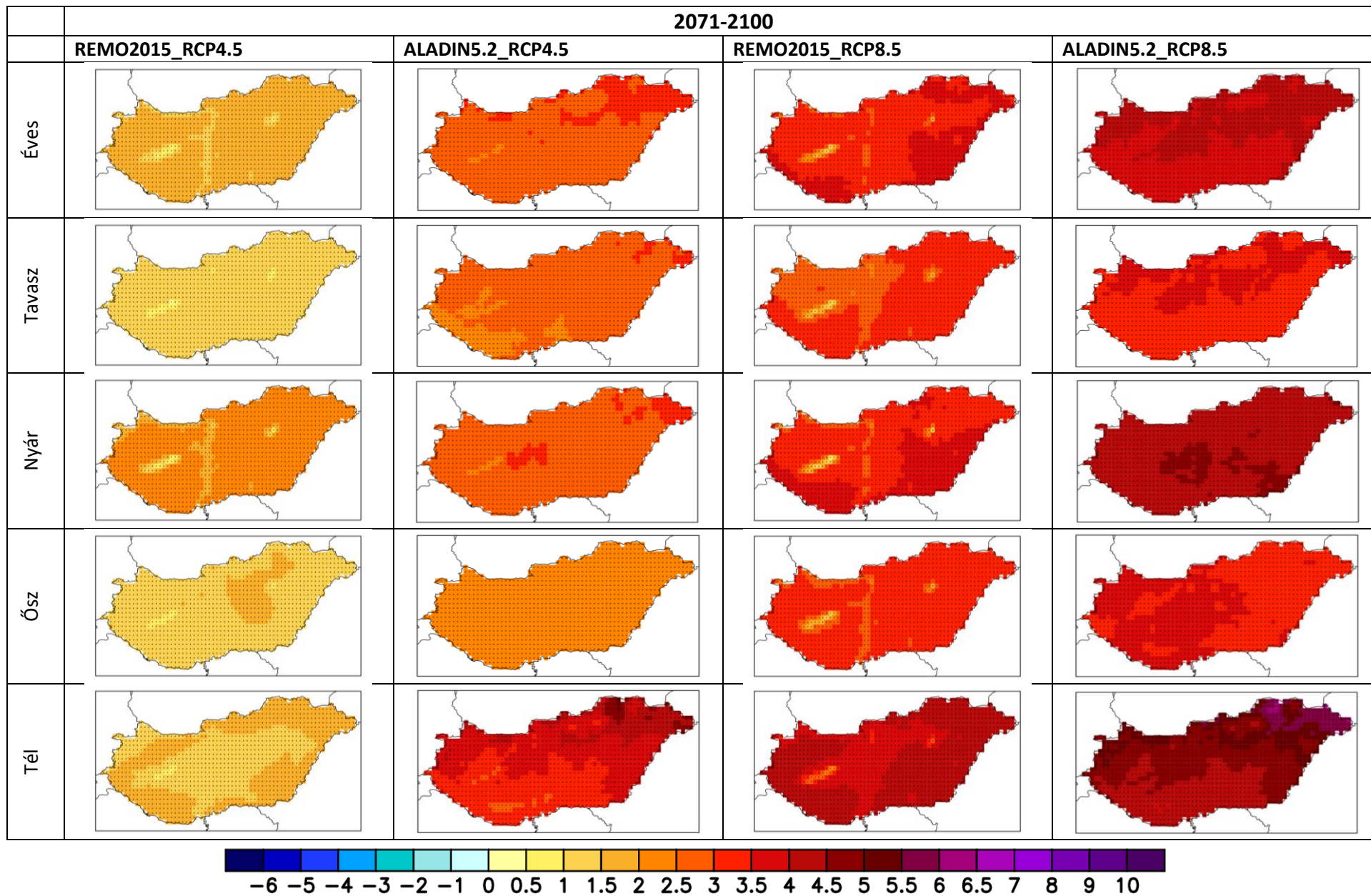
részében 0 fok alá estek, míg mindkét modell többségében 0 fok fölé eső értékeket mutat már a következő évtizedekben is. A korábban említett várható júliusi-augusztusi és januári átlaghőmérséklet az éves hőingás csökkenését jelzi.

**6. táblázat.** A REMO2015 és ALADIN5.2 modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlaghőmérséklet térbeli szórása [°C].

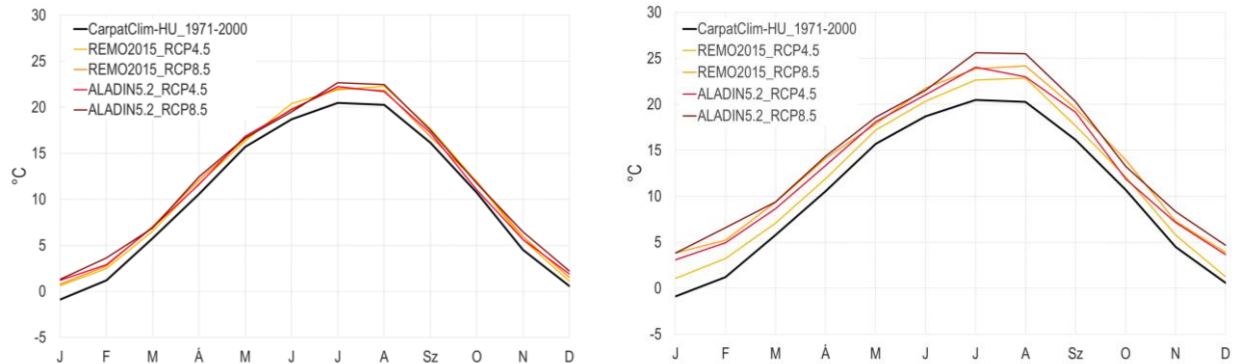
Hőmérséklet (°C)							
Térbeli szórás							
Időszak	Szenárió	Modell	Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
1971-2000		REMO2015	1,0	0,9	1,5	1,0	1,0
		ALADIN5.2	0,8	0,8	0,7	0,7	1,3
2021-2050	RCP4.5	REMO2015	1,0	1,0	1,6	1,0	1,0
		ALADIN5.2	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0
	RCP8.5	REMO2015	1,0	1,0	1,6	1,0	0,9
		ALADIN5.2	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0
2071-2100	RCP4.5	REMO2015	1,0	1,0	1,6	1,0	1,0
		ALADIN5.2	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8
	RCP8.5	REMO2015	1,1	1,1	1,8	1,1	1,0
		ALADIN5.2	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8



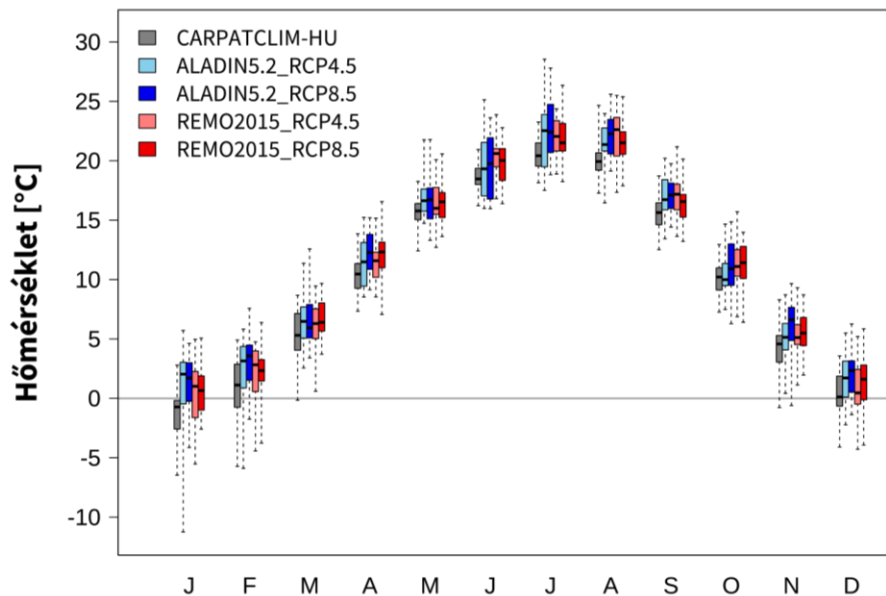
7. ábra. Éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.



8. ábra. Éves és évszakai átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

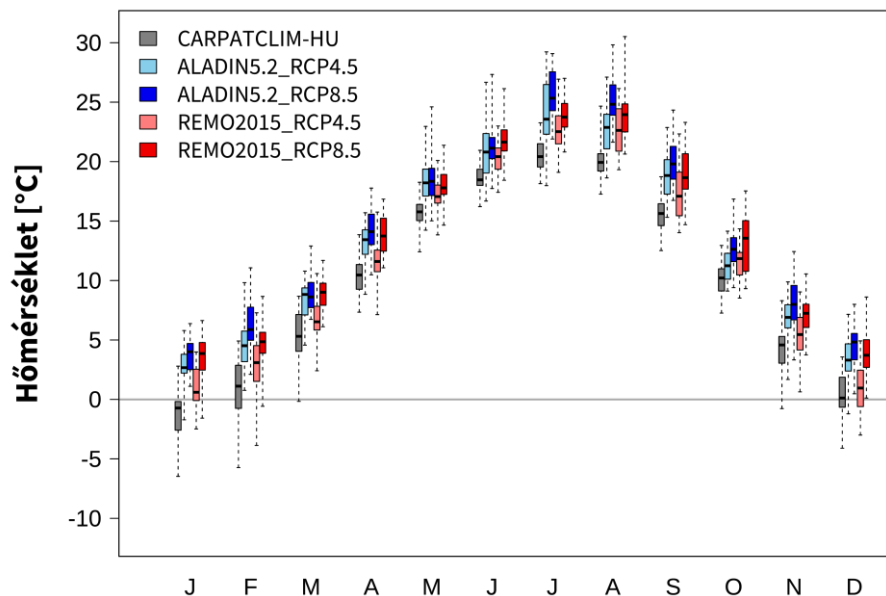


**9. ábra.** Magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakon a négy modellszimuláció mérésekkel korrigált eredményei alapján és 1971–2000-ra mérések (CARPATCLIM-HU) alapján.



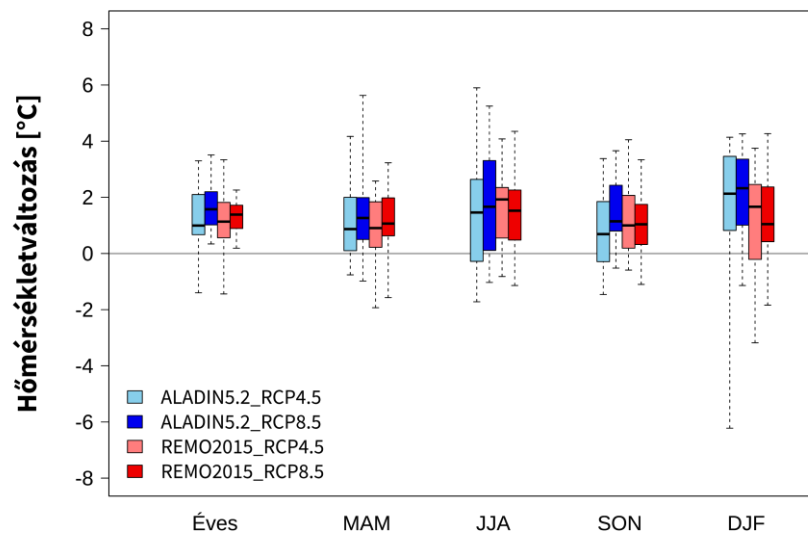
**10. ábra.** Az évenkénti magyarországi havi átlaghőmérséklet értékei (°C) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korrigált eredményei alapján 2021 és 2050 között.



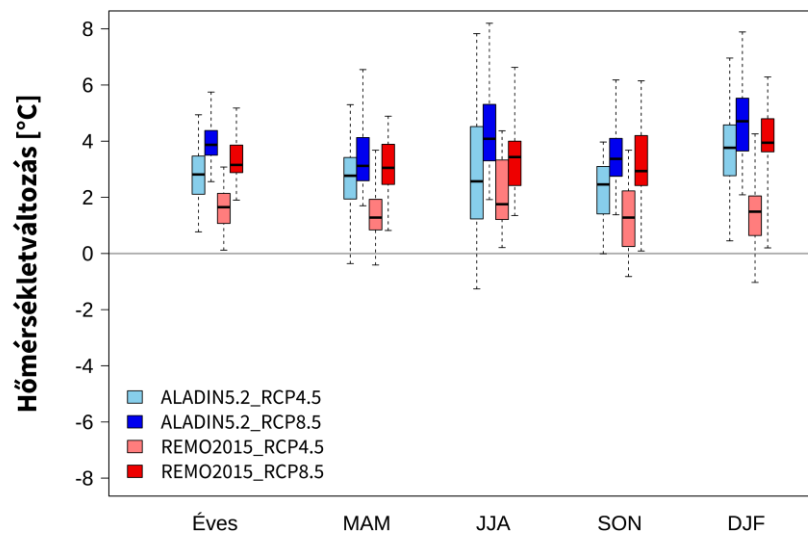


**11. ábra.** Az évenkénti magyarországi havi átlaghőmérséklet értékei (°C) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korrigált eredményei alapján 2071 és 2100 között.

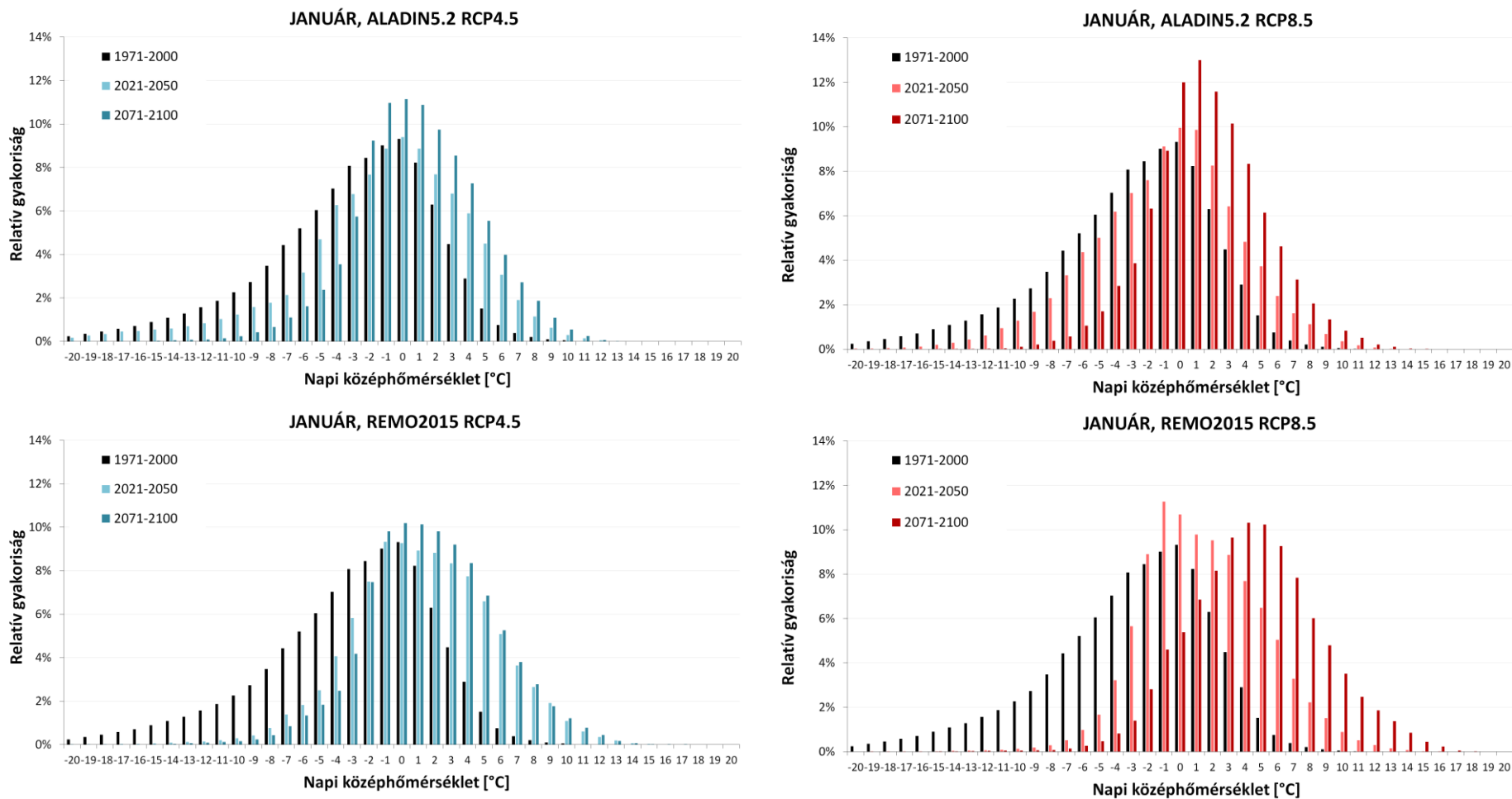
A hőmérsékleti indexek vizsgálata előtt érdemes visszatekinteni, hogy milyen megállapításokra jutottunk a validációs vizsgálat (Bán et al., 2021) során, így ezt figyelembe véve vonhatunk le következtetéseket a jövőre nézve. A REMO2015 szimulációk az átlaghőmérsékletet jól közelítik, azonban a napi maximum és minimum hőmérsékletek szisztematikus hibával terheltek. A nyári napok és a fagyos napok számát a modellszimulációk általában alulbecsülték, ami a REMO2015 kísérleteknél a 60-80%-ot is elérte az 1981–2000 időszakra. A projekciós eredmények közül a nyári napok változásánál (16. ábra) az évszázad elején az ALADIN5.2 és a REMO2015 között az ország keleti részénél előjeles különbség van: az ALADIN az index csökkenését mutatja. Ez az évszázad végére eltűnik, és mindkét modell növekedést jelez. Hőségnapok tekintetében (17. ábra) az ALADIN5.2 nagyobb növekedést mutat a REMO2015-nél, az évszázad végén az RCP8.5-ös scenáriónál egyes területeken akár 30 napos, országos átlagban 25 napos (19. ábra) különbség is lehet a két modell által adott értékek között. A fagyos napok száma (18. ábra) csökken az évszázad végére mindkét modell és scenárió alapján, ami akár 90-100% is lehet a nyugati országrészben (19. ábra). Az ALADIN5.2 modell magasabb hőmérsékletértékei miatt a fagyos napok számának csökkenése jobban megjelenik, kiugróan az évszázad végén az RCP8.5-ös forgatókönyvvel (55-60 napos csökkenés). A fagyos napok számának csökkenésében térnek el leginkább a kísérletek, akár 44 napos különbség is megjelenhet köztük (20. ábra). A zord napok számának magyarországi átlaga az évszázad végére 10 nappal is csökkenhet (20. ábra).



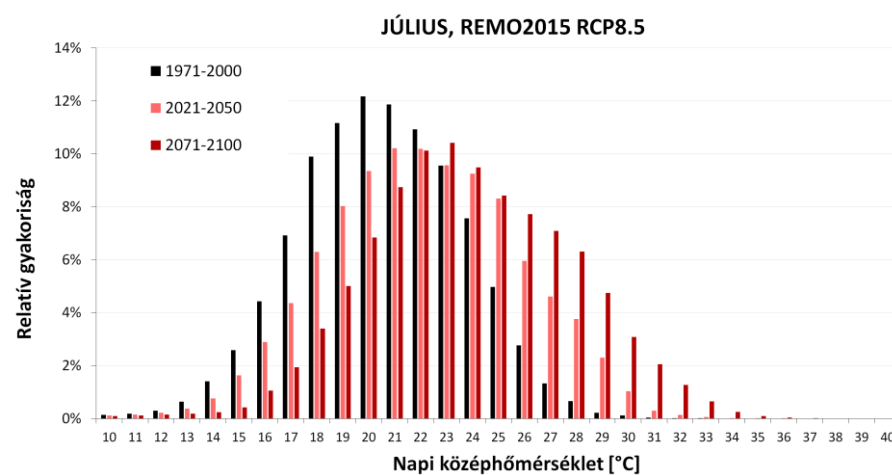
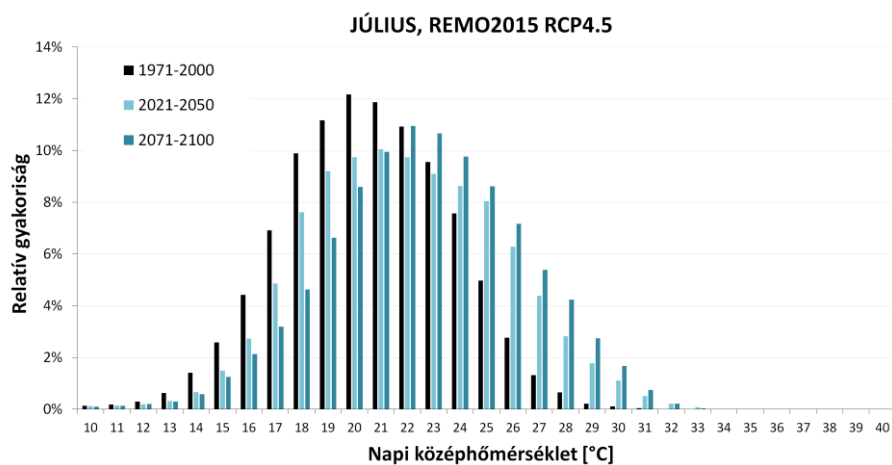
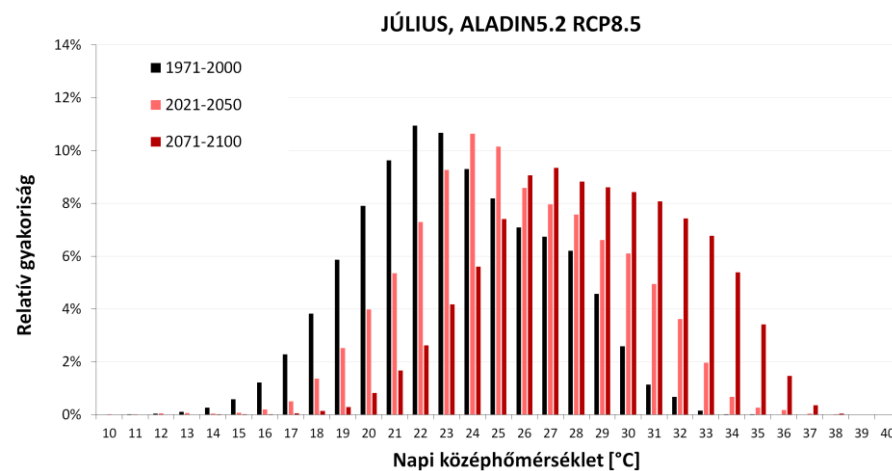
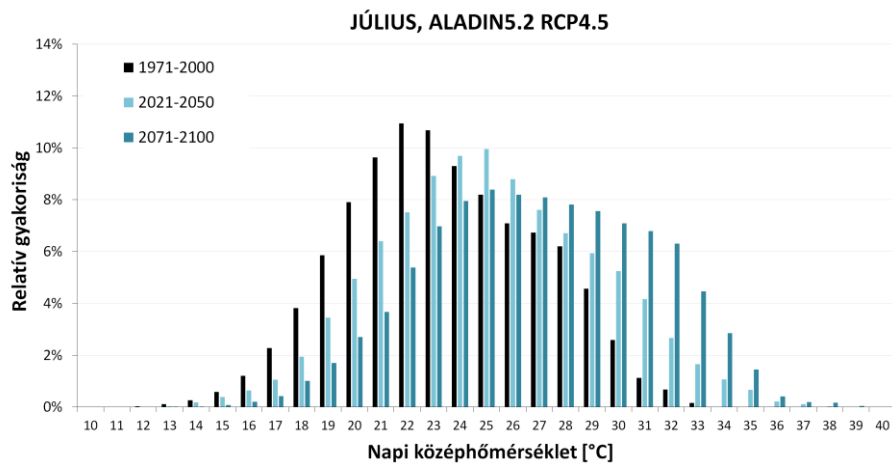
**12. ábra.** Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet-változás értékei (°C) 2021 és 2050 között. Referencia-időszak: 1971–2000.



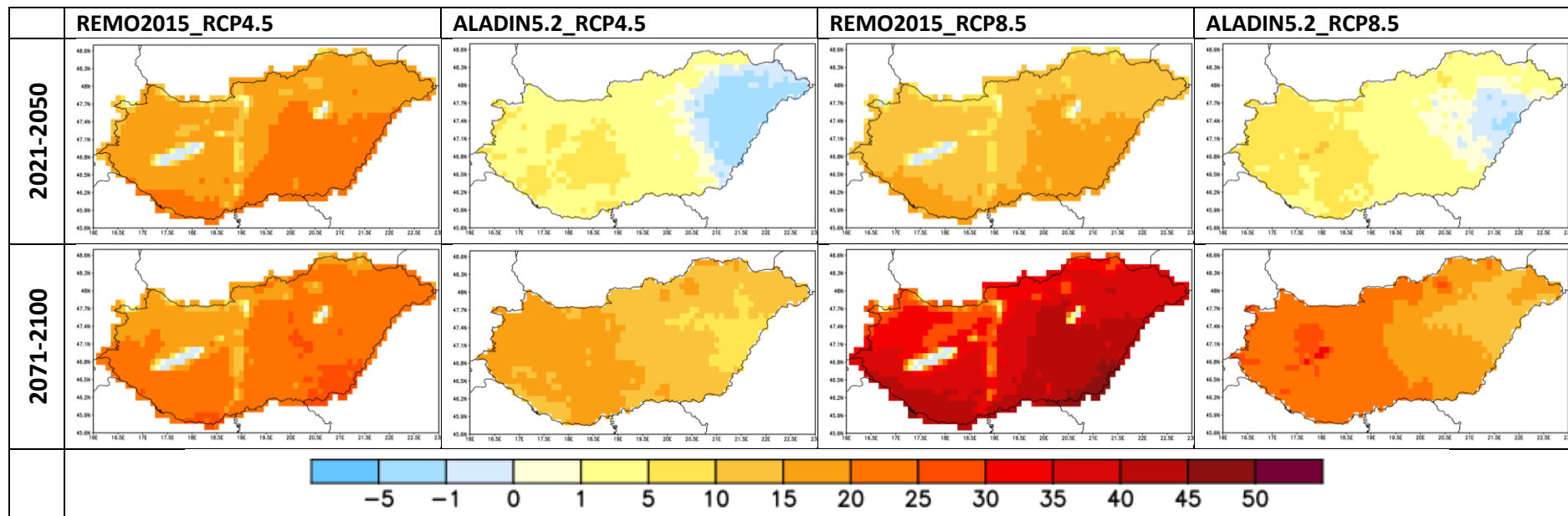
**13. ábra.** Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet-változás értékei (°C) 2071 és 2100 között. Referencia-időszak: 1971–2000.



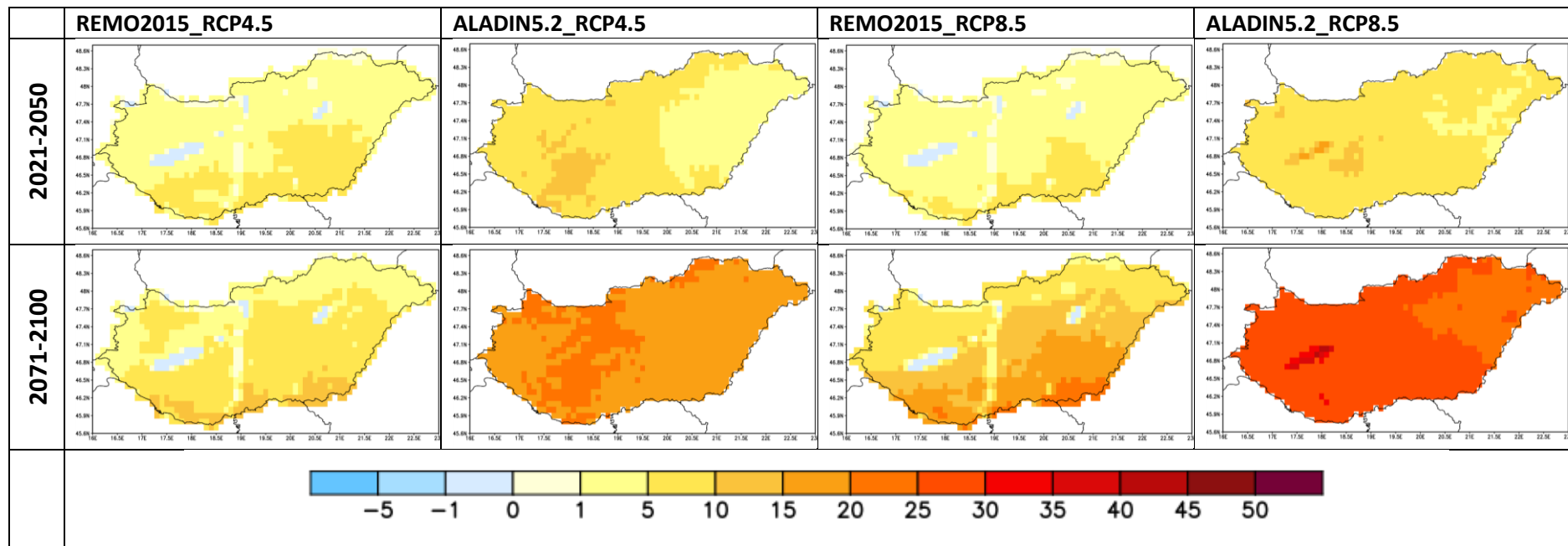
**14. ábra.** A januári napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) Magyarországon az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.



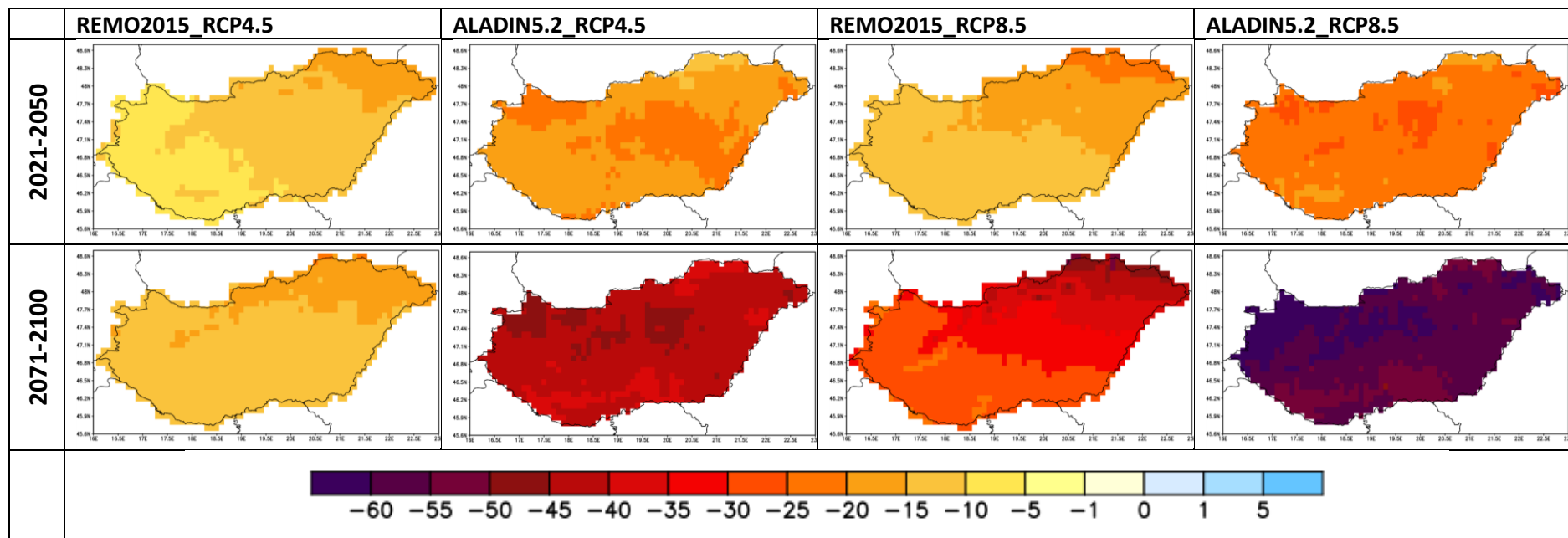
**15. ábra.** A júliusi napi középhőmérséklet értékeinek relatív gyakorisága (%) Magyarországon az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.



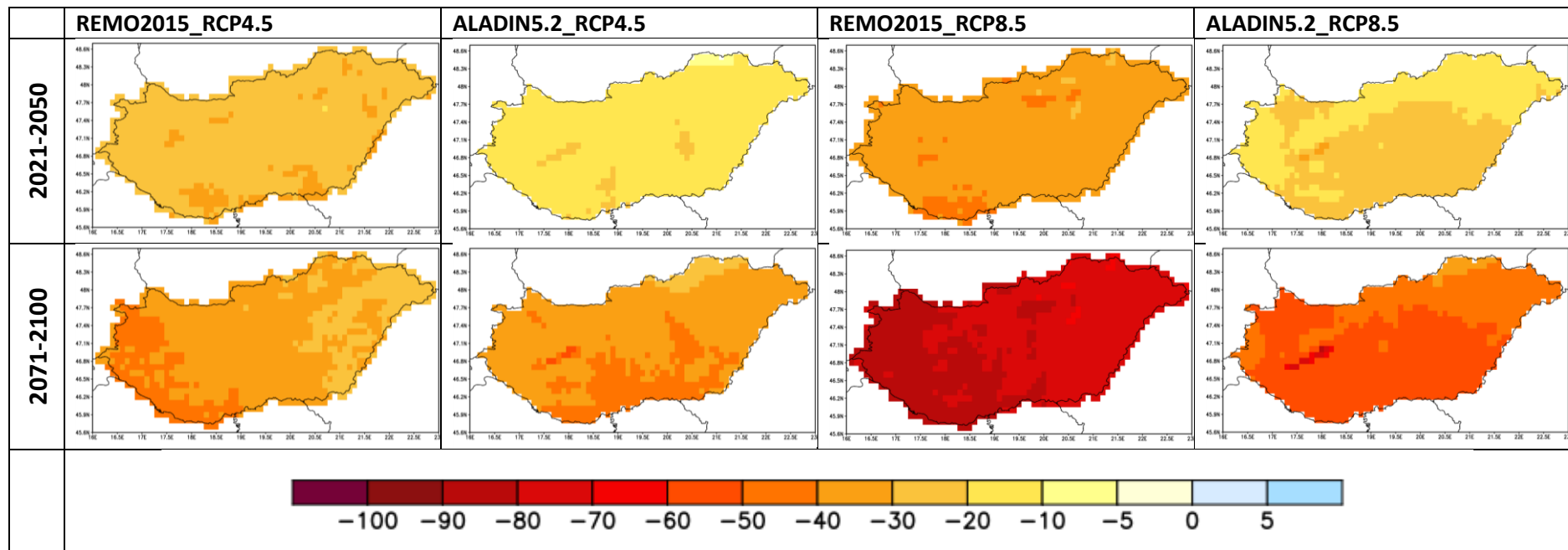
16. ábra. A nyári napok ( $T_{max} > 25\text{ °C}$ ) éves számának változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



17. ábra. A hőségnapok ( $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) éves számának változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

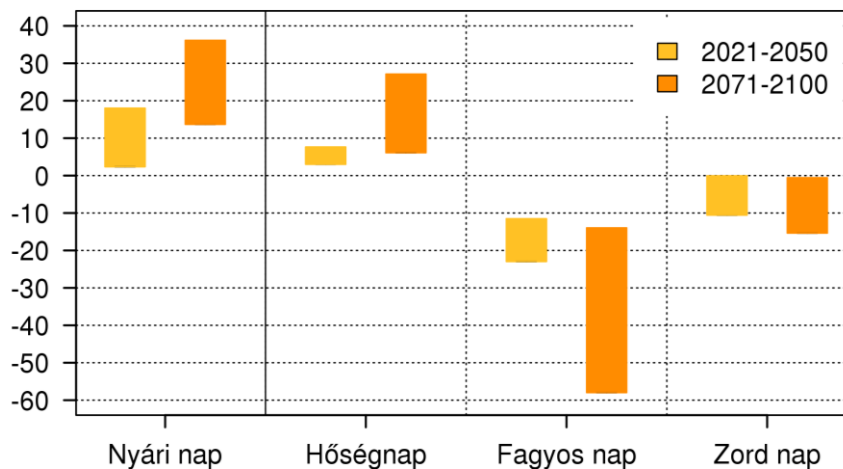


18. ábra. A fagyos napok ( $T_{min} < 0^{\circ}C$ ) éves számának változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



19. ábra. A fagyos napok ( $T_{min} < 0^{\circ}C$ ) éves számának relatív változása (%) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



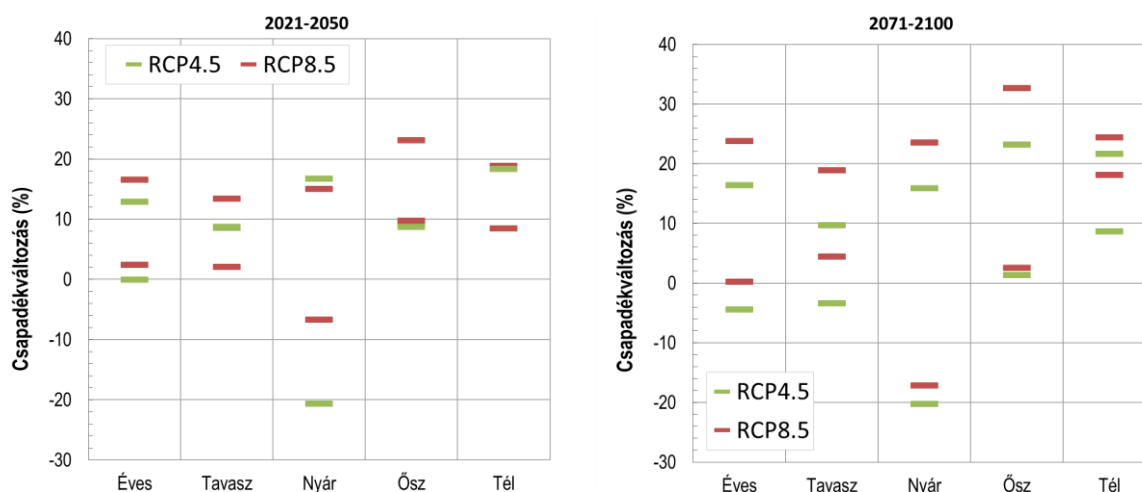


**20. ábra.** A fagyos napok ( $T_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ ), a zord napok ( $T_{min} < -10^{\circ}\text{C}$ ), a nyári napok ( $T_{max} > 25^{\circ}\text{C}$ ) és a hőségnapok ( $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) éves számának átlagos magyarországi változása (nap) 2021–2050-ben és 2071–2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referenciaidőszakhoz viszonyítva.

## 4.2 Csapadék

Összetett leírása miatt a csapadék projekciók bizonytalansága nagy. A **21. ábrán** látható, hogy a 2021–2050 időszakban a nyarat kivéve minden évszakban csapadéknövekedést mutatnak a modellszimulációk. A legnagyobb növekedést ősszel várjuk 9-23% közötti relatív változással, télen 9-19%, tavasszal pedig 9-13%-os növekedés jelenik meg. A nyári változás előjelében azonban már nem egyeznek meg a modellek: míg az ALADIN5.2 modell 15-17%-os növekedést jelez, addig a REMO2015 modell 7–21%-os csökkenést vetít előre. A nyári növekedés egyes években elérheti a 100 %-ot, a csökkenés pedig meghaladhatja akár a 60 %-ot is (**28-29. ábra**). A század végére tavasszal is megjelenik némi bizonytalanság a csapadékváltozás előjelét illetően, hiszen a REMO2015\_RCP4.5 szerint 3%-os csökkenés is lehetséges, a másik három modellszimuláció azonban 4-19%-os csapadéknövekedést mutat. A legnagyobb növekedést továbbra is ősszel és télen várhatjuk (rendre 1-33% és 9-24%). Nyáron 17–20%-os csökkenés és 16-24%-os növekedés egyformán valószínű. A REMO2015\_RCP4.5 kiugró átlaghőmérséklet emelkedése a legnagyobb szárazodással párosul.

Ha megnézzük az évszakai változások időbeli fejlődését (**22. ábra**), akkor láthatjuk, hogy a 2021–2050-es téli csapadéknövekedés a REMO2015 esetében csak az időszak második felében indul be. A REMO2015 modell csapadéknövekedése az ALADIN5.2-höz képest tavasszal, ősszel és télen a század végére mérséklődik (tavasszal, az egyik scenárióval előjelet is vált). Tehát a csapadék nem folyamatosan nő vagy csökken az évszázad során. A nyár esetében a modellek egyértelmű szétválását a teljes XXI. században megfigyelhetjük.



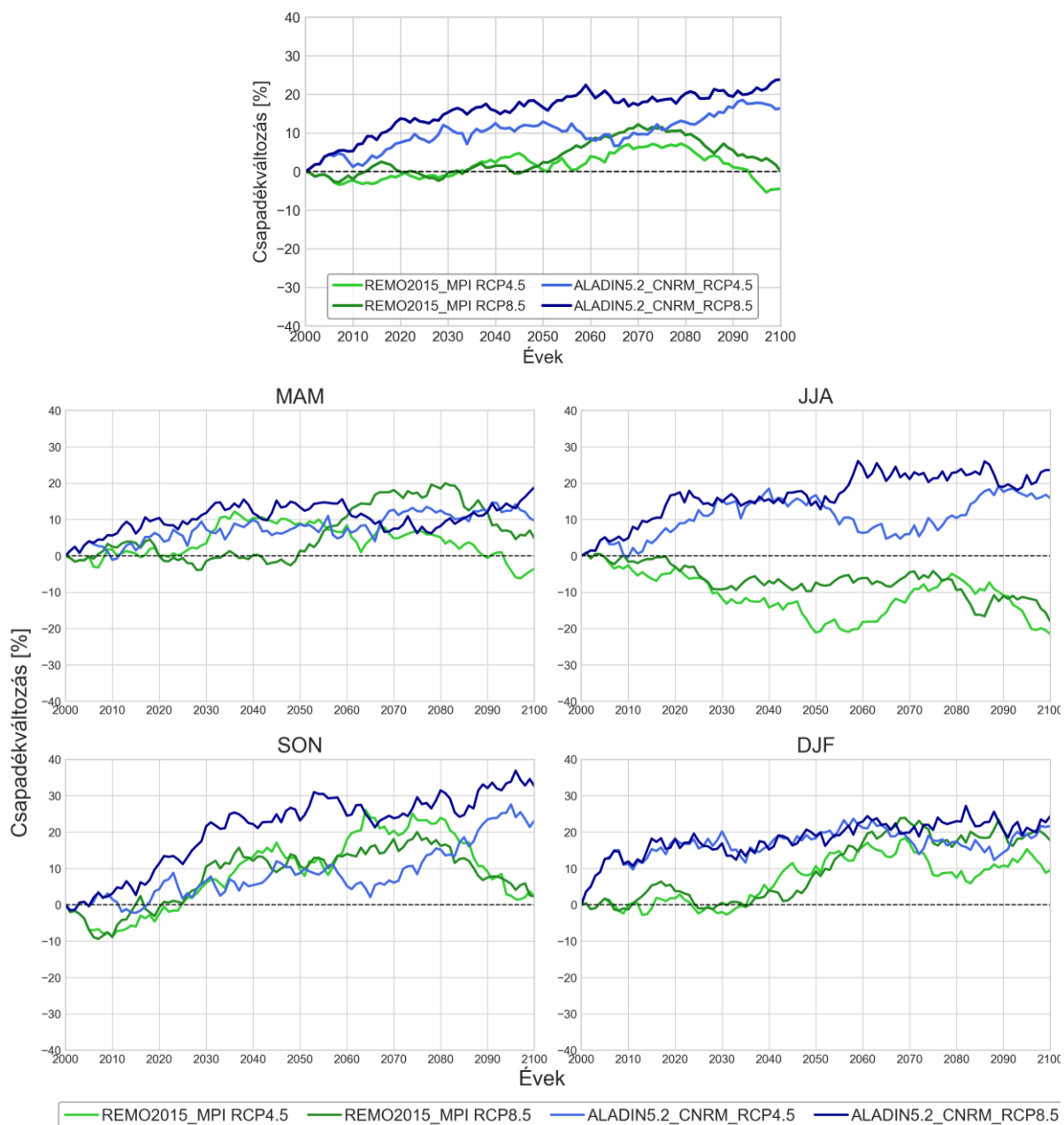
**21. ábra.** A magyarországi éves és évszakos csapadékváltozás (%) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

Ez kitűnik a nyári magyarországi térképeken is mind 2021–2050-re (**23. ábra**), mind 2071–2100-ra (**24. ábra**). A REMO2015\_RCP4.5-ös scenárióval mindkét időszakban országosan 40-60%-os szignifikáns csapadécsökkenést láthatunk, melynek magasabb értékei a század végére az ország keleti területeire tevődnek át. A REMO RCP8.5 forgatókönyvvel készült szimulációja is a keleti területek felett mutatja a legnagyobb csökkenést. Utóbbi scenárió a 2021–2050 időszakban tavasszal az ország középső területein mutat szárazodást, ami 2071–2100-ban az RCP4.5 forgatókönyvvel figyelhető meg. Az évszázad végén elsősorban ősszel is mutat 10% alatti csapadécsökkenést a REMO2015. Az ALADIN5.2 (egy-két foltot kivéve a Balaton és a délnyugati határ mentén) az összes évszakban csapadéknövekedést mutat, mely tavasztól ősziig jellemzően az ország keleti területein, míg télen, a Dunántúlon szignifikáns. A térbeli szórás a legnagyobb nyáron, a legkisebb pedig télen. A modellek közül a REMO2015 modell nagyobb térbeli szórással rendelkezik (**7. táblázat**).

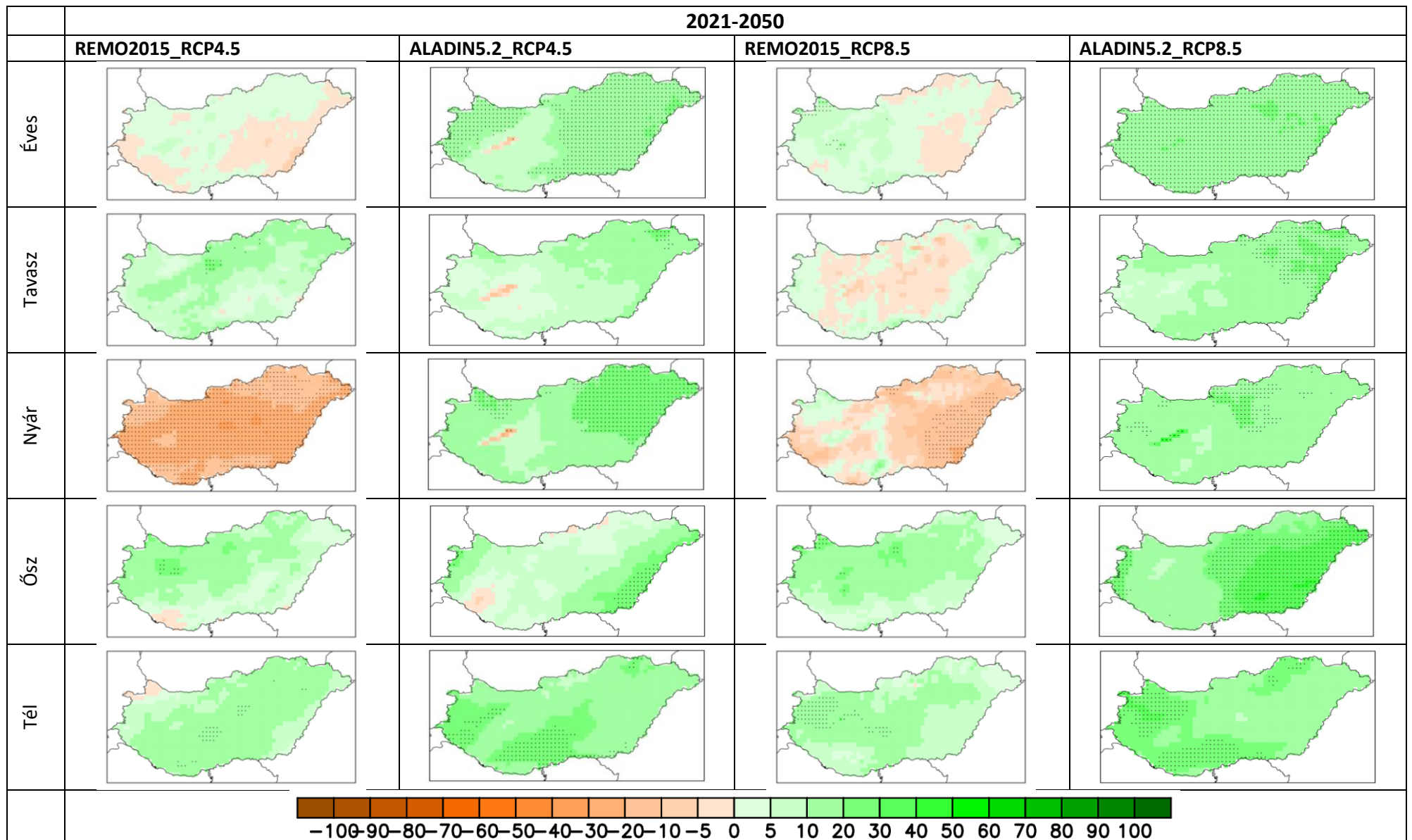
A csapadék éven belüli eloszlása nem változik (**25. ábra**): a legtöbb csapadékot júniusban, a legkevesebbet február-március hónapokban várhatjuk. Az őszi másodmaximum kevésbé lesz jellemző. Kiugró értékek augusztusban várhatóak a 2021–2050 időszakban (**26. ábra**): míg a referencia-időszakban a magyarországi átlagos csapadékösszeg nem haladta meg a 100 mm-t, addig 2021 és 2050 között egyes években akár a 200 mm-t is elérheti. Ugyanakkor előfordulhatnak a jövőben olyan évek, amikor februárban, márciusban, októberben vagy decemberben egyáltalán nem hullik csapadék.

A januári napi csapadékjellemzőket bemutató hisztogramokon (**30. ábra**) mindkét modell a kevésbé intenzív csapadékok növekedését és a 20 mm feletti csapadéku napok számának jelentős növekedését mutatja a referencia időszakhoz viszonyítva. A júliusi hisztogramokon (**31. ábra**) az ALADIN5.2 modell mérsékelt növekedést jelez a csapadékos napok számában, azonban a 8-15 mm közötti tartományban jelentősebb a gyakoriság növekedése. Ezzel együtt a 20 mm feletti csapadéku napok számának gyakorisága esetében

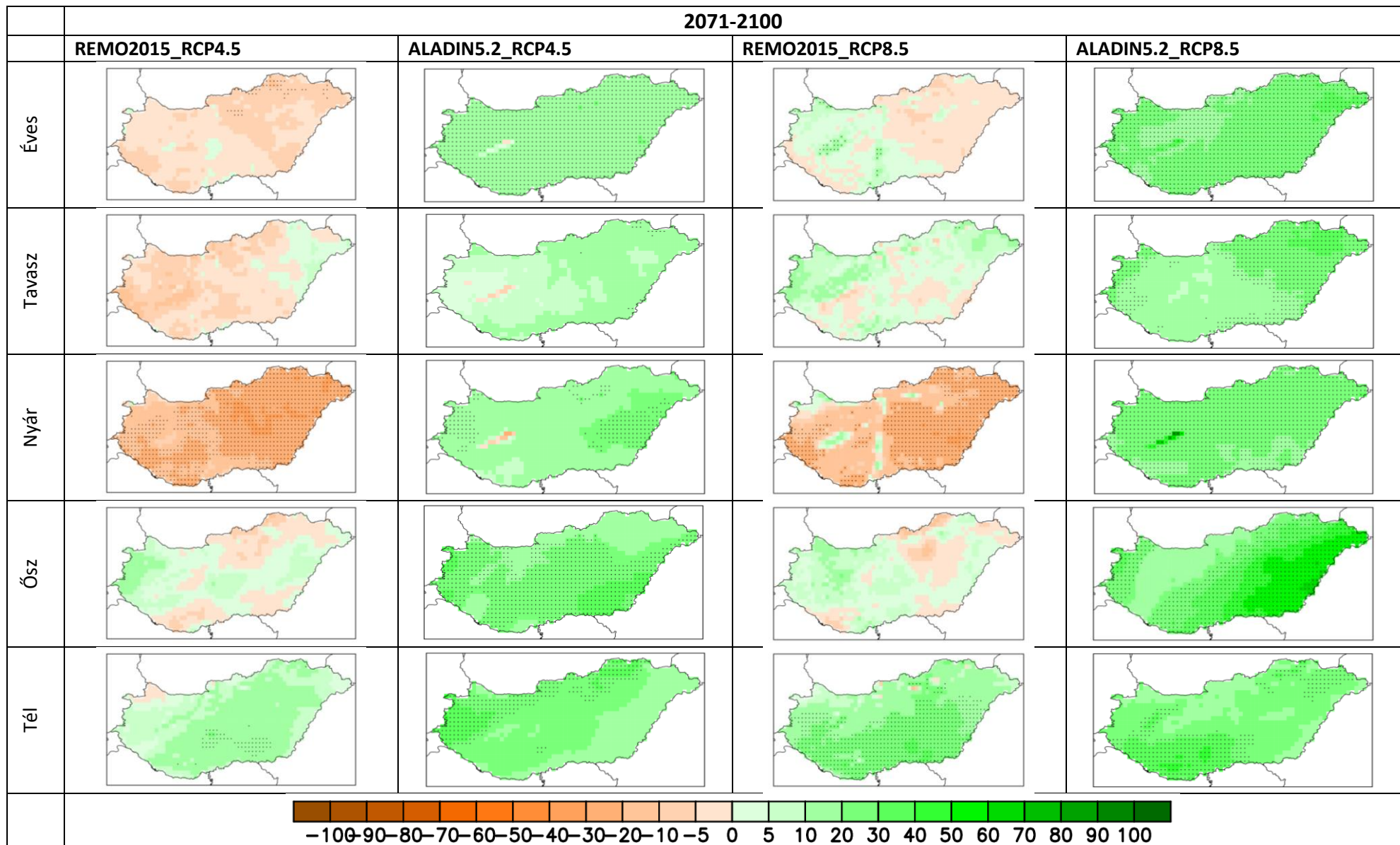
csökkenést mutat az ALADIN5.2. A REMO2015 modell a csapadékos napok relatív gyakoriságának egyenletes csökkenését mutatja.



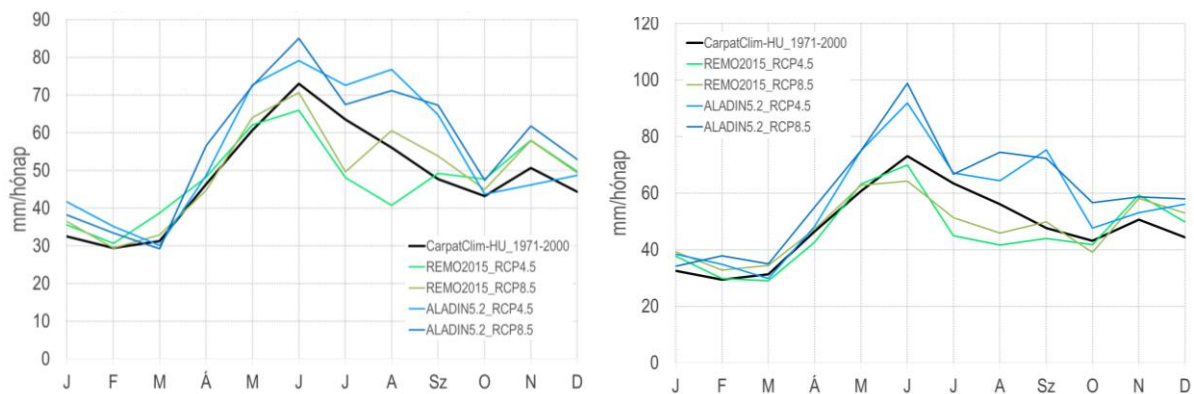
**22. ábra.** A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változásának (%) 30 éves mozgóátlaga a négy modellszimuláció alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.



**23. ábra.** Éves és évszakos átlagos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

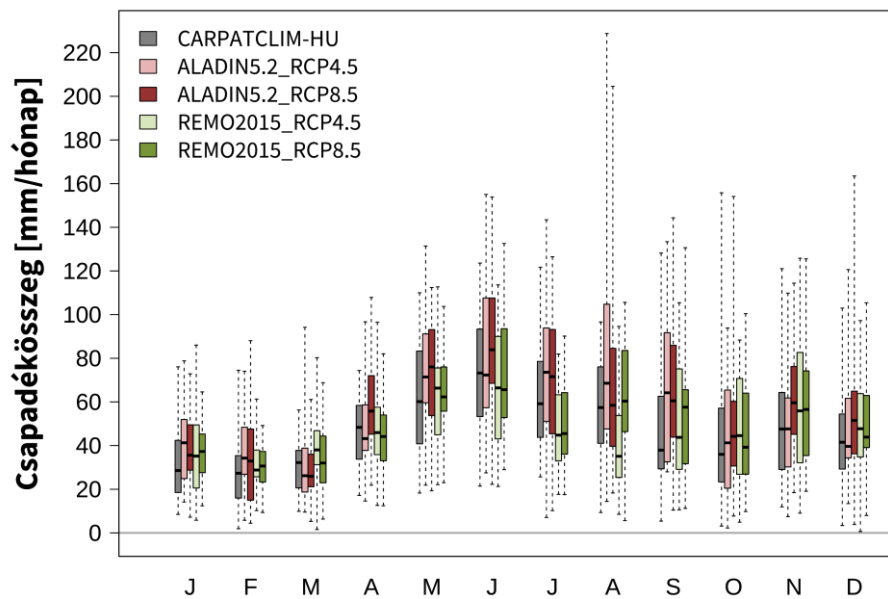


24. ábra. Éves és évszakos átlagos csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációi alapján. Referencia-időszak: 1971–2000.

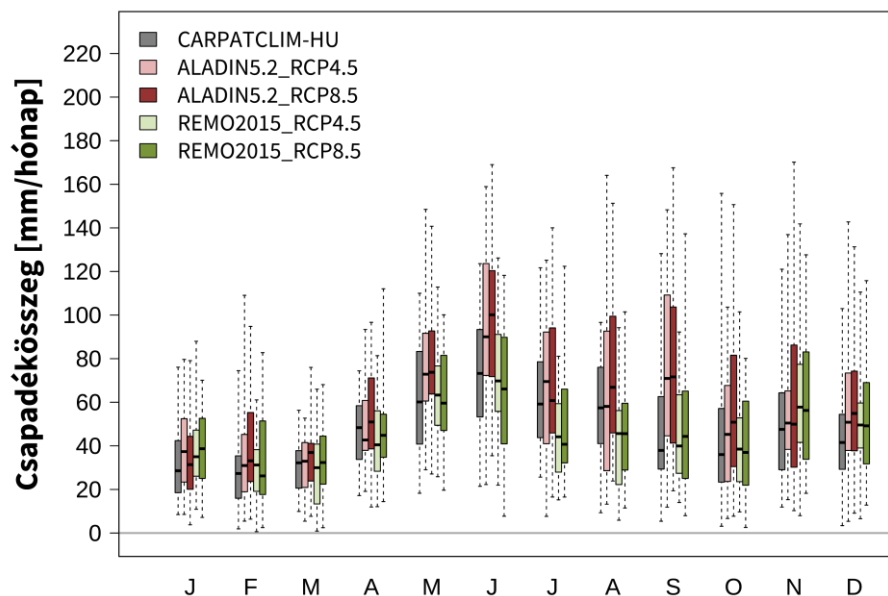


**25. ábra.** Magyarországi átlagos havi csapadékösszeg (mm/hónap) a 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra a négy modellszimuláció mérésekkel korrigált eredményei alapján és 1971–2000-ra mérések (CARPATCLIM-HU) alapján.

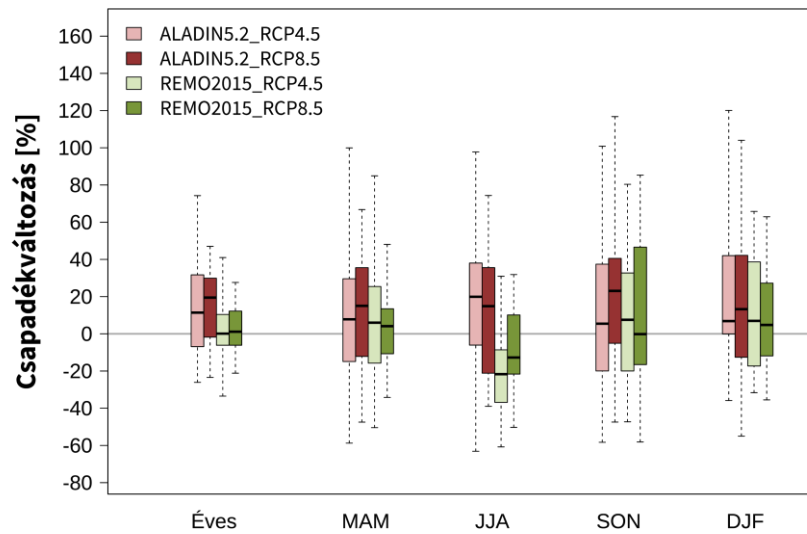
A validációs vizsgálatok alapján az ALADIN5.2 és a REMO2015 is alulbecsülte az egymást követő száraz napok maximális számát, a csapadékos napok és a nagy csapadékú napok előfordulását a CarpatClim-HU referencia adatbázissal összevetve. Az egymást követő száraz napok maximális hosszánál télen mutatkozott a legnagyobb eltérés (Bán et al., 2021b) a kísérletek között, amikor az ALADIN5.2 nagyobb, a REMO2015 kisebb értékeket adott, mint a mérések. A REMO2015 a csapadékos napok erőteljes csökkenését jelzi a jövőben (az évszázad végére nyáron helyenként akár 30-60%-kal; **32-33. ábra**), míg az ALADIN5.2 10-30%-os növekedést mutat). Nyáron a legnagyobb a szórás a projekciók között, ami akár 12 napos különbséget is jelenhet (**38. ábra**). A nagy csapadékú napok számával kapcsolatban (**34-35. ábra**) is hasonló megállapításra juthatunk, annyi kiegészítéssel, hogy az ALADIN5.2 a délkeleti országrészben az évszázad végére akár 100%-kal csapadékosabb lehet az 1971–2000 időszakhoz képest. Az egymást követő száraz napok maximális számában (**36-37. ábra**) a REMO2015 növekedést mutat, különösen nyáron, ellentétben az ALADIN5.2-vel.



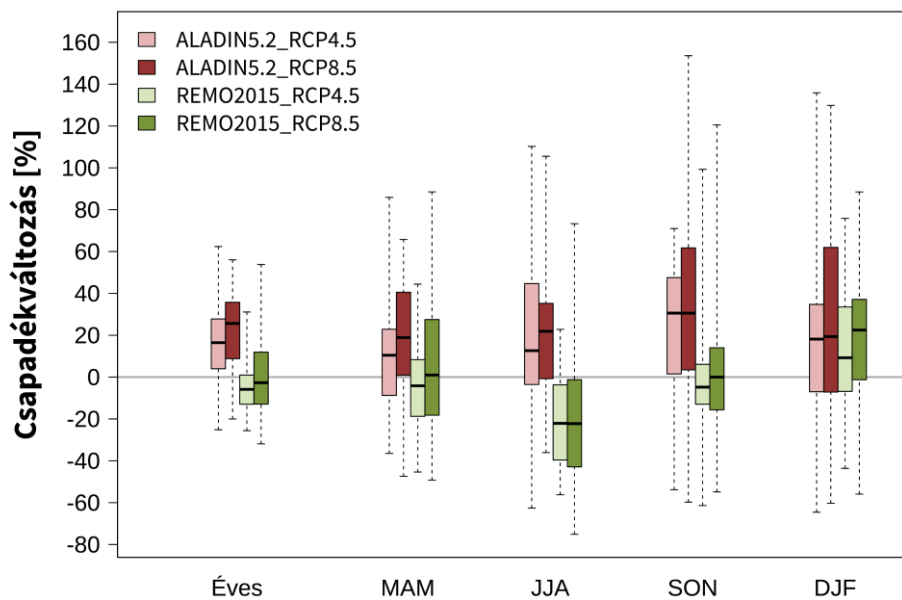
**26. ábra.** Az évenkénti magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korigált eredményei alapján 2021 és 2050 között.



**27. ábra.** Az évenkénti magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) a mérések alapján 1971 és 2000 között, az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk mérésekkel (CARPATCLIM-HU) korigált eredményei alapján 2071 és 2100 között.



**28. ábra.** Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlagos csapadékváltozás értékei (%) 2021 és 2050 között. Referencia-időszak: 1971–2000.

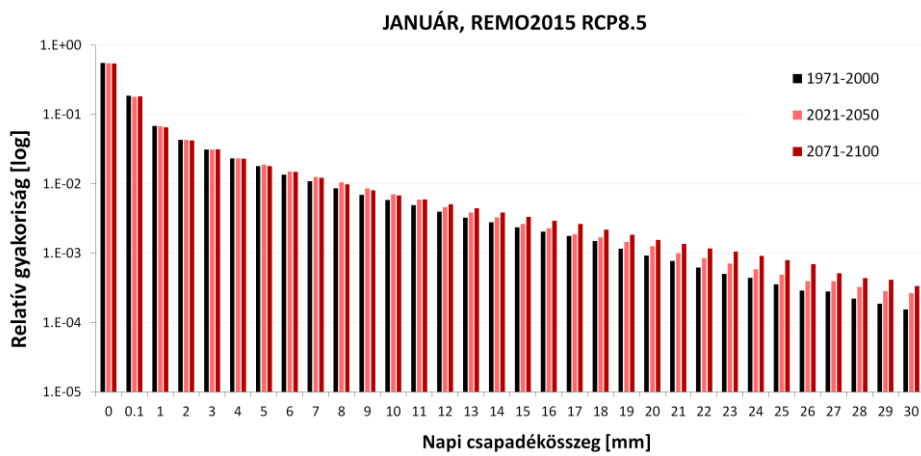
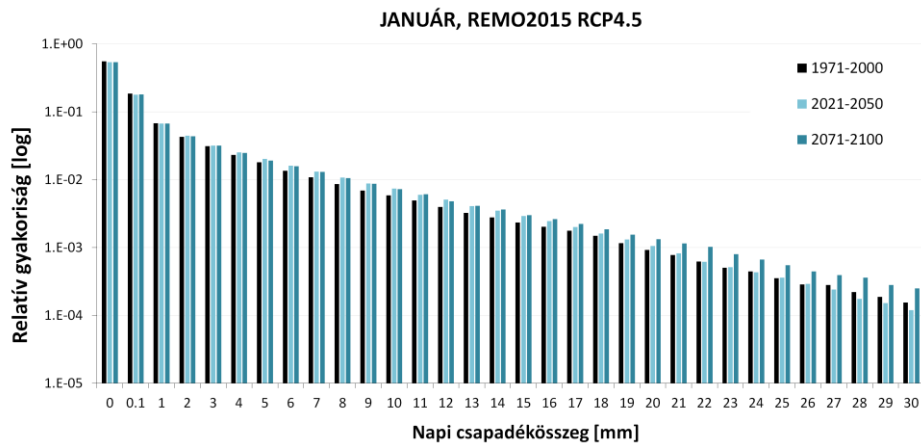
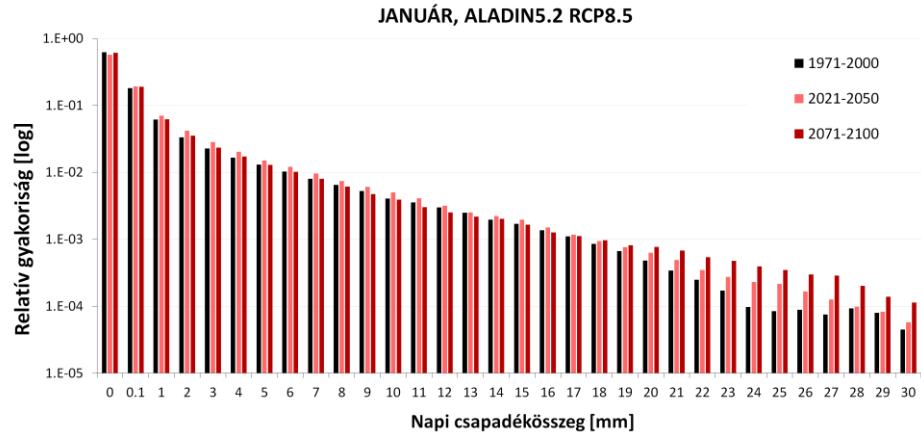
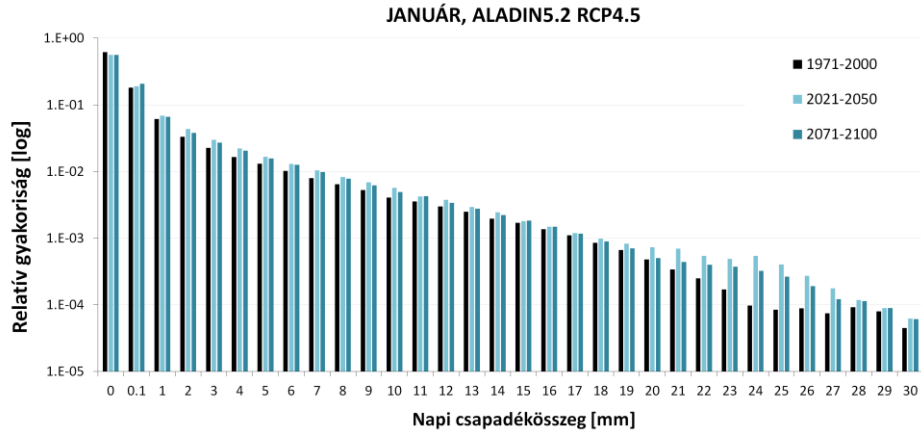


**29. ábra.** Az ALADIN5.2 és REMO2015 szimulációk évenkénti magyarországi éves és évszakos átlagos csapadékváltozás értékei (%) 2071 és 2100 között. Referencia-időszak: 1971–2000.

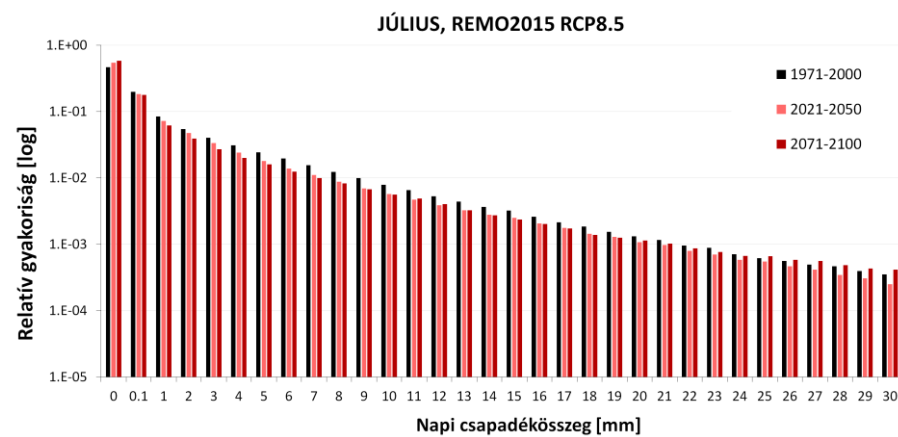
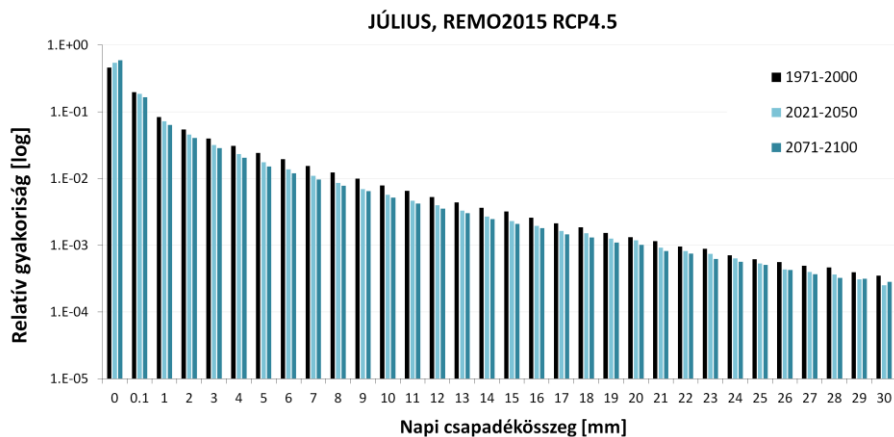
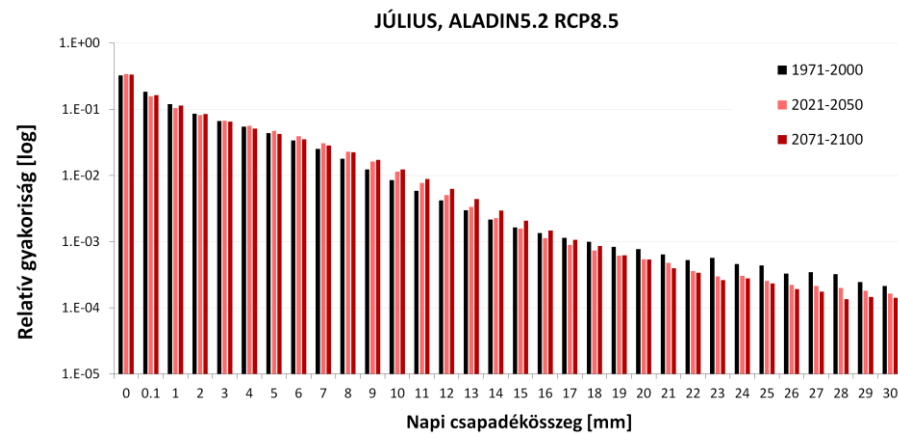
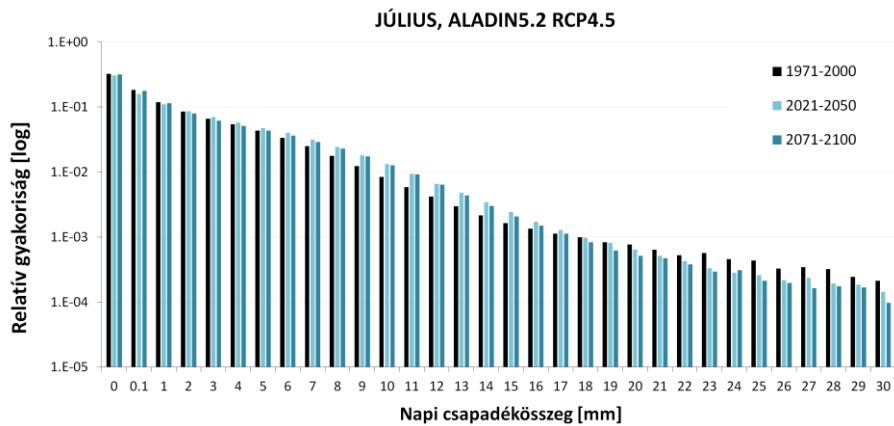


**7. táblázat.** A REMO2015 és ALADIN5.2 modellszimulációk eredményei alapján számított éves és évszakos átlagos csapadékösszeg időbeli és térbeli szórása (mm/hónap).

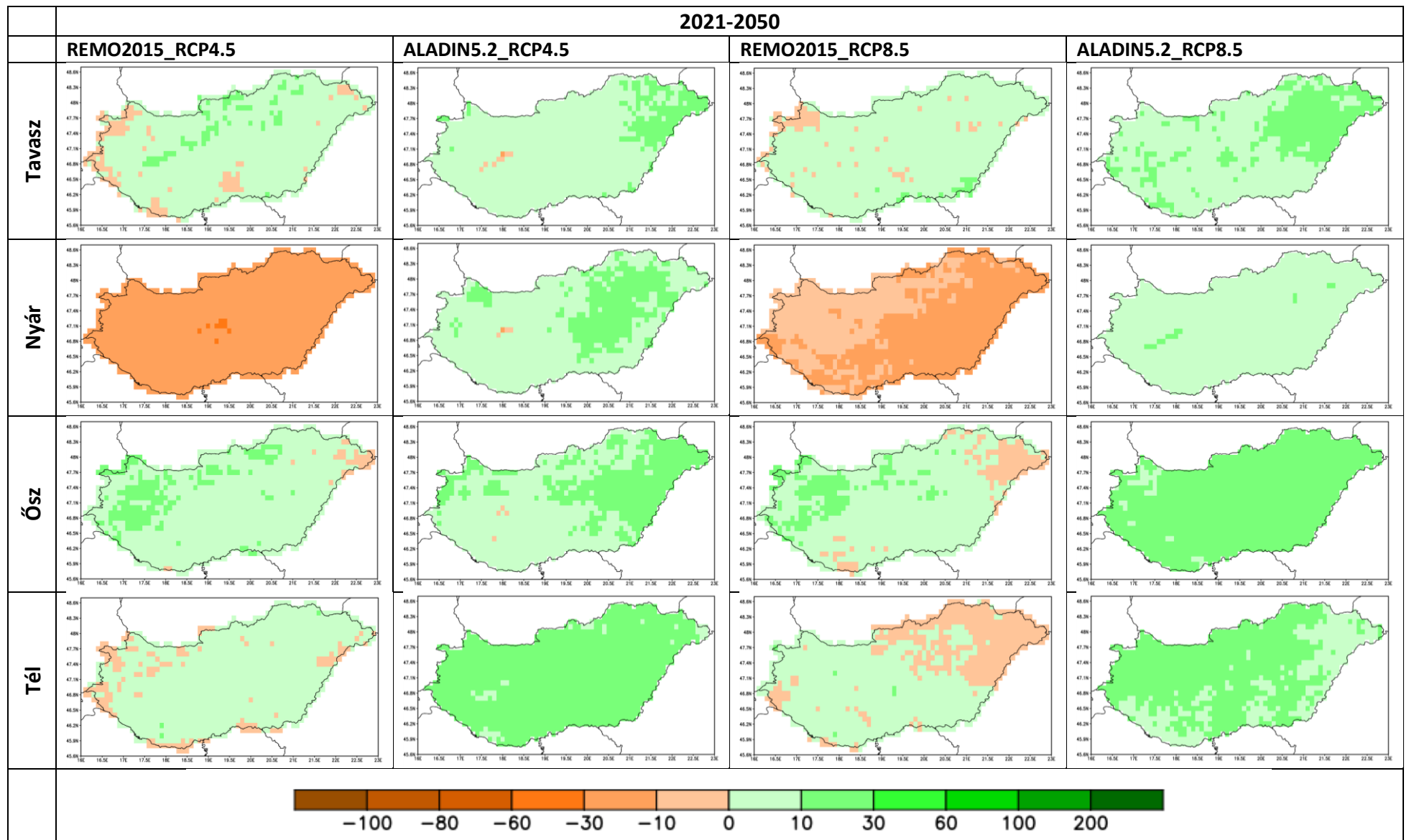
Csapadék (mm)							
Térbeli szórás							
Időszak	Szenárió	Modell	Éves	Tavaszi	Nyári	Ősz	Tél
1971-2000		REMO2015	10	12	21	12	12
		ALADIN5.2	5	9	9	10	7
2021-2050	RCP4.5	REMO2015	11	14	18	13	12
		ALADIN5.2	6	10	11	9	8
	RCP8.5	REMO2015	11	14	20	13	12
		ALADIN5.2	6	10	11	10	7
2071-2100	RCP4.5	REMO2015	10	13	17	13	12
		ALADIN5.2	6	10	12	12	8
	RCP8.5	REMO2015	11	15	19	13	13
		ALADIN5.2	6	11	11	10	8



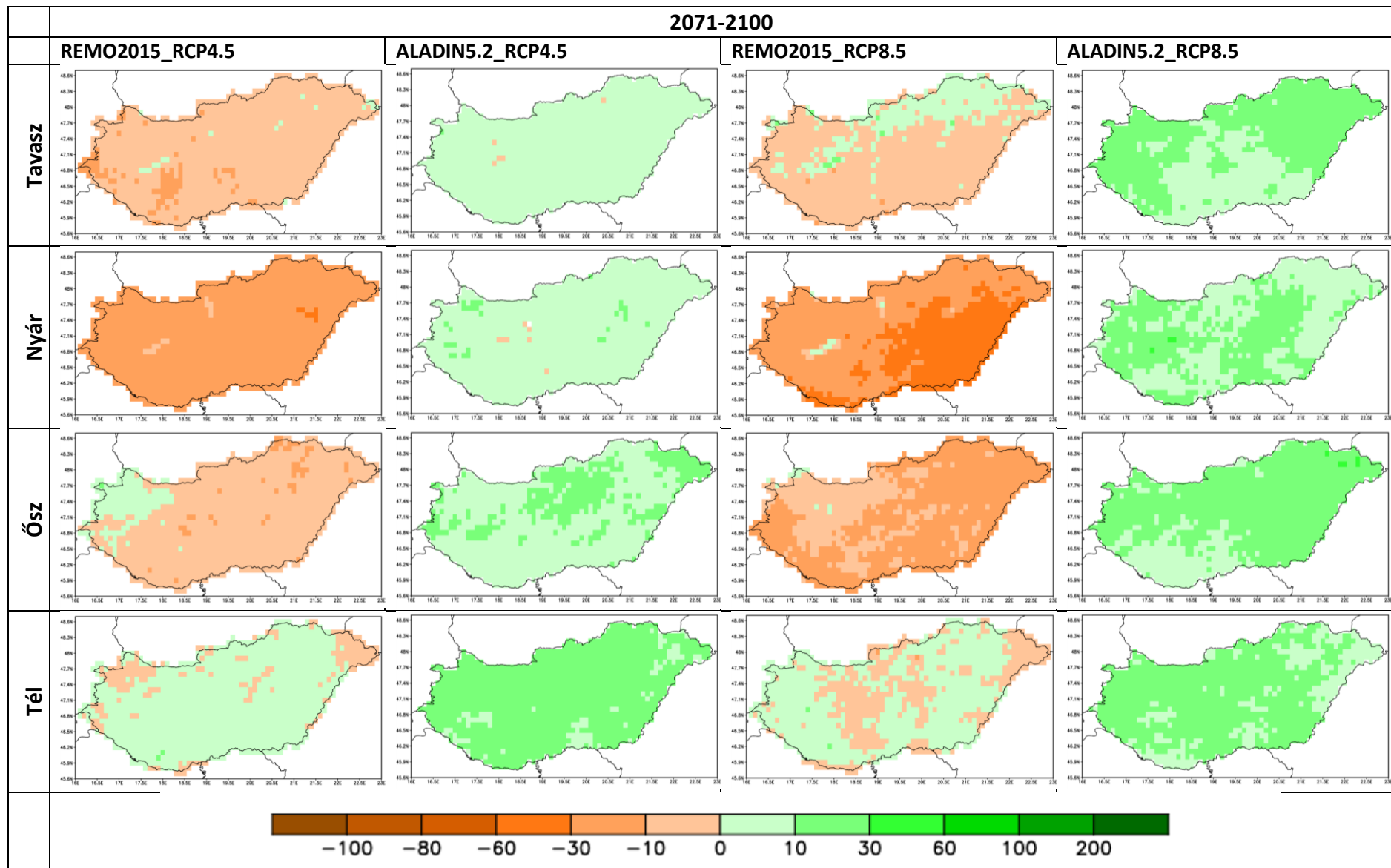
**30. ábra.** A januári napi csapadékösszeg értékeinek logaritmusos relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.



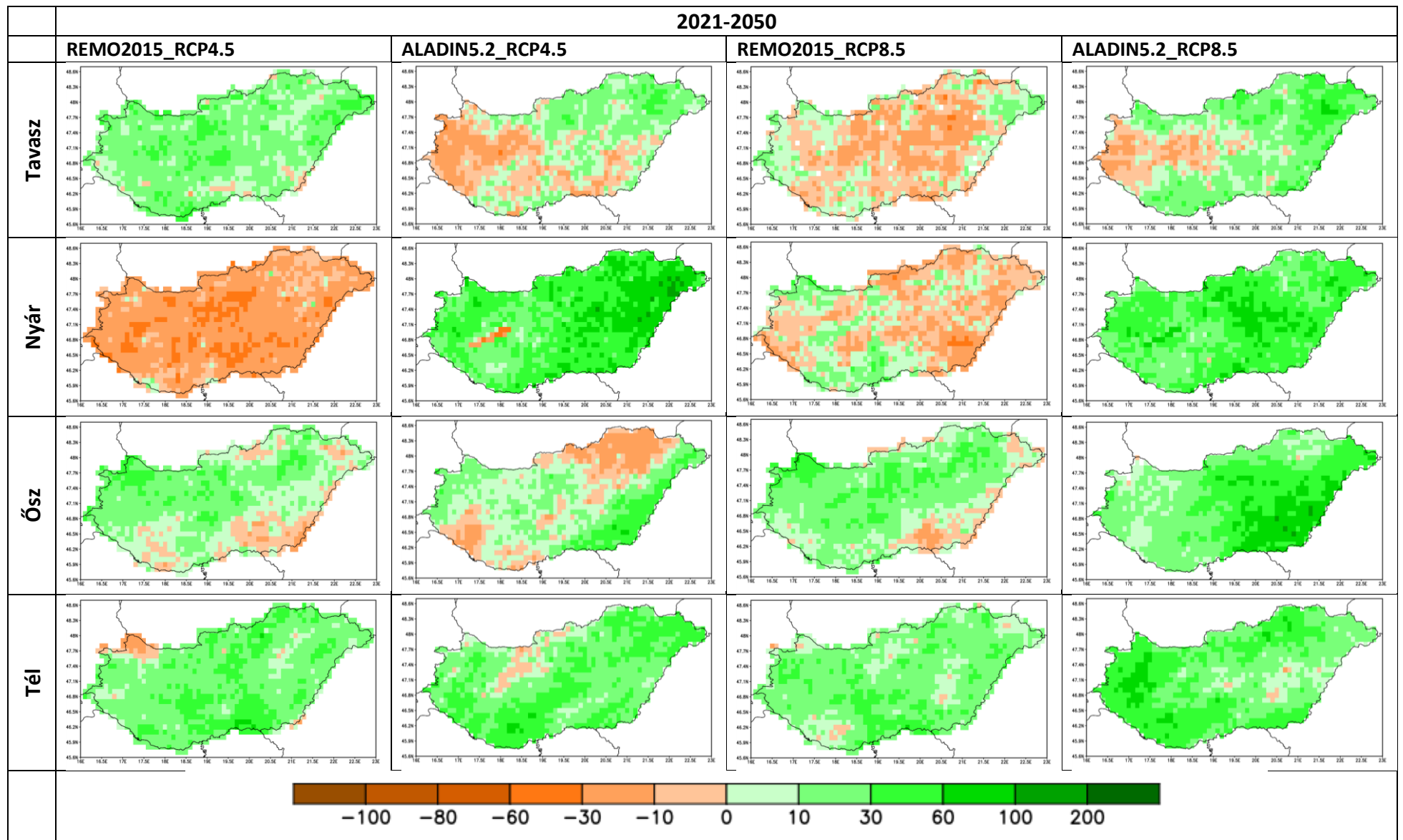
**31. ábra.** A júliusi napi csapadékösszeg értékeinek logaritmikus relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban az 1971–2000, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokban az ALADIN5.2 és REMO2015 modellszimulációinak eredményei alapján.



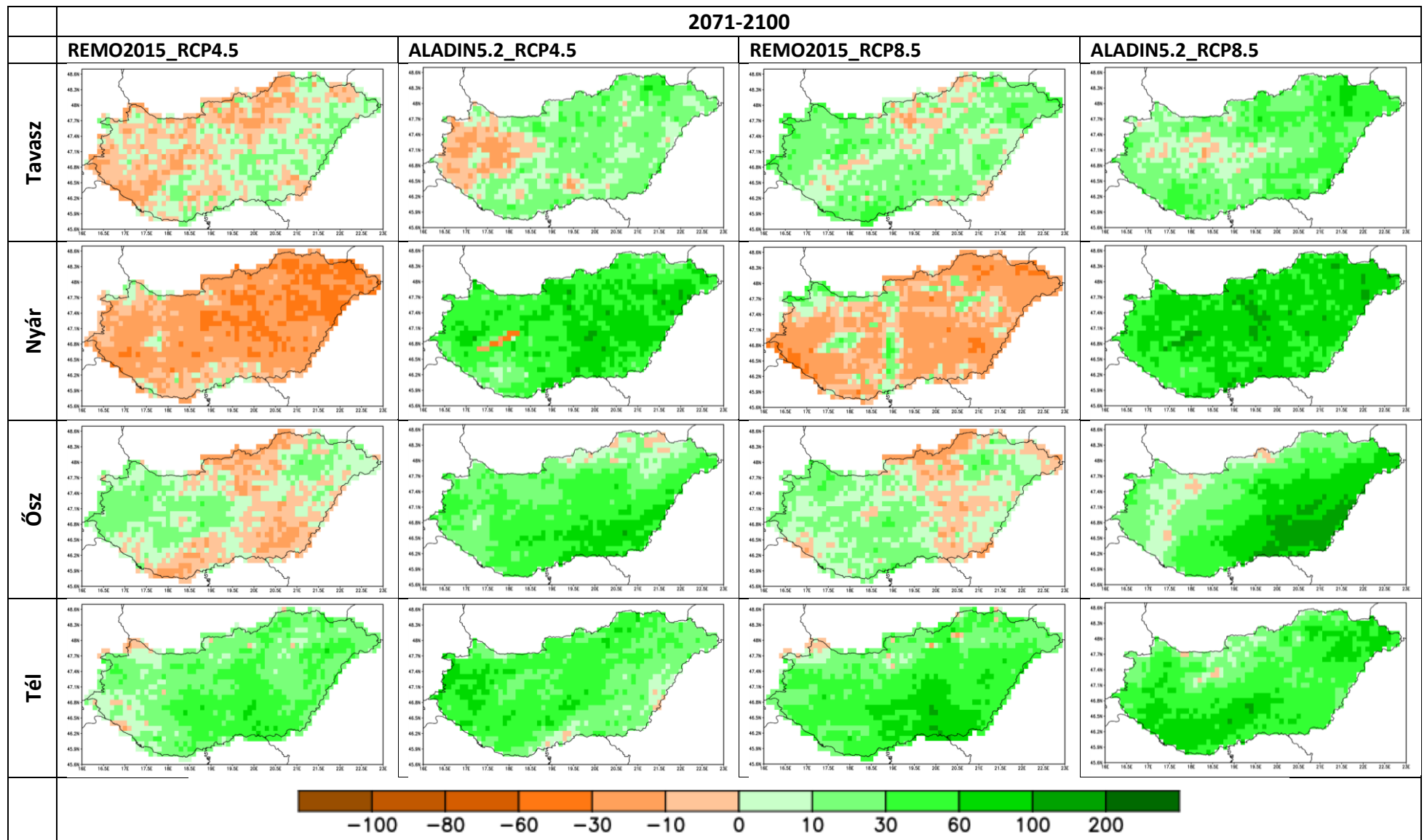
32. ábra. A csapadékos ( $R \geq 1$  mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



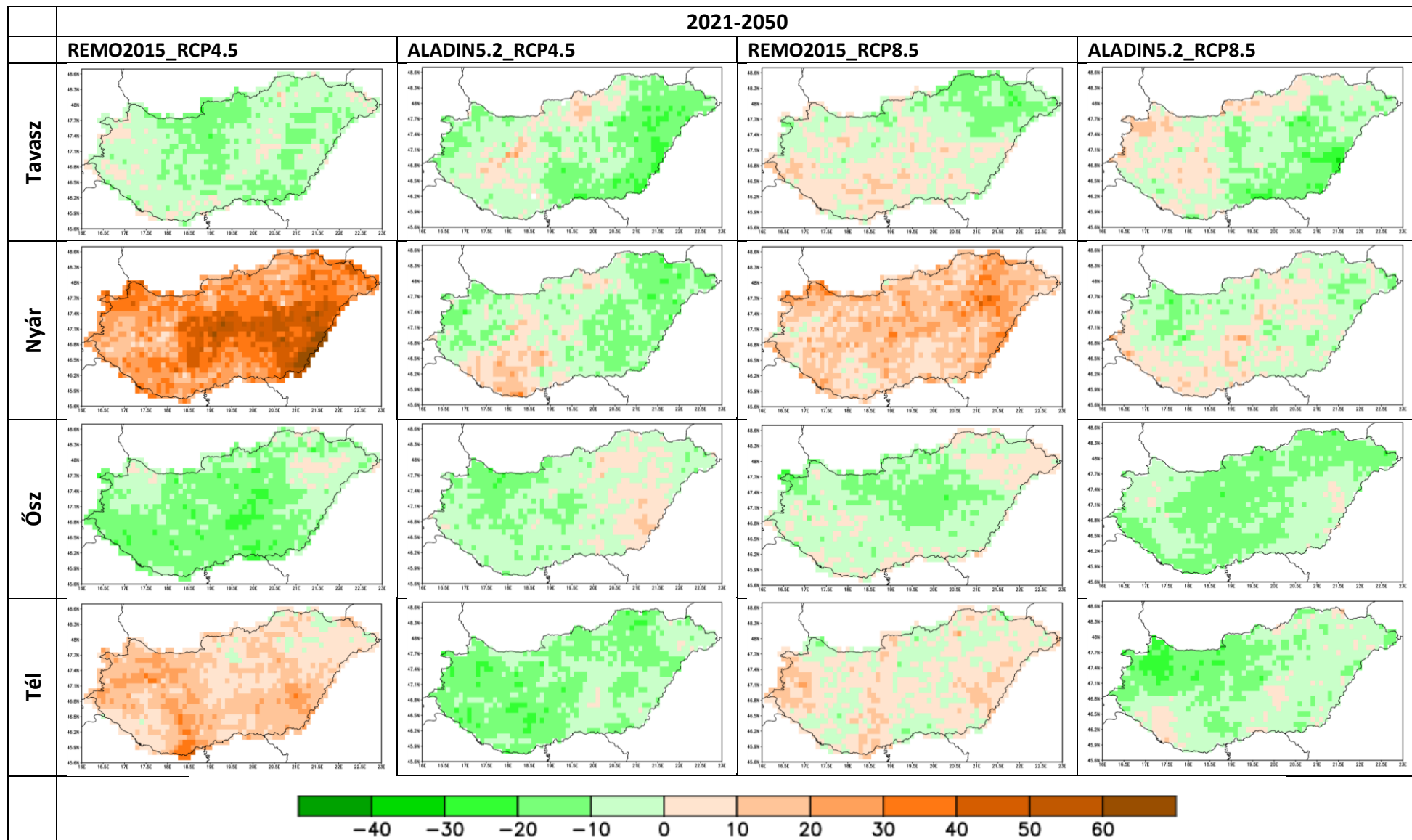
33. ábra. A csapadékos ( $R \geq 1$  mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



34. ábra. A nagy csapadék ( $R \geq 10$  mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

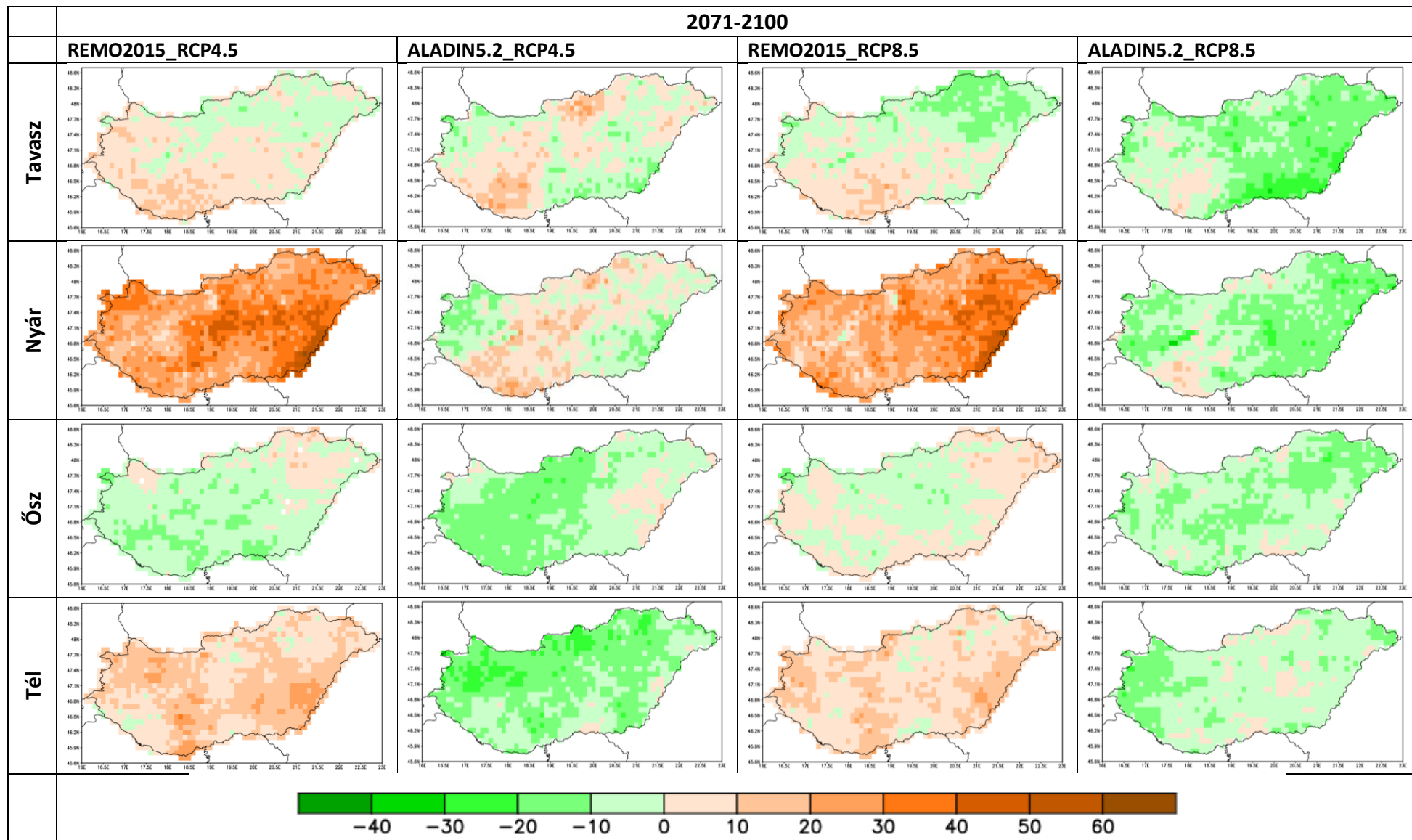


35. ábra. A nagy csapadékú ( $R \geq 10$  mm) napok évszakos gyakoriságának változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

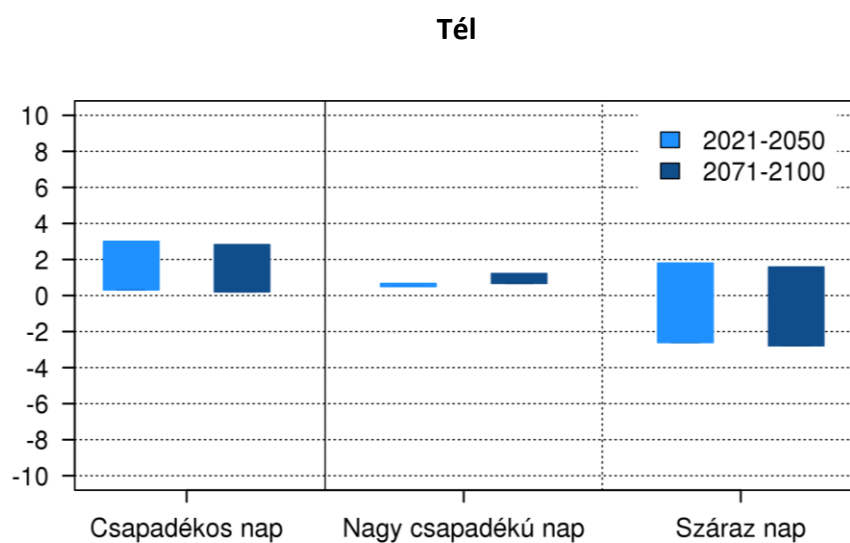
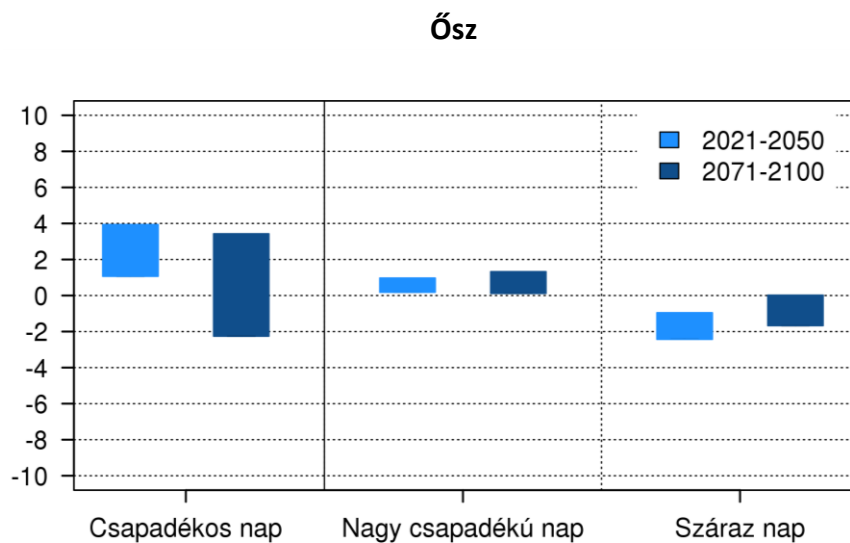
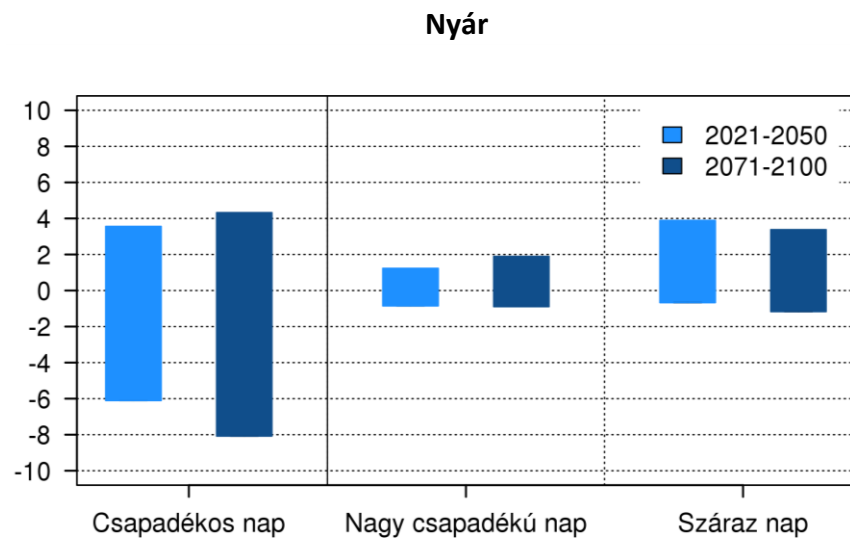
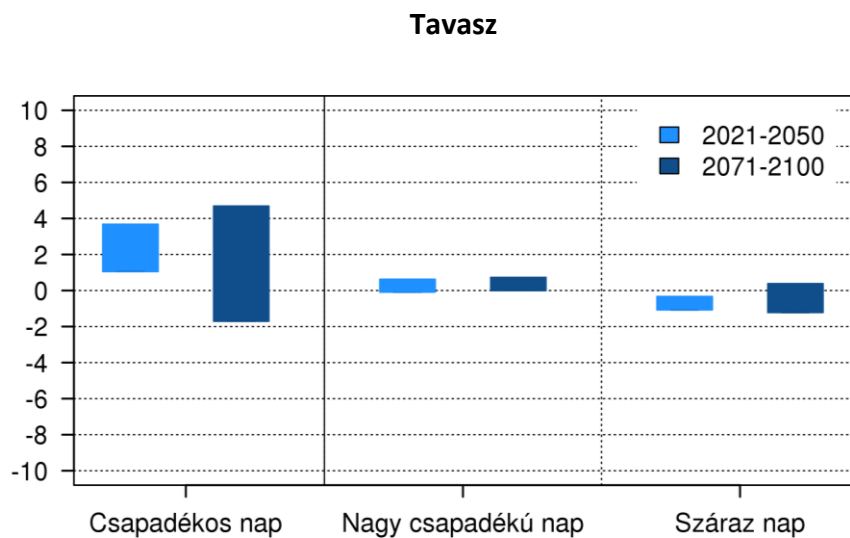


36. ábra. Az egymást követő száraz ( $R < 1$  mm) napok maximális évszakos számának változása (%) 2021–2050-re az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.





**37. ábra.** Az egymást követő száraz ( $R < 1$  mm) napok maximális évszakos számának változása (%) 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.



**38. ábra.** Az egymást követő száraz napok maximális évszakos számának ( $R < 1 \text{ mm}$ ), a nagy ( $R \geq 10 \text{ mm}$ ) csapadékú és a csapadékos ( $R \geq 1 \text{ mm}$ ) napok évszakos gyakoriságának magyarországi változása (nap) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN5.2 és a REMO2015 modellszimulációk eredményei alapján az 1971–2000 referencia-időszakhoz viszonyítva.

## 5. Összefoglalás

A KlimAdat projekt során 2016 és 2022 között azt tűztük ki célul, hogy feltérképezzük az éghajlatváltozás hazai hatásait új regionális klímamodell-szimulációkkal és ezek eredményeit elérhetővé tegyük a felhasználók számára. A projekt során új szimulációkat végeztünk az ALADIN-Climate 5.2 modellel, illetve adaptáltuk a REMO 2015-ös verziójú regionális klímamodell, amivel egy teljes modellezési folyamatot hajtottunk végre. Elsőként egy rövid tesztelési fázist követően a REMO2015-öt egy múltbeli időszakra futtattuk és eredményeit validáltuk. Ezt követően a modellekkel 10 km-es felbontáson készültek kísérletek két, az RCP4.5 mérsékelt, és az RCP8.5 magas kibocsátást feltételező antropogén forgatókönyvek használatával. Az eredményeiket 2021–2050-re és 2071–2100-ra értékeltük ki.

A fenti kísérletek eredményei alátámasztották a korábbi kutatás eredményeiben tapasztalt 1-2°C-os hőmérséklet-emelkedést a 2021-2050-es időszakra, mely az ország egészére szignifikáns. A század végére azonban országos átlagban 3-5°C közötti emelkedésre is számíthatunk. Habár a modellek térképes eredményei között tapasztalhatunk jelentős különbségeket, többségében Magyarország keleti-északkeleti tájain várható a nagyobb melegedés. Emellett jelentős növekedés várható a nyári napok és a hóhullámos napok számában is. Előbbi esetében a közeljövőben 2-18 nap, a század végére 14-36 nap éves növekedés lehetséges, míg utóbbi paraméter esetében pedig rendre 3-8 és 6-27 nap. Az évszázad végére a januári-februári átlaghőmérséklet minden szimuláció szerint és mindkét időszakban várhatóan 0 fok fölött fog alakulni, mely párhuzamba állítható a fagyos napok számának akár 90-100%-os csökkenésével az ország délnyugati részén.

A csapadék projekciók bizonytalansága megjelenik a modellszimulációk eredményeinek eltéréseiben. Tavasszal és ősszel zömmel mindkét modell alátámasztja az emelkedő csapadék tendenciát, majd 2080-tól a REMO modell a csökkenést valószínűsíti. Télen mindkét modell mindkét szimulációja egyetért a csapadék növekedésében a század végére. Ezzel szemben nyáron már a század elejétől kezdve az ALADIN5.2 modell csapadéknövekedést, a REMO2015 modell pedig csapadékcsökkenést vetít előre. Ez az eredmény egyértelműen rámutat a modell-együttesek használatának fontosságára. Az éghajlati indexek vizsgálata alapján a csapadék egyenetlen éves eloszlására számíthatunk, nyáron inkább szárazabb, ősszel és télen csapadékosabb napokra. A hőségnapok számának növekedésével párhuzamosan a száraz napok száma is várhatóan növekedni fog, bár ennek térbeli eloszlása bizonytalan.

## Irodalomjegyzék

- Bán, B., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., Somot, S., 2021a: ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results. *Időjárás* 125, 4, 647–673, DOI:10.28974/idojaras.2021.4.6.
- Bán B., Suga R., Megyeri-Korotaj O., 2021b: Az ALADIN5.2 és a REMO2015 regionális klímamodellek múltbeli időszakokra vonatkozó eredményeinek validációja. KLIMADAT project beszámoló.
- Bihari Z., Lakatos M., Szentimrey T., 2017: Felszíni megfigyelésekből készített rácsponti adatbázisok az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. *Léggör* 62, 4 148–151.
- Bougeault, P., 1985: A simple parameterization of the large-scale effects of cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.* 113, 2108–2121.
- Buntemeyer, L., Koldunov, N., Sieck, K., Teichmann, C., Kotlarski, S., Remedino, A. 2018: REMO 2015 MPI User Guide. Draft Version.
- Charnock, H., 1955: Wind stress on a water surface. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 81, 639–640.
- Colin, J., Déqué, M., Radu, R., Somot, S., 2010: Sensitivity study of heavy precipitations in Limited Area Model climate simulation: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus-A* 62, 591–604, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x.
- Csorvási A., Illy T., Sábitz J., Szabó P., Szépszó G., Zsebeházi G., 2016: A jövőre vonatkozó projekciók eredményeinek együttes kiértékelése, bizonytalanságok számszerűsítése. RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 51 p.
- Fouquart, Y., Bonnel, B., 1980: Computations of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization. *Contrib. Atmos. Phys.* 53, 35–62.
- Giorgetta, M. A., et al. (2013), Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 572–597, DOI:10.1002/jame.20038.
- Giorgi, F., Bates, G., 1989: The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Mon. Wea. Rev.* 117, 2325–2347.
- Illy T., Sábitz J., Szépszó G., 2015: Az ALADIN-Climate modellkísérletek eredményeinek validációja. RCMTÉR EEA-C13-10 projekt beszámoló, 19 p.
- 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.
- Jacob, D., Podzun, R., 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. *Meteorology and Atmospheric Physics* 63, 119–129.
- Krüzselyi, I., Bartholy, J., Horányi, A., Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabó, P., Szépszó, G., Torma, Cs., 2011: The future climate characteristics of the Carpathian Basin based on a regional climate model mini-ensemble, *Adv. Sci. Res.* 6, 69–73, DOI: 10.5194/asr-6-69-2011.
- McGill, R., Tukey, J.W., Larsen, W.A., 1978: Variations of Box Plots. *The American Statistician* 32, 12–16.
- Majewski, D., 1991: The Europa Modell of the Deutscher Wetterdienst. ECMWF Seminar of Numerical Methods in Atmospheric Models II, ECMWF, 147–191.

- 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.
- 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.
- Monin, A.S., Obukhov, A.M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Doklady Akademii Nauk SSSR Trudy Instituta Geofiziki* 151, 163–187.
- Morcrette, J.-J., Smith, L., Fourquart, Y., 1986: Pressure and temperature dependence of the absorption in longwave radiation parametrizations. *Beitr. Phys. Atmos.* 59, 455–469.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756, DOI: 10.1038/nature08823.
- 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.
- Nordeng, T.E., 1994: Extended versions of the convective parametrization scheme at ECMWF and their impact on the mean and transient activity of the model in the tropics. ECMWF Research Department, Technical Memorandum 206, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Reading, UK.
- Ricard, J.L., Royer, J.F., 1993: A statistical cloud scheme for use in an AGCM. *Annales Geophysicae* 11, 1095–1115.
- Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., and Schulzweida, U., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Report No. 18, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany.
- Smith, R.N.B., 1990: A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116, 435–460.
- Sundqvist, H., 1978: A parametrization scheme for non-convective condensation including precipitation including prediction of cloud water content. *Q. J. R. Met. Soc.* 104, 677–690.
- Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). *Proceedings of the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology* (eds.: S. Szalai, Z. Bihari, T. Szentimrey, M. Lakatos) 2007, COST Office, Luxemburg, ISBN 92-898-0033-X, 17–28.

- Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data. Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 2006, WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 123–130.
- Szépszó G., 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz–Meteorológia Program.
- 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, 19 p.
- Szopa, S., Y. Balkanski, M. Schulz, S. Bekki, D. Cugnet, A. Fortems-Cheiney, S. Turquety, A. Cozic, C. Déandreis, D. Hauglustaine, A. Idelkadi, J. Lathière, F. Lefevre, M. Marchand, R. Vuolo, N. Yan & J.-L. Dufresne, 2013: Aerosol and ozone changes as forcing for climate evolution between 1850 and 2100. *Clim. Dyn.* 40, 2223–2250.
- Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M., Fung, I., Jacob, D., Penner, J., 1997: Contribution of different aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness: Estimates from model results, *J. Geophys. Res.* 102, 23895–23915, DOI: 10.1029/97JD01864.
- Tiedtke, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large scale model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1779–1800.
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., Chauvin, F., 2013: The CNRM-CM5.1 Global Climate Model: Description and Basic Evaluation. *Clim. Dyn.* 40, 2091–2121, DOI: 10.1007/s00382-011-1259-y.
- Warrilow, D.A., Sangster, A.B., Slingo, A., 1986: Modelling of land surface processes and their influence on European climate. Technical Note DCTN 38, Dynamical Climatology Branch, United Kingdom Meteorological Office.