

# **A klímamodellekből levezethető indikátorok alkalmazási lehetőségei**

**Tanulmány**

**Szerzők:**

**Sábitz Judit, Szépszó Gabriella, Zsebeházi Gabriella,  
Szabó Péter, Illy Tamás**

Országos Meteorológiai Szolgálat



**Bartholy Judit, Pieczka Ildikó, Pongrácz Rita**

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék



**Felelős szerkesztő: Szépszó Gabriella**

Budapest, 2015. június

## Tartalomjegyzék

ÁBRAJEGYZÉK .....	2
TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	9
<b>1. BEVEZETÉS .....</b>	<b>11</b>
<b>2. AZ ÉGHAJLATI MODELLEZÉS TUDOMÁNYOS HÁTTERE .....</b>	<b>11</b>
2.1 Az éghajlati rendszer és annak leírása.....	11
2.2 Szimulációs bizonytalanságok .....	13
2.3 Nemzetközi együttműködések a bizonytalanság számszerűsítésére .....	15
<b>3. A HAZAI KLÍMAMODELLEZÉS ÉS ADAPTÁCIÓ TÖRTÉNETE.....</b>	<b>16</b>
<b>4. A HAZAI ÉGHAJLATI VISZONYOK JELLEMZÉSE A NATÉR KLÍMAMODELL-ADATAI ALAPJÁN .....</b>	<b>18</b>
4.1 Validáció .....	19
4.2 Projekciók.....	36
<b>5. ÖSSZEFOGLALÁS .....</b>	<b>96</b>
<b>6. KITEKINTÉS .....</b>	<b>97</b>
<b>7. SUMMARY .....</b>	<b>100</b>
<b>IRODALOM .....</b>	<b>109</b>

## Ábrajegyzék

- 1. ábra.** Az éghajlati rendszert érő globális kényszer hatására bekövetkező regionális éghajlatváltozást, illetve ennek modellezését bemutató sematikus ábra. .... 13
- 2. 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). .... 14
- 3. ábra.** A SRES forgatókönyvek figyelembevételével készített CMIP3 (balra) és az RCP-forgatókönyvek figyelembevételével készített CMIP5 (jobbra) globális modellszimulációk által jelzett globális átlaghőmérséklet-változás az 1986–2005 időszakhoz viszonyítva (Knutti és Sedlacek, 2012). Az azonos forgatókönyvvel készített modellszimulációk eredményeit azonos színű sáv tartalmazza, ezeken belül a modellszimulációk átlagát vastag vonal jelöli; zárójelben pedig a felhasznált modellek száma szerepel. .... 16
- 4. ábra.** Bal: az ALADIN-Climate (piros) és a RegCM (kék) regionális klímamodellek szimulációinak integrálási tartománya; jobb: a NATÉR modelladatainak magyarországi rácspontjai. .... 18
- 5. ábra.** A magyarországi havi átlagos hőmérséklet értékei (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis alapján 1961–1990-re. .... 21
- 6. ábra.** Az átlagos éves hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. .... 22
- 7. ábra.** Az átlagos tavaszi hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. .... 23
- 8. ábra.** Az átlagos nyári hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. .... 24
- 9. ábra.** Az átlagos őszi hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. .... 25
- 10. ábra.** Az átlagos téli hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. .... 26
- 11. ábra.** A különböző hőmérsékleti indexek (jobbra fent: fagyos napok, balra fent: nyári napok, lent: hőségnapok) éves gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (zöld) és a RegCM (piros) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely). .... 27

<b>12. ábra.</b> A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis alapján 1961–1990-re. ....	28
<b>13. ábra.</b> Az átlagos éves csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. ....	30
<b>14. ábra.</b> Az átlagos tavaszi csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. ....	31
<b>15. ábra.</b> Az átlagos nyári csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. ....	32
<b>16. ábra.</b> Az átlagos őszi csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. ....	33
<b>17. ábra.</b> Az átlagos téli csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns. ....	34
<b>18. ábra.</b> A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) tavaszi gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely). ....	35
<b>19. ábra.</b> A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) nyári gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely). ....	35
<b>20. ábra.</b> A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) őszi gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely). ....	36
<b>21. ábra.</b> A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) téli gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely). ....	36
<b>22. ábra.</b> A magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	38

<b>23. ábra.</b> Az éves átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	39
<b>24. ábra.</b> A tavaszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	40
<b>25. ábra.</b> A nyári átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	41
<b>26. ábra.</b> Az őszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	42
<b>27. ábra.</b> A téli átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	43
<b>28. ábra.</b> Az éves átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	44
<b>29. ábra.</b> A tavaszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	45
<b>30. ábra.</b> A nyári átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	46
<b>31. ábra.</b> Az őszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	47
<b>32. ábra.</b> A téli átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	48
<b>33. ábra.</b> A januári napi középhőmérséklet egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	49
<b>34. ábra.</b> A júliusi napi középhőmérséklet egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	50
<b>35. ábra.</b> A nyári napok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	52
<b>36. ábra.</b> A nyári napok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	53

<b>37. ábra.</b> A hőségnapok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	54
<b>38. ábra.</b> A hőségnapok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	55
<b>39. ábra.</b> A fagyos napok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	56
<b>40. ábra.</b> A fagyos napok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	57
<b>41. ábra.</b> Az extrém hideg napok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	58
<b>42. ábra.</b> Az extrém hideg napok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	59
<b>43. ábra.</b> 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.....	61
<b>44. ábra.</b> Az átlagos éves csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rádspontokat, ahol a változás szignifikáns.....	62
<b>45. ábra.</b> Az átlagos tavaszi csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rádspontokat, ahol a változás szignifikáns.....	63
<b>46. ábra.</b> Az átlagos nyári csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rádspontokat, ahol a változás szignifikáns.....	64
<b>47. ábra.</b> Az átlagos őszi csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rádspontokat, ahol a változás szignifikáns.....	65
<b>48. ábra.</b> Az átlagos téli csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rádspontokat, ahol a változás szignifikáns.....	66
<b>49. ábra.</b> Az átlagos éves csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rádspontokat, ahol a változás szignifikáns.....	67

- 50. ábra.** Az átlagos tavaszi csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns..... 68
- 51. ábra.** Az átlagos nyári csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns..... 69
- 52. ábra.** Az átlagos őszi csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns..... 70
- 53. ábra.** Az átlagos téli csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns..... 71
- 54. ábra.** A januári napi csapadékösszeg egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján..... 72
- 55. ábra.** A júliusi napi csapadékösszeg egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján..... 73
- 56. ábra.** A csapadékos napok átlagos tavaszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást..... 76
- 57. ábra.** A csapadékos napok átlagos nyári számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást..... 77
- 58. ábra.** A csapadékos napok átlagos őszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást..... 78
- 59. ábra.** A csapadékos napok átlagos téli számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást..... 79
- 60. ábra.** A nagy csapadékú napok átlagos tavaszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást..... 80
- 61. ábra.** A nagy csapadékú napok átlagos nyári számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM

regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.....	81
<b>62. ábra.</b> A nagy csapadékú napok átlagos őszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.....	82
<b>63. ábra.</b> A nagy csapadékú napok átlagos téli számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.....	83
<b>64. ábra.</b> Az extrém nagy csapadékú napok átlagos tavaszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	84
<b>65. ábra.</b> Az extrém nagy csapadékú napok átlagos nyári számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	85
<b>66. ábra.</b> Az extrém nagy csapadékú napok átlagos őszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	86
<b>67. ábra.</b> Az extrém nagy csapadékú napok átlagos téli számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	87
<b>68. ábra.</b> Az átlagos tavaszi csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ..	88
<b>69. ábra.</b> Az átlagos nyári csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ..	89
<b>70. ábra.</b> Az átlagos őszi csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ..	90
<b>71. ábra.</b> Az átlagos téli csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ..	91
<b>72. ábra.</b> Az egymást követő száraz napok átlagos tavaszi hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	92
<b>73. ábra.</b> Az egymást követő száraz napok átlagos nyári hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és	



RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	93
<b>74. ábra.</b> Az egymást követő száraz napok átlagos őszi hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	94
<b>75. ábra.</b> Az egymást követő száraz napok átlagos téli hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást. ....	95
<b>Fig. 1.</b> Monthly mean temperature values (°C) over Hungary for 1961–1990 based on observations, for 2021–2050 and 2071–2100 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Future values are calculated as sum of observation values in the reference period and projected changes. ....	102
<b>Fig. 2.</b> Relative frequency of January (top) and July (bottom) daily mean temperature values (%) in gridpoints over Hungary for 1961–1990, 2021–2050 and 2071–2100 based on results of ALADIN-Climate (left) and RegCM (right) regional climate models. ....	103
<b>Fig. 3.</b> Monthly mean precipitation amounts (mm) over Hungary for 1961–1990 based on observations, for 2021–2050 and 2071–2100 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Future values are calculated from observation reference values multiplied by projected changes. ....	104
<b>Fig. 4.</b> Mean change of autumn precipitation intensity (%) for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Grey dots represent significant changes. ....	107
<b>Fig. 5.</b> Mean change in maximum length of summer dry periods (%) for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Grey dots represent significant changes. ....	107

## Táblázatjegyzék

<b>1. táblázat.</b> Az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellekkel készített szimulációk jellemzői.....	18
<b>2. táblázat.</b> A NATÉR-ban a klímamodellek eredményeiből elérhető adatok. ....	19
<b>3. táblázat.</b> A magyarországi átlagos éves és évszakos hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. Sárga háttér jelöli az országos átlagban 1 °C-nál nagyobb eltéréseket, s a ± jel után a 30 évre vonatkozó időbeli szórás értéke szerepel. ....	20
<b>4. táblázat.</b> A vizsgált hőmérsékleti indexek. ....	27
<b>5. táblázat.</b> A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékelterés (mm/hónap) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. Sárga háttér jelöli az országos átlagban 10 mm/hónap értéknél nagyobb eltéréseket, s a ± jel után a 30 évre vonatkozó időbeli szórás értéke szerepel. ....	28
<b>6. táblázat.</b> A vizsgált csapadékindexek. ....	29
<b>7. táblázat.</b> A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. ....	38
<b>8. táblázat.</b> A különböző hőmérsékleti indexek átlagos magyarországi éves számának változása (nap) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.....	51
<b>9. táblázat.</b> A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. Az irányában egyértelmű változásokat színezéssel jelöltük. ....	61
<b>10. táblázat.</b> A különböző csapadékindexek átlagos magyarországi évszakos számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. Színezéssel emeltük ki azokat az évszakokat, amelyeknél a két modell ugyanolyan irányú változást mutat: barna csapadékcsökkenés, zöld: csapadéknövekedés. ....	75
<b>Table 1.</b> Annual and seasonal mean temperature changes (°C) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models.....	101
<b>Table 2.</b> Mean annual change of temperature indices (day) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. ....	103
<b>Table 3.</b> Annual and seasonal mean precipitation changes (%) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Changes with same direction is highlighted with brown (decrease) and green (increase) colours.....	104
<b>Table 4.</b> Mean seasonal changes of precipitation indices (%) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of	

ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Changes with same direction is highlighted with brown (decrease) and green (increase) colours..... 106

## 1. Bevezetés

A hazai adaptációval kapcsolatos tervezés és döntéshozatal támogatására 2013-ban hozták létre a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszert (NATÉR). Az információs rendszer alapját az éghajlati adatok, tehát a múltbeli mérések és a jövőre vonatkozó becslések biztosítják, s az ezekre épülő objektív hatásvizsgálatok eredményei azonosítják a felkészülés legfontosabb területeit és irányait. **A helyes irányok kijelöléséhez kulcsfontosságú, hogy a jövőbeli hatások vizsgálata megfelelő kiindulási adatokra támaszkodjon.**

A NATÉR célja, hogy a Magyarországon várható éghajlatváltozás meteorológiai jellemzőit leíró részletes becslések révén számszerű kiindulási adatokat biztosítson a klímaváltozás társadalmi-gazdasági hatásainak feltérképezését szolgáló hatásvizsgálatokhoz. Ehhez két regionális klímamodell eredményeit használja fel: az Országos Meteorológiai Szolgálatnál futtatott ALADIN-Climate (a továbbiakban ALADIN; Csima és Horányi, 2008), valamint az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén adaptált RegCM (Torma, 2011; Torma et al., 2011) modell adatait. A két modell alkalmazása lehetőséget ad arra, hogy **a hatásvizsgálatokban és a rájuk épülő döntéshozatalban figyelembe vegyék az éghajlati projekciók bizonytalanságait, ami a NATÉR kezdeményezésnek kitüntetett célkitűzése.**

Jelen tanulmány célja, hogy bemutassa a klímaváltozás leírásának tudományos és szakmai hátterét, alapos elemzést adjon a NATÉR-ba beépített klímamodell-adatokról, s ezzel elősegítse a modelladatok megfelelő és korrekt felhasználását, értelmezését. A bevezetést követő 2. fejezetben áttekintjük az éghajlati rendszer összetevőit és folyamatainak numerikus modellekkel történő leírásának alapelveit. Ismertetjük a regionális éghajlati információk előállítására vonatkozó lehetőségeket, kiemelve a regionális klímamodellek jellemzőit. Az éghajlati szimulációk többféle bizonytalanságot tartalmaznak, amelyek kvantitatív ismerete elengedhetetlen a modellekkel készült becslések értelmezéséhez, ezért külön alfejezetet szentelünk a klímamodelllezési bizonytalanságok bemutatásának, továbbá áttekintjük azokat a nemzetközi együttműködések, melyek célja a globális és regionális éghajlatváltozás modellezési eszközökkel való kutatása, s a projekciók bizonytalanságainak vizsgálata. A 3. fejezetben ismertetjük a hazai klímadinamikai kutatás legfontosabb mérföldköveit, valamint áttekintjük az elmúlt években az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatában tett lépéseket. A 4. fejezetben bemutatjuk, hogy a NATÉR milyen adatokra támaszkodik a magyarországi változások jellemzőinek leírásánál. **Részletesen elemezzük az ALADIN-Climate és a RegCM modellel végrehajtott éghajlatváltozási szimulációk eredményeit.** Elsőként a modellek hazánkra való alkalmazhatóságát demonstráló validációs eredményeket tekintjük át az 1961–1990 időszakra. Majd a jövőbeli projekciók eredményeit vizsgáljuk két időszakon: a következő évtizedekre szóló tervezés szempontjából lényeges 2021–2050-re és a hosszútávú adaptációs stratégiák készítéséhez fontos 2071–2100-ra. A legfontosabb következtetéseket az 5. fejezetben foglaljuk össze. Ezt egy kitekintés követi, melyben **kritikai értékelést adunk a NATÉR-ban szereplő meteorológiai információk minőségéről, felhasználhatóságáról és az eddigi felhasználási gyakorlatról, továbbá néhány javaslatot fogalmazunk meg a fejlesztésre vonatkozóan.** A tanulmányt egy angol nyelvű összefoglaló zárja, mely néhány illusztráló ábra és táblázat kíséretében kiemeli a dolgozat lényeges megállapításait.

## 2. Az éghajlati modellezés tudományos háttere

### 2.1 Az éghajlati rendszer és annak leírása

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. Mindegyik komponens fo-

lyamatait a légkörihez hasonló 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 rendszer egészét tekintve leírják az éghajlati rendszer válaszát egy feltételezett jövőbeli kényszerre. A modellszimulációkban a természetes éghajlatalakító folyamatok mellett figyelembe veszik az emberi tevékenység hatását is. Ennek alakulását nem ismerjük egy évszázadra előre, ezért ún. *forogatókönyveket* (szcenáriókat) állítanak fel, amelyek az antropogén tevékenység eltérő jövőbeli fejlődési lehetőségeit jelenítik meg (l. később).

Napjainkra a nagy klímakutató központokban fejlesztett kapcsolt globális éghajlati modellek tudományos és technikai kidolgozottsága elérte azt a szintet, hogy ezek a modellek 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 három módszer ismeretes:

1. A legkézenfekvőbb lehetőség a nagy- vagy változó felbontású globális modellek alkalmazása. Ebben az esetben általában már csak a légkör viselkedését tanulmányozzák, s a többi komponensre (például az óceánra) vonatkozó kényszereket egy durvább felbontású globális modell mezőinek felhasználásával veszik figyelembe. A változó felbontású modellek esetében a légköri modell felbontását kizárólag azokon a területeken növelik, amelynek éghajlati viszonyai érdekesek az adott vizsgálat szempontjából. Ezekkel a modellekkel tehát lehetséges marad a komplex rendszer globális kezelése, mindazonáltal számítógépes futtatásuk még így is rendkívül költséges, ezért alkalmazásukra továbbra is csak a legnagyobb kutatóközpontok vállalkozhatnak.
2. A statisztikai leskálázás ennél jóval kevesebb számítást igényel; lényege, hogy az éghajlat túlra vonatkozó globális és regionális jellemzői között egy statisztikai kapcsolatot állítunk fel, majd ezt a relációt alkalmazzuk a globális modellek által szolgáltatott jövőbeli eredményekre. A múltbeli globális viszonyokról a globális éghajlati modellek, a regionális jellemzőkről pedig a mérések szolgáltatnak információt, közöttük állítják fel tehát a statisztikai kapcsolatot. A módszer gyengesége, hogy alapfeltevése, miszerint a múltbeli statisztikai kapcsolatok érvényesek maradnak a jövőben is, nem ellenőrizhető, továbbá egy változó éghajlatot leíró rendszerben nem is tartható, mivel nem képes figyelembe venni azokat a nem-lineáris visszacsatolási mechanizmusokat, amelyek az éghajlati rendszert globális és regionális szinten is átszövik.
3. A regionális éghajlati modellek (RCM: regional climate model) egy kiválasztott terület folyamatait jellemzik a globális modellekhez hasonló, fizikailag megalapozott módon, s ehhez a globális modellek eredményei határfeltételt szolgáltatnak (**1. ábra**). A kisebb integrálási tartománynak köszönhetően ugyanazzal a számítógépes kapacitással finomabb felbontáson futtathatók, így kisebb országok kutatóközpontjai is vállalkozhatnak alkalmazásukra. A finomabb felbontás lehetővé teszi a felszíni, és azon kisskálájú folyamatok pontosabb leírását, amelyek lényeges szerepet játszanak a regionális éghajlati viszonyok alakításában. A regionális klímamodelleket a 90-es évek óta használják kisebb térségek éghajlati viszonyainak jellemzésére (Giorgi és Bates, 1989).



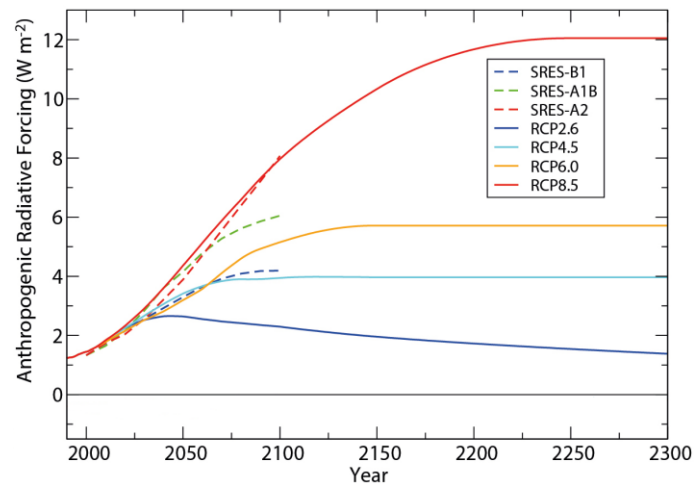
**1. ábra.** Az éghajlati rendszert érő globális kényszer hatására bekövetkező regionális éghajlatváltozást, illetve ennek modellezését bemutató sematikus ábra.

## 2.2 Szimulációs bizonytalanságok

A globális és regionális éghajlati szimulációk számos bizonytalanságot tartalmaznak, melyek pontos ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy ezeket a projekciókat megfelelő módon tudjuk értelmezni. Az éghajlati modellek eredményei csak a bizonytalanságok számszerűsítésével együtt közölhetők, ezért a következőkben röviden áttekintést nyújtunk ezek mibenlétéről és eredetéről. 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, hogyan írjuk le a klímamodellekkel az éghajlati rendszerben zajló folyamatokat. Ugyan minden klímamodellel 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 leskalázás során tovább nőhetnek. (A parametrizációkon keresztül megjelenő bizonytalanságok közül a csapadékképződéssel kapcsolatosak a legjelentősebbek, így elsősorban ennek köszönhető a csapadékszimulációk nagyfokú bizonytalansága.)
3. Az éghajlatra hatással bíró külső kényszerek egyik legbizonytalanabb eleme az emberi tevékenység, mégpedig azért, mert ennek a XXI. században való alakulásáról nincs egyértelmű jövőképünk, csupán különböző (optimista, pesszimista, átlagos) forgatókönyveink vannak. Az egyes lehetőségeket a globális éghajlati modellek számára külső kényszerként, szén-koncentráció kibocsátás illetve sugárzási kényszer (**2. ábra**) formájában számszerűsítik a modellek számára, azaz az egyes scenáriók ezek különböző fejlődési menetét írják le. A globális modell az éghajlati rendszer egészének vá-

laszát szimulálja a feltételezett külső kényszerre. A forgatókönyveket rendszeresen felülvizsgálják, és az újabb tapasztalatok birtokában időről időre frissítik őket. Ezért vették be például a korábbi SRES<sup>1</sup> scenáriók (Nakicenovic et al., 2000) helyett az ún. RCP<sup>2</sup> forgatókönyveket (Meinshausen et al., 2011), melyek figyelembe veszik a kibocsátás-csökkentési (mitigációs) törekvéseket. Ezek is részletesen megadják az aeroszol-részecskék és az üvegházhatású gázok koncentrációjának lehetséges jövőbeli értékeit, s 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/m<sup>2</sup>-t) jelent.



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

A 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 érezteti hatását, az első évtizedekben a modellek eltéréseiből és változékonyságból eredő bizonytalanság dominál (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). A globális és regionális 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 gyakorlatilag elhanyagolható. Ez fokozottan igaz, ha az eredményeket kisebb területre vizsgáljuk. Mindez azt jelenti, hogy a csapadék esetében az évszázad végéig nincs jelentősége annak, melyik kibocsátási forgatókönyvet tekintjük, sokkal lényegesebb a modellek közötti eltérésekből eredő bizonytalanság.

<sup>1</sup> Special Report on Emissions Scenarios

<sup>2</sup> Representative Concentration Pathways

## 2.3 Nemzetközi együttműködések a bizonytalanság számszerűsítésére

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.

Az összeállított szimuláció-együttes akkor reprezentálja jól a „valós” bizonytalanságot, ha minden fontos bizonytalanságtípust a súlyának megfelelően veszünk figyelembe. Az ilyen ensemble rendszerek készítése kiterjedt nemzetközi együttműködést igényel, mivel általában még a legnagyobb klímakutató központoknak is „csupán” arra van kapacitása, hogy az általuk fejlesztett kapcsolt globális modellt néhány szcenárió figyelembevételével futtassák le. Az összehangolt globális klíma-szimulációk elvégzésére jó példák a CMIP3<sup>3</sup> (Meehl et al., 2007) illetve a CMIP5<sup>4</sup> (Taylor et al., 2012) projektek. A CMIP3 keretében a SRES kibocsátási forgatókönyvek figyelembevételével készítettek globális modellszimulációkat, melyekben a modellek átlagos horizontális felbontása 200 km volt. A CMIP5 együttműködésben a legmodernebb légkör-óceán általános cirkulációs modelleket használták a jövőbeli emberi tevékenység leírására egy új, a sugárzási kényszer értékein alapuló RCP forgatókönyv-család alkalmazásával. A modellszimulációkat 0,5-4 fokos horizontális felbontáson készítették el, mellyel nagyjából megduplázták a CMIP3 projekt eredményeinek térbeli részletességét. Az IPCC 4. jelentése (IPCC AR4 WGI, 2007) a CMIP3, míg a legutóbbi, 5. jelentés (IPCC AR5 WGI, 2013) már a CMIP5 modelleredményeken alapul (**3. ábra**).

A regionális éghajlatváltozás vizsgálatánál szintén lényeges a szimulációk egységes koncepció mentén történő megvalósítása, s itt is nagy jelentőséggel bírnak azok a nemzetközi projektek, amelyek keretében a résztvevő országok intézményei közösen valósítják meg és értékelik ki a projekciókat. A 2001–2004 során zajló PRUDENCE<sup>5</sup> európai projektben (Christensen et al., 2007) elsősorban a 21. század végére várható változásokat vizsgálták a két szélsőséget képviselő kibocsátási szcenárió és számos regionális klímamodell 50 km-es felbontáson való alkalmazásával. A 2004 és 2009 között folyó ENSEMBLES projektben (van der Linden és Mitchell, 2009) már csak egyetlen, az „átlagos” (A1B) SRES forgatókönyvet tekintették, viszont több globális és regionális modellt használtak, melyeket 25-50 km-es felbontáson futtattak. Az ENSEMBLES ensemble-je tehát alapvetően a modellek eltéréseiből fakadó bizonytalanság megjelenítésére szolgált és éppen ezért ebben a projektben különösen felértékelődött a csapadékmezők bizonytalanságának vizsgálata. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy ez a szimuláció-együttes nem volt teljesen kiegyensúlyozott, mert a regionális modellek többsége számára mindössze két globális modell szolgáltatott határfeltételt. A többi globális modell eredményeinek figyelembevételével csak kevés regionális szimuláció készült, s mivel a regionális eredményekre nagy hatással van a határfeltételt adó globális modell, néhány globális modell „túlsúlya” a valószínűségi információk torzulásához vezet. A WCRP<sup>6</sup> által 2009-ben kezdeményezett CORDEX<sup>7</sup> együttműködés (Jones et al., 2011) Európára koncentrált ága, a EURO-CORDEX (Jacob et al., 2013) az RCP forgatókönyvekkel és a legújabb globális modellváltozatokkal készült szimulációk dinamikai leskalázását hajtotta végre 50 és 10 km-es felbontású regionális klímamodellekkel. A EURO-CORDEX eredmények a modell-

<sup>3</sup> Coupled Model Intercomparison Project Phase 3

<sup>4</sup> Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

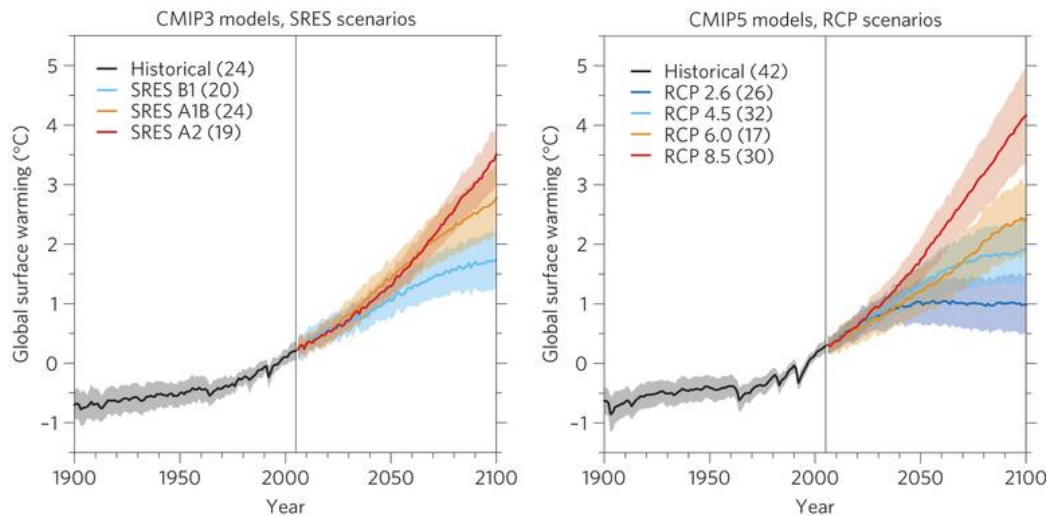
<sup>5</sup> Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects

<sup>6</sup> World Climate Research Program, a WMO éghajlati programja

<sup>7</sup> COordinated Regional climate Downscaling Experiment



és a forgatókönyv-választásból eredő bizonytalanságon kívül lehetőséget adnak a különböző forgatókönyv-családok hatásának tanulmányozására is.



**3. ábra.** A SRES forgatókönyvek figyelembevételével készített CMIP3 (balra) és az RCP-forgatókönyvek figyelembevételével készített CMIP5 (jobbra) globális modellszimulációk által jelzett globális átlaghőmérséklet-változás az 1986–2005 időszakhoz viszonyítva (Knutti és Sedlacek, 2012). Az azonos forgatókönyvvel készített modellszimulációk eredményeit azonos színű sáv tartalmazza, ezeken belül a modellszimulációk átlagát vastag vonal jelöli; zárójelben pedig a felhasznált modellek száma szerepel.

### 3. A hazai klímamodellezés és adaptáció története

A klímaváltozás hatásaira való célirányos felkészülés előkészítéséhez elengedhetetlen a változások irányának és számszerű mértékének ismerete, s ezeket az információkat egyedül a klímamodellek tudják biztosítani. Az éghajlati rendszer működése numerikus modellek segítségével tanulmányozható, s – összetettségénél fogva – jövőbeli viselkedése is kizárólag a modellezés eszközeivel írható le. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) 2003 közepén fogalmazódott meg a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás dinamikai eszközökkel való vizsgálatának gondolata. Az elképzelésnek az adott szilárd alapot, hogy az azt megelőző években felépült egy olyan numerikus modellező csapat, amely képes számszerű előrejelzéseket biztosító modellek adaptálására és alkalmazására. Az elképzelés megvalósítása egy Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program keretében kezdődött meg, melynek címe „Magyarország éghajlatának dinamikai vizsgálata és a numerikus modelleken alapuló regionális klíma-előrejelzések módszertanának megalapozása” volt. A projektet az OMSZ koordinálásával 2005 és 2007 között közösen valósította meg az OMSZ, az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Meteorológiai Tanszéke, a Pécsi Tudományegyetem és az Env-in-Cent Kft. Az együttműködés célja a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás becsléséhez szükséges magyarországi regionális klímamodellezési háttér megteremtése volt. Ehhez négy regionális klímamodell adaptálására került sor: az ALADIN-Climate és REMO modellekére az OMSZ-ban, míg a PRECIS és RegCM modellekére az ELTE Meteorológiai Tanszékén.

A modellezési alapok sikeres megteremtésével lehetőségünk nyílt arra, hogy kapcsolatba lépjünk azokkal az európai kutatókkal, akik regionális klímamodellezéssel foglalkoznak, és bekapcsolódjunk az európai kutatási hálózatba. Ennek első lépéseként partnerként vettünk részt a 2006 és 2009 között zajló CLAVIER és CECILIA európai uniós projekteken, melyek során „megtanultuk”, hogy az éghajlatváltozás közvetett hatásainak feltérképezésére modell-

eredményeken alapuló számszerű hatásvizsgálatokat kell elvégezni. Mindkét projekt a középkelet európai térségre fókuszált: a [CLAVIER](#)<sup>8</sup> keretében a REMO modell, míg a [CECILIA](#)<sup>9</sup> projektben az ALADIN-Climate és a RegCM modellek segítségével kutattuk a klímaváltozás regionális hatásait a cirkulációs viszonyokra, a szélsőséges eseményekre, a levegőszennyeződéésre, a víz- és az energiagazdálkodásra, illetve a mezőgazdaságra.

A CECILIA és a CLAVIER projektek lezárása után 2010 elején kezdtük meg részvételünket olyan uniós finanszírozású projektekből, amelyek már kimondottan a klímaváltozás hatásainak vizsgálatával foglalkoztak. Az [ECCONET](#)<sup>10</sup> az éghajlatváltozás folyami hajózásra gyakorolt várható hatásaival foglalkozott, különös tekintettel a Duna és a Rajna folyókra; míg az [OrientGate](#) projektben a városi hatásokkal kapcsolatban folytattunk vizsgálatokat.

A fentiekből látható, hogy hazánkban hosszú évek óta birtokában vagyunk az éghajlatváltozás vizsgálatára alkalmas tudományos eszközöknek és szakmai módszertannak, ennek ellenére a magyarországi adaptációs vizsgálatok jó része sokáig nem élt ezekkel: vagy a minden eshetőségre való felkészülés elve (Láng et al., 2007), vagy pedig számszerű vizsgálatok nélkül, „intuitíven” javasolt alkalmazkodási lépéseket (NÉS, 2008). Hosszú távon azonban egyik stratégia sem tartható fenn: egyrészt azért, mert minden lehetőségre felkészülni rendkívül költséges, másrészt pedig a korábbi tapasztalatokon (pl. mérési adatokon) alapuló intuíció könnyen tévútra viheti az alkalmazkodást.

Az elmúlt néhány évben számos szakterületen megkezdődött a hatásvizsgálatok objektív alapokra helyezése: regionális klímamodellek eredményein alapuló kutatásokat végeznek például a hidrológia és a hidrogeológia, az ökológia, a mezőgazdaság, az erdészet, a műszaki tervezés, az egészségügy, a turizmus vagy a szőlőtermesztés területén. A konkrét adatigényt az egyes hatásvizsgálatok alakítják. A leggyakrabban használt éghajlati paraméterek a havi átlaghőmérséklet, a napi minimum-, maximum- és középhőmérséklet, a csapadékösszeg, a szélesebesség, a szélirány, a relatív nedvesség és a globálsugárzás. De gyakran felmerül speciális paraméterek előállításának igénye is, mint például a felhőborítottság, a párolgás vagy a hőmérséklet és a csapadék különböző értékeinek együttes előfordulása. Hosszú távra szóló tervezés esetében (pl. távvezetékek, épületek műszaki tervezésénél) igény van olyan, a meteorológiai változókból külön utófeldolgozás segítségével előállítható adatokra is, mint a maximális szélhőmérséklet, a jegesedés, a talajvízszint 100-, 200- vagy akár 500-éves visszatérési értékei. A térbeli és időbeli felbontást tekintve is változóak a felhasználók igényei: a vízügyi hatásvizsgálatokhoz például az éghajlati információk 10 km-es horizontális felbontása és havi részletessége ideális, ugyanakkor számos vizsgálatban a 6 órás időbeli felbontás és néhány száz méteres rács távolság lenne optimális, ami a klímamodellek fejlesztését igényli.

További kihívást jelent elfogadtatni mind a tudományos világgal, mind a döntéshozókkal, hogy a számszerű vizsgálatok szükségszerűen bizonytalanságokat tartalmaznak, melyek figyelembevétele – bár kétségtelenül új megközelítést igényel – ugyanolyan lényeges, mint maguké az eredményeké. Az egyes felhasználóknak igen eltérők a lehetőségeik és az ambíciójuk, hogy figyelembe vegyék a klímaprojekciók bizonytalanságait. A folyókra vonatkozó hidrológiai modellezés esetében már időjárási (néhány napos-hetes) időskálán is valószínűségi előrejelzéseket készítenek, így az éghajlati vizsgálatoknál is több modellre alapozva veszik figyelembe a bizonytalanságokat. Ugyancsak ezt a gyakorlatot alkalmazzák a természet-hozam-becsléseknél illetve az ökológiai elemzéseknél, sőt, utóbbinál arra is tesznek kísérletet, hogy magának a hatásvizsgálati módszertannak a bizonytalanságát is számszerűsítsék. Azonban számos kutatás esetében továbbra is egyetlen modell eredményére támaszkodnak, ami nem nyújthat megalapozott információt a klímaváltozás hazai hatásairól.

---

<sup>8</sup> Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe

<sup>9</sup> Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment

<sup>10</sup> Effects of Climate Change on the Inland Waterway Networks

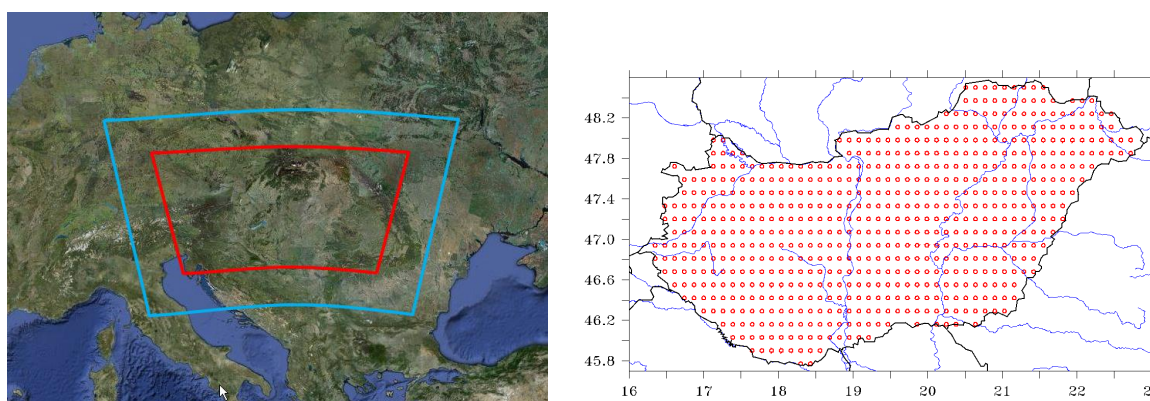
A fentiek eredményeként a hazai hatásvizsgálatok meglehetősen heterogének, kiindulási adataik sokszor különböző – egyedi praktikus szempontok szerint kiválasztott – modellszimulációkból származnak, ami nem teszi lehetővé az eredmények összehasonlítását és egymáshoz képest való interpretációját. A 2013-ban elindított adaptációs információs rendszer, a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer ezzel a szemlélettel szakítani kíván, s határozott célja, hogy a felhasználók vizsgálataikat ugyanazoknak az ellenőrzött minőségű adatsoroknak a felhasználásával végezzék el, ráadásul a bizonytalanságok figyelembevétele ne csupán lehetőség, hanem kötelezettség legyen.

#### 4. A hazai éghajlati viszonyok jellemzése a NATÉR klímamodell-adatai alapján

A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer számára a jövőbeli magyarországi éghajlatváltozás jellemzőinek leírását két regionális klímamodell eredményei biztosítják. Az ALADIN-Climate és a RegCM modellekkel az OMSZ-ban és az ELTE Meteorológiai Tanszékén 10 km-es horizontális felbontással hajtottak végre szimulációkat a XXI. század végéig, a jövőbeli emberi tevékenység leírására egy átlagos kibocsátási forgatókönyvet alkalmazva (**1. táblázat**). A modellkísérletek egy Kárpát-medencét lefedő tartományra készültek (**4. ábra**), melyekhez a tartományon kívül zajló folyamatok leírását (azaz az oldalsó határfeltételeket) két különböző globális klímamodell szolgáltatta.

**1. táblázat.** Az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellekkel készített szimulációk jellemzői.

Regionális klímamodell	ALADIN-Climate	RegCM
Modellverzió	4.5	3.1
Horizontális felbontás	10 km	10 km
Oldalsó határfeltételek	ARPEGE-Climate	ECHAM5/MPI-OM → RegCM_25
Kibocsátási forgatókönyv	SRES A1B	SRES A1B



**4. ábra.** Bal: az ALADIN-Climate (piros) és a RegCM (kék) regionális klímamodellek szimulációinak integrálási tartománya; jobb: a NATÉR modelldatainak magyarországi rácspontjai.

Az információs rendszerben a napi és havi részletességű modelldatok (**2. táblázat**) három időszakra érhetők el: a következő évtizedekre szóló tervezéshez lényeges 2021–2050-re és a stratégiaalkotás szempontjából fontos 2071–2100-ra, továbbá a változások meghatározásához az 1961–1990 időszak szolgál referenciaként. A két modellszimuláció segítségével a határfeltételt adó globális valamint a regionális modellek eltéréseiből eredő bizonytalanság

számszerűsíthető, aminek nagy jelentősége van a csapadékviszonyok esetében. Így a NATÉR lehetőséget ad a felhasználói számára a bizonytalanságok alapfokú figyelembevételére.

A továbbiakban részletesen áttekintjük, hogy az ALADIN-Climate és a RegCM modellek eredményei hogyan írják le hazánk jelenlegi és jövőbeli éghajlati viszonyait, s a jövőbeli projekciókat milyen jellegű és mértékű bizonytalanság jellemzi.

**2. táblázat.** A NATÉR-ban a klímamodellek eredményeiből elérhető adatok.

Változó	Mértékegység	Időskála
<b>2-méteres középhőmérséklet</b>	Celsius fok	Napi, havi
<b>2-méteres minimumhőmérséklet</b>	Celsius fok	Napi, havi
<b>2-méteres maximumhőmérséklet</b>	Celsius fok	Napi, havi
<b>Csapadékösszeg</b>	mm	Napi, havi
<b>Átlagos 2-méteres horizontális szélesség</b>	m/s	Napi, havi
<b>Átlagos 10-méteres horizontális szélesség</b>	m/s	Napi, havi
<b>Globálsugárzás</b>	MJ/m <sup>2</sup> /nap	Napi
<b>2-méteres relatív páratartalom</b>	%	Havi
<b>Három hónapra átlagolt SPI aszályindex</b>	–	3-havi
<b>Hat hónapra átlagolt SPI aszályindex</b>	–	6-havi
<b>Tizenkét hónapra átlagolt SPI aszályindex</b>	–	12-havi

#### 4.1 Validáció

Az éghajlati modellek jövőre vonatkozó eredményeit annak ismeretében értelmezhetjük, hogy a modellek mennyire tudják reprodukálni a múltbeli klímát jellemző értékeket. Ennek érdekében a jelen validáció során azt vizsgáljuk, hogy a két adaptált regionális klímamodell a hőmérséklet és a csapadék éghajlati sajátosságait mekkora hibával képes becsülni az 1961–1990 referencia-időszakban. A jelen alfejezetben megvizsgáljuk és összehasonlítjuk a két regionális klímamodell havi, évszakos és éves átlaghőmérsékletének és csapadékösszegének hibáit. Erre elsősorban az átlagos hiba- és időbeli szórásértékeket használjuk, valamint térképes formában bemutatjuk az éves és az évszakos hibák modellenkénti területi eloszlását szignifikancia-vizsgálattal kiegészítve. Nem térünk ki az egyéb változók (pl. szélesség, globálsugárzás, relatív nedvesség) kiértékelésére. Az összehasonlítás alapjául a legtöbb esetben a rácsponti adatokat tartalmazó, mintegy 20 km-es felbontású CRU-adatbázis szolgált, melyet a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztálya (University of East Anglia, Climatic Research Unit) állított össze meteorológiai állomási mérések felhasználásával (Mitchell et al., 2004). Elvégeztük még néhány hőmérséklettel és csapadékkal kapcsolatos éghajlati index validációját is az 1961–1990 időszakra annak érdekében, hogy ezeken keresztül a napi adatok jellemzőibe is legyen betekintésünk. Ebben az esetben viszont a homogenizált mérési adatsorok alapján előállított 10 km-es felbontású CARPATCLIM adatbázist (Lakatos et al., 2013) tekintettük referenciaként, mivel a napi adatok vizsgálatánál nagy jelentősége van a lehető legpontosabb referencia alkalmazásának.

Meg kell jegyeznünk, hogy bár a validáció fontos és kikerülhetetlen lépése az éghajlati modellezésnek, ugyanakkor nincs garancia arra, hogy a múltat (a validációnál használt refe-

rencia-időszakot) jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak. Validációs vizsgálatokat alapvetően kétféle modellfuttatásra végezhetünk. Egyrészt a regionális modellek azon futtatásaira, ahol a meghajtó kezdeti- és peremfeltételeket valamilyen re-analízis adatbázis szolgáltatja, másrészt azokra a modellfuttatásokra, ahol a meghajtó mezőket csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek adják. A re-analízis mezők felhasználásával történt modellfuttatások azt mutatják meg, hogy maga a regionális klímamodell milyen pontosan tudja becsülni a térség jelenlegi klímáját, míg a globális klímamodell kísérletek eredményeivel futtatott szimulációk a GCM és az RCM együttes bizonytalanságaira világítanak rá. A NATÉR keretében végzendő hatásvizsgálatokhoz a GCM-mel meghajtott regionális klímamodell-szimulációk biztosítanak kiindulási adatokat, ezért e tanulmányban ezek elemzését ismertetjük.

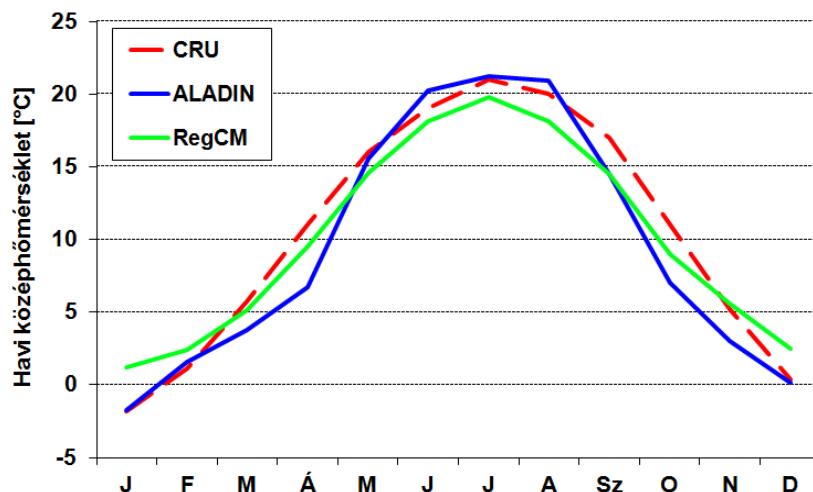
### Hőmérséklet

A **3. táblázatban** összegezzük a Magyarország területére eső rácspontok figyelembevételével képzett átlagos éves és évszakos hőmérsékleti hibák értékeit. Az átlagos hibák meghatározása mellett szignifikancia-vizsgálat segítségével számszerűsítettük, hogy a rácspontokban kapott átlagos hibaérték miként viszonyul a referencia-időszak évszakos és éves hibaértékeinek szóráshoz. A vizsgálatokat egymintás t-próba, illetve Welch-próba alkalmazásával végeztük el. Mindkét statisztikai próba megkívánja, hogy a minták normális eloszlásúak legyenek, míg a minták függetlensége csak a Welch-próba esetén követelmény. Ezeket a feltételezéseket idősorainkra érvényesnek tekintettük. Az 1961–1990 közötti időszakra vonatkozó éves átlaghőmérséklet esetén mindkét modellszimuláció kis mértékben alulbecsli a referencia értékeket, mely valamelyest nagyobb az ALADIN esetén a RegCM-hez viszonyítva. Az évszakos hibák alapján az ALADIN esetén az átmeneti évszakokban jelentősebb mértékű, 2 °C-ot meghaladó szignifikáns alulbecslés jellemző, viszont nyáron és télen a hiba előjelet váltott (bár télen elhanyagolható, csupán 0,1 °C a felülbecslés mértéke, mely országos átlagban nem is szignifikáns). A RegCM esetén téli szignifikáns felülbecslés figyelhető meg, melyet a többi három évszak alulbecslése ellensúlyoz éves átlagban.

**3. táblázat.** A magyarországi átlagos éves és évszakos hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. Sárga háttér jelöli az országos átlagban 1 °C-nál nagyobb eltéréseket, s a ± jel után a 30 évre vonatkozó időbeli szórás értéke szerepel.

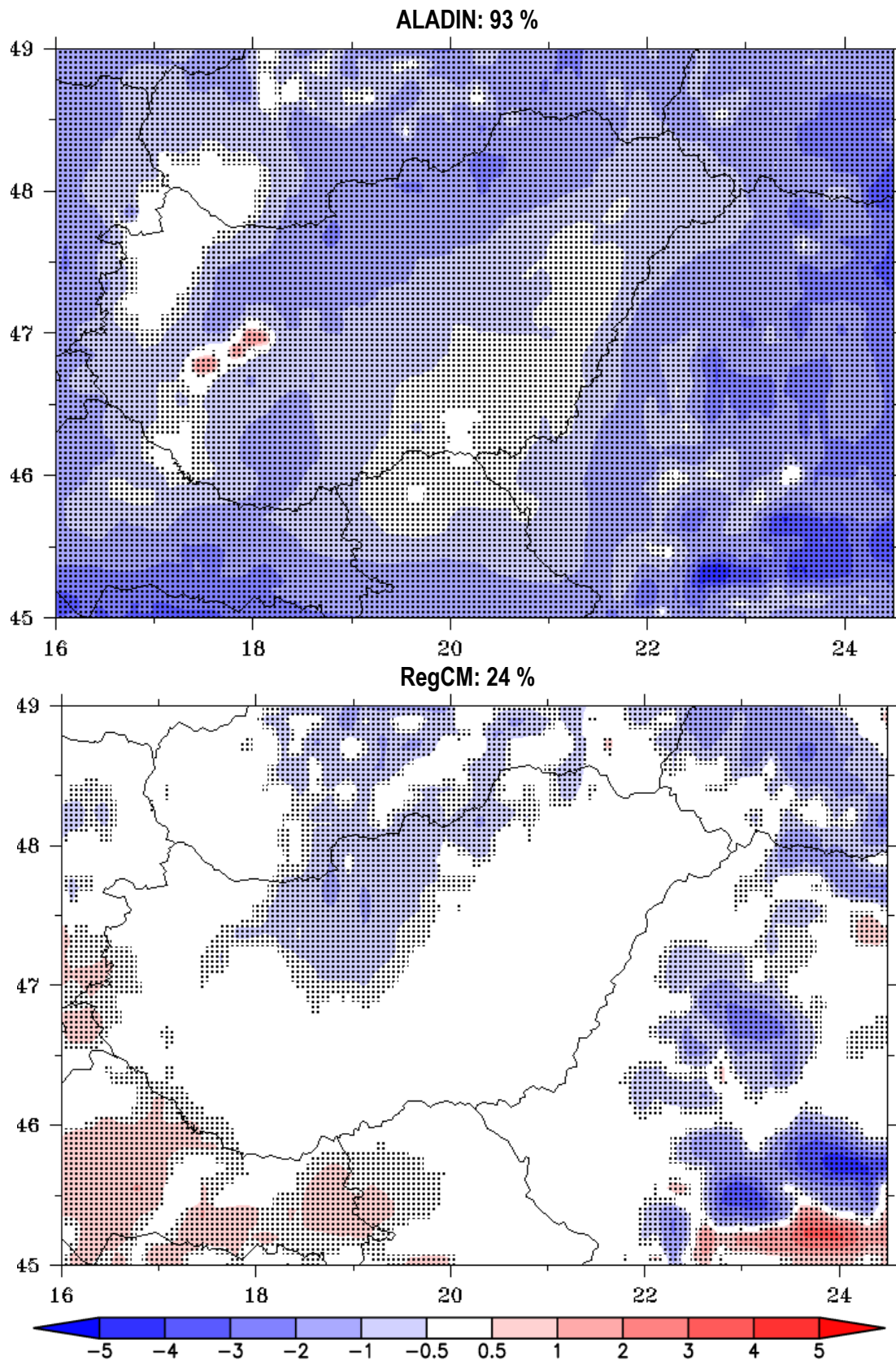
	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
ALADIN	-0,8 ± 0,7	-2,0 ± 0,8	1,1 ± 1,2	-2,7 ± 1,3	0,1 ± 1,4
RegCM	-0,3 ± 0,8	-1,0 ± 1,3	-1,1 ± 0,9	-1,2 ± 1,0	2,3 ± 1,1

A magyarországi rácspontokra számított országos havi átlaghőmérsékletek éves menétét a két vizsgált modellszimuláció és a mért adatok alapján az **5. ábrán** láthatjuk. A CRU-adatbázis állomási méréseken alapuló havi átlagértékeit a tavaszi és őszi hónapokban az ALADIN jelentősen alulbecsli (ennek mértéke áprilisban és októberben eléri 4 °C-ot). A téli és a nyári hónapokban jobb az egyezés, a felülbecslés mértéke csupán júniusban haladja meg az 1 °C-ot. Ez arra utal, hogy az ALADIN-szimulációkban a tavaszi melegedés jóval lassabban, az őszi lehűlés viszont jóval gyorsabban történik, mint a CRU-adatbázisban. A havi hibák átlaga a RegCM esetén jóval kisebb, a téli hónapok mindegyikében 1 °C-ot meghaladó felülbecslés látható, míg az év többi részében 0,5 °C és 2,5 °C közötti alulbecslés jellemző (a legnagyobb átlagos havi hiba szeptemberben jelentkezik).

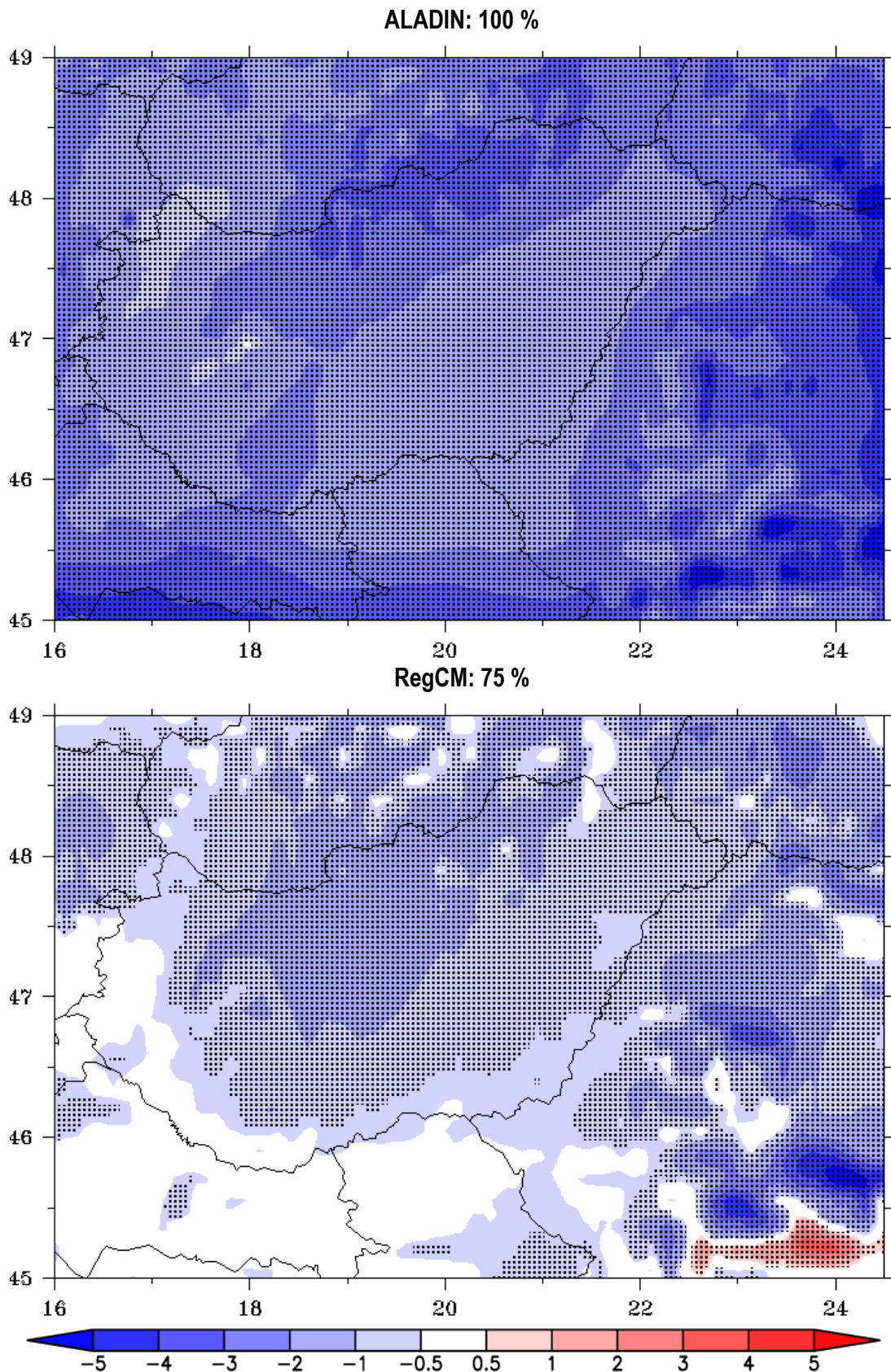


**5. ábra.** A magyarországi havi átlagos hőmérséklet értékei (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis alapján 1961–1990-re.

A modellszimulációk éves és évszakos átlagos hőmérsékleti hibáinak térbeli eloszlását a **6–10. ábrákon** összegezzük modellenként. A térképeken a kék árnyalatok a hőmérséklet alul-, míg a piros színek a hőmérséklet felülbecslését jelzik. Minden rácspontra megvizsgáltuk, hogy a kapott hiba szignifikáns-e. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a hiba szignifikáns, továbbá a térképek felett megjelenő értékek azt mutatják, hogy Magyarország területének mekkora hányadán szignifikáns a hiba. Az éves hibákra mindkét modell esetén az alulbecslés jellemző, mely az ALADIN-nál az ország csaknem teljes területén szignifikáns (az északi, északkeleti térségekben a legnagyobbak a hibaértékek). A RegCM esetén a rácspontok csupán 24%-ában szignifikáns a hiba, mely elsősorban a főváros körzetében jelenik meg. Az évszakos hőmérsékleti hibákat bemutató térképsorozat alapján megállapítható, hogy a tavaszi és őszi időszakban mindkét modellszimuláció felülbecsül, az ALADIN valamelyest nagyobb mértékben. Nyáron eltér a két modellszimuláció hibájának előjele: az ALADIN jelentősen melegebb, a RegCM hidegebb éghajlati viszonyokat eredményezett a referencia-értékekhez képest. Végül télen kiemelendő a RegCM jelentős felülbecslése, mely az ALADIN esetében egyáltalán nem jellemző, sőt a négy évszak közül ebben az időszakban a legjobb a referencia-mezővel való egyezése.

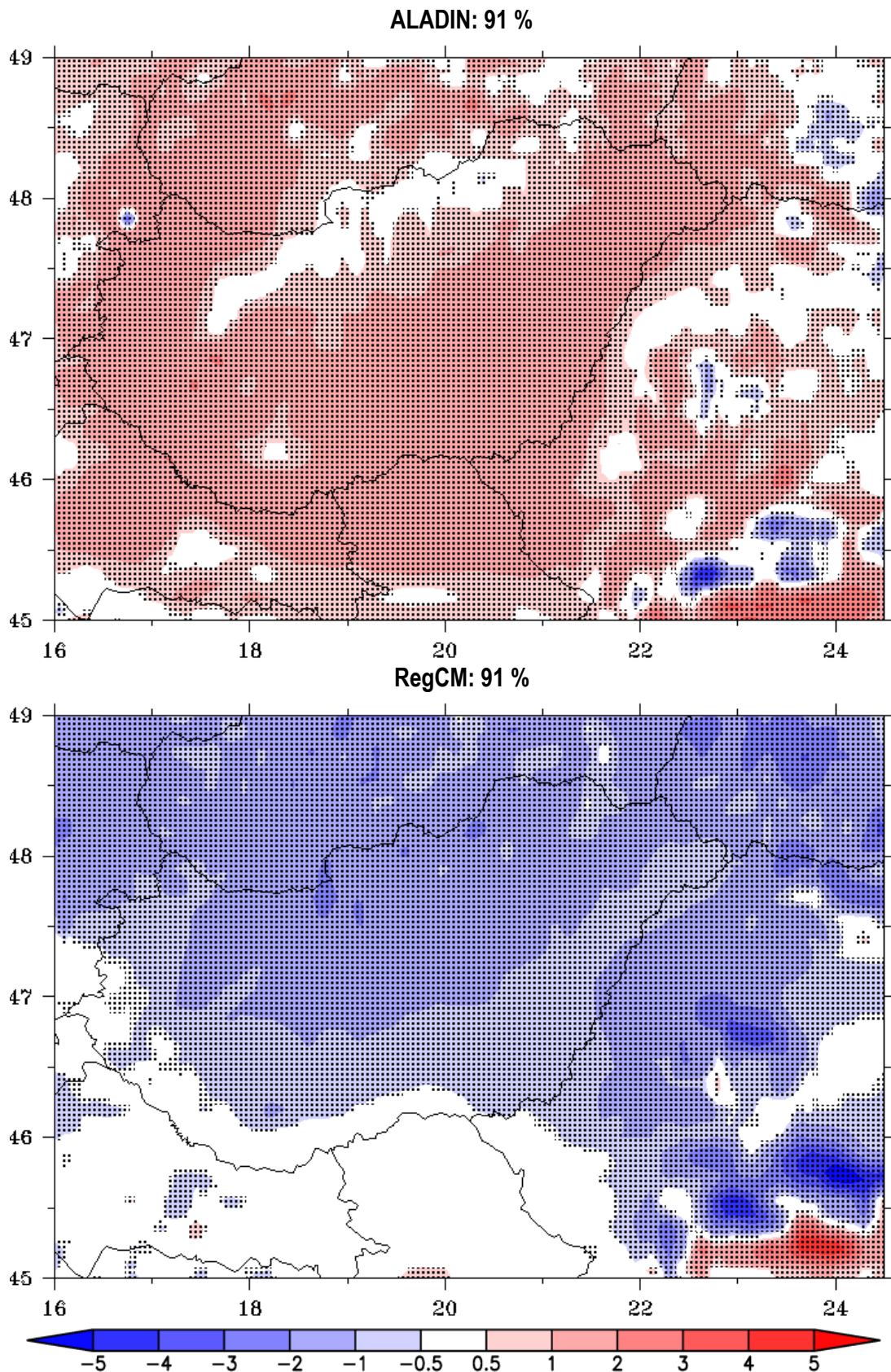


**6. ábra.** Az átlagos éves hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climote és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

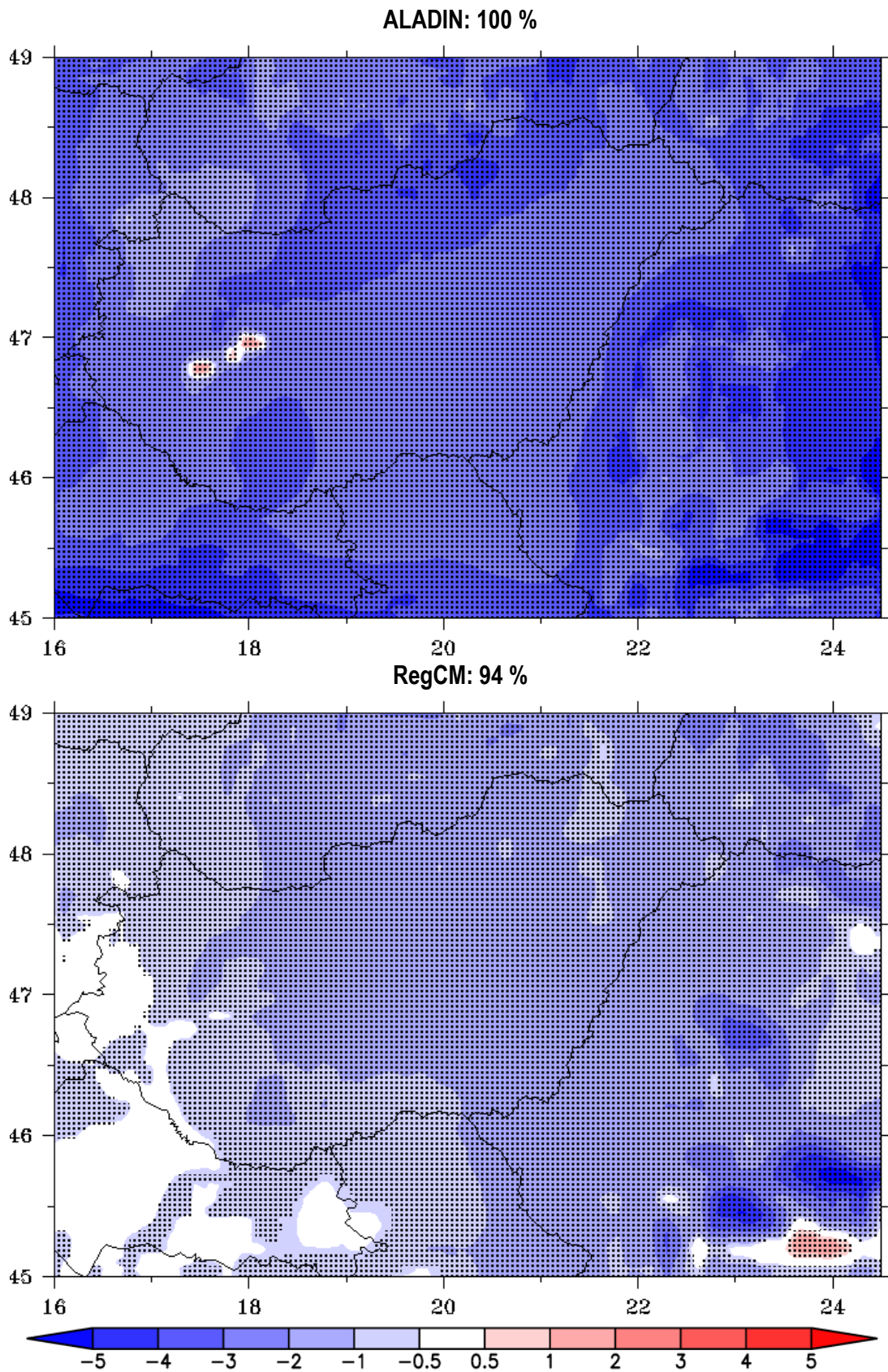


**7. ábra.** Az átlagos tavaszi hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climote és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

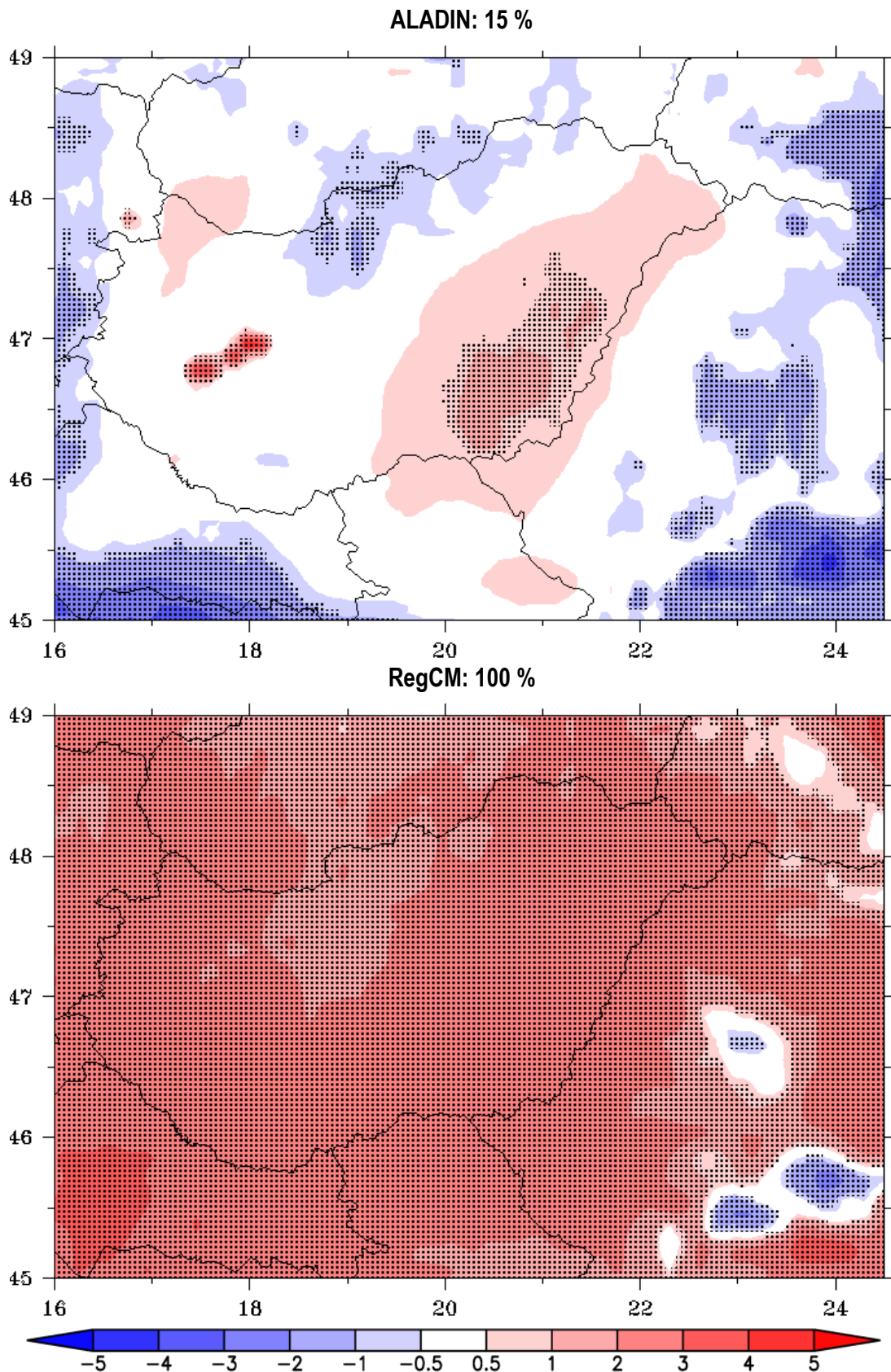




**8. ábra.** Az átlagos nyári hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.



**9. ábra.** Az átlagos őszi hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climat és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktértekek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

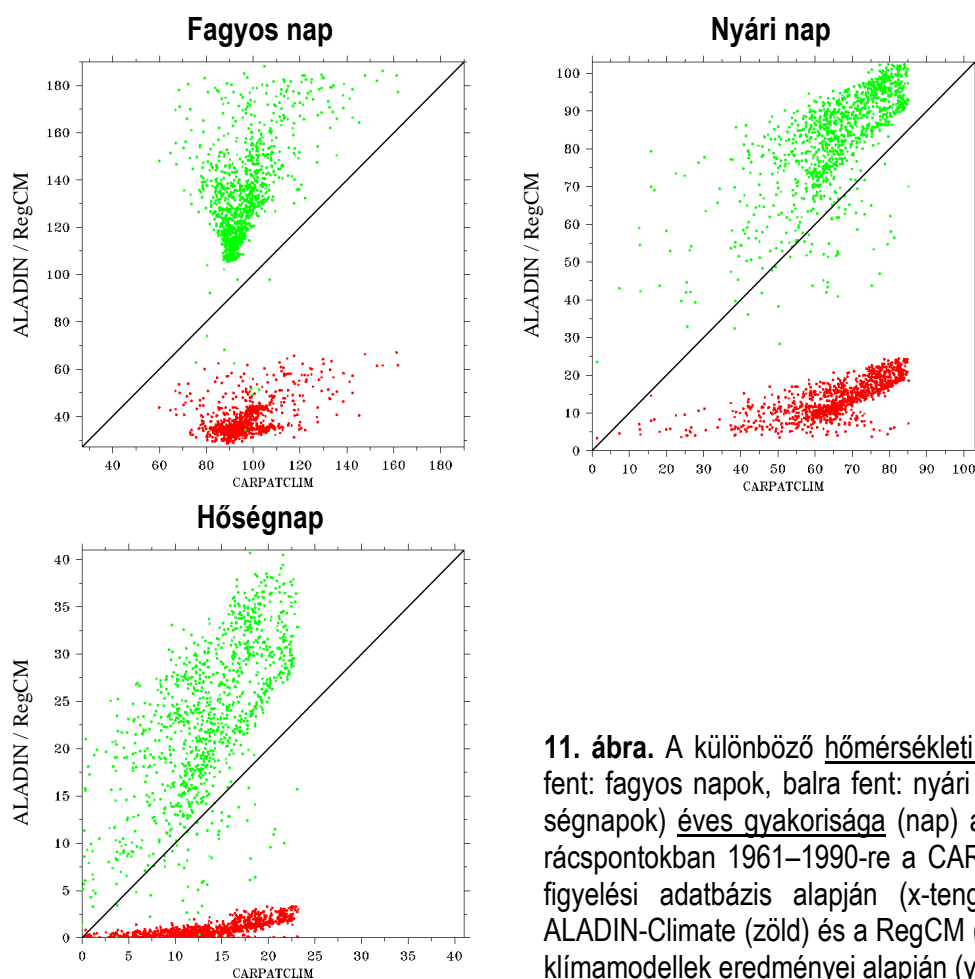


**10. ábra.** Az átlagos téli hőmérsékleti eltérés (°C) az ALADIN-Climat és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

Az éghajlati indexek esetében általában valamilyen szintátlépés gyakoriságát, illetve adott szint feletti tartózkodást vizsgálunk. Mivel a CARPATCLIM adatbázis esetében a napi középhőmérséklet a napi minimum- és maximumhőmérséklet mérések átlagából áll elő, ezért olyan indexeket választottunk, amelyek közvetlenül a mért változókkal (tehát a minimum- és a maximumhőmérséklettel) vethetők össze (**4. táblázat**). Az indexeknek a modelleredményekből és a mérésekből a teljes időszakra számított előfordulását pontdiagram formában jelenítjük meg a **11. ábrán** a magyarországi rácspontokra. Ha a szimuláció–mérés párokat reprezentáló pontok az y-tengelyhez vannak közelebb, akkor a modell felülbecsli az adott index gyakoriságát, míg ha a pontok az x-tengelyhez esnek közelebb, akkor alulbecsli láthatunk. Az eredmények alapján elmondhatjuk, hogy a két modell közötti eltérés a fagyos napokra és a nyári napokra jelentős, míg a hőségnapokra igen jelentős. Az ALADIN-Climate kissé felülbecsli mind a meleg, mind a hideg hőmérsékleti indexek előfordulását, míg a RegCM nagymértékben alulbecsli azokat. Utóbbiból arra következtethetünk, hogy a RegCM jelentős hibával adja vissza a minimum- és a maximumhőmérséklet értékeit.

**4. táblázat.** A vizsgált hőmérsékleti indexek.

Index	Definíció
Nyári nap	A napi maximumhőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot.
Hőségnap	A napi maximumhőmérséklet meghaladja a 30 °C-ot.
Fagyos nap	A napi minimumhőmérséklet 0 °C alatti.
Extrém hideg nap	A napi minimumhőmérséklet -10 °C alatti.



**11. ábra.** A különböző hőmérsékleti indexek (jobbra fent: fagyos napok, balra fent: nyári napok, lent: hőségnapok) éves gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (zöld) és a RegCM (piros) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely).

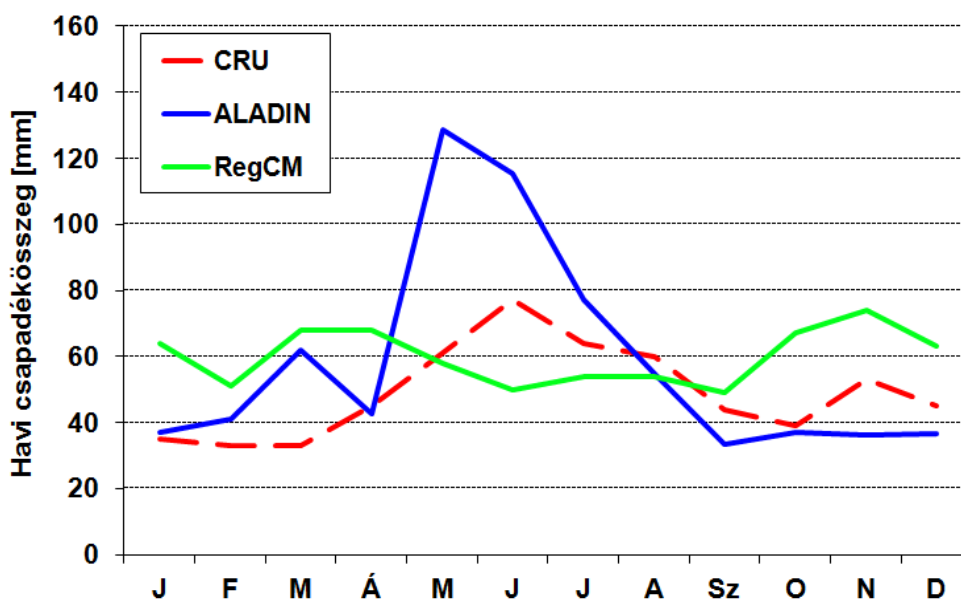
## Csapadék

A hőmérséklethez hasonló módon mutatjuk be a két vizsgált modell csapadékeredményeinek validációját. Az **5. táblázat** az éves és évszakos csapadékhibákat foglalja össze a magyarországi rácspontok átlaga alapján. Az éves csapadékösszeget mindkét szimuláció kis mértékben felülbecsli. Az évszakos hibákat vizsgálva szembevetendő, hogy tavasszal az ALADIN modell szignifikánsan felülbecsül, ez kisebb mértékben a RegCM-re szintén igaz. Szignifikáns felülbecslés jellemző a RegCM esetén télen is. eltérő az átlagos évszakos hibák előjele ősszel és nyáron. Ősszel az ALADIN esetén alulbecslést, míg a RegCM esetén felülbecslést figyelhetünk meg. A nyári csapadékösszeg becslésénél viszont ennek ellentétét láthatjuk: az ALADIN szignifikánsan felülbecsül, míg a RegCM a valóságnál jóval kevesebb csapadékot mutat.

Az 1961–1990 közötti átlagos havi szimulált csapadékösszegek éves menetét a **12. ábra** hasonlítja össze a CRU-adatbázisból számított átlagértékekkel. A két modell általánosságban véve nagyobb évi csapadékösszegeket ad, mint a megfigyelések. A havi átlagos összegek menetét az ALADIN jobban követi, ugyanakkor nagyon jelentős mértékű a május–július időszak felülbecslése. A RegCM szimuláció esetén a havi átlagos csapadékösszegek eloszlása egyenletes, a hazánkra jellemző éves csapadékmenet követése emiatt gyenge.

**5. táblázat.** A magyarországi átlagos éves és évszakos csapadékeltérés (mm/hónap) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. Sárga háttér jelöli az országos átlagban 10 mm/hónap értéknél nagyobb eltéréseket, s a  $\pm$  jel után a 30 évre vonatkozó időbeli szórás értéke szerepel.

	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
ALADIN	9 $\pm$ 9	32 $\pm$ 16	15 $\pm$ 22	-10 $\pm$ 14	1 $\pm$ 15
RegCM	9 $\pm$ 9	17 $\pm$ 18	-16 $\pm$ 18	16 $\pm$ 19	19 $\pm$ 17



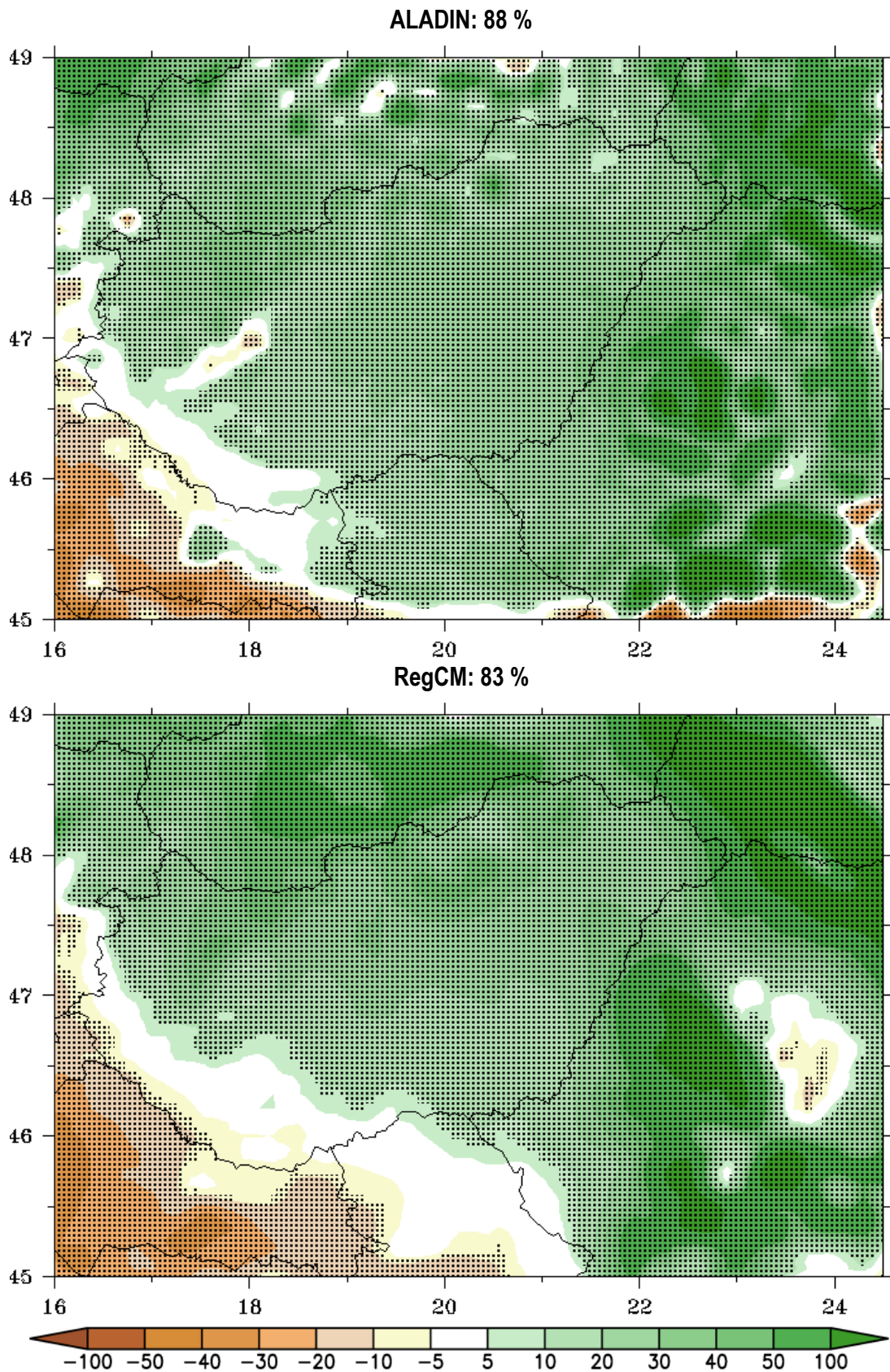
**12. ábra.** A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg értékei (mm/hónap) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis alapján 1961–1990-re.

A modellszimulációk éves és évszakos átlagos csapadékösszegeinek hibamezőit a **13–17. ábrák** foglalják össze. Ezeken a térképeken a barna színárnyalatok a modellek alulbecslését jelzik, míg a zöld színárnyalatok felülbecslésre utalnak. A zöld szín dominanciája jelzi, hogy az alkalmazott regionális modellek általában felülbecslik mind az éves, mind az évszakos csapadékösszegeket. Az ALADIN modell évi csapadéokra vonatkozó felülbecslése az ország szinte teljes területén szignifikáns. Ehhez hasonló szerkezetű, és valamelyest kisebb mértékű a RegCM szimulációk hibamezője: a szignifikáns felülbecslés a rácsponatok 83%-ában jelenik meg. Az évszakos hibamezők térképsorozatából a tavaszi és nyári felülbecslés, valamint az őszi alulbecslés az ország nagy részén mindkét modell esetén megjelenik. Az évszakos hibamezőket figyelembe véve tavasszal mindkét modell felülbecsli a referencia mező értékeit, mely az ALADIN esetében valamelyest nagyobb mértékű. Ahogy az országos átlagos hibaértékekből is kitűnt, nyáron és ősszel ellentétes előjelű a két vizsgált modellszimuláció mezője. Mindkét évszakra és mindkét modellszimuláció esetén a rácsponatok nagy hányadában szignifikáns hibát kaptunk. A téli átlagos csapadékösszegekre vonatkozó hibamező a RegCM esetén jelentős felülbecslést tartalmaz, míg az ALADIN csak az országon belüli rácsponatok kb. 11-11 %-ában mutat szignifikáns alul-, illetve felülbecslést.

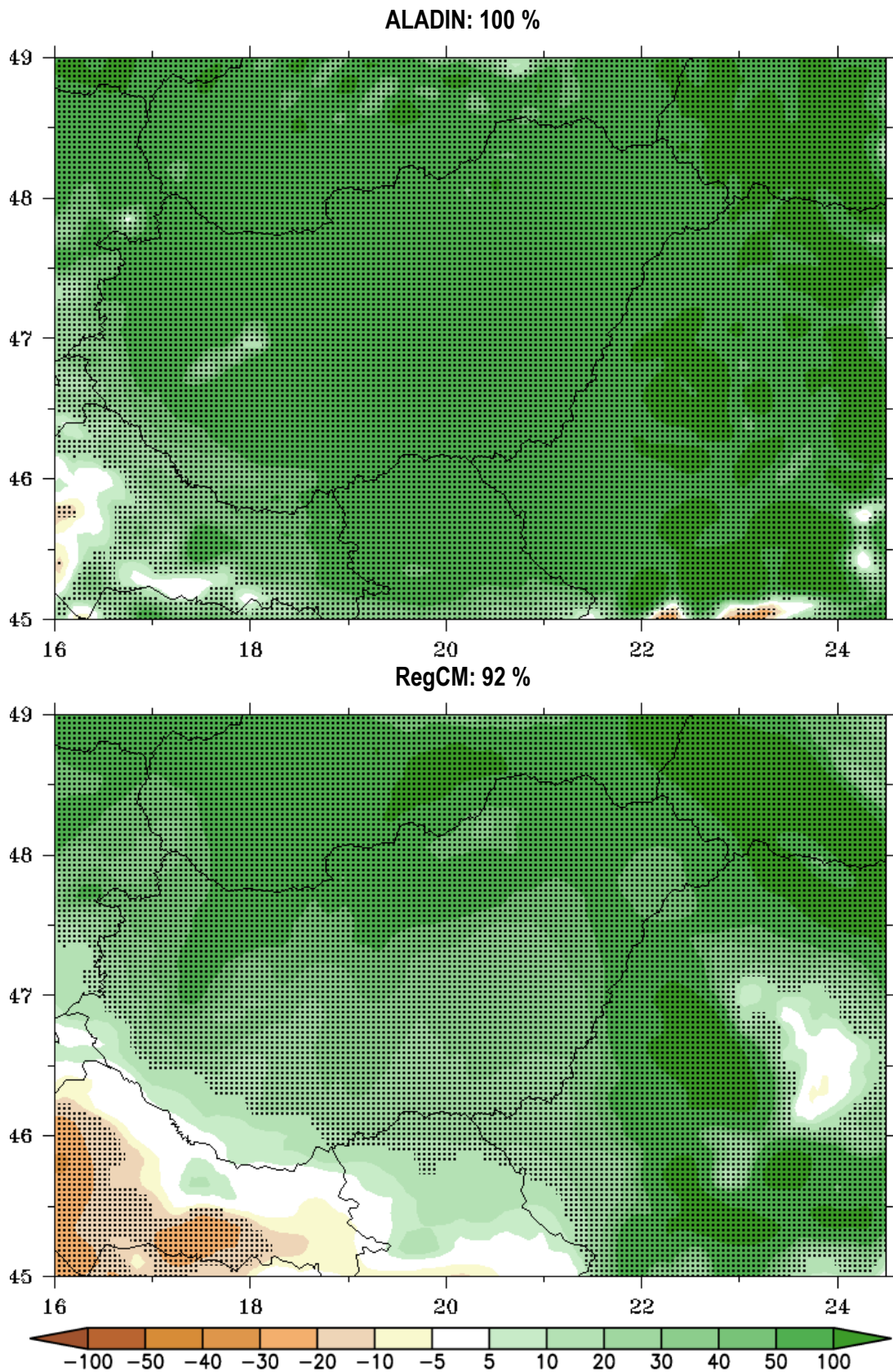
A csapadék esetében is elvégeztük néhány éghajlati index (**6. táblázat**), az 1 mm, illetve a 10 mm feletti csapadékú napok, valamint az egymást követő száraz napok előfordulásának validációját, referenciaként a CARPATCLIM megfigyelési adatbázist használva. Jellemzően a modellek pontosabb becslést adnak ezekre az indexekre (**18–21. ábrák**), mint a hőmérsékleti indexekre. A csapadékos napok számát a RegCM a nyár kivételével minden évszakban felülbecsli, nyáron a megfigyeléshez közeli eredményeket produkál, míg az ALADIN-Climate ősszel és télen megfelelő, tavasszal és nyáron viszont túl sok csapadékos napot jelez. A 10 mm-t meghaladó napi csapadékösszegű napok előfordulását a RegCM ősszel és télen ugyancsak kissé felülbecsli, nyáron viszont jelentősen alulbecsli, míg az ALADIN-Climate az őszi felülbecslés kivételével jól visszaadja a mérések alapján számított értékeket. A száraz napok maximális évszakos hosszát a modellek a valóságosnál rövidebbnek jellemzik (a csapadékos napokkal közel fordítottan arányosan), a RegCM a nyár kivételével minden évszakban, míg az ALADIN-Climate modellre télen inkább a felülbecslés jellemző.

**6. táblázat.** A vizsgált csapadékindexek.

Index	Definíció
<b>Csapadékos nap</b>	A napi csapadékösszeg 1 mm feletti.
<b>Nagy csapadékú nap</b>	A napi csapadékösszeg eléri a 10 mm-t.
<b>Extrém nagy csapadékú nap</b>	A napi csapadékösszeg eléri a 20 mm-t.
<b>Csapadékintenzitás</b>	Az 1 mm-nél nagyobb csapadékú napokon hulló átlagos csapadék.
<b>Egymást követő száraz napok hossza</b>	Amikor a napi csapadékösszeg 1 mm-nél kisebb.

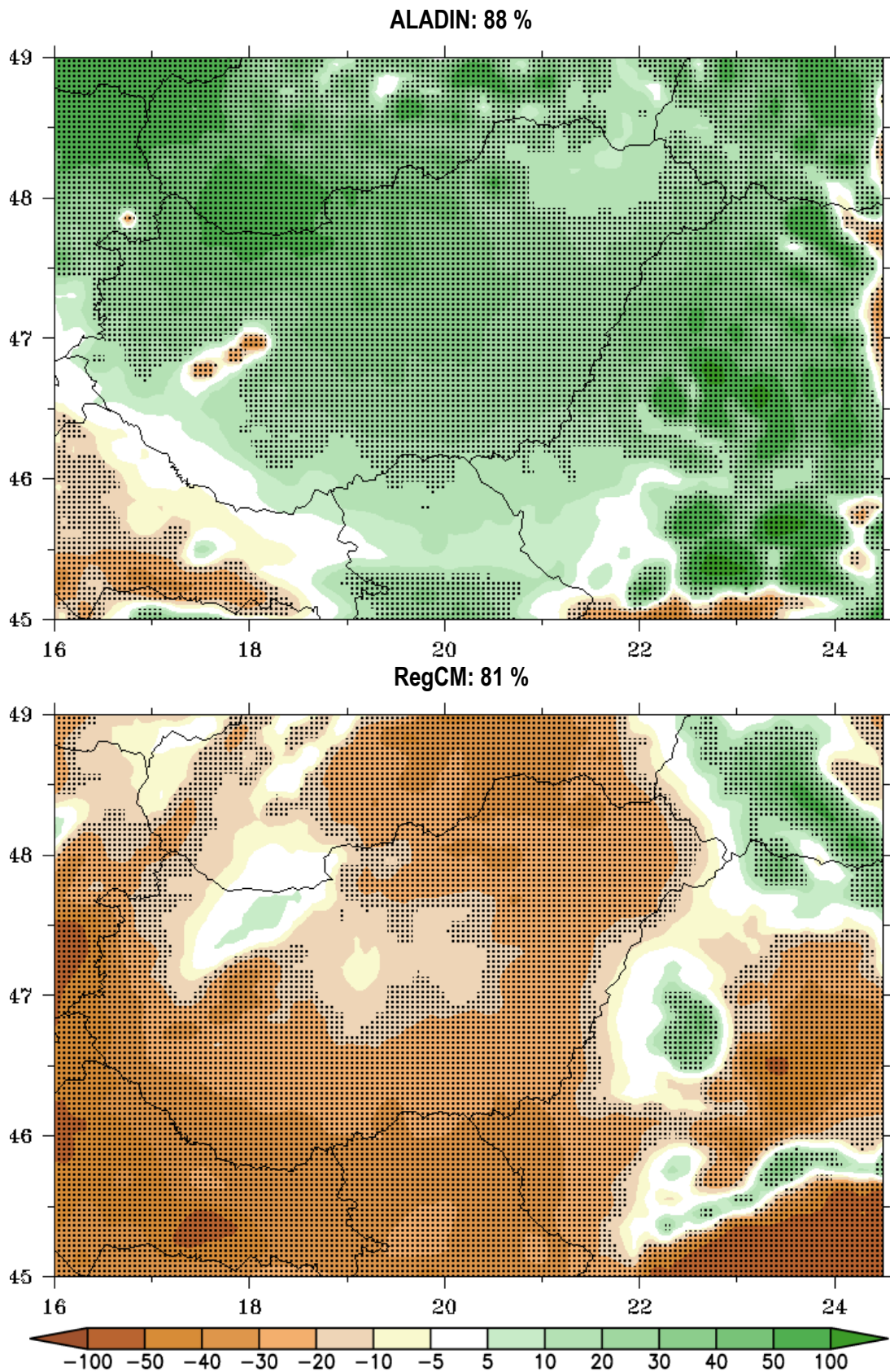


**13. ábra.** Az átlagos éves csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktértek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

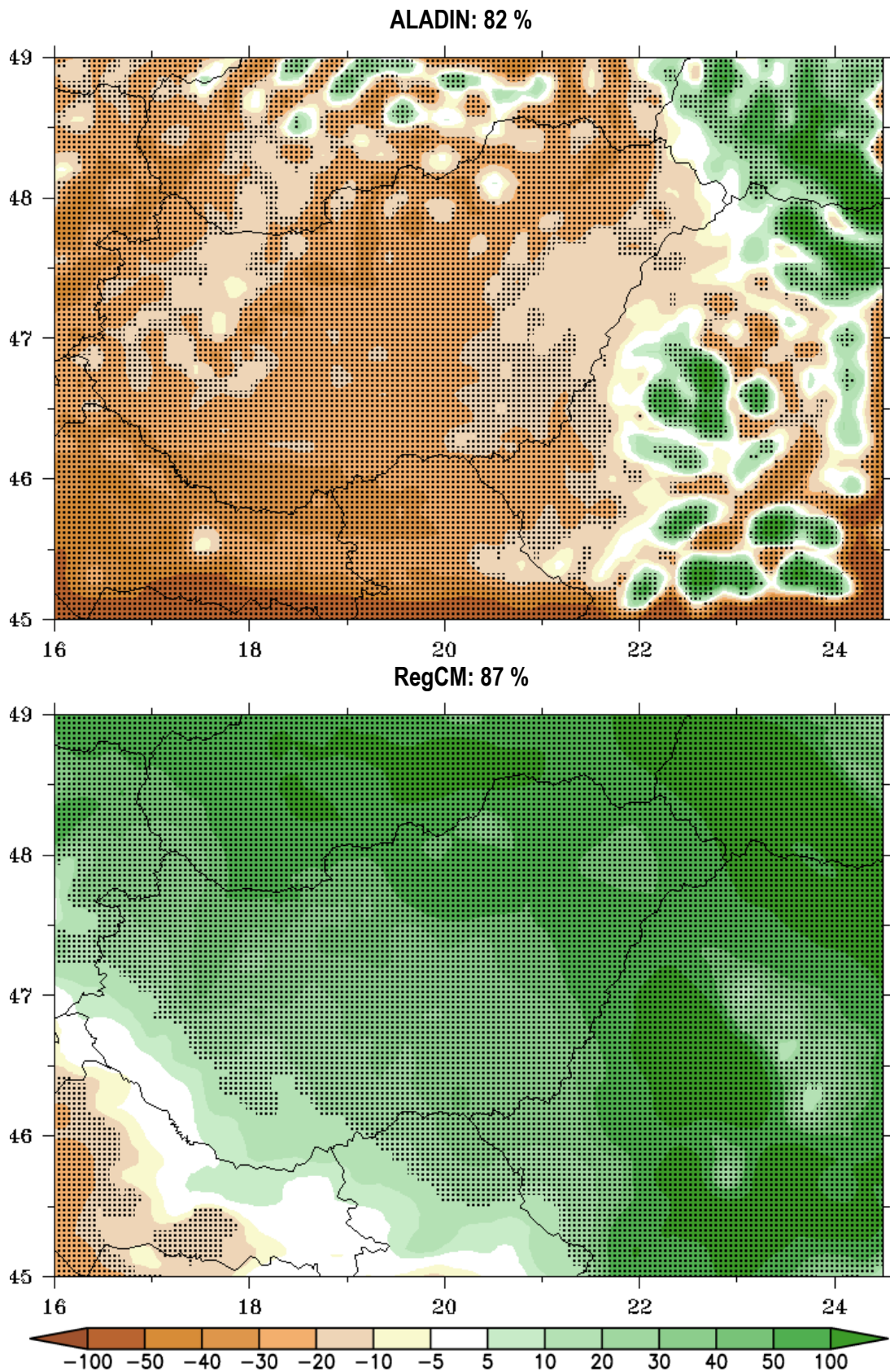


**14. ábra.** Az átlagos tavaszi csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climat és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

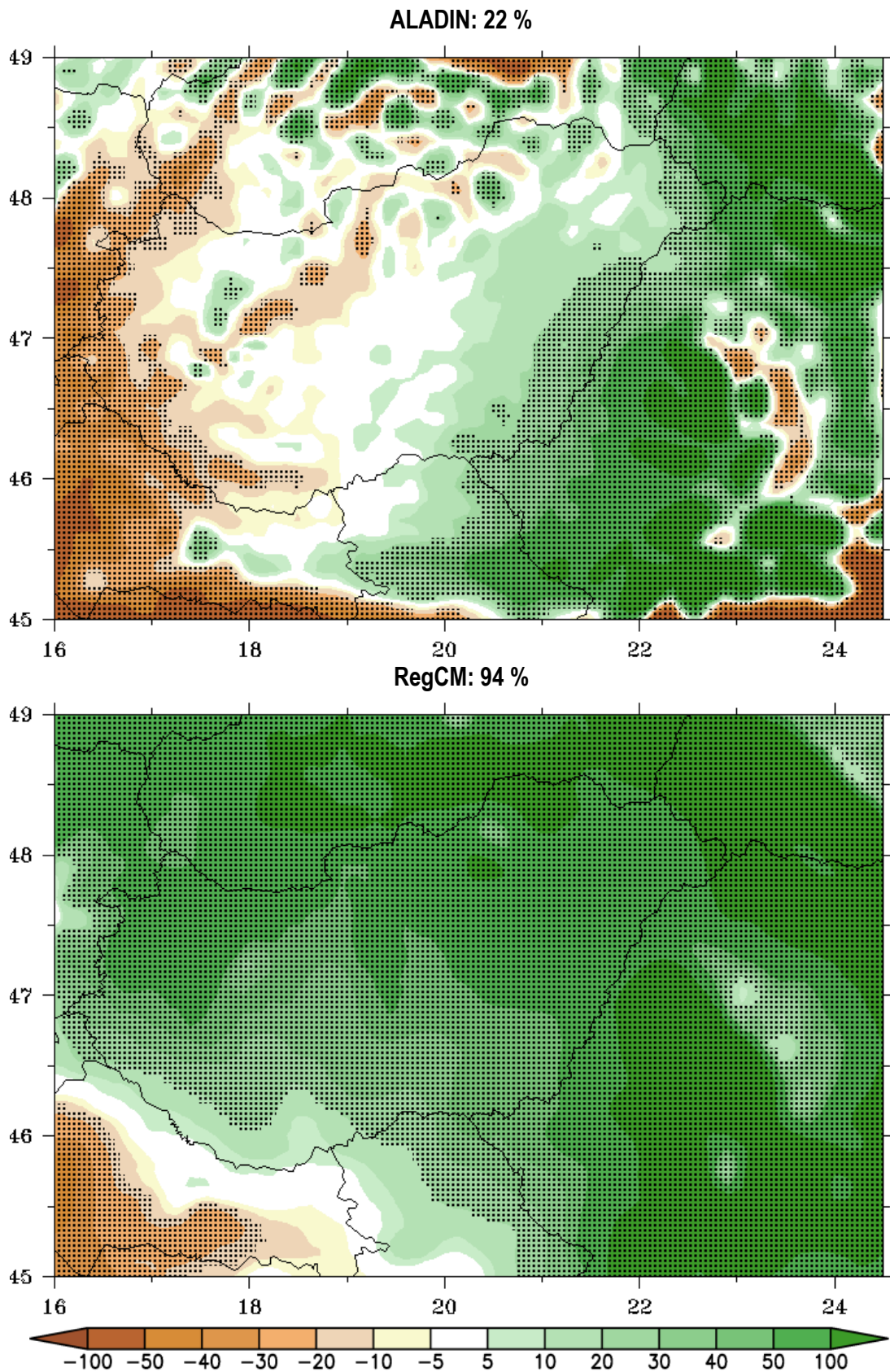




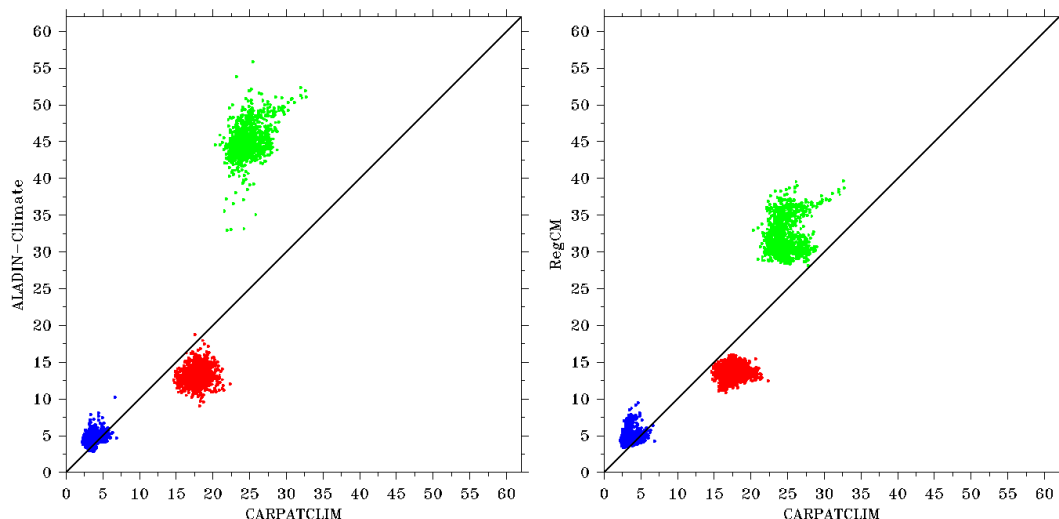
**15. ábra.** Az átlagos nyári csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléértékek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.



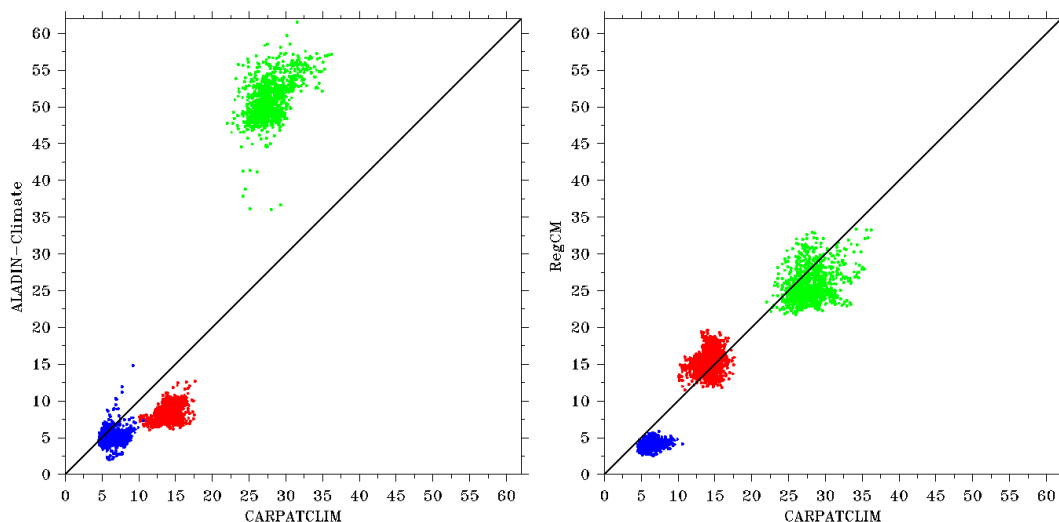
**16. ábra.** Az átlagos őszi csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climote és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.



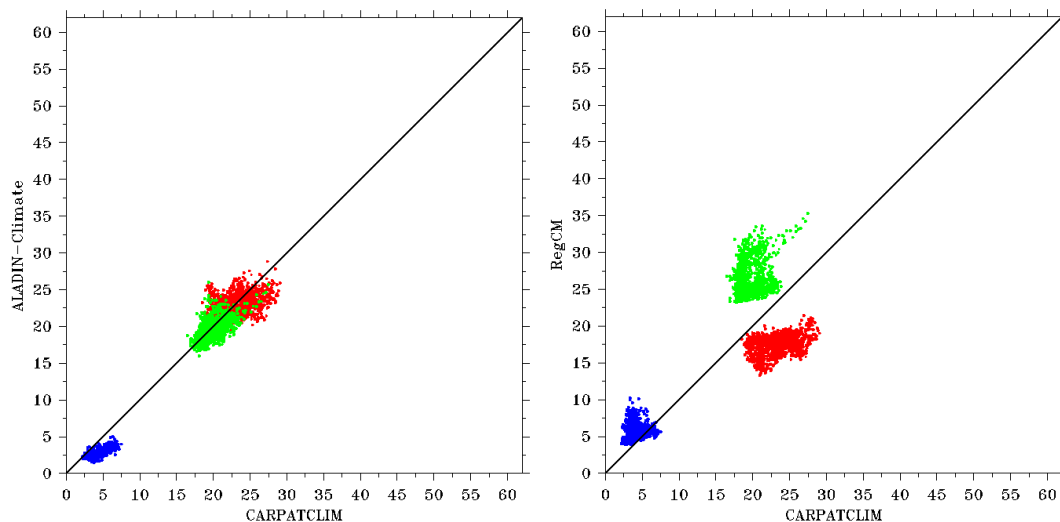
**17. ábra.** Az átlagos téli csapadék eltérés (%) az ALADIN-Climade és RegCM regionális klímamodellek eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.



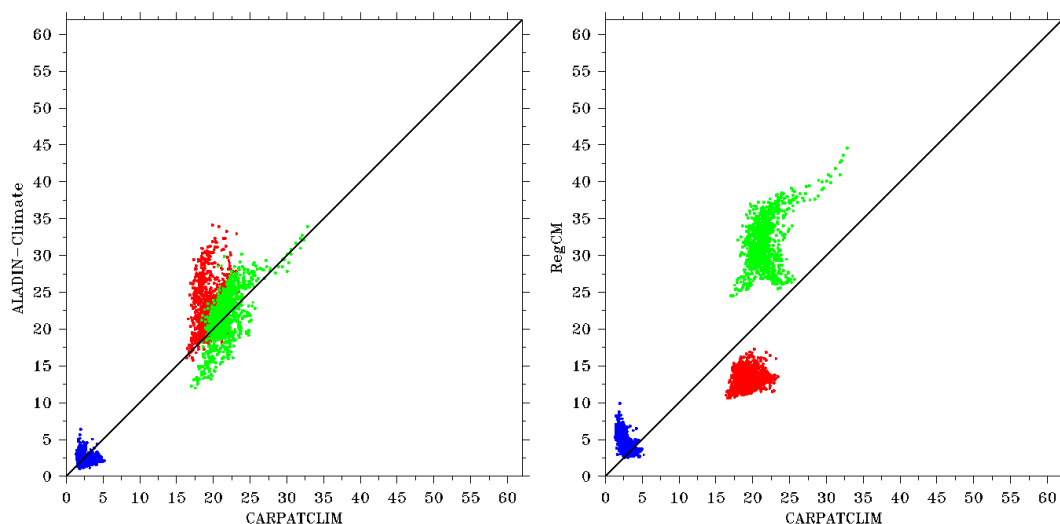
**18. ábra.** A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) tavaszi gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely).



**19. ábra.** A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) nyári gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely).



**20. ábra.** A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) őszi gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely).



**21. ábra.** A különböző csapadékindexek (kék: 10 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, zöld: 1 mm-nél nagyobb csapadékösszegű napok, piros: egymást követő száraz napok maximális hosszának) téli gyakorisága (nap) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re a CARPATCLIM megfigyelési adatbázis alapján (x-tengely), illetve az ALADIN-Climate (bal) és a RegCM (jobb) regionális klímamodellek eredményei alapján (y-tengely).

## 4.2 Projekciók

Az ALADIN-Climate és a RegCM regionális éghajlati modellek egy átlagos ütemű légköri szén-dioxid koncentráció fejlődést feltételezve írják le a Kárpát-medence éghajlatának XXI. században várható módosulását. A modelledmények együttes vizsgálata lehetővé teszi a projekciók bizonytalanságának alapfokú számszerűsítését. A NATÉR klímamodell-adatainak bizonytalansága elsősorban maguknak a regionális modelleknek az eltéréseiből ered: a modellek különböznek a fizikai folyamatok leírására alkalmazott numerikus sémáikban és

parametrizációs eljárásaikban, nagy eltéréseket okozhat az, hogy milyen területen, felszíni jellemzőkkel és felbontással hajtják végre a modellkísérleteket. Ezenkívül a bizonytalanság egy jelentős része származik a globális klímamodellekből, melyek a regionális modellek számára leírják egy kiválasztott térség éghajlatában szerepet játszó nagyskálájú információkat. Adott éghajlati viszonyok esetén a szimulációk megbízhatóságát akkor tekintjük nagyobbának, ha a modellek jó egyezést mutatnak, eltérő eredmények esetén a projekciók nagyobb bizonytalansággal terheltek (Horányi et al., 2011).

A Kárpát-medence éghajlatában az átlaghőmérsékletre, a csapadékösszegre, valamint különböző éghajlati indexekre várható jövőbeli változásokat a két modellre együttesen vizsgáltuk 2021–2050-re és 2071–2100-ra koncentrálva, s a változásokat az egyes modellek 1961–1990 időszakra szimulált átlagaihoz viszonyítva adtuk meg. A változások számszerűsítésénél a regionális modellek eredményeit azonos súllyal vettük figyelembe. A két kísérlet együttese megjeleníti a regionális és globális modellek eltéréseiből eredő bizonytalanságot, viszont egyáltalán nem ad információt az emberi tevékenység közelítő jellegű leírásából eredő bizonytalanságról, aminek elsősorban az évszázad végére vonatkozó hőmérsékleti projekciók esetében van jelentősége.

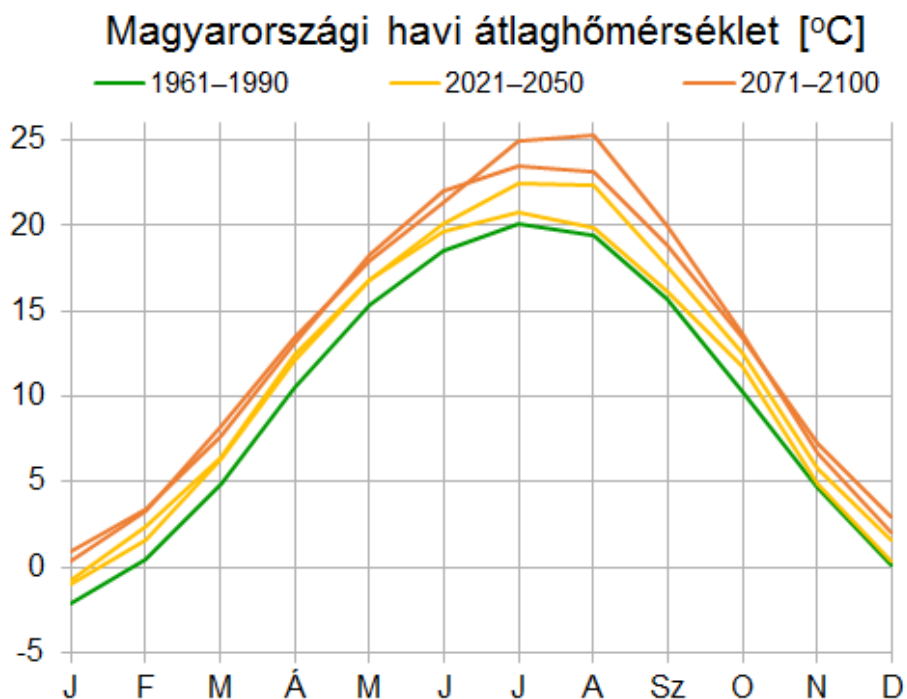
### Hőmérséklet

Az ALADIN és a RegCM regionális klímamodellek „egyetértene” abban, hogy a XXI. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelkedése a Kárpát-medencében. Ezek a változások minden időszak és mindkét modell esetében statisztikailag szignifikánsak, így ezt külön nem említjük a továbbiakban (és a hőmérsékleti térképeken sem jelöltük). A két regionális klímamodell alapján a hőmérséklet éves átlagban vett növekedése 2021–2050-re nagyjából 1-2 °C (**23. ábra; 7. táblázat**) és 2071–2100-ra csaknem teljes bizonyossággal mondható, hogy a melegedés mértéke hazánkban mindenütt meghaladja a 3 °C-ot, de 5 °C-nál kisebb lesz (**28. ábra; 7. táblázat**). Azaz a hőmérséklet emelkedése – némileg gyorsuló ütemmel – folyamatosnak tekinthető a XXI. század során, s az egyik modell szerint kissé nagyobb mértékben. Jól látható az is, hogy Magyarország keleti fele jobban fog melegedni, mint a nyugati országrész.

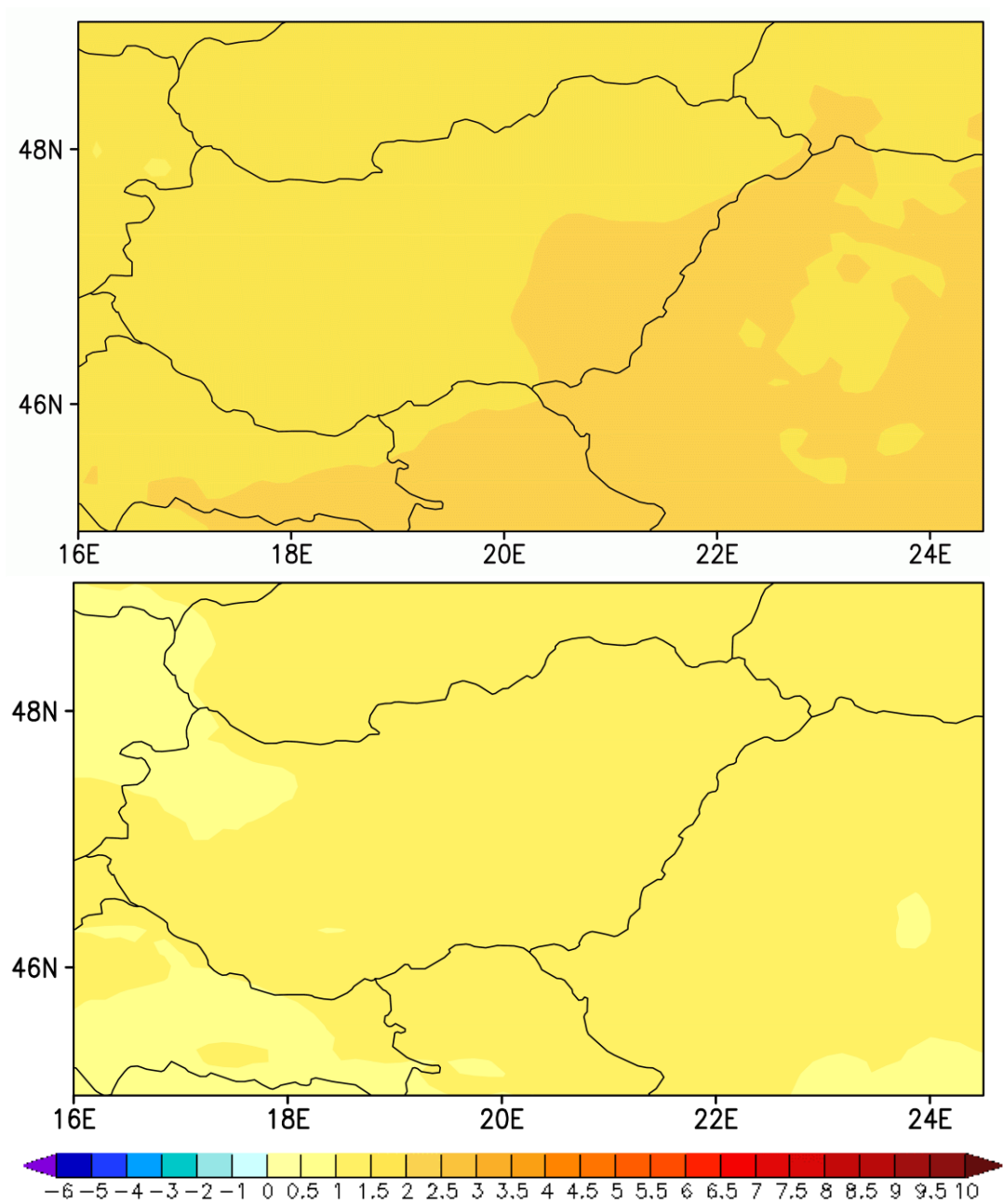
Az évszakai térképek (**24–27. ábra** és **29. ábra–32. ábra**) vizsgálata alapján a modellek közötti változékonyság tavasszal a legkisebb, míg nyáron tapasztalható a legnagyobb eltérés a várható átlaghőmérséklet alakulásában mindkét jövőbeli időszakban. Az évszázad közepére tavasszal és télen szinte mindenütt az országban 1 °C-ot meghaladó, de 2 °C-nál nem nagyobb mértékű változások várhatóak. Nyáron és ősszel a modellek közötti bizonytalanság jóval nagyobb mértékű: az egyik modell szerint mindkét évszakban 1 °C-nál kisebb a változás, míg a másik 2-3 °C-os változást jelez. Az évszázad végére a nagyfokú bizonytalanság csak nyáron marad meg. Ugyanakkor egyedül a nyári évszak az, amikor Magyarország teljes területén igen valószínű a 3 °C-nál nagyobb melegedés, augusztusban ez elérheti akár a 6 °C-ot is (**22. ábra**). A többi évszakban a keleti területeket leszámítva nagy bizonyossággal nem lesz 4 °C-nál nagyobb hőmérsékletemelkedés, de a 3 °C-os változás sem tekinthető mindenhol bizonyosnak (ez alól talán csak az ősz a kivétel). Az évszakai térképek alapján is megfigyelhető a már említett országon belüli eloszlás: keleten, illetve délen várható nagyobb mértékű melegedés, azaz az hazánk területén belül van egy nyugat–keleti irányú hőmérsékletváltozási gradiens nagyobb melegedési értékeket jelezve a keleti határszélen. Az egyik modell esetében ezek a területi különbségek csak az évszázad végére jelennek meg.

**7. táblázat.** A magyarországi éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
<b>2021–2050</b>	1,1–1,9	1,6	0,7–2,6	0,8–2,0	1,1–1,3
<b>2071–2100</b>	3,1–3,5	2,8–3,1	3,5–4,9	3,0–3,6	2,5–2,9

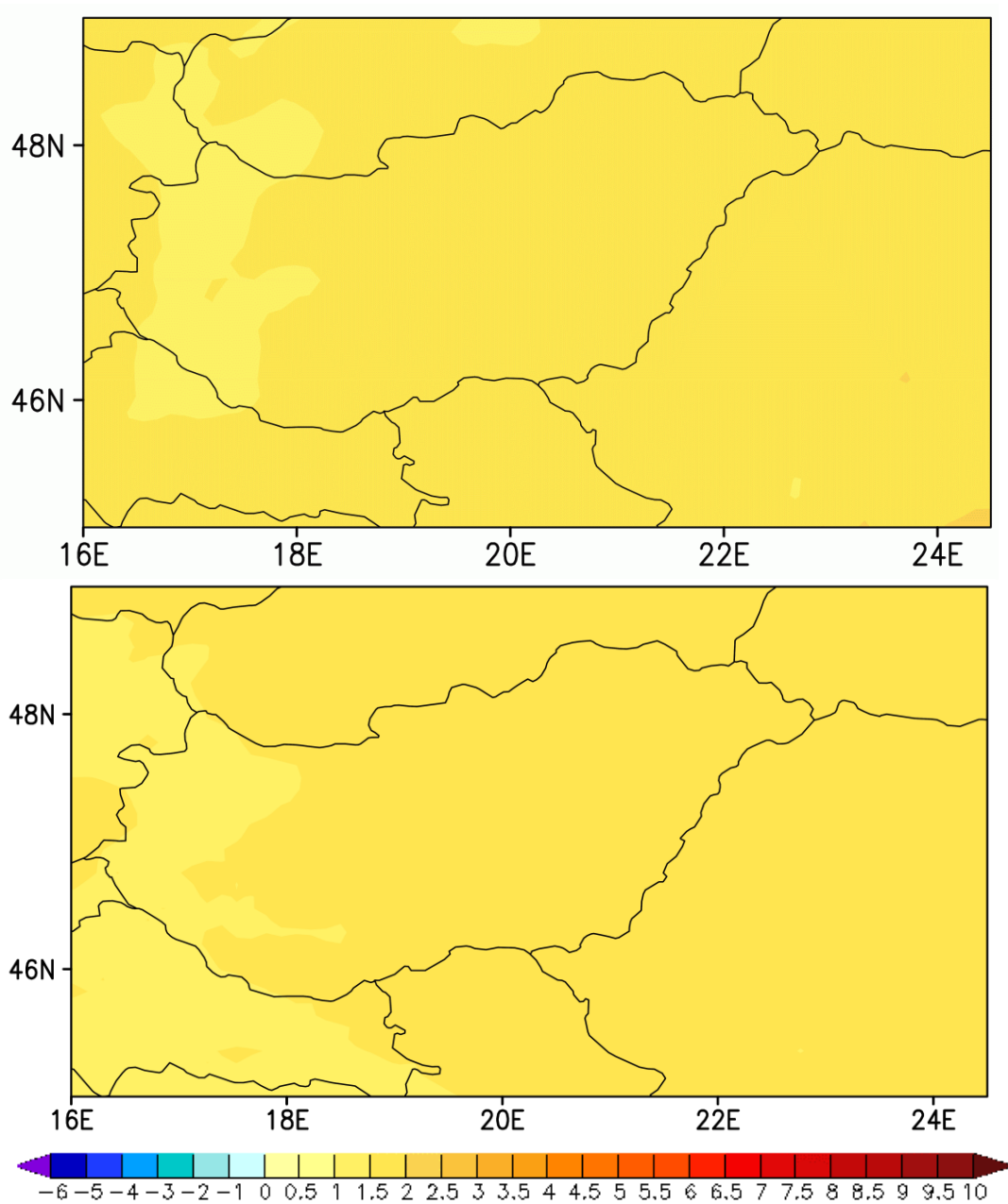


**22. ábra.** A magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

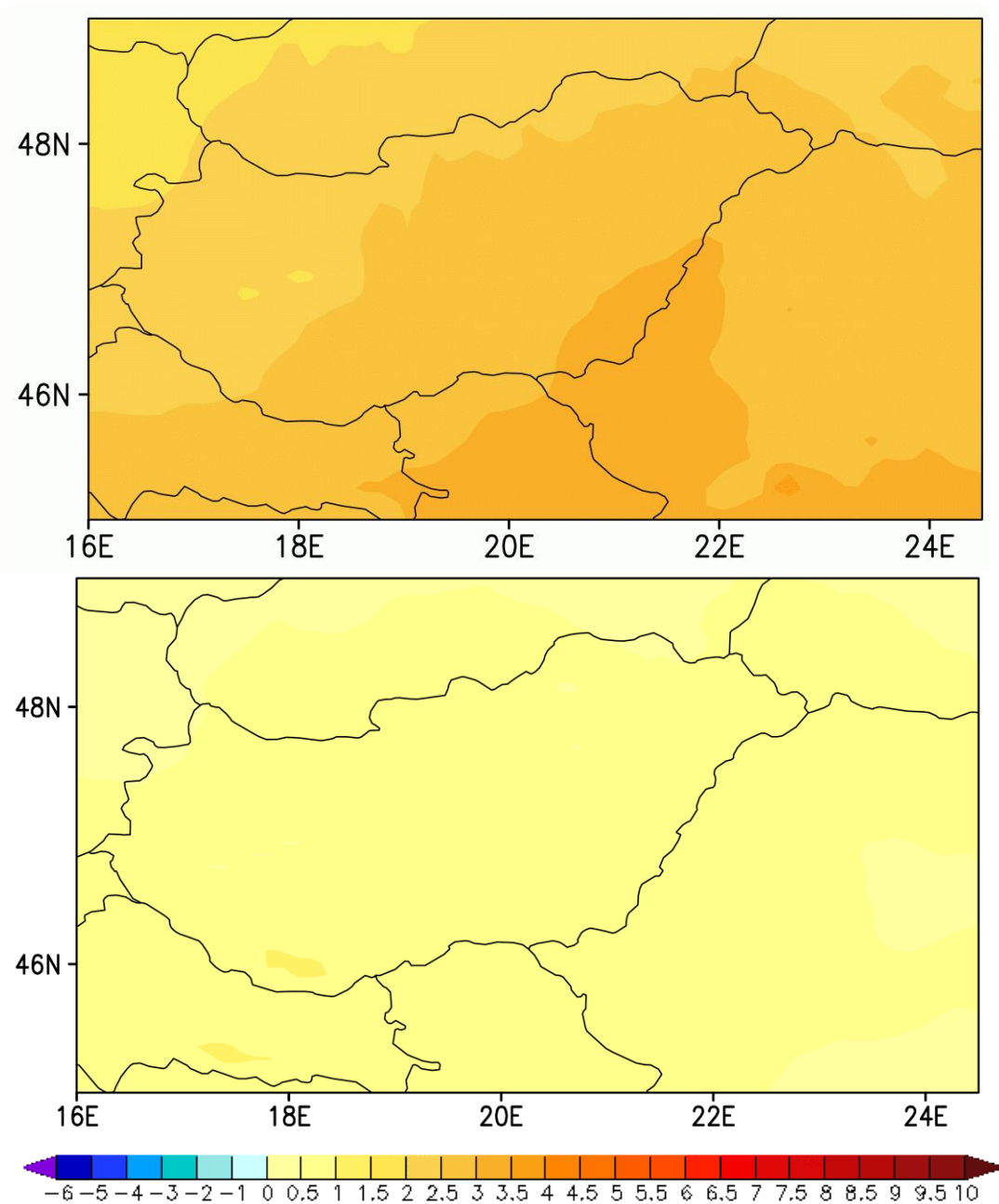


**23. ábra.** Az éves átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referenciaidőszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

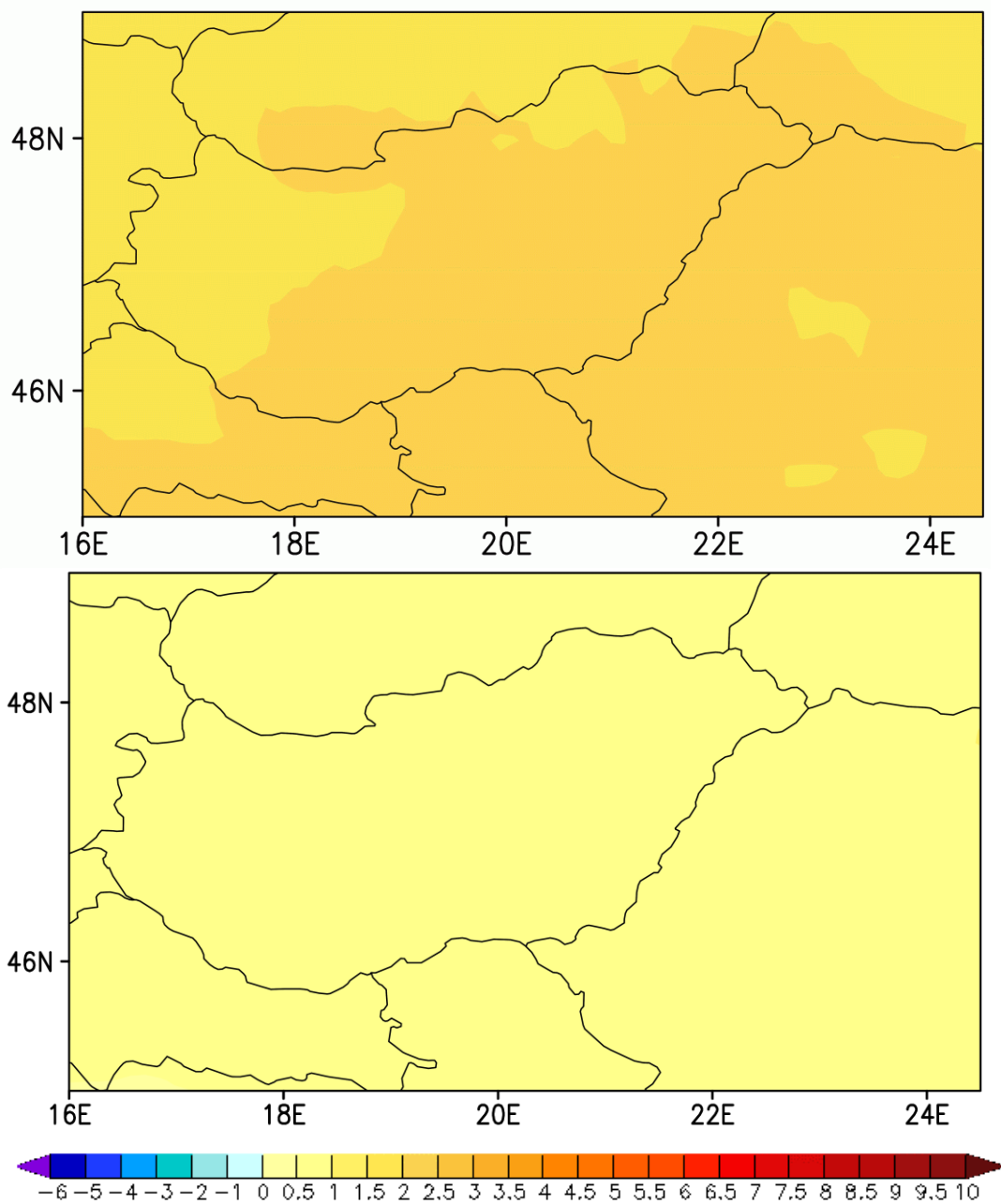




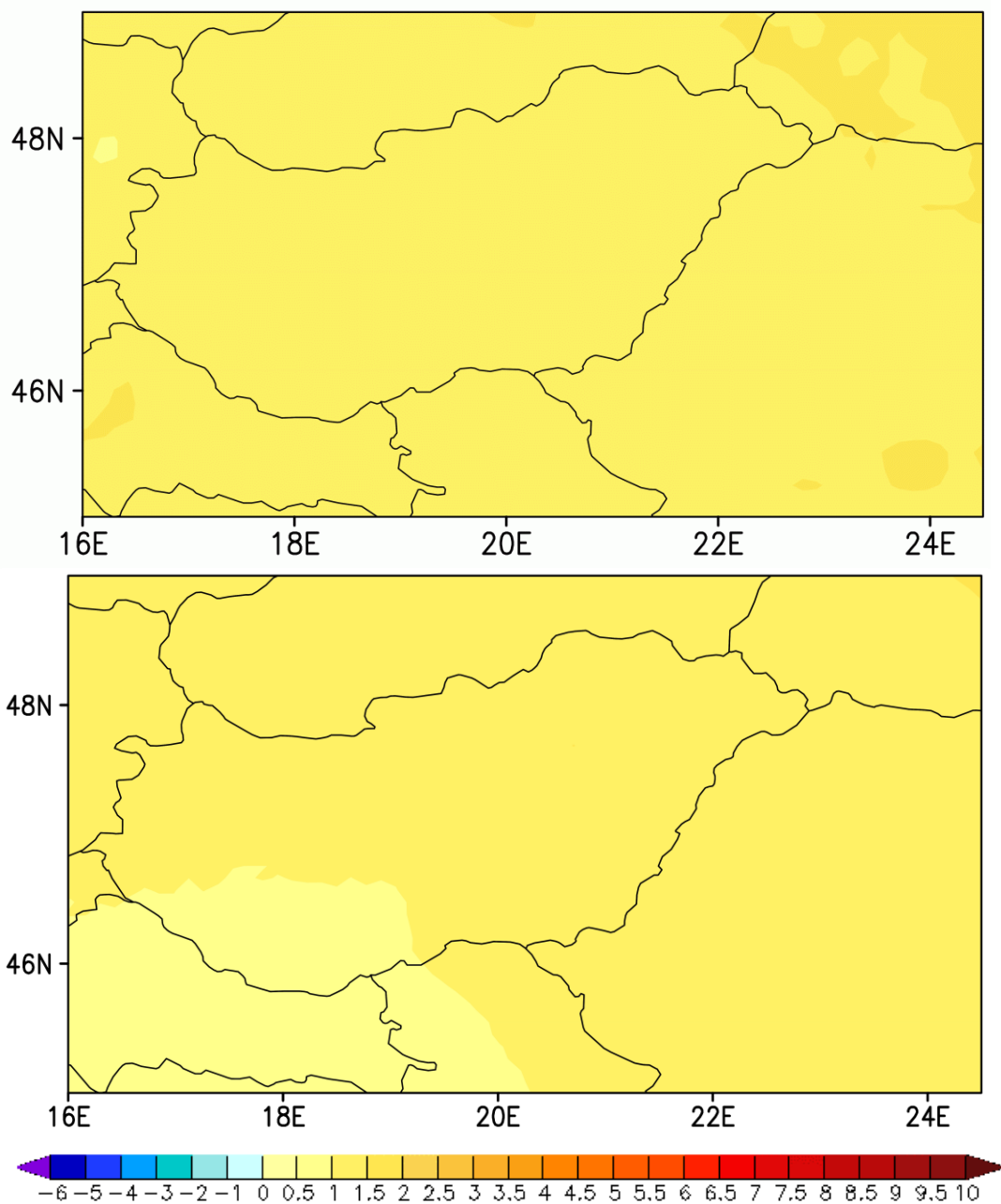
**24. ábra.** A tavaszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



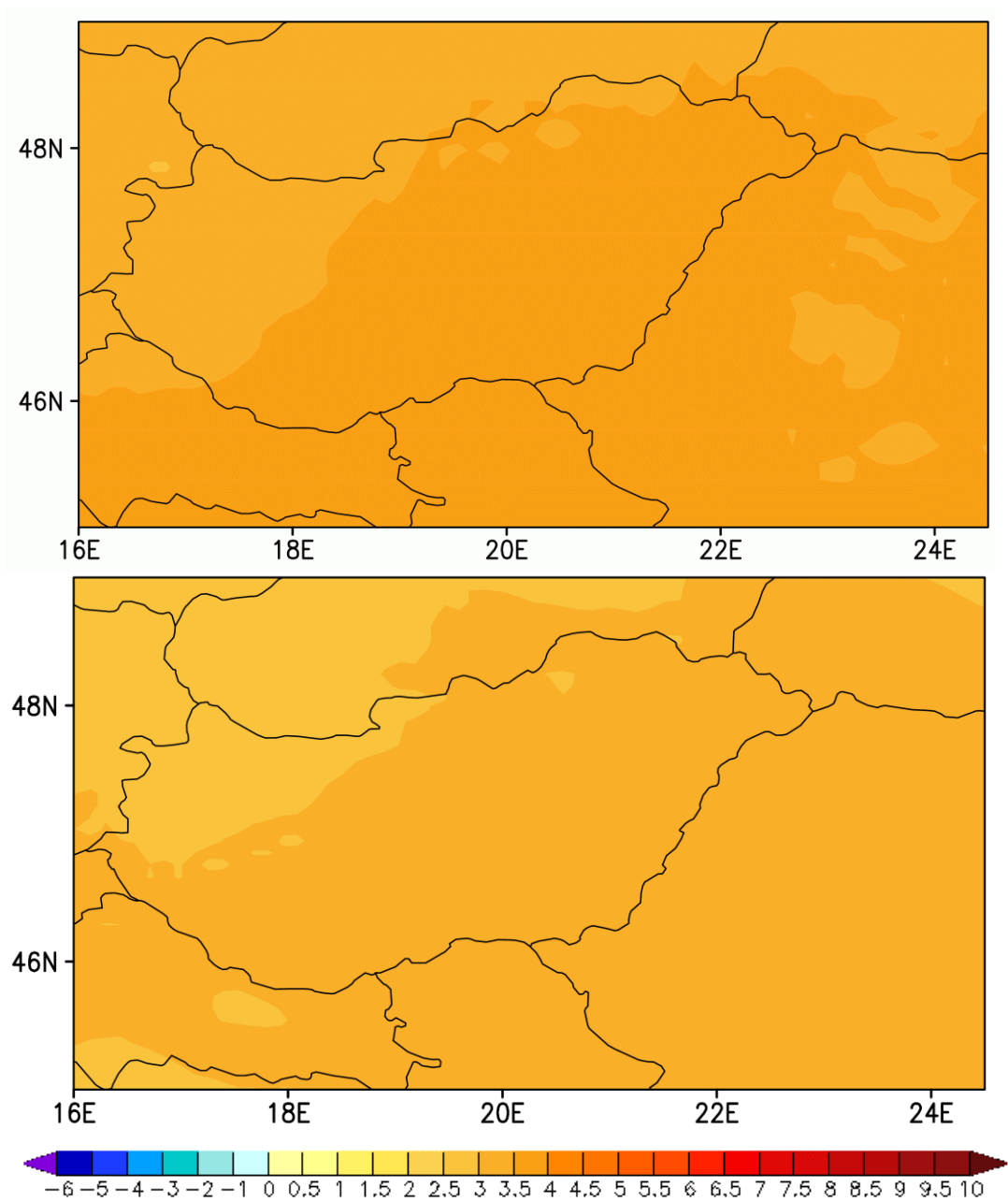
**25. ábra.** A nyári átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



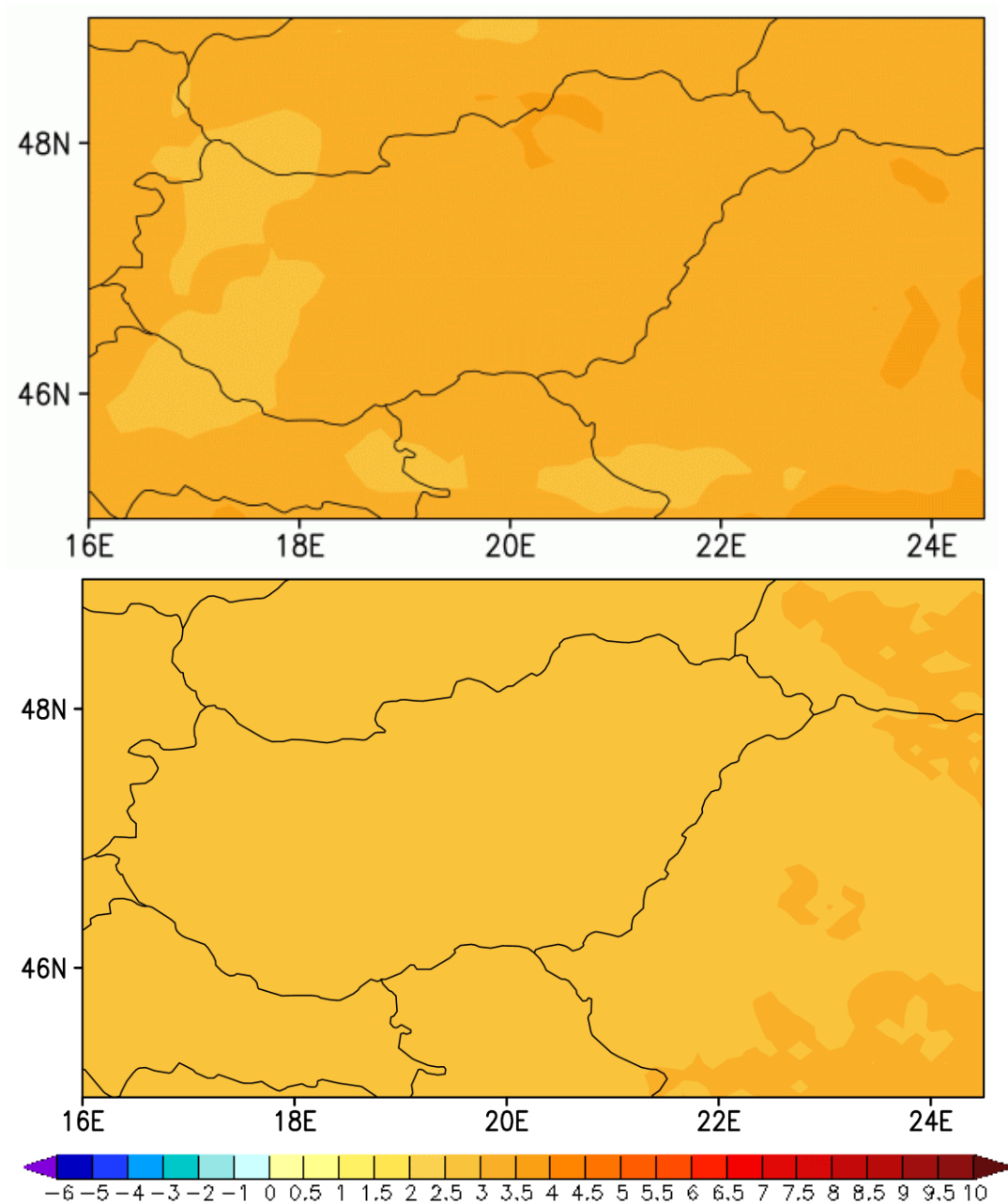
**26. ábra.** Az őszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



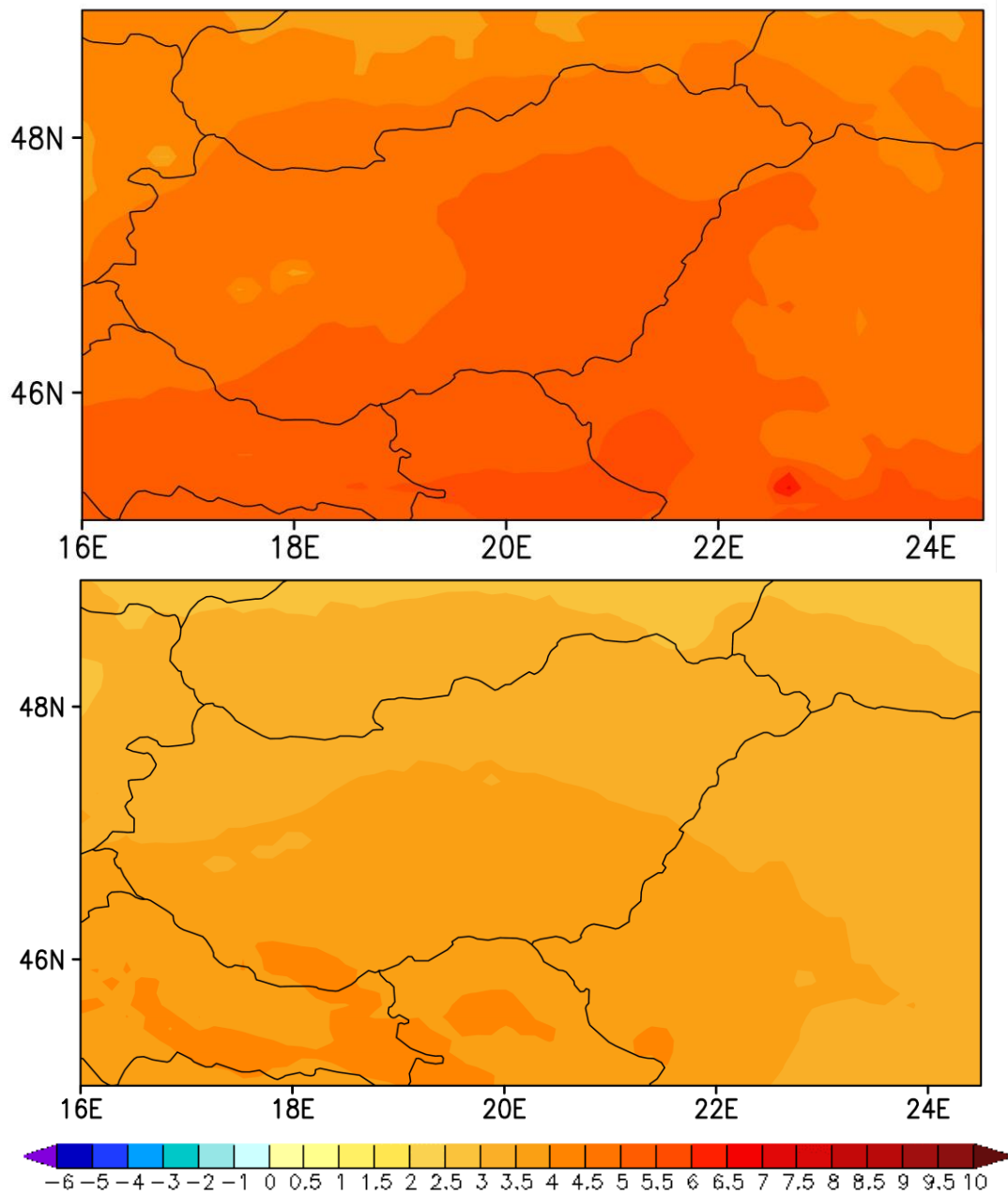
**27. ábra.** A téli átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



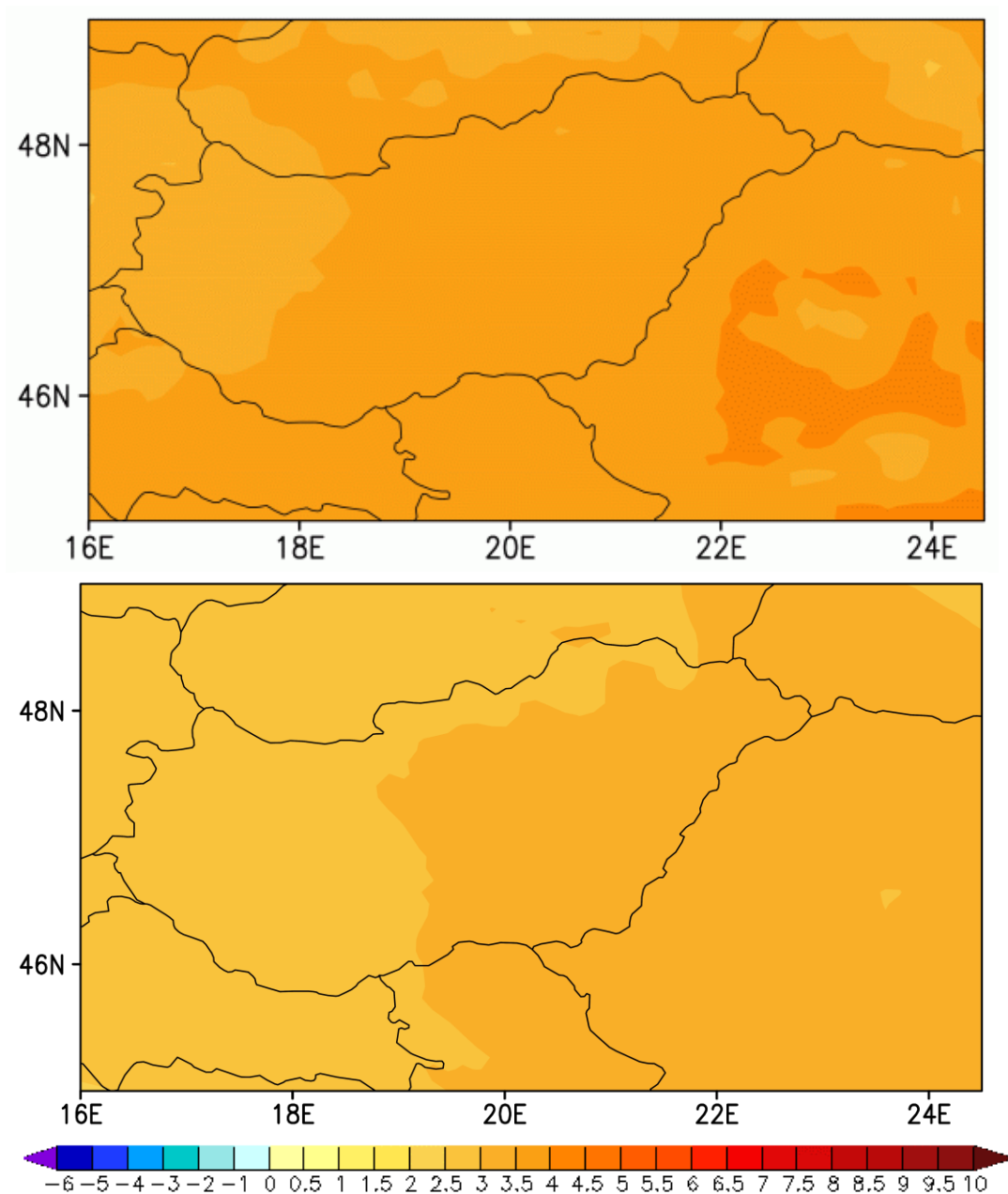
**28. ábra.** Az éves átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referenciaidőszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



**29. ábra.** A tavaszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referenciaidőszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

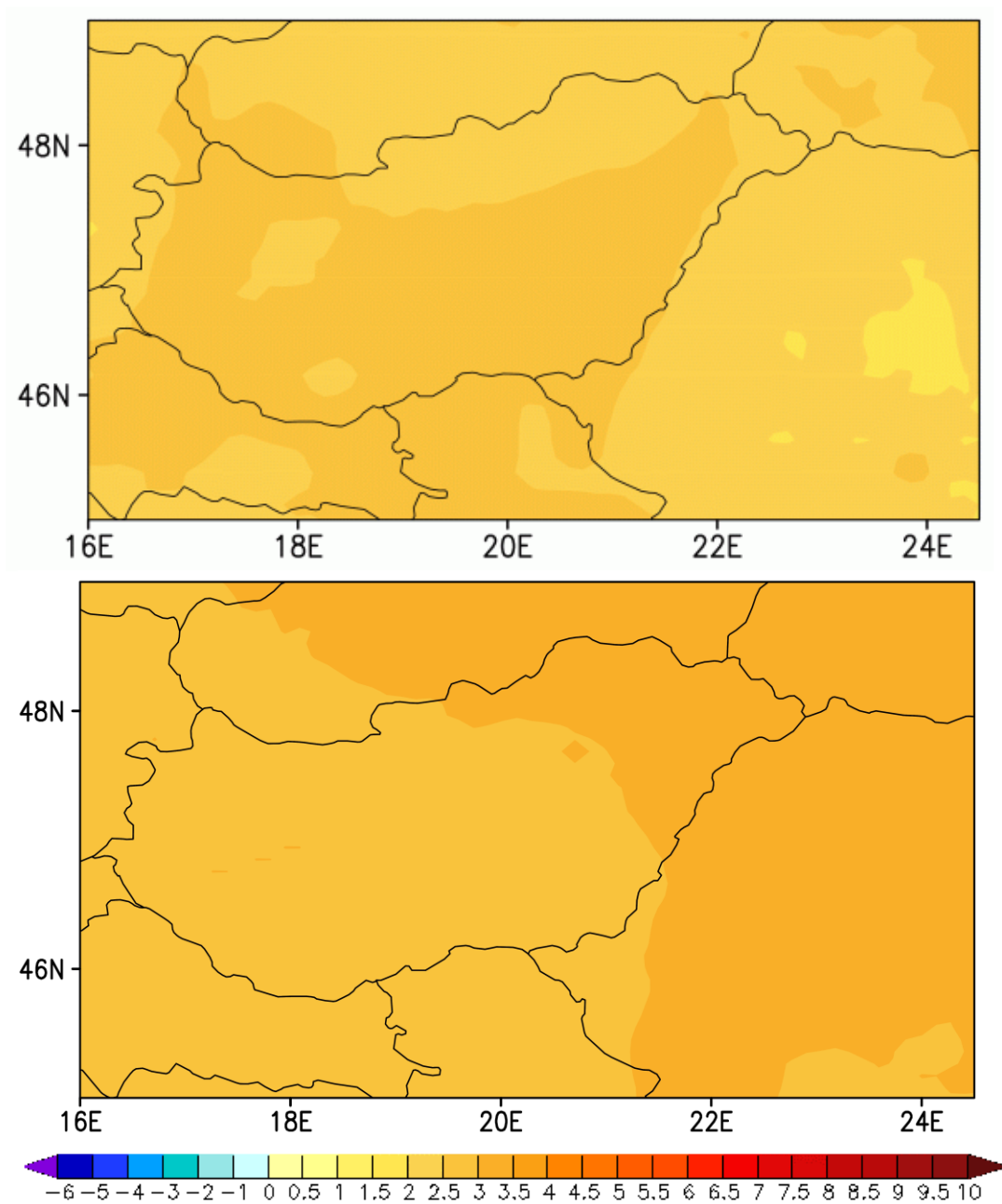


**30. ábra.** A nyári átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referenciaidőszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



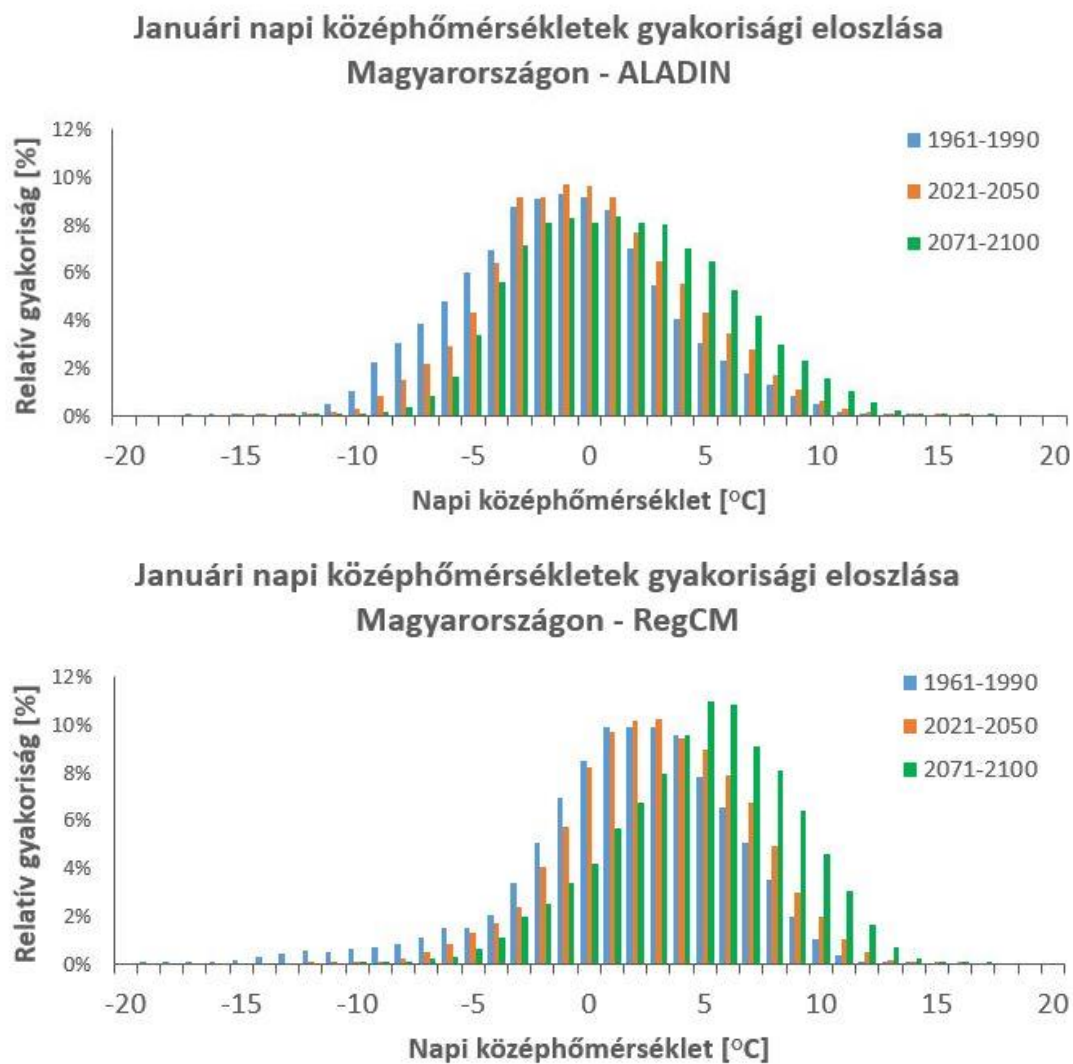
**31. ábra.** Az őszi átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.





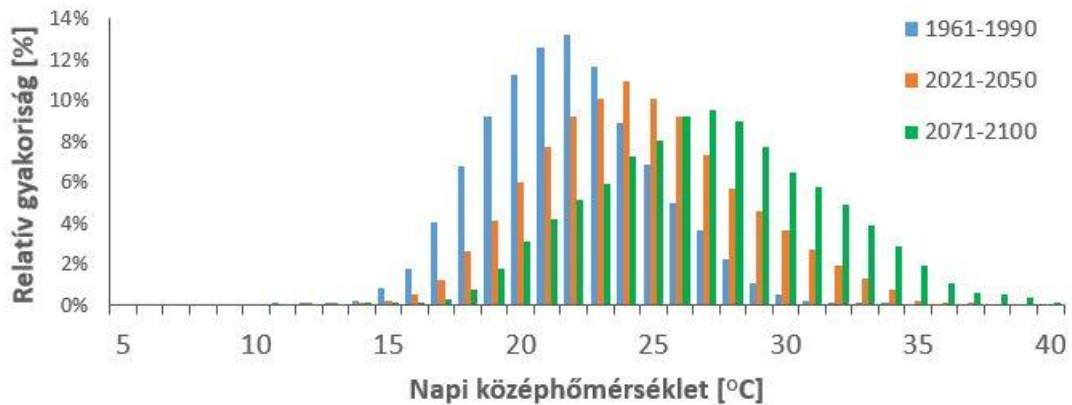
**32. ábra.** A téli átlaghőmérséklet változása (°C) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

Külön megvizsgáltuk a napi középhőmérséklet értékeit a januári és július hónapokra. Ezek gyakorisági eloszlása is a melegedő tendenciát támasztja alá, amely különösen a század végére válik jelentőssé (33–34. ábra). Az egyik modell esetén a januári középhőmérséklet legnagyobb relatív gyakorisággal  $-3$  és  $0$  °C között alakult a referencia-időszakban, a század végére már  $-2$  és  $+3$  °C közötti érték jellemző. Ugyanez az érték a másik modell szerint  $0-3$  °C-ról az évszázad végére  $5-6$  °C-ra emelkedik, azaz lényegesen ritkábban fog előfordulni fagypont alatti hőmérséklet. Júliusban mindkét modell szerint kb. 5-6 fokkal eltolódik a leggyakoribb hőmérsékleti érték, s a nyers modelleredmények alapján ez  $20-23$  illetve  $25-27$  °C-ot jelenthet.

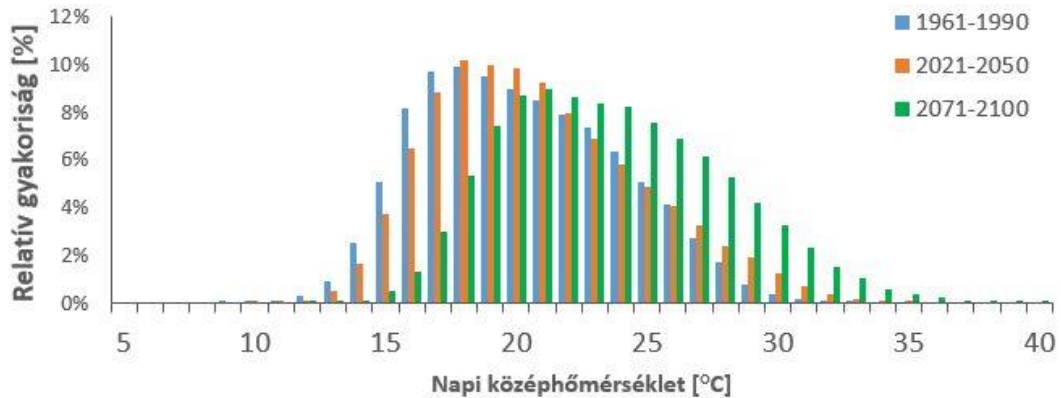


**33. ábra.** A januári napi középhőmérséklet egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján.

Júliusi napi középhőmérsékletek gyakorisági eloszlása  
Magyarországon - ALADIN



Júliusi napi középhőmérsékletek gyakorisági eloszlása  
Magyarországon - RegCM



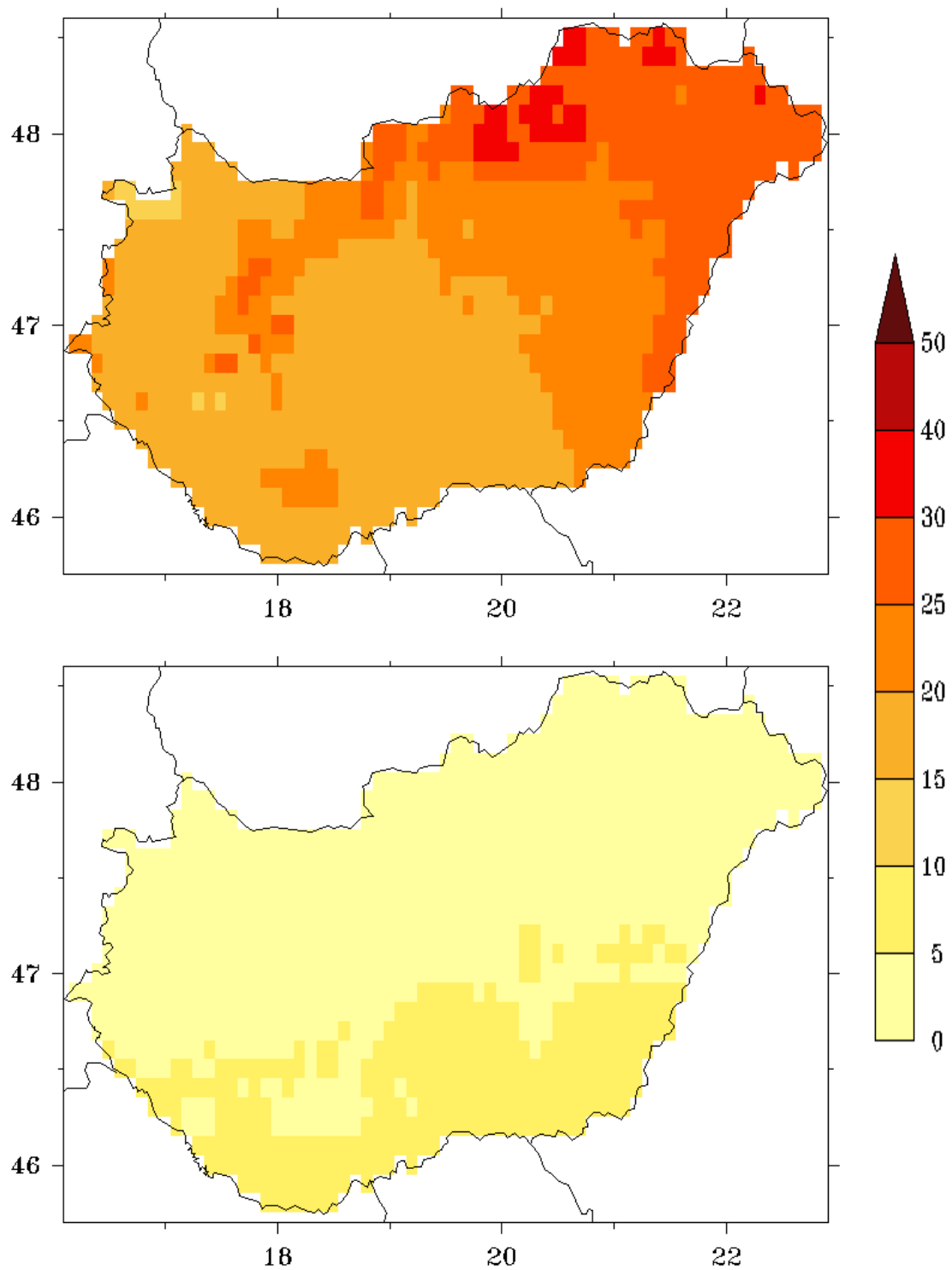
**34. ábra.** A júliusi napi középhőmérséklet egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácspontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján.

A hőmérséklet változásának jellemzésére négy hőmérsékleti index, az extrém hideg napok, a fagyos napok, a nyári napok, valamint a hőségnapok (**4. táblázat**) országos átlagban várható változásait mutatjuk be a regionális modellszimulációk eredményei alapján. A változást napban adjuk meg 2021–2050-re és 2071–2100-ra vonatkozóan a modellbeli 1961–1990 referencia-időszakhoz viszonyítva. A táblázatos formában megadott intervallumok (**8. táblázat**) a két modell eredményei alapján számított átlagos magyarországi változásokat tartalmazzák. A várakozásainknak megfelelően a negatív hőmérsékleti értékekkel jellemzett extrém hideg illetve fagyos napok száma csökkenni fog, míg a meleg hőmérsékleti szélsőségeket jellemző indexek előfordulása várhatóan jelentősen növekszik. Az 1961–1990 referencia-időszakban a mérések alapján hazánkban országos átlagban 66 nyári nap volt jellemző (Zsebeházi, 2013). A várható változás mértéke a közeljövőig 4–21 nap, az évszázad végére akár 28–40 nap is lehet. A hőségnapok száma a múltban átlagosan 14 nap volt, ami 2021–2050-re hasonló mértékben, 2–24 nappal, míg 2071–2100-ra közel 8–49 nappal növekedhet. Ezzel párhuzamosan az alacsony hőmérsékletű napok számának jelentős csökkenésére számíthatunk: a múltban átlagosan 96 fagyos nap és 10 extrém hideg nap volt jellemző hazánkban, az évszázad végére az előbbi egy hónappal, míg az utóbbi akár a felére is csökkenhet.

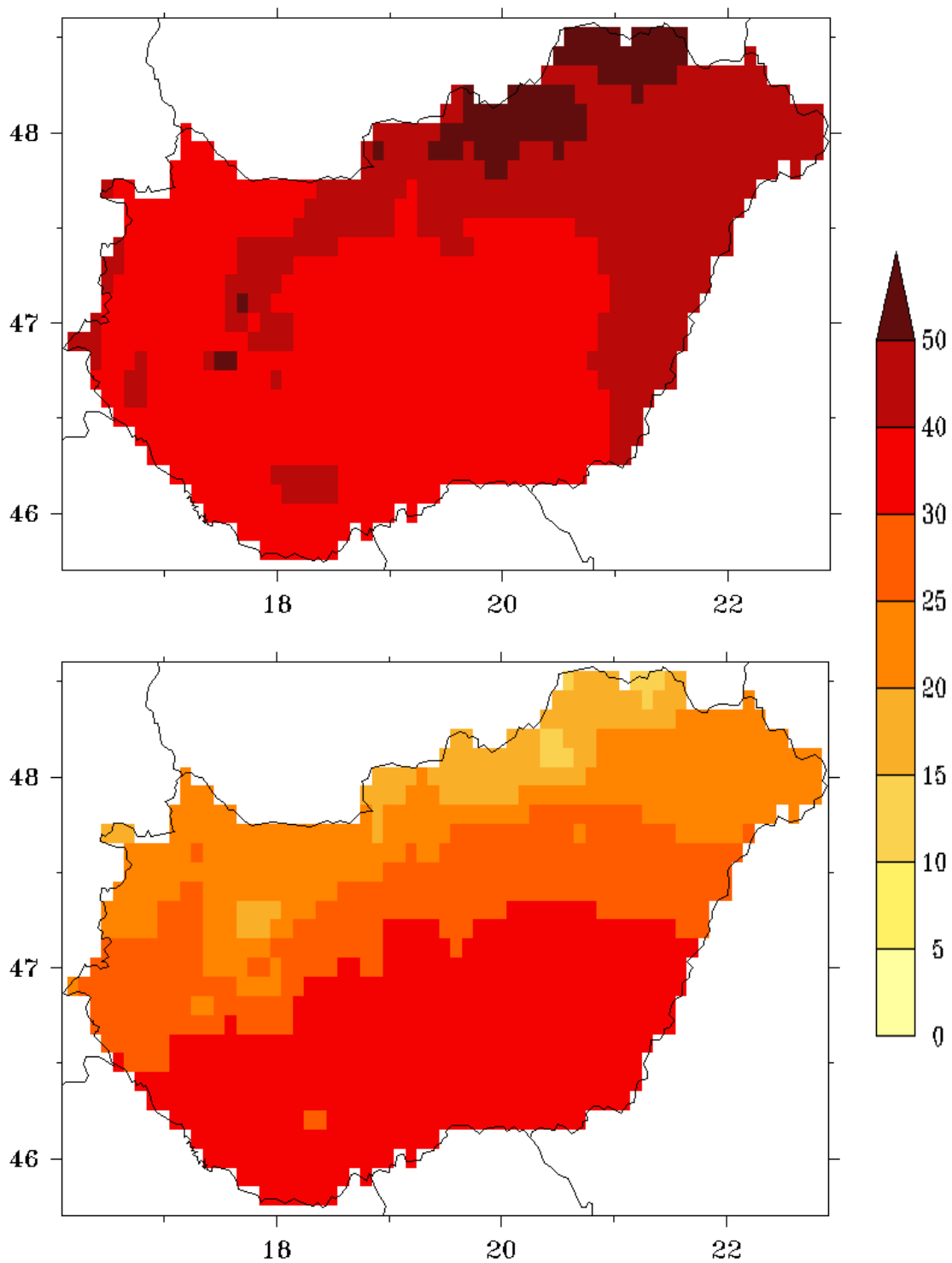
A regionális modelleredmények alapján a várható változások területi eloszlását a **35–42. ábrákon** mutatjuk be mindkét modellre és minden vizsgált indexre a közeljövőre és az évszázad végére vonatkozóan. Minden térképpáron jól látható, hogy a század végére valószínűsíthető változás jóval nagyobb mértékű, mint amire a század közepéig számíthatunk. Valamennyi bemutatott hőmérsékleti index esetén megfigyelhető, hogy a két modell eredményei eltérő mértékű változást mutatnak, s a nyári napok illetve a fagyos napok alakulásában eltérő területi eloszlást is adnak. Az egyik modell észak-északkeletre (ahol a múltban a legkisebb volt az index előfordulása), a másik a melegebb déli tájakra jelez jelentős emelkedést a nyári napok számában. A fagyos napok gyakorisága az egyik esetben várhatóan délnyugaton csökken legjelentősebben, a másik modell esetében pedig északkeleten (ahol a múltban a legtöbb fagyos napot regisztrálták). A hőségnapok számának növekedését mindkét modell leginkább az ország keleti-délkeleti felére, az extrém hideg napok számának jelentős csökkenését pedig hazánk északkeleti területeire jelzi – azaz mindkét index esetében arra az országészre, ahol az a legtöbbször fordult elő az 1961–1990 időszakban.

**8. táblázat.** A különböző hőmérsékleti indexek átlagos magyarországi éves számának változása (nap) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

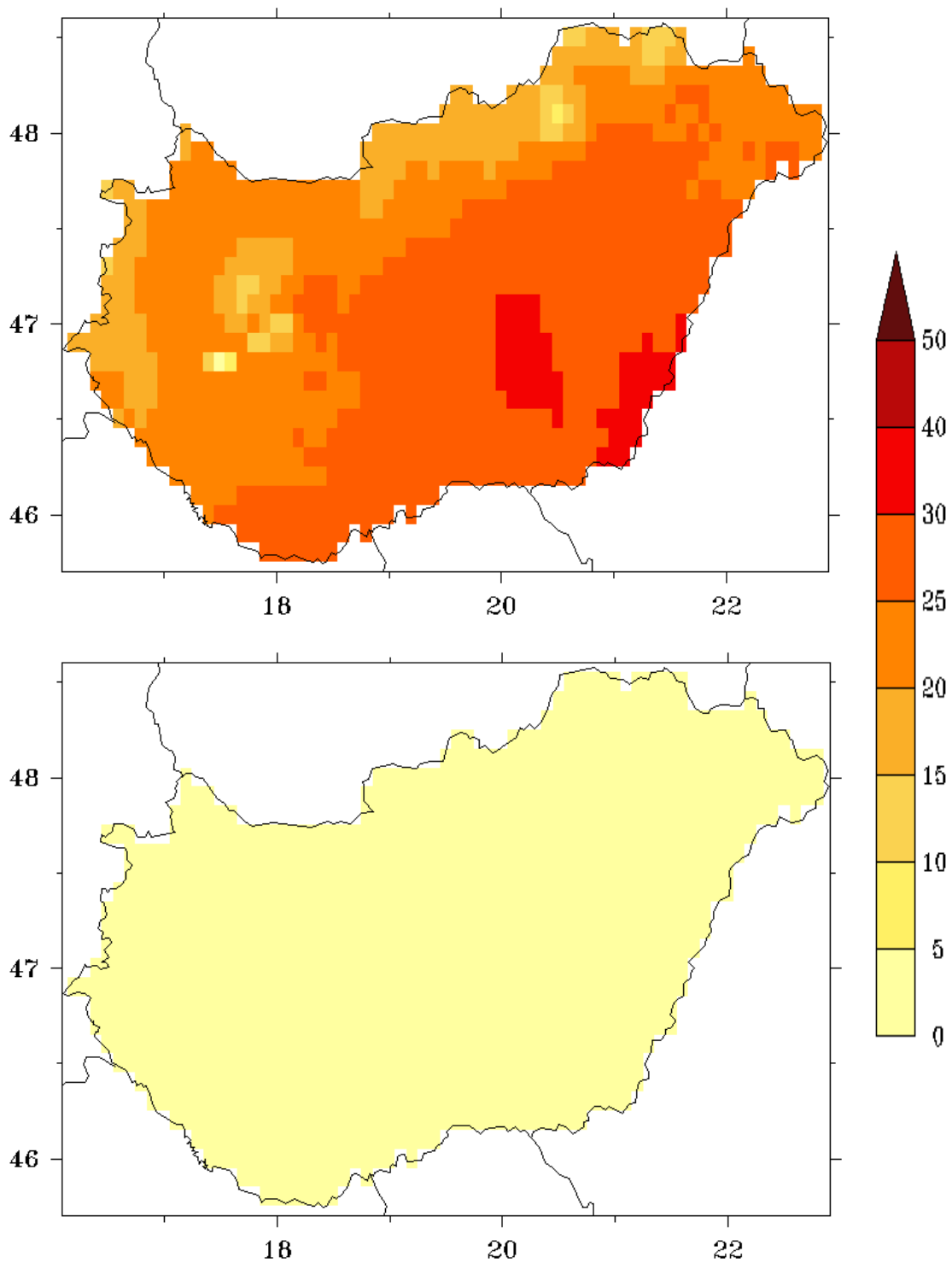
Index	2021–2050	2071–2100
Nyári nap	4–21	28–40
Hőségnap	1,7–24	8–49
Fagyos nap	(-23) – (-9)	(-41) – (-25)
Extrém hideg nap	(-5) – (-1,3)	(-7) – (-1,5)



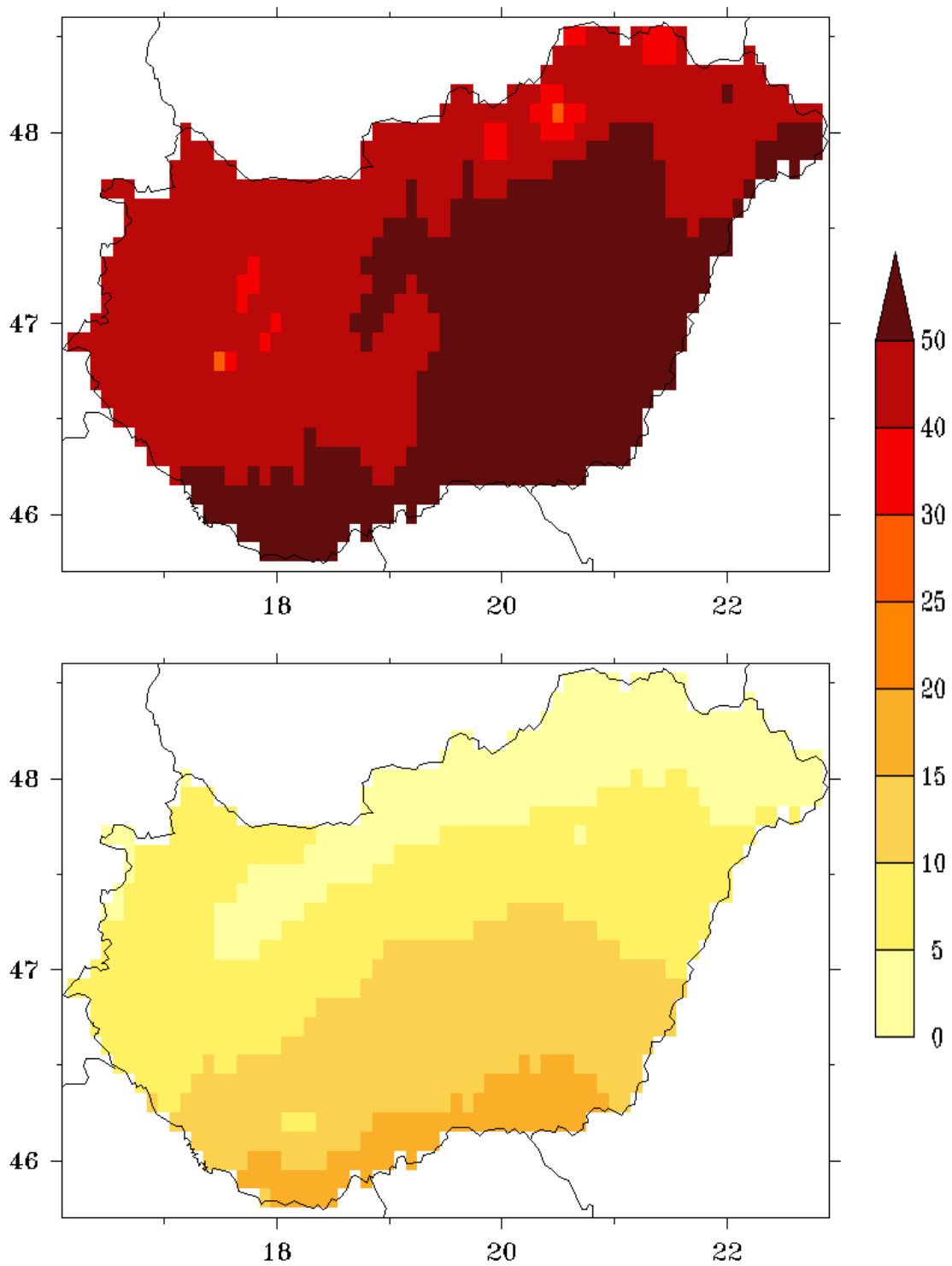
**35. ábra.** A nyári napok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



**36. ábra.** A nyári napok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referenci-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

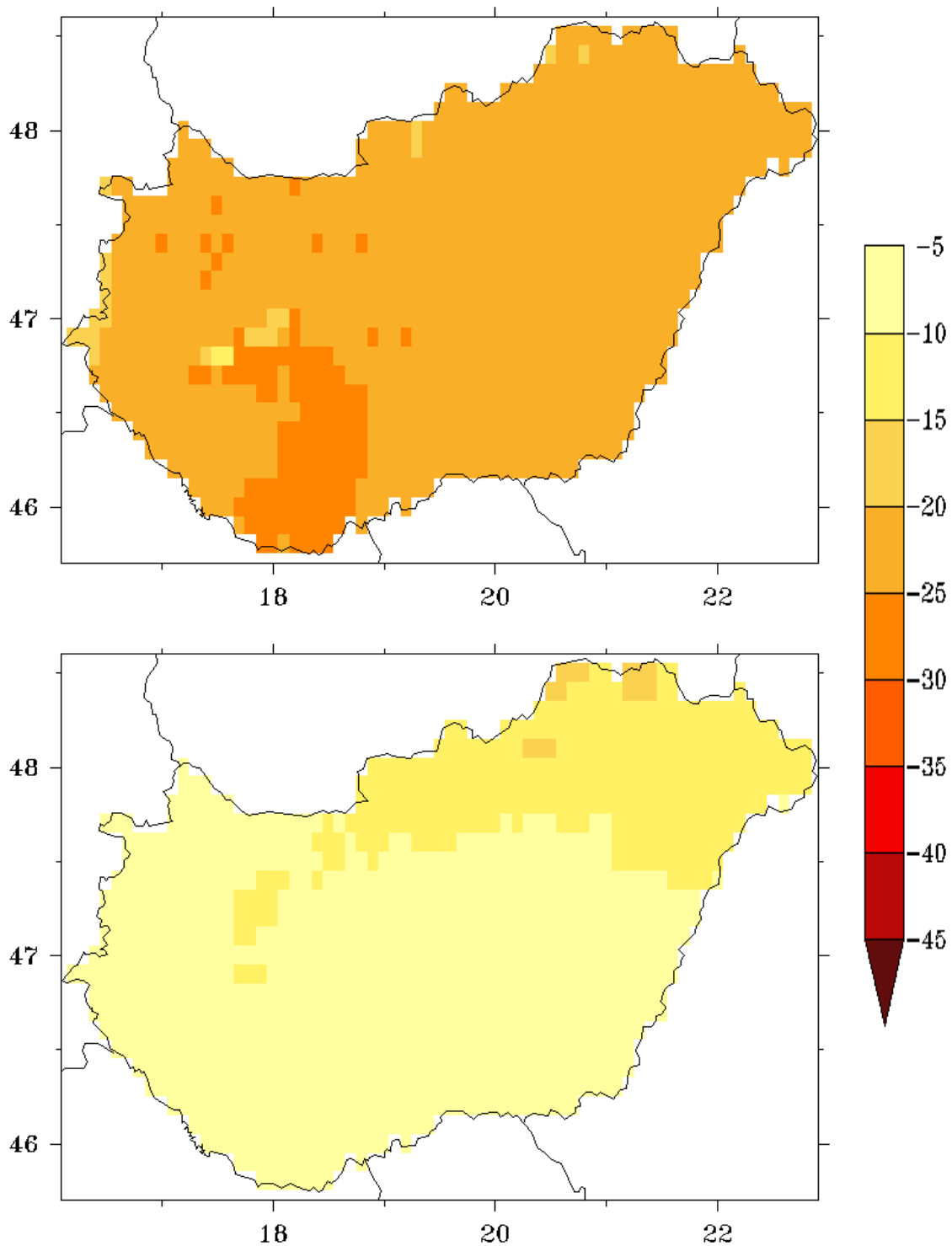


**37. ábra.** A hőségnapok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referenci-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

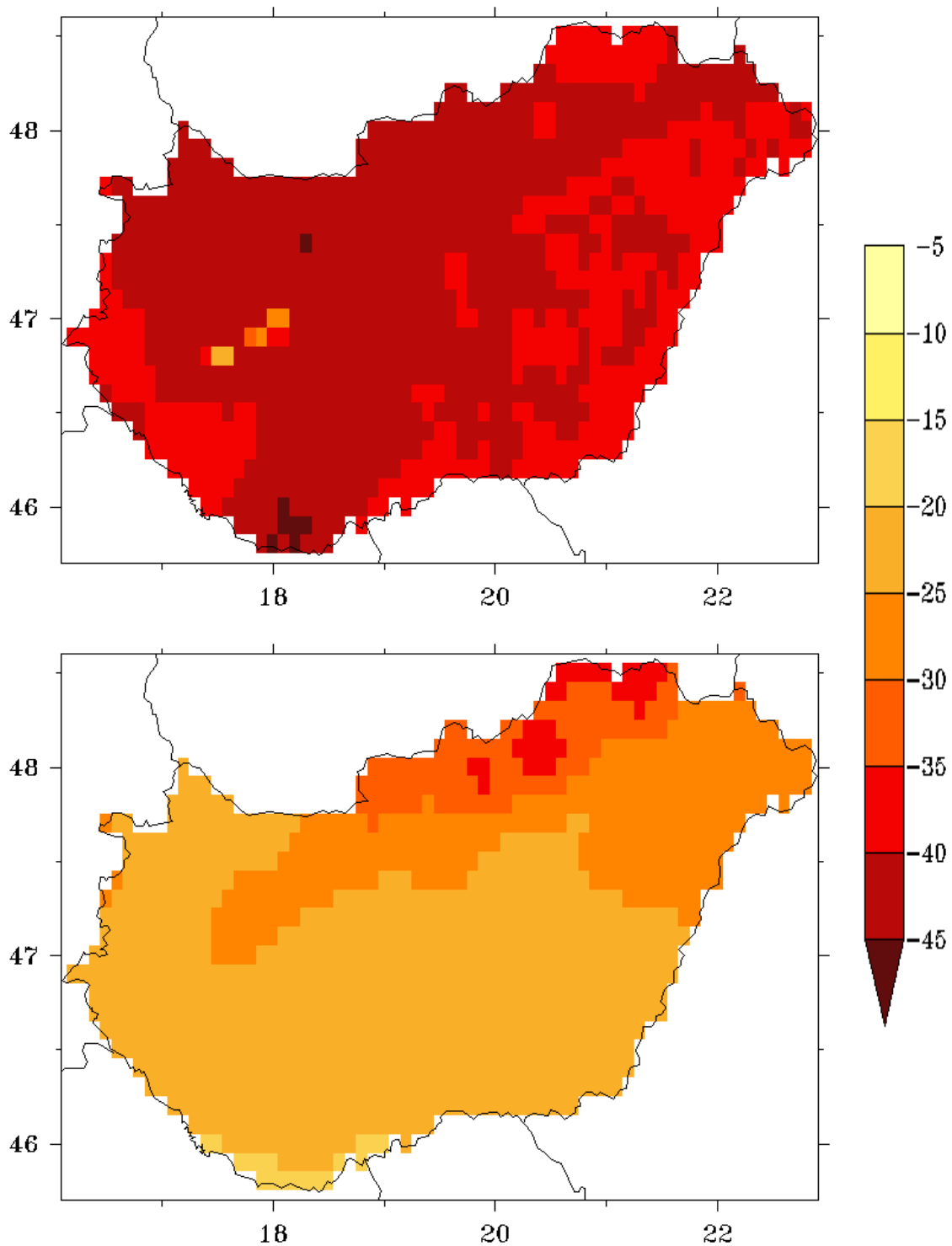


**38. ábra.** A hőségnapok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.

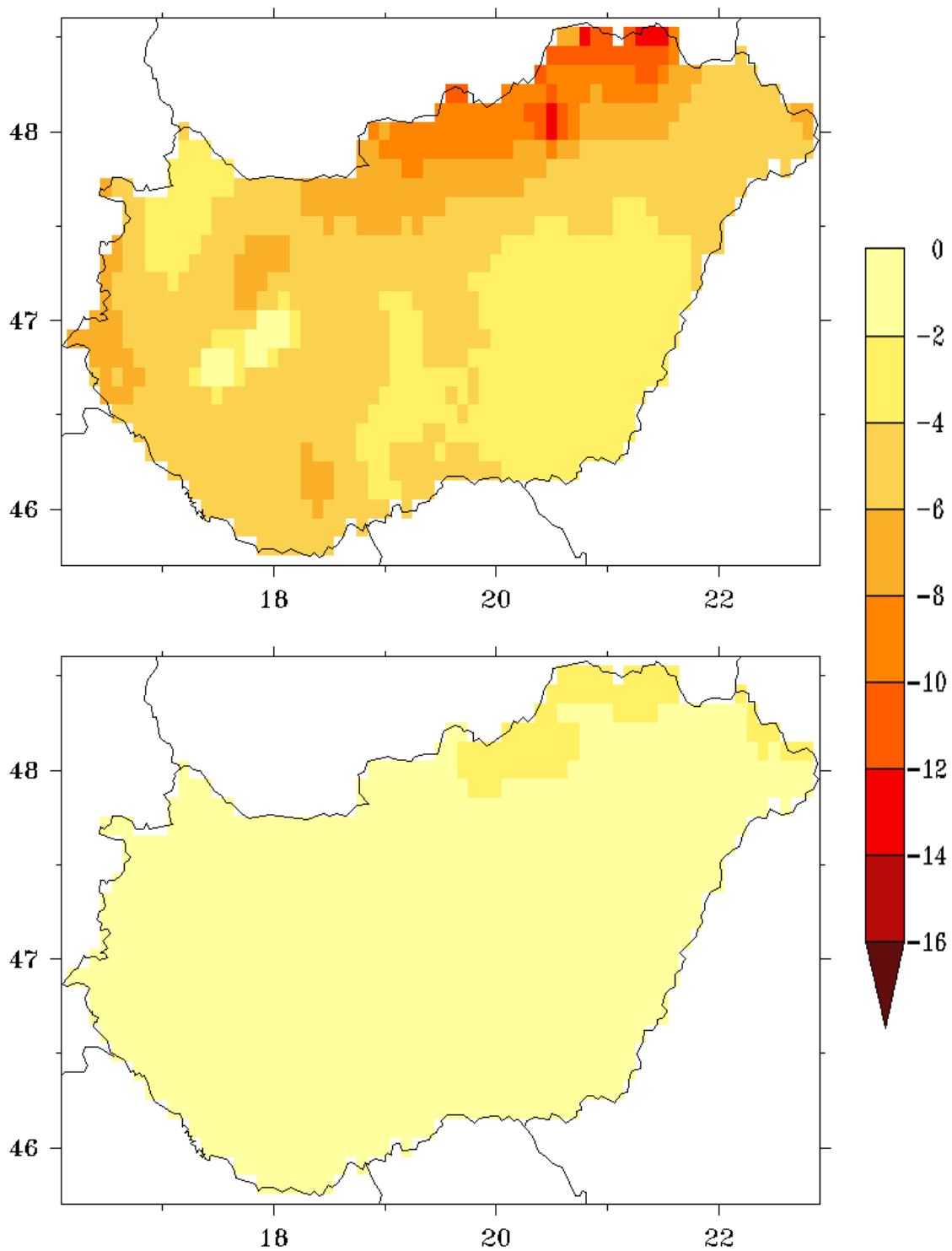




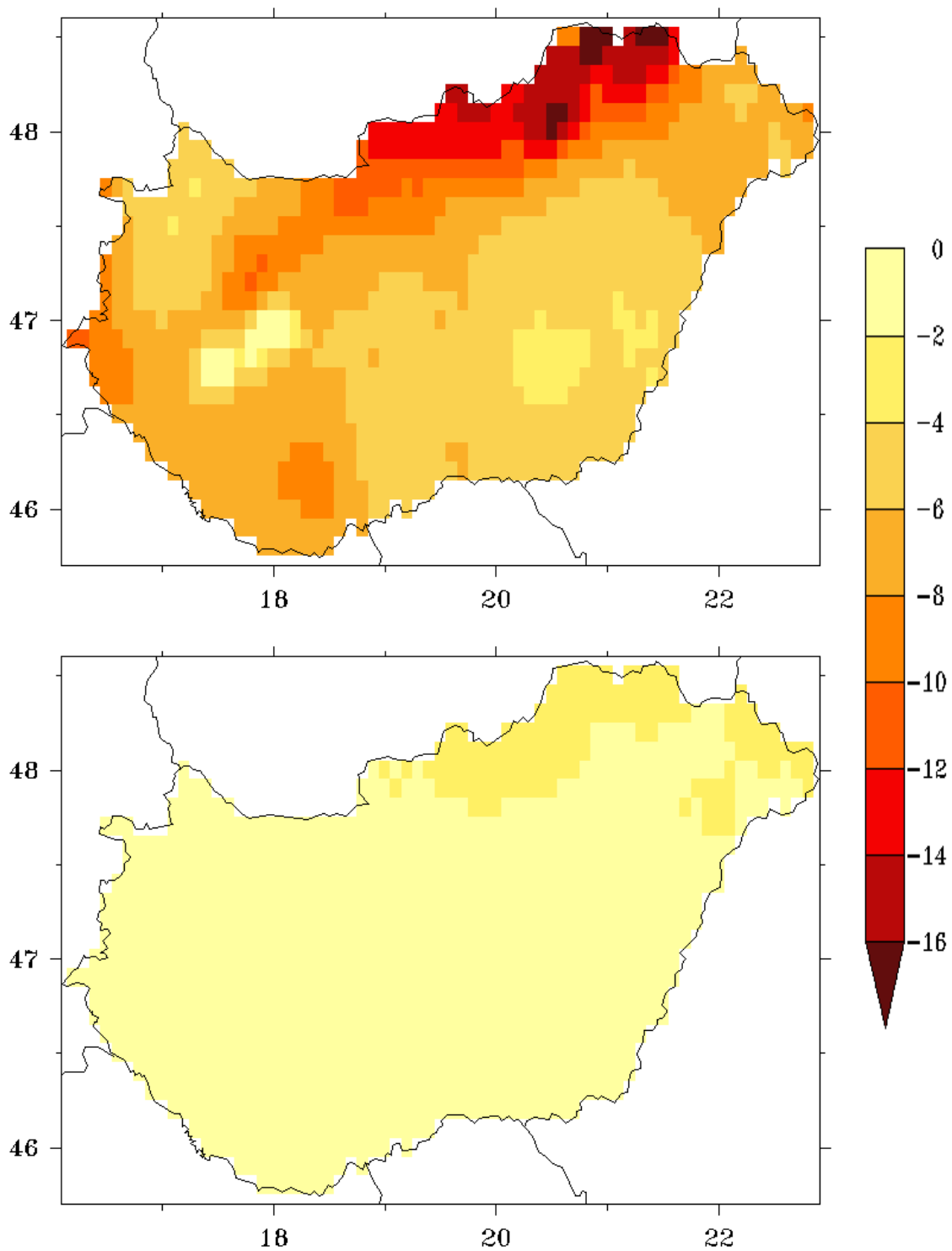
**39. ábra.** A fagyos napok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referenciaidőszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



**40. ábra.** A fagyos napok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referenci-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján.



**41. ábra.** Az extrém hideg napok átlagos éves számának változása (nap) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klíma-modellek eredményei alapján.



**42. ábra.** Az extrém hideg napok átlagos éves számának változása (nap) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klíma-modellek eredményei alapján.

## Csapadék

A Magyarországra várható csapadék mennyiségének megváltozása sokkal nehezebben elemezhető és értelmezhető, mint a hőmérsékleti változások. Ennek egyik oka az, hogy a modellek esetenként még előjelükben is eltérő eredményeket szolgáltatnak, azaz a csapadék-projekciókban jóval nagyobb a bizonytalanság, mint a hőmérséklet esetében. Egy másik bizonytalansági tényező, hogy a jelzett változások gyakran nem is szignifikánsak, ezért ezen eredmények interpretációjánál kellő óvatossággal kell eljárunk. Továbbá a Kárpát-medence a globális és regionális modell-szimulációkban is egy átmeneti zónában fekszik: tőlünk északra egyértelműen csapadéknövekedés, míg délre csapadékcsökkenés várható (pl. Christensen és Christensen, 2007), és a változatlan éves csapadékmennyiséggel jellemezhető területek behatárolása bizonytalan.

A csapadék mm-ben kifejezett abszolút mennyiségei havi bontásban (**43. ábra**) azt mutatják, hogy az évi csapadékmennyiség éven belüli eloszlása hosszú idő átlagában (főként az évszázad végére) várhatóan egyenletesebb lesz, mint jelenleg. Ez annak köszönhető, hogy a jelenleg legcsapadékosabb nyár során a csapadék egyértelműen csökkenni fog, míg a most legszárazabb tél során a változások bizonytalanok, a csökkenést jelző modellben azonban a változás mértéke kicsi. Figyelemre méltóak még az őszi változások. A mérések tanúsága szerint a XX. század utolsó évtizedeiben novemberben a csapadékhullásnak egy másodlagos maximuma volt, és októberben megfigyelhető egy lokális minimum. Az egyik modell a 2021–2050 időszakon azonban már nem mutatja a novemberi csapadékmaximumot, hanem a téli hónapok mennyiségeihez hasonló összeget valószínűsít. Az évszázad végére azonban olyan jelentős mértékű növekedés is előfordulhat, hogy a novemberi és júniusi mennyiségek között szinte nem lesz különbség.

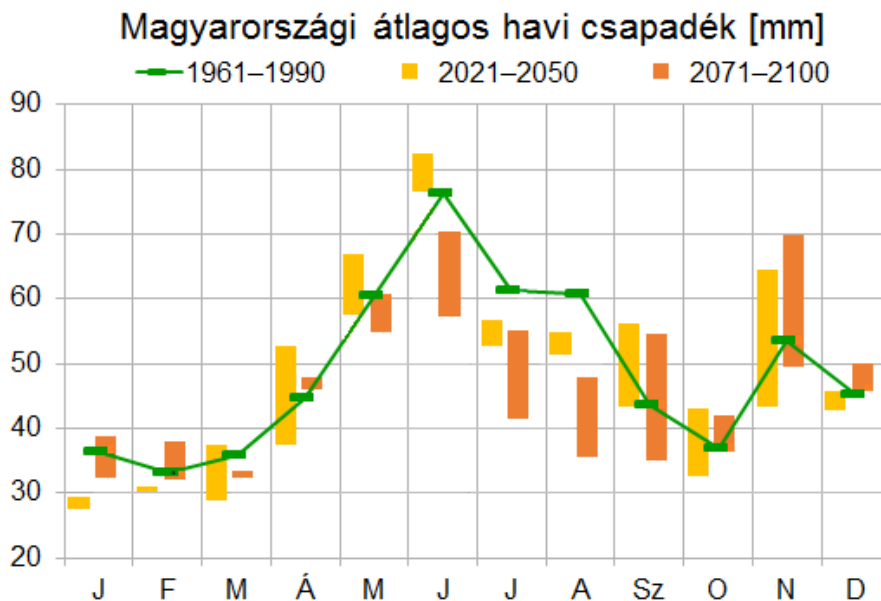
A csapadék mennyisége az ország területén igen tág határok között mozoghat, így a modellek és a különböző időszakok (pl. évszakok) összehasonlíthatósága érdekében relatív változás-térképeket mutatunk be, melyhez referenciaként mindkét modell esetében a saját 1961–1990 időszakra vonatkozó eredményeit használtuk fel. A változás szignifikáns voltát pontozással jelöltük az ábrákon. Ha megnézzük az éves csapadékösszeg relatív megváltozását (**44. és 49. ábra, 9. táblázat**), akkor látható, hogy mindkét időszakon országos átlagban kismértékű (10% alatti) csökkenés valószínű, sőt a közeljövőben akár változatlan mennyiségű országos átlagos csapadék is előfordulhat. A változás térbeli eloszlása a két modell alapján igen bizonytalan, ugyanis az egyik modell a nagyobb mértékű csapadékcsökkenést az ország keleti felében valószínűsíti, míg a másik modell szerint a változás inkább észak–dél irányú. A 2021–2050 időszakon a modellek egyértelműen a nyári és téli csapadék csökkenését valószínűsítik, melynek értéke télen a nagyobb [-10% körüli, nyáron pedig (-2,1) – 5%; **46. és 48. ábrák, 9. táblázat**]. Ezen az időszakon nyáron még előfordulhatnak az országban olyan területek, ahol átlagosan több csapadék hullhat, mint a múltban, azonban ennek helyében a modellek nem értenek egyet. Az átmeneti évszakokban a két modell ellentétes irányú változást jelez, a nagyobb mértékű változás tavasszal negatív, ősszel pozitív előjelű (**45. és 47. ábrák**). Az évszázad végére már a legerősebb változás nyáron várható, a csapadékcsökkenés az ország egész területére kiterjed és jelentős részén szignifikáns [országos átlagban (-18) – 20 %; **51. ábra**]. Ezen az időszakon a tavasz mellett a téli évszak változása válik bizonytalanná, ugyanis az egyik modellben a korábbi csapadékcsökkenést növekedés váltja fel (**50. és 53. ábrák**). Ellenben ősszel mindkét modell pozitív irányú (legfeljebb 10% mértékű) csapadéktrendet jelez (**52. ábra**). A bizonytalansági intervallum a tél kivételével az évszázad végére csökken a 2021–2050 időszakhoz képest (**9. táblázat**).

A csapadék esetében is megvizsgáltuk a napi mennyiségek eloszlását Magyarországra a január és július hónapokra, ezt az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra az **54–55. ábrák** szemléltetik. A téli hónapban a 20 mm-nél kisebb mennyiségű csapadék a XXI.

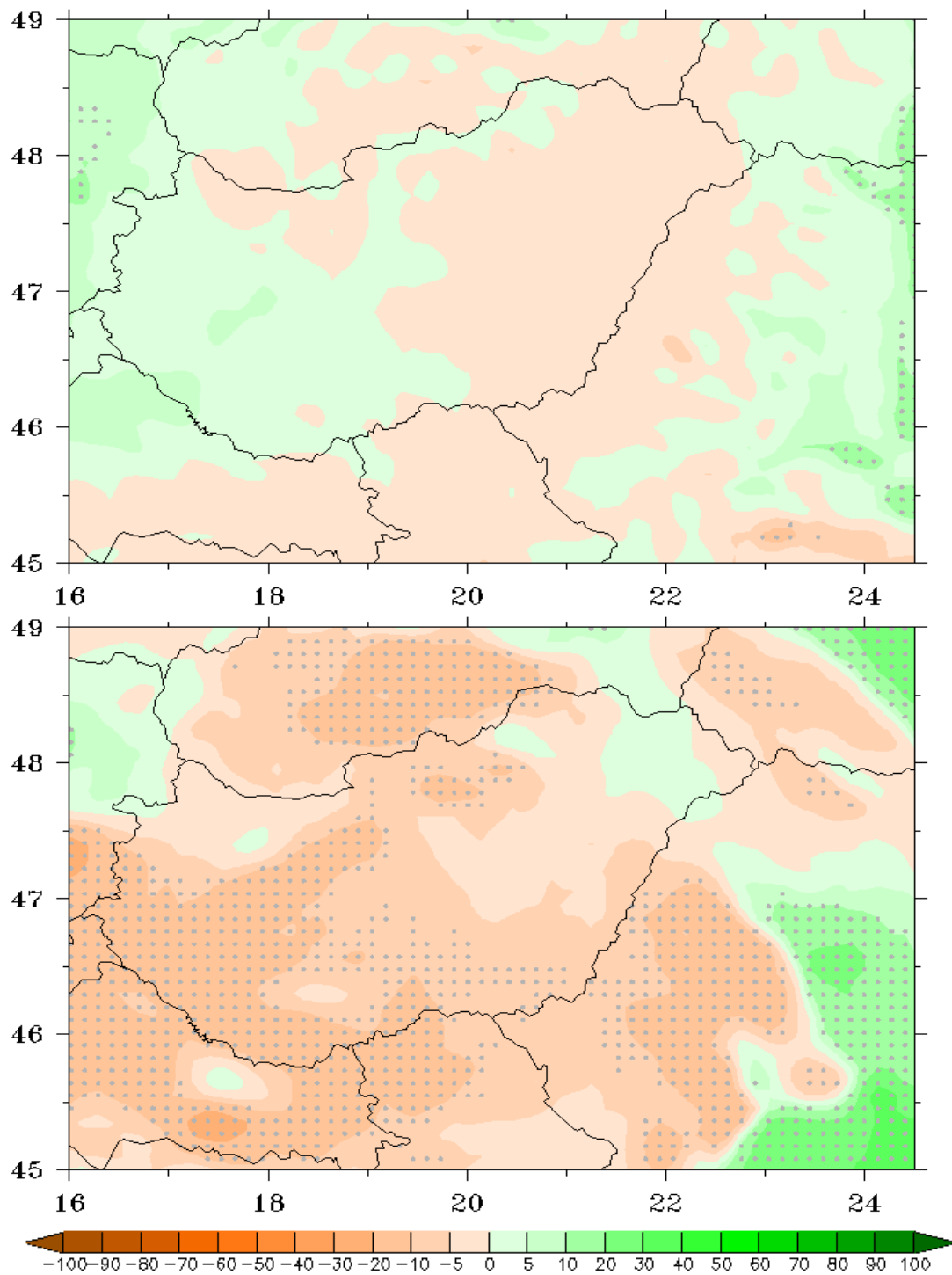
században kis mértékben ugyan, de ritkábban fordul elő, mint az 1961–1990 időszakban. A csökkenés azonban nem folytonos, ugyanis a két jövőbeli időszakot összevetve az évszázad végére növekvő gyakoriságot figyelhetünk meg. A mind nagyobb napi mennyiségek felé haladva ellenben azt láthatjuk, hogy a távoli jövőben a jelentős mennyiségű napi csapadéköszegek előfordulása akár többszöröse is lehet a múltbeli előfordulásnak (hozzá kell tenni azonban, hogy ezek nagyon ritka események). Nyáron a kisebb csapadékesemények gyakoriságában mindkét időszakon csökkenés látható, kivéve a nagyon kis (0-3 mm közötti) mennyiségeket. A 20 mm-nél nagyobb csapadékkal járó események előfordulásában azonban bizonytalan változásokat mutatnak a modellek: az egyik modell szerint a közeljövőben gyakoribbá, az évszázad végére ritkábbá válnak a nagyon heves esőzések, míg a másik modell az évszázad végére jelez a múltbelinél nagyobb előfordulást.

**9. táblázat.** A magyarországi átlagos éves és évszagos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. Az irányában egyértelmű változásokat színezéssel jelöltük.

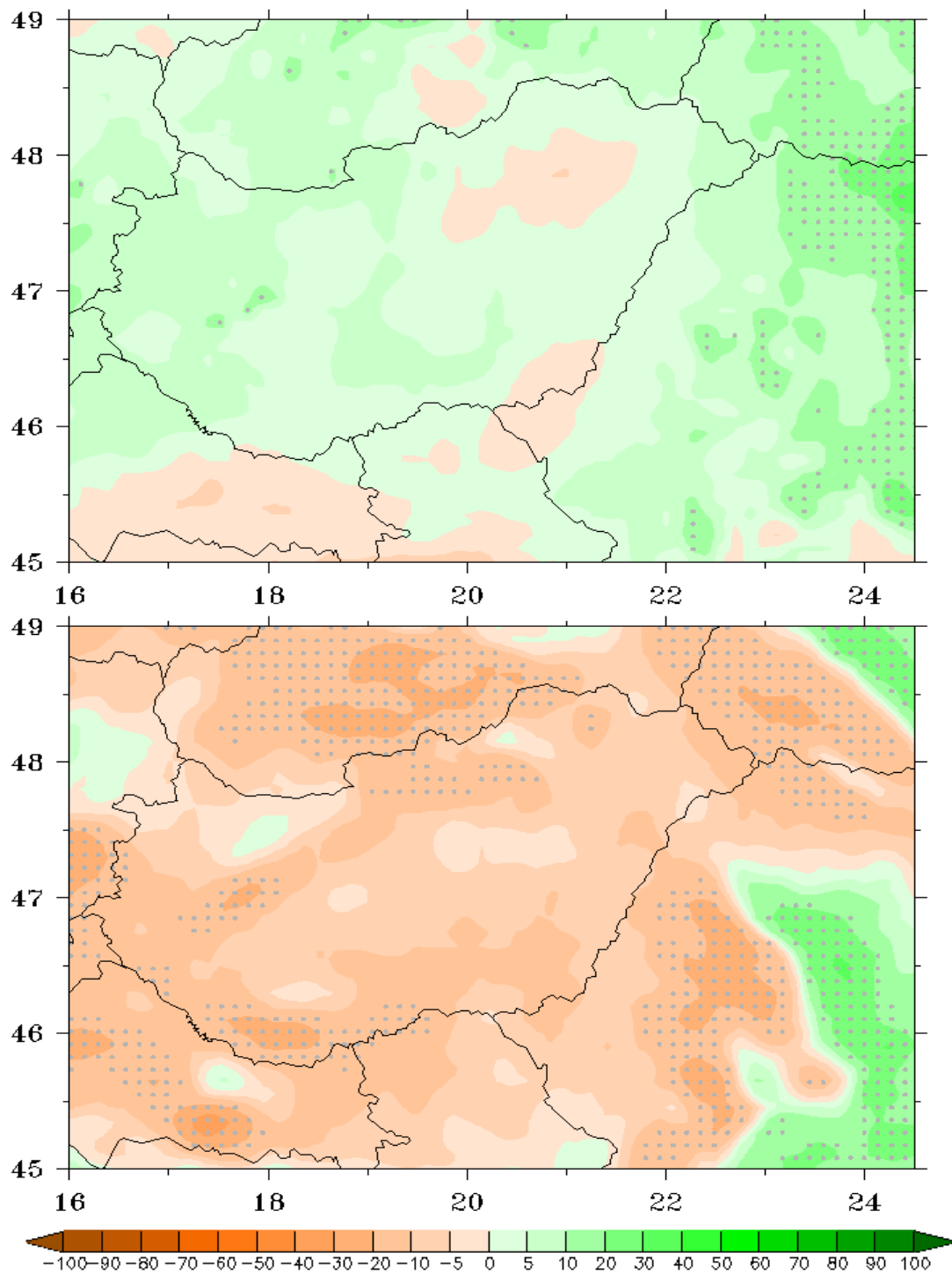
	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
<b>2021–2050</b>	(-7) – (-0,2)	(-10) – 3,4	(-5) – (-2,1)	(-3,8) – 14	-10
<b>2071–2100</b>	(-5) – (-2,3)	(-5) – 2,1	(-20) – (-18)	4,6 – 10	(-3,1) – 8



**43. 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.

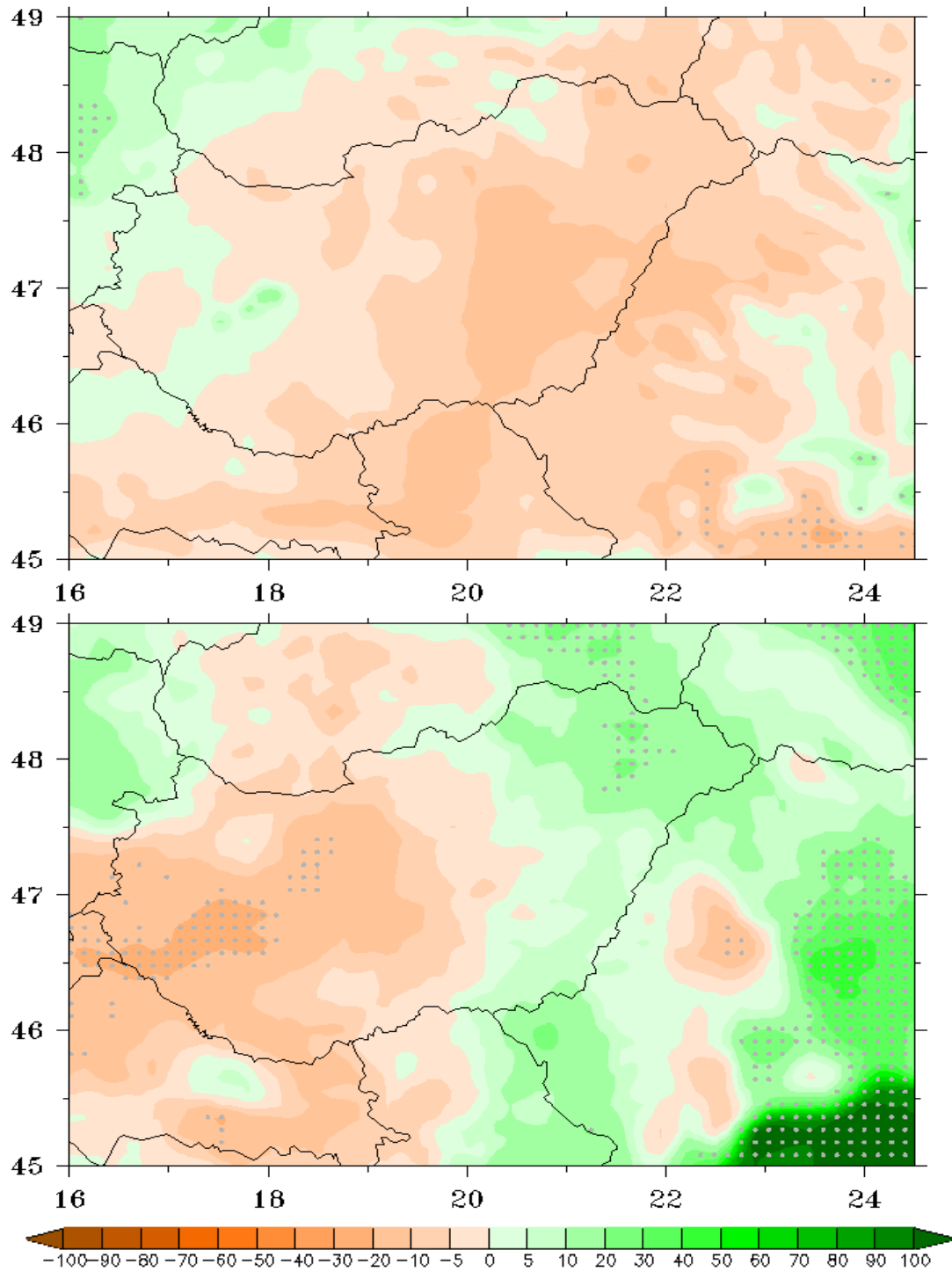


**44. ábra.** Az átlagos éves csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.

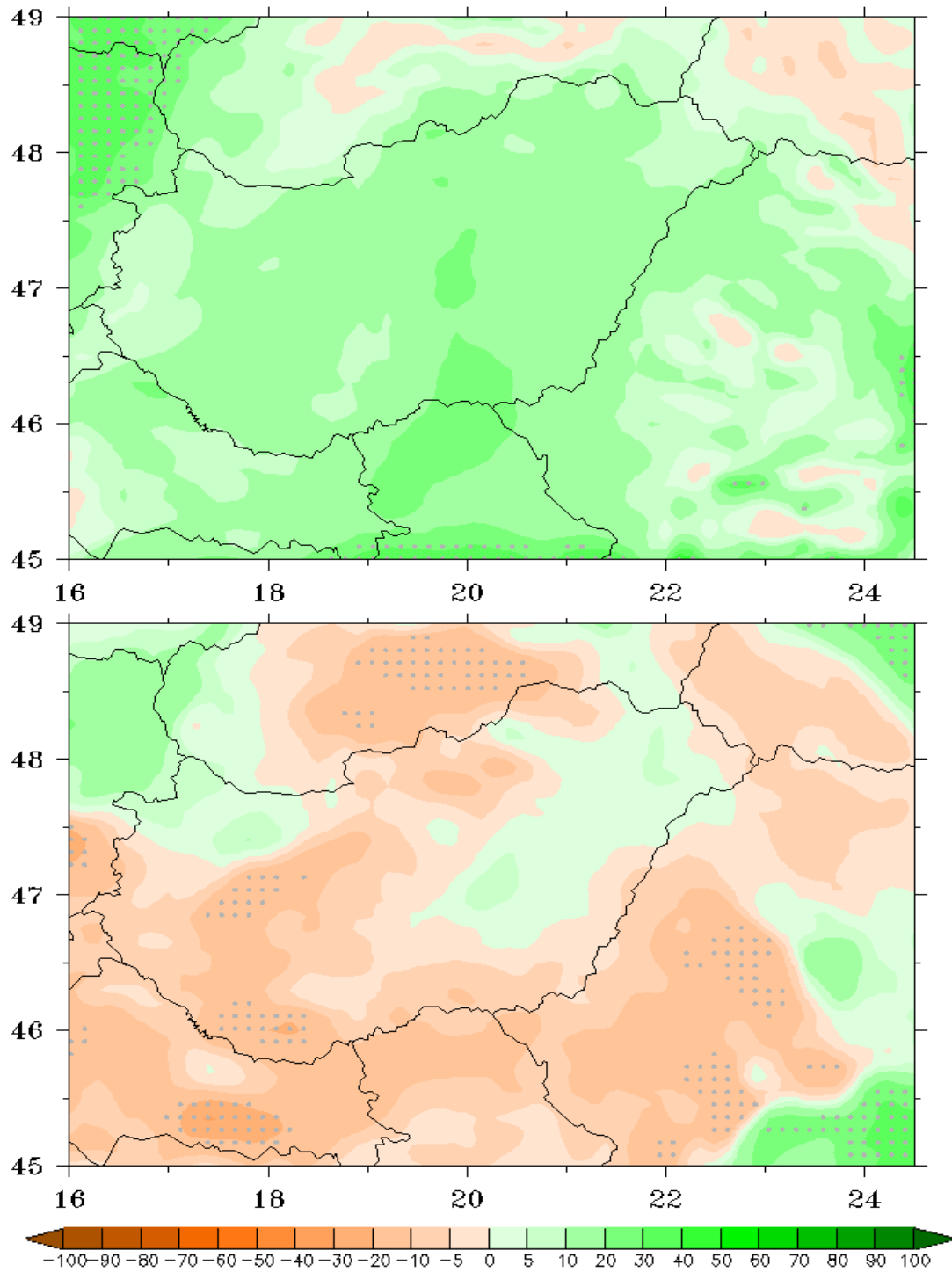


**45. ábra.** Az átlagos tavaszi csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.

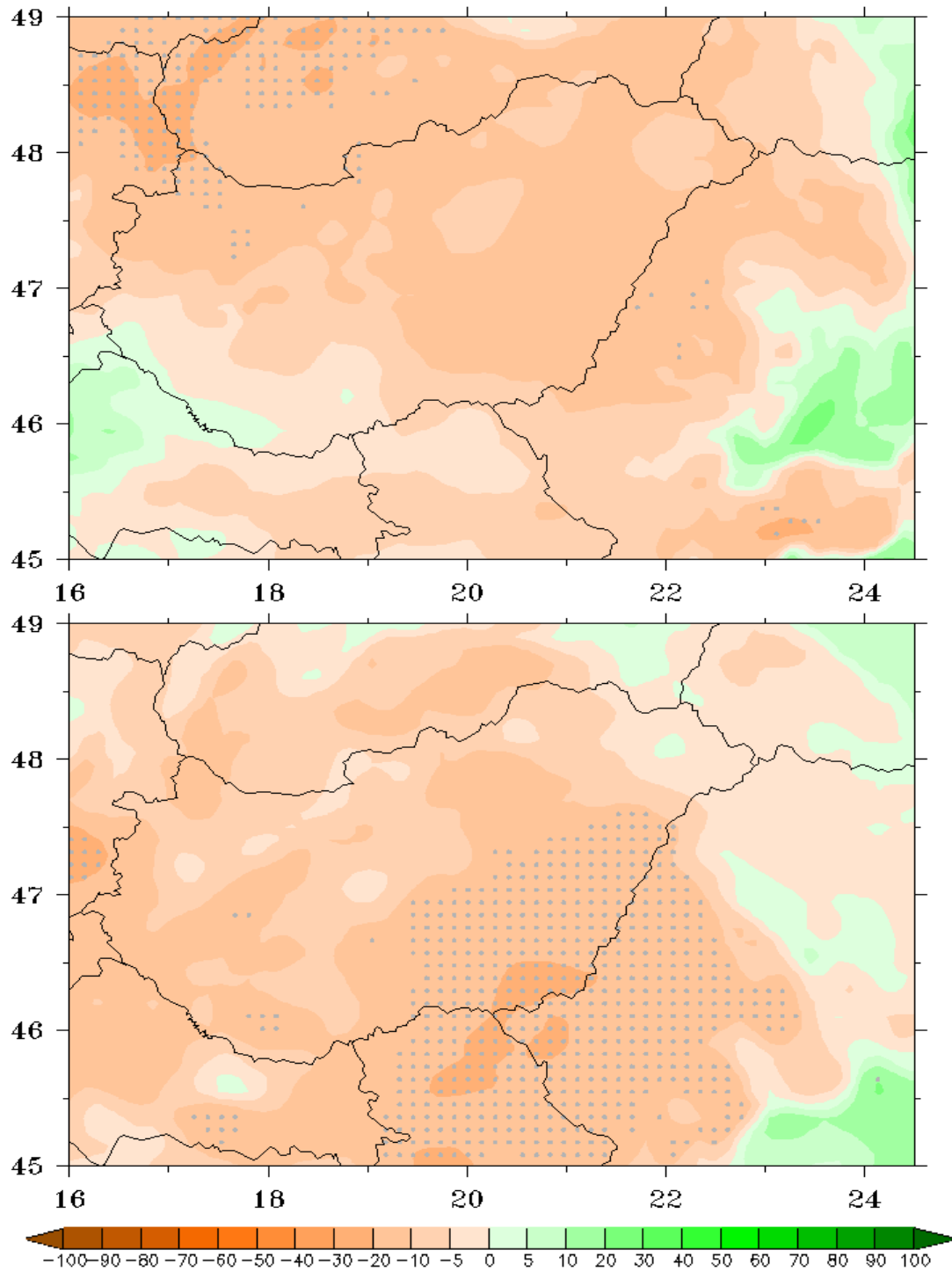




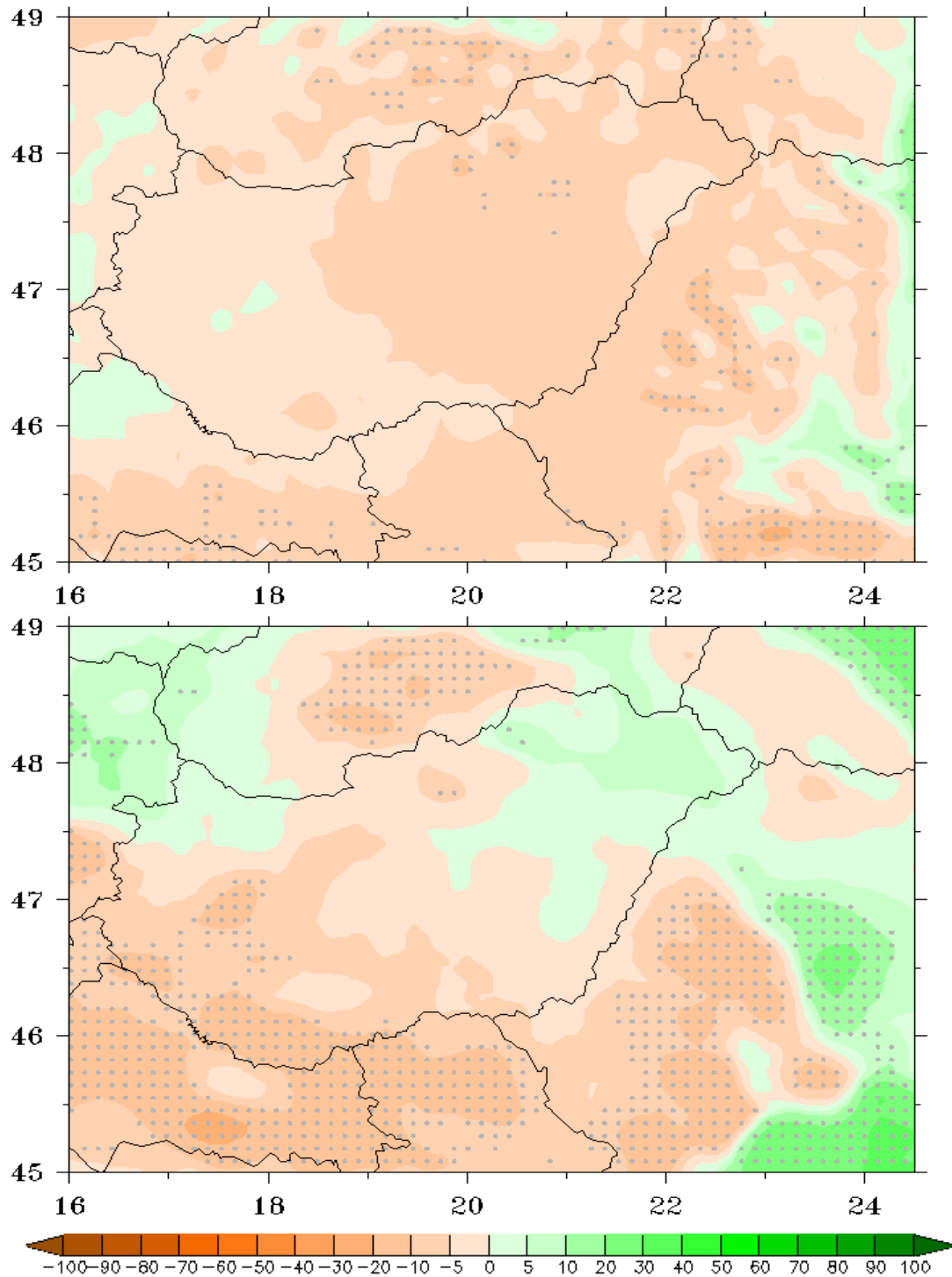
**46. ábra.** Az átlagos nyári csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.



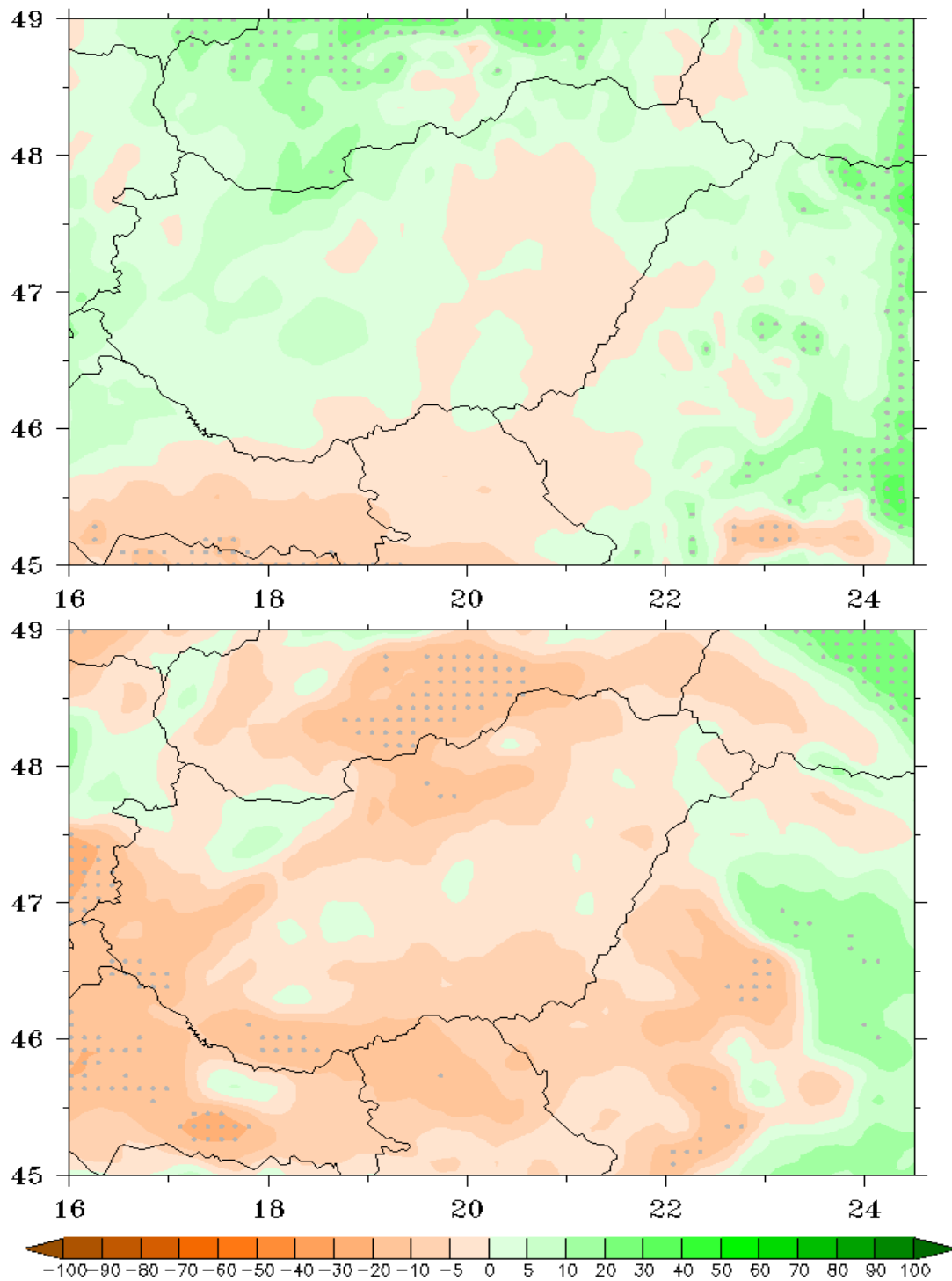
**47. ábra.** Az átlagos őszi csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referen-  
cia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei  
alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.



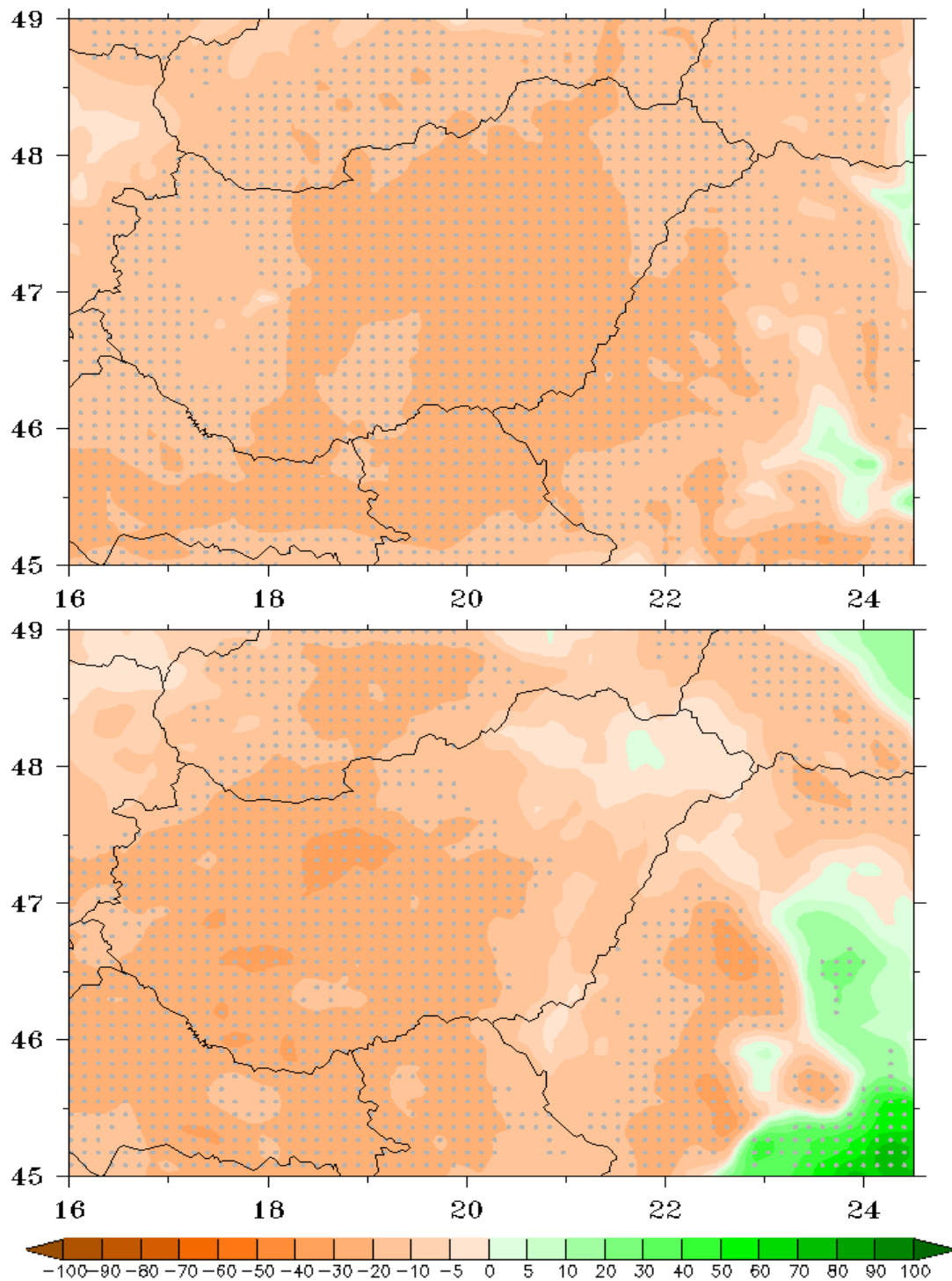
**48. ábra.** Az átlagos téli csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re az 1961–1990 referen-  
cia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei  
alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.



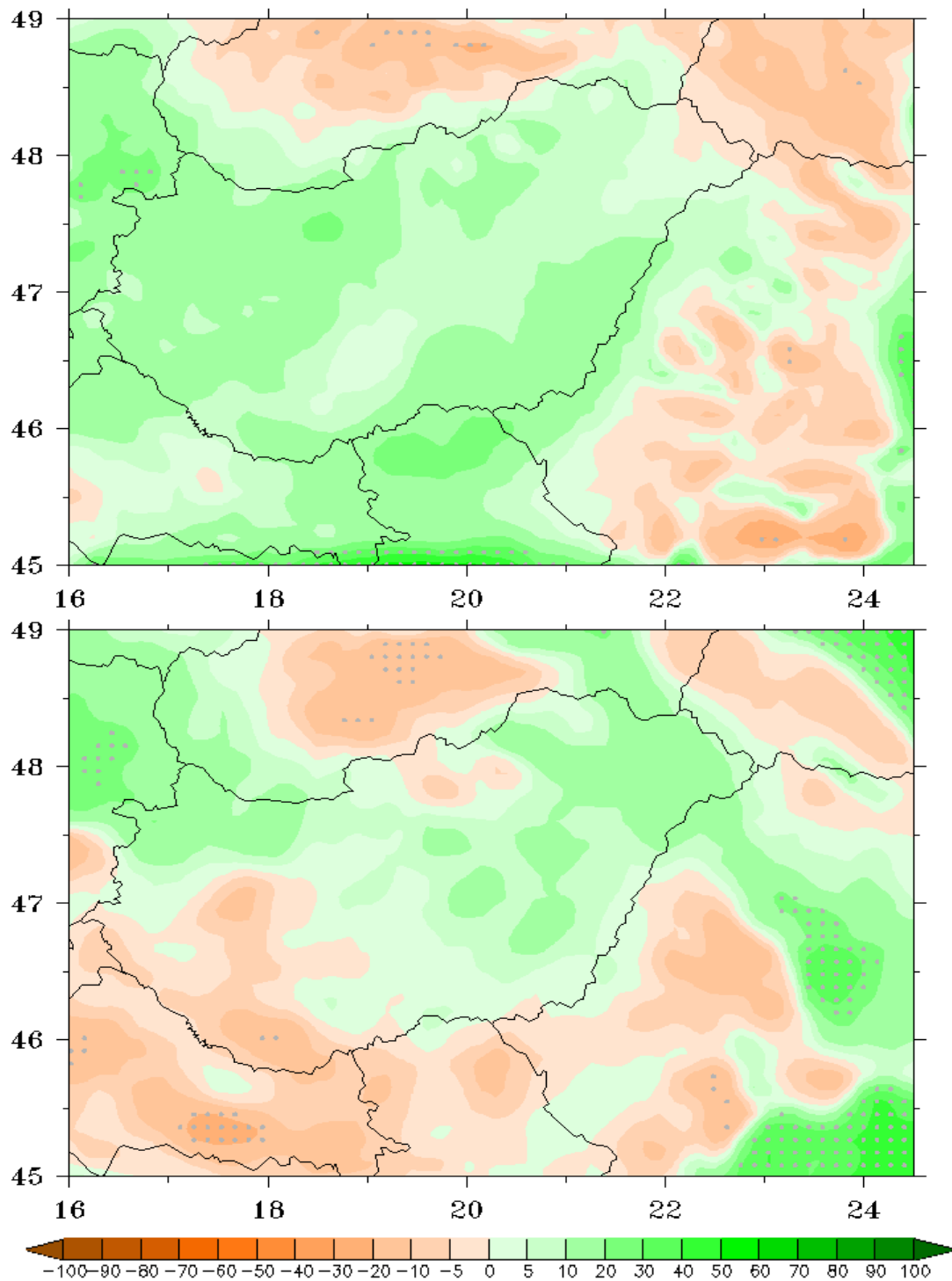
**49. ábra.** Az átlagos éves csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.



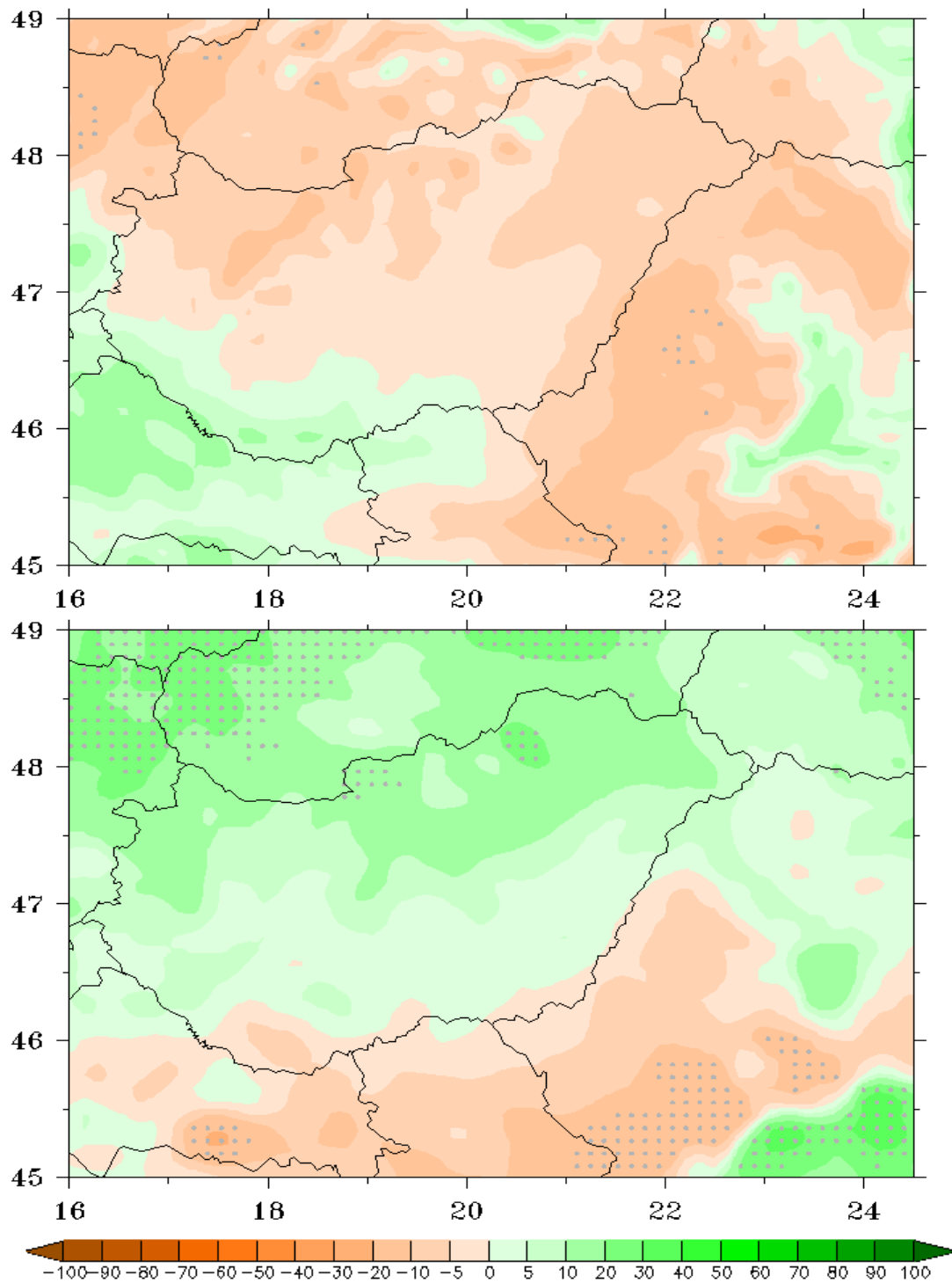
**50. ábra.** Az átlagos tavaszi csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.



**51. ábra.** Az átlagos nyári csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.

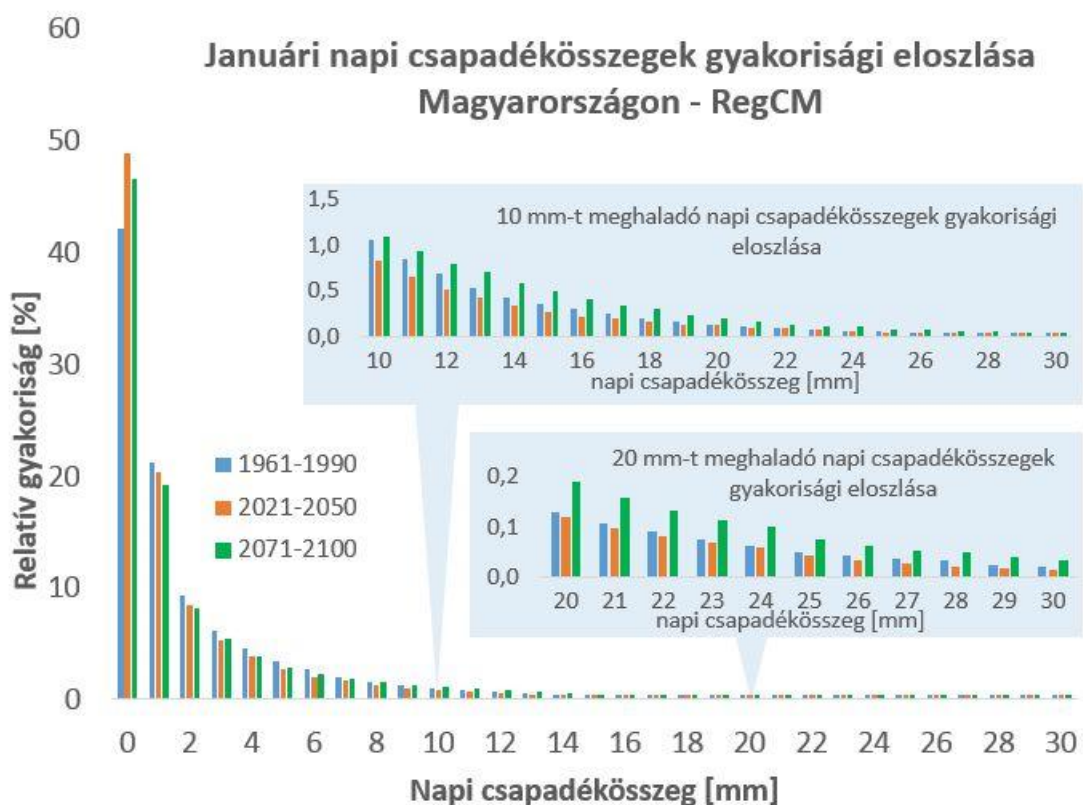
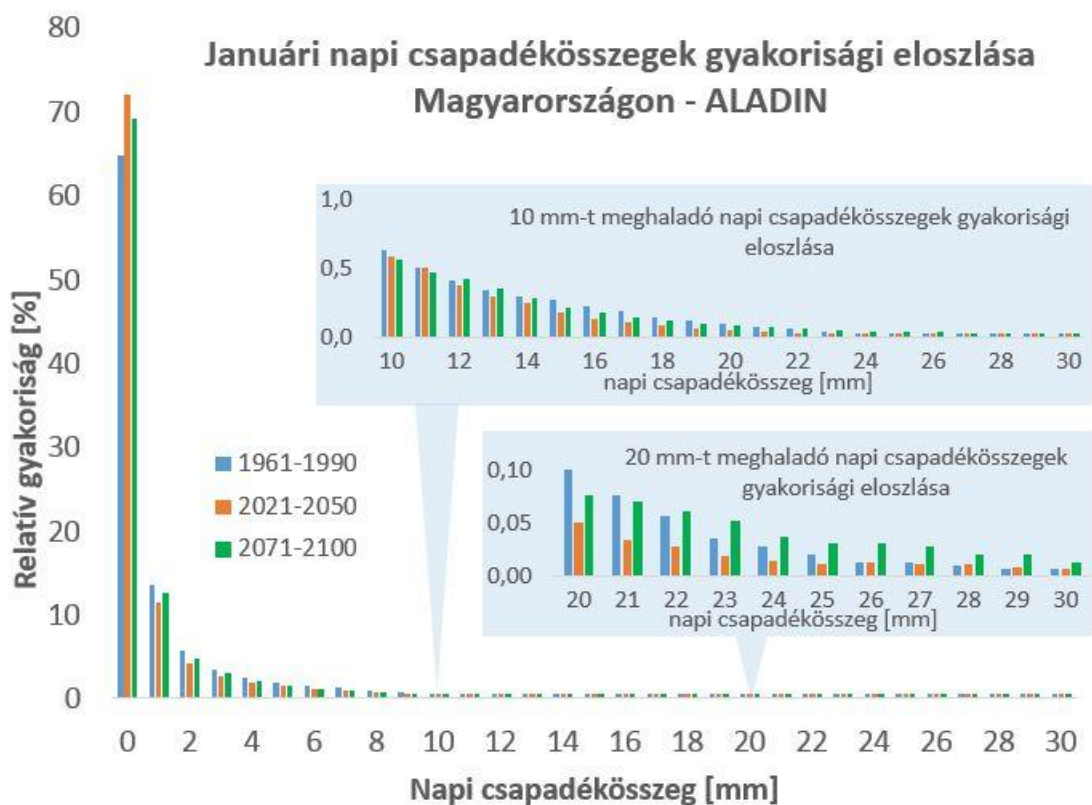


**52. ábra.** Az átlagos őszi csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referen-  
cia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei  
alján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.

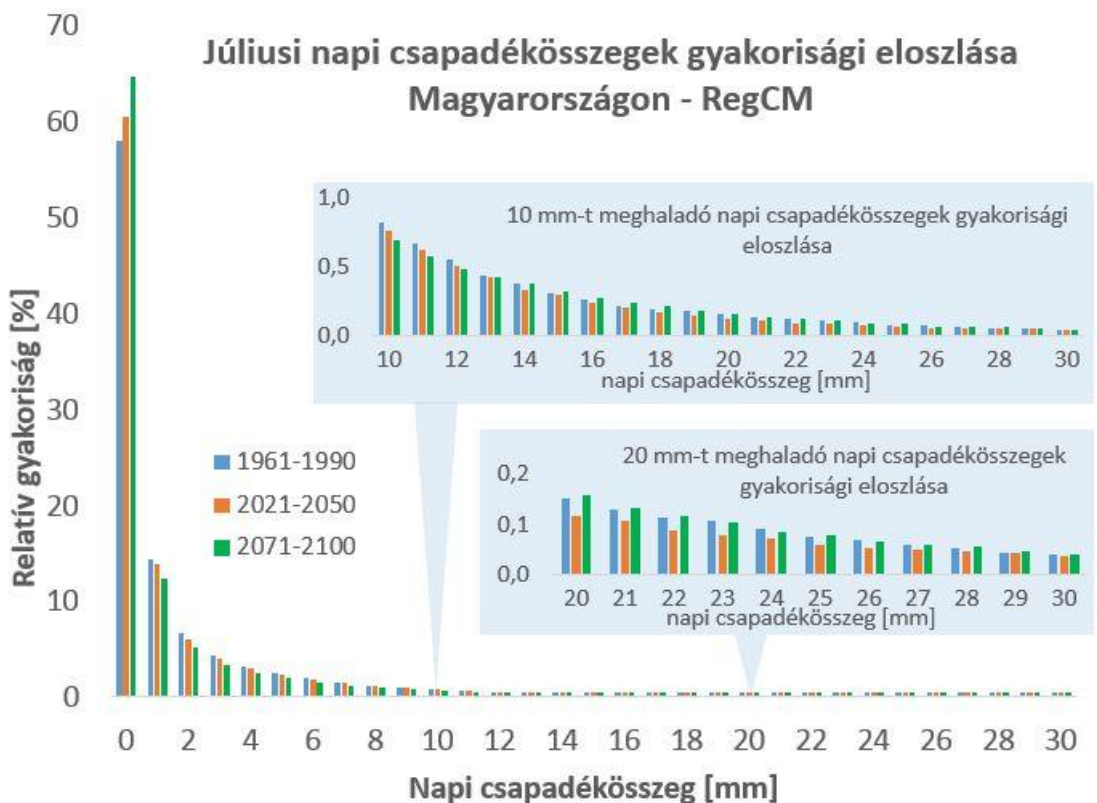
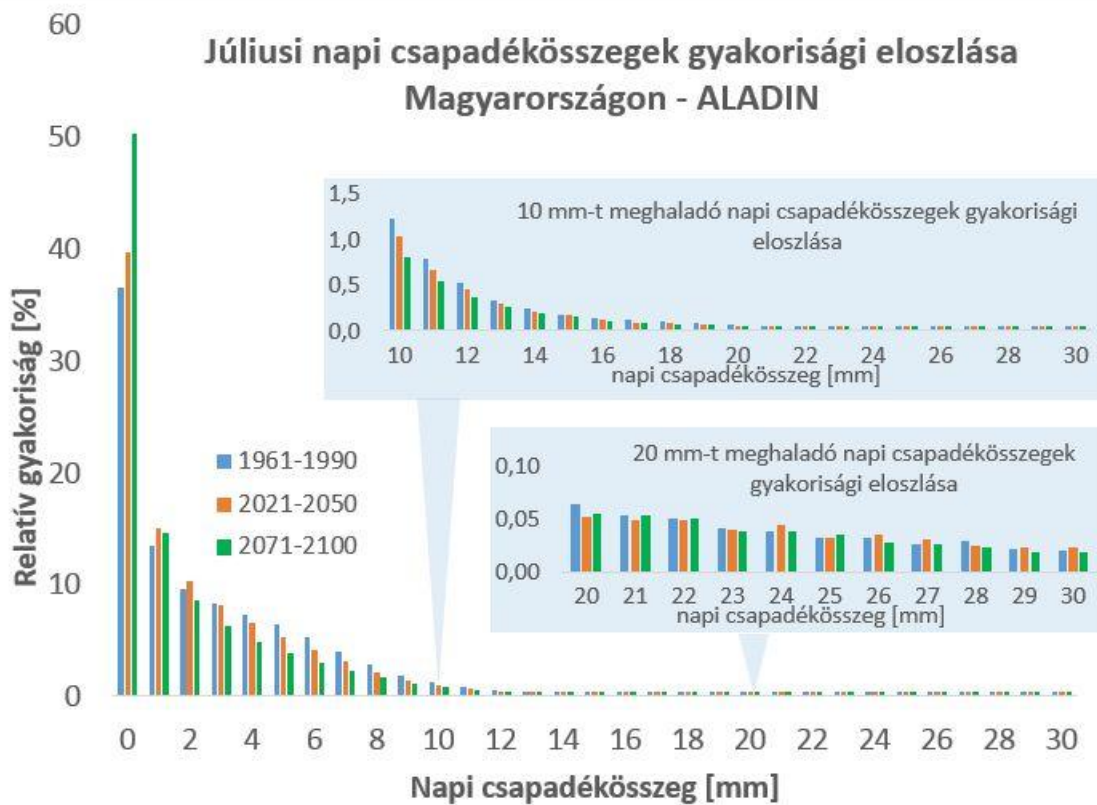


**53. ábra.** Az átlagos téli csapadékösszeg változása (%) 2071–2100-ra az 1961–1990 referen-  
cia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei  
alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.





**54. ábra.** A januári napi csapadékösszeg egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácpontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján.



**55. ábra.** A júliusi napi csapadékösszeg egyes értékeinek relatív gyakorisága (%) a magyarországi rácpontokban 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate (fent) és RegCM (lent) regionális klímamodellek eredményei alapján.

A napi csapadékmennyiség vizsgálatához szintén felhasználtunk éghajlati indexeket (**6. táblázat**). Ezek nagy része különböző küszöbértékeket (pl.: 1 mm, 10 mm, 20 mm) meghaladó napi csapadékesemények éves vagy évszakos számát tekinti. A csapadékintenzitás az adott időszak alatt hulló csapadékösszeg és az 1 mm-t meghaladó csapadékú napok számának hányadosa; míg a száraz időszakokra vonatkozó index a csapadékhiányt jellemzi, nevezetesen egy adott időszakban (évben vagy évszakban) a leghosszabb csapadékmentes (1 mm-nél kisebb napi csapadékú) időszak hosszát adja meg. A **10. táblázatban** az indexek százalékban kifejezett országos átlagos évszakos változásait foglaltuk össze, s színezéssel jelöltük azokat az évszakokat, amikor mindkét modell azonos irányú tendenciát valószínűsít. Azokban az esetekben, amikor a változás intervalluma tartalmazza a 0-t (tehát az egyik modellszimuláció növekvő, a másik csökkenő tendenciát jelez), a mezőket nem színeztük. Az **56–75. ábrákon** ezeknek az indexeknek a 2021–2050-re, illetve 2071–2100-ra várható évszakos változásai láthatók az 1961–1990 modellbeli referencia-időszakhoz viszonyítva, s a szignifikáns változást ezúttal is pontozással jelöltük az egyes rácsponatokban.

A csapadékos napok száma országos átlagban a tavasz kivételével minden évszakban és mindkét időszakban egyértelmű csökkenést mutat. Tavasszal a két modell eredményei alapján biztos következtetést csak az évszázad végére tehetünk, ekkor már szintén kevesebb csapadékos napra számíthatunk. 2021–2050-re télen mindkét modell még kiterjedtebb területen jelez szignifikáns változást, melynek mértéke országos átlagban (-15) – (-11) %, az évszázad végére azonban mérséklődő tendencia figyelhető meg az eredményekben. Ezen az időszakon egyébként a többi évszakban a negatív változás fokozódik és nagyobb területre terjed ki. Mint korábban említettük, 2071–2100-ra jelentős mértékű csapadékcsökkenésre számíthatunk nyáron, ami a csapadékos napok számának változásában is megmutatkozik (országos átlagban mintegy 25%-os, minden rácsponatban szignifikáns csökkenés várható). A változás térbeli alakulása az egyes évszakokban igen bizonytalan a két modell eredményei alapján.

A nagyobb, 10 mm-t meghaladó csapadékmennyiségű napok mindkét modell szerint az évszázad első felében nyáron és télen kis mértékben (télen legfeljebb 15%-kal) ritkábbá válnak. Az évszázad második felében a nyári előfordulás csökkenése tovább folytatódik és fokozódik, télen viszont a modellek már jelentősebb, 10-25%-os növekedést mutatnak. Az átmeneti évszakokban is a nagy csapadékú napok gyakoribbá válását mutatják a modellek: a legmarkánsabb változás ősszel látható, országos átlagban 12-30%, azonban ez csak az ország északi és keleti területein és csak az egyik modell szerint szignifikáns.

A 20 mm-t meghaladó extrém mennyiségű napi csapadék előfordulása már az évszázad első felében is minden évszakban egyértelmű növekedést mutat a tél kivételével. Az évszázad végére csakúgy, mint a nagy csapadékok esetében, télen szintén jelentősebb mértékű (az őszi változásokkal összemérhető) növekedést jeleznek a modellek, és egyébként a nyár kivételével a többi évszakban is még inkább gyakoribbá válnak a nagy napi csapadékkal járó események. A változások iránya és mértéke térben igen változékony, ugyanis a folyamatok kormányzásában a nagyskalájú tényezőknél nagyobb szerepe van a lokális hatásoknak.

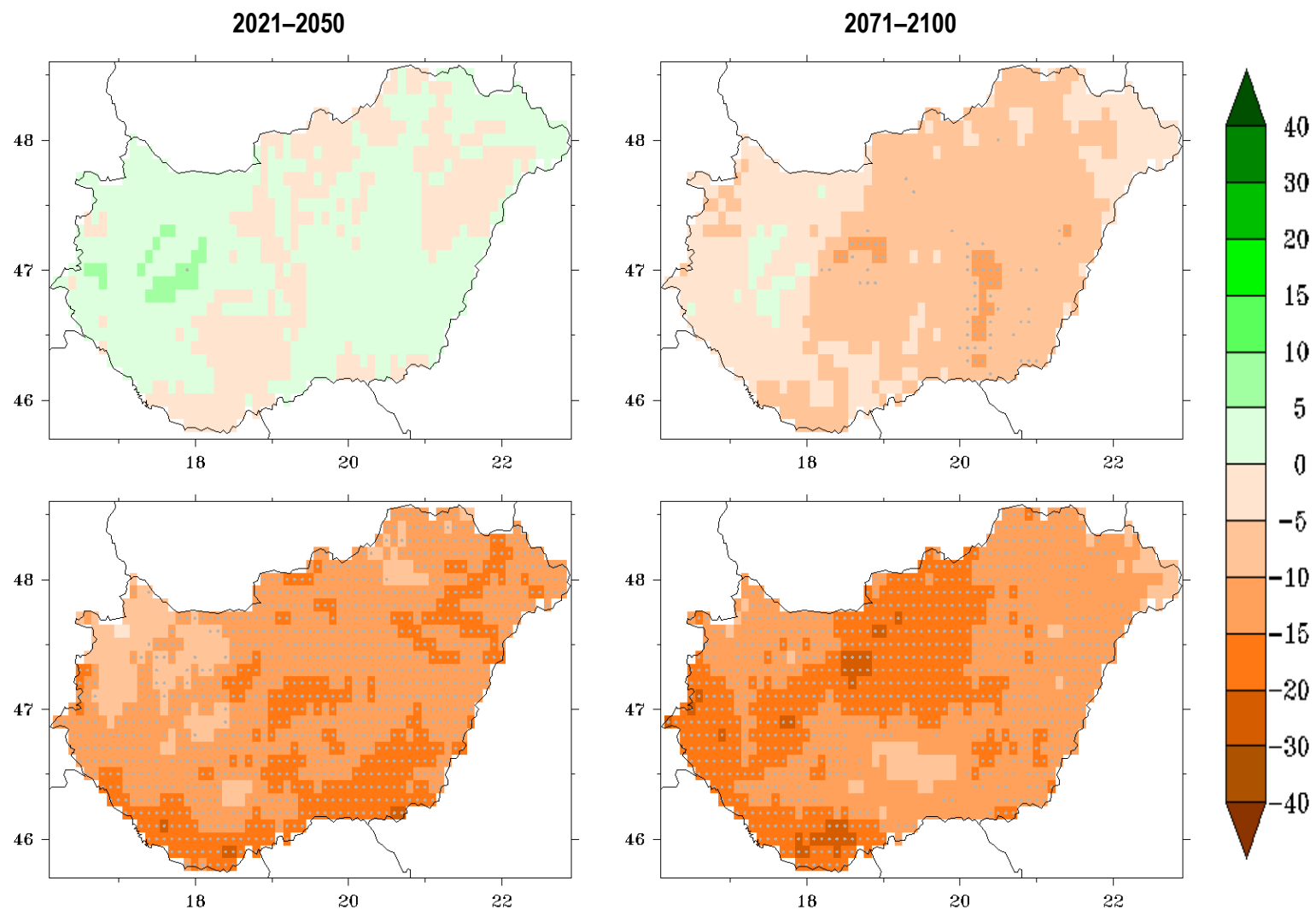
A csapadékintenzitás kisebb mértékben tavasszal, nagyobb mértékben ősszel, illetve az évszázad végén télen növekedhet. Nyáron országos átlagban az évszázad végén ugyanolyan mértékű növekedés és csökkenés egyaránt előfordulhat, a csökkenést valószínűsítő modellben azonban a változások az ország nagy részén szignifikánsak. A többi évszakban 2071–2100-ra legalább az egyik modell kiterjedt területen jelzi a szignifikánsan intenzívebbé váló csapadékhajlamot. A mérések alapján a csapadékintenzitás a múltban főként nyáron növekedett (Lakatos és Bihari, 2011), ami tehát a jövőben a modelleredmények alapján módosulni fog, s az őszi növekedés lesz valószínűbb.

Az összefüggő száraz időszakok hosszának változásából következtethetünk hazánk az elkövetkezendő évtizedekben várható aszályossági hajlamára. Az országos átlagos változások az egyes évszakokban pontosan ellentétes irányúak a csapadékos napok számában megfigyelt

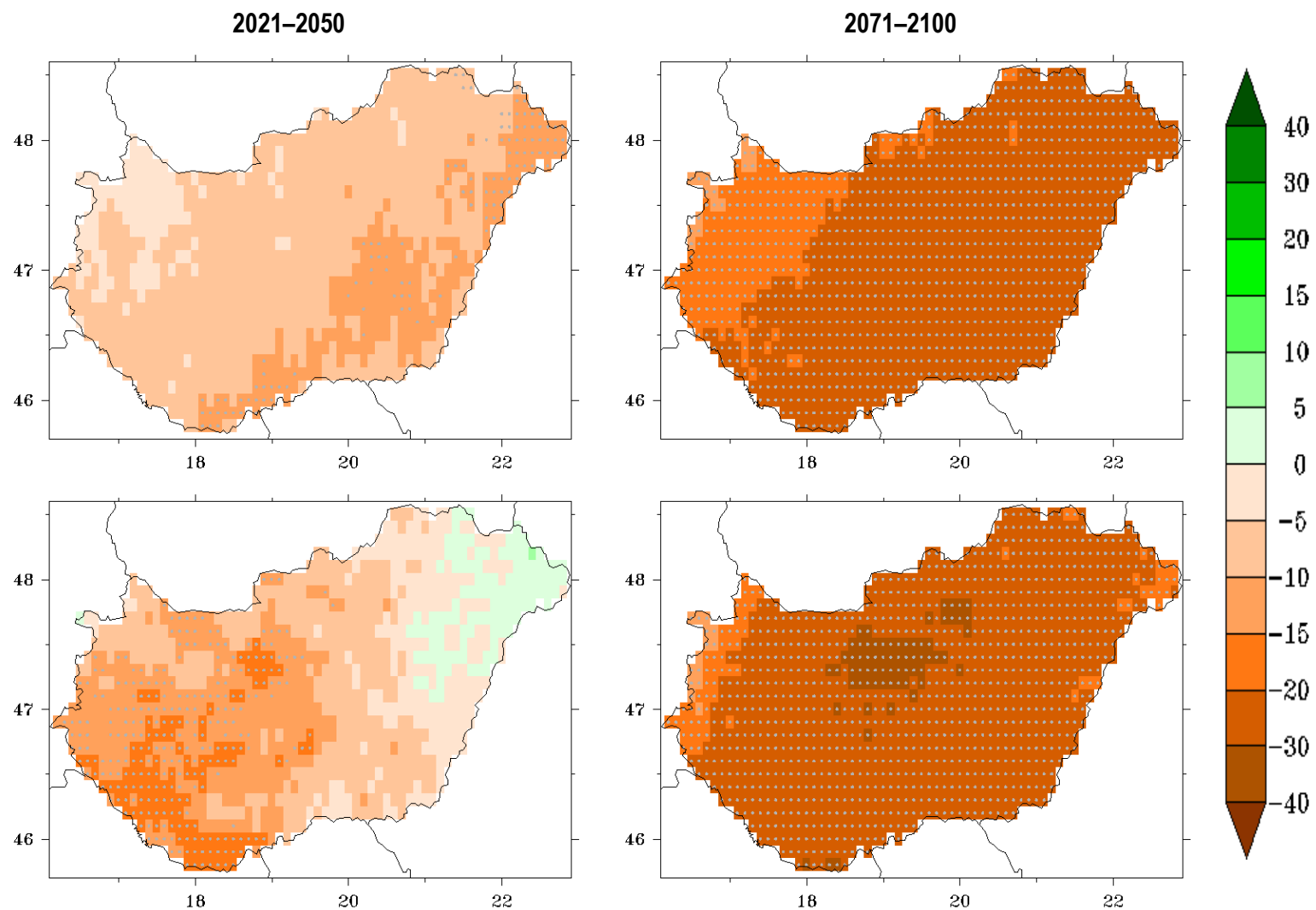
változásokkal. Azaz 2021–2050-re nyártól télig, az évszázad végére pedig már egész évben hosszabb száraz időszakokkal kell számolnunk, s a jelentől távolodva a változás mértéke (a tél kivételével) fokozódik. Ezek a változások nagyobb területen azonban csak az évszázad végén, nyáron és ősszel szignifikánsak.

**10. táblázat.** A különböző csapadékindexek átlagos magyarországi évszakos számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. Színezéssel emeltük ki azokat az évszakokat, amelyeknél a két modell ugyanolyan irányú változást mutat: barna csapadékcsökkenés, zöld: csapadéknövekedés.

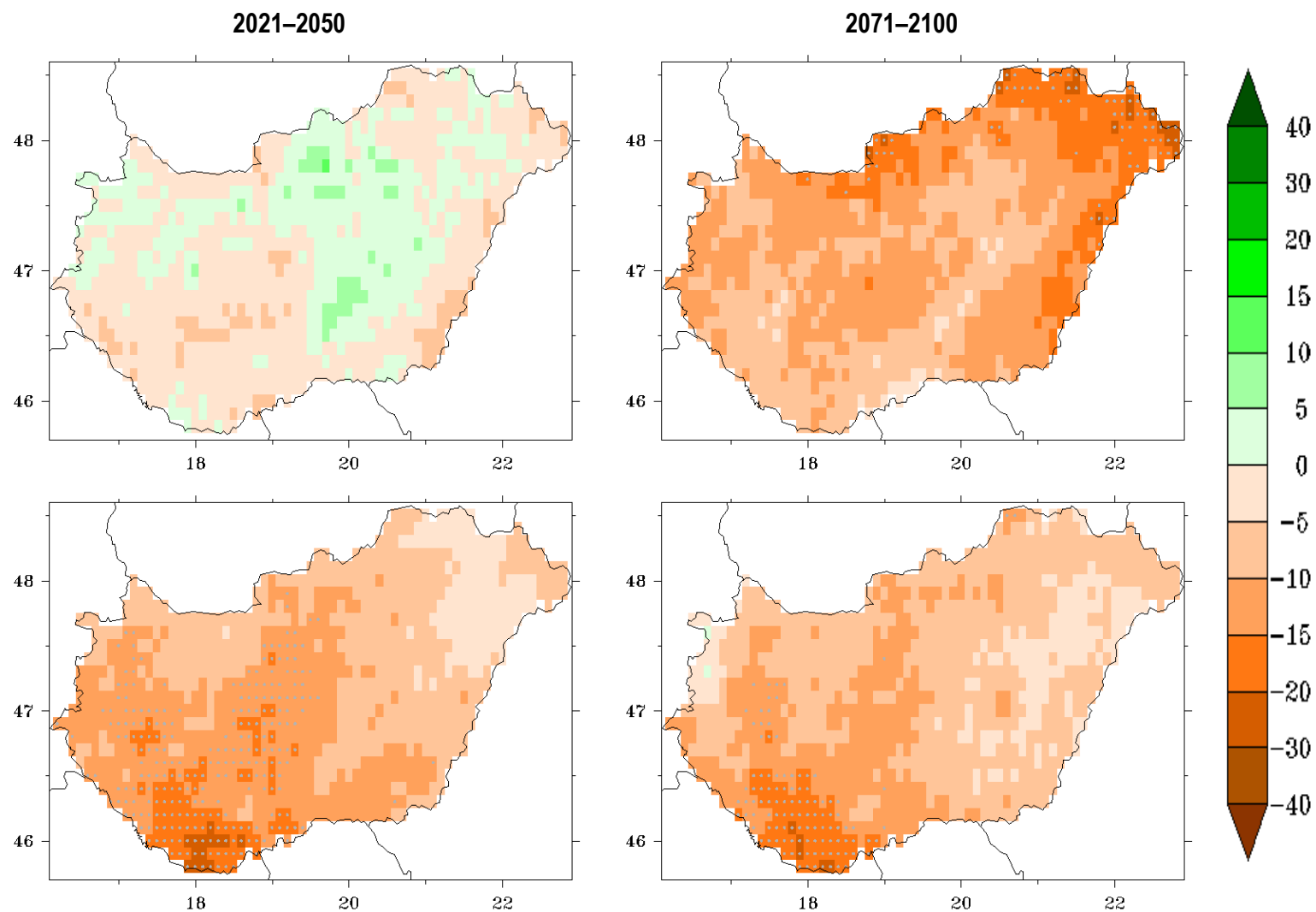
		2021–2050	2071–2100
<b>Csapadékos nap</b>	tavaszi	(-13) – 0,9	(-14) – (-6)
	nyári	-8	(-25) – (-23)
	ősz	(-10) – (-0,8)	(-12) – (-9)
	téli	(-15) – (-11)	-7
<b>Nagy csapadékú nap</b>	tavaszi	(-6) – 4,9	3,6–4,9
	nyári	(-6) – (-1)	(-19) – (-12)
	ősz	(-3) – 25	12–30
	téli	(-15) – (-3)	10–25
<b>Extrém nagy csapadékú nap</b>	tavaszi	9–11	37–38
	nyári	14–19	(-0,3) – 2,1
	ősz	10–56	39–68
	téli	(-3,9) – (-1)	31–63
<b>Csapadékintenzitás</b>	tavaszi	0,1–4,1	3,7–9
	nyári	-3,4–7	(-8) – 8
	ősz	7– 18	12–20
	téli	(-1,1) – 4,5	5,4–13
<b>Egymást követő száraz napok maximális időtartama</b>	tavaszi	(-16) – 14	1,9–14
	nyári	3,7–9	19–47
	ősz	0,9–7	16–19
	téli	6,2–11	7,5–11



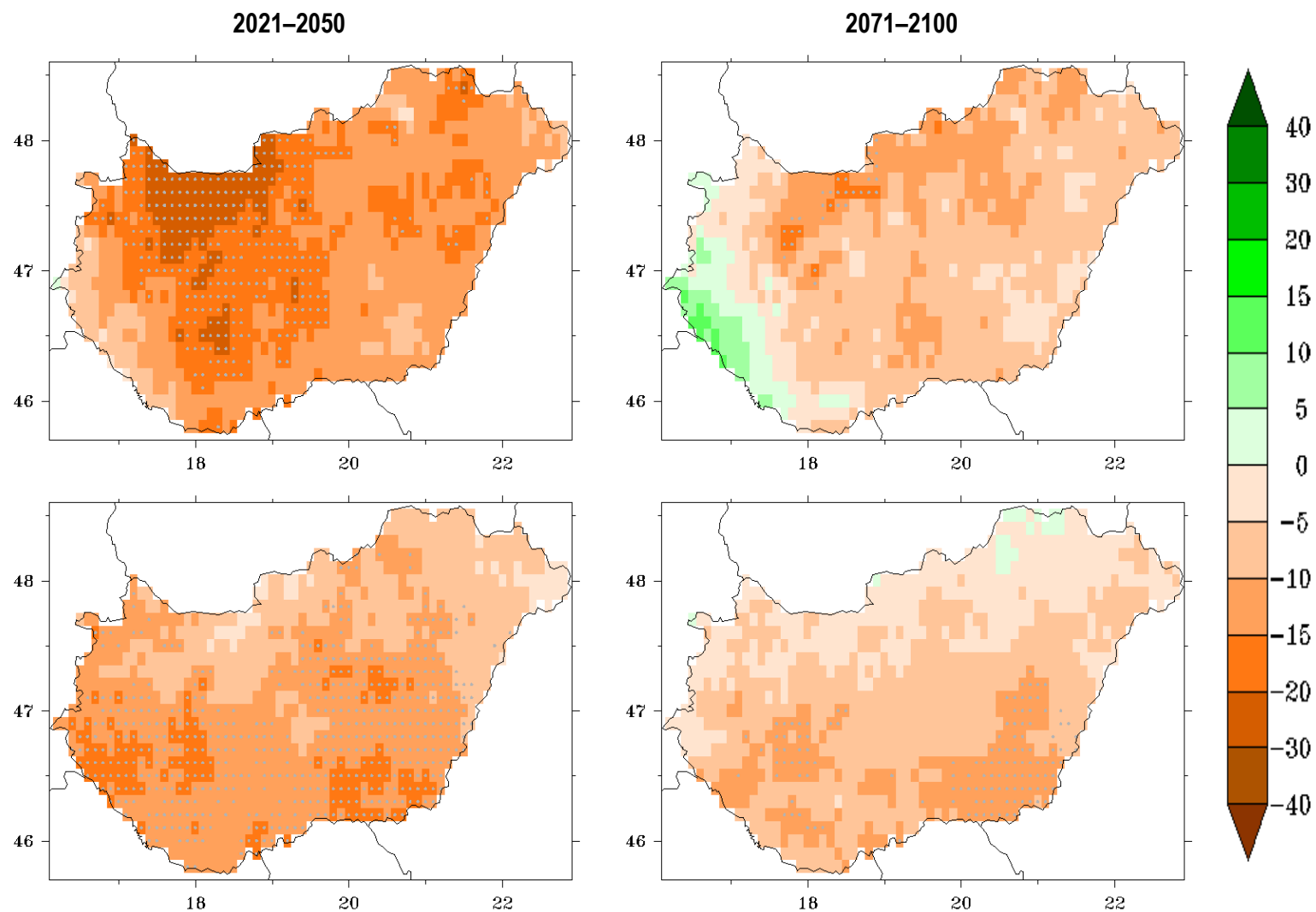
**56. ábra.** A csapadékos napok átlagos tavaszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



**57. ábra.** A csapadékos napok átlagos nyári számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.

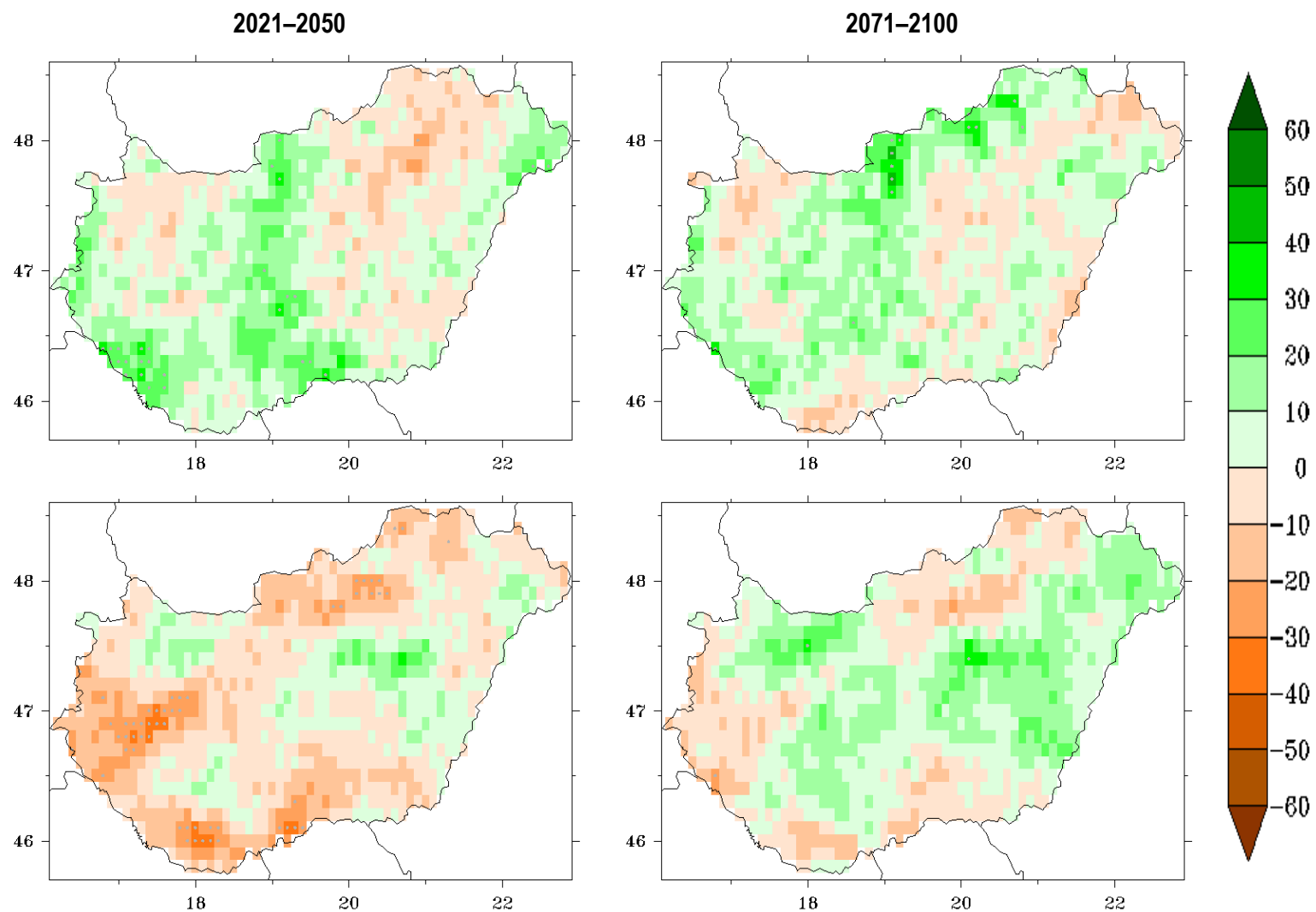


**58. ábra.** A csapadékos napok átlagos őszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.

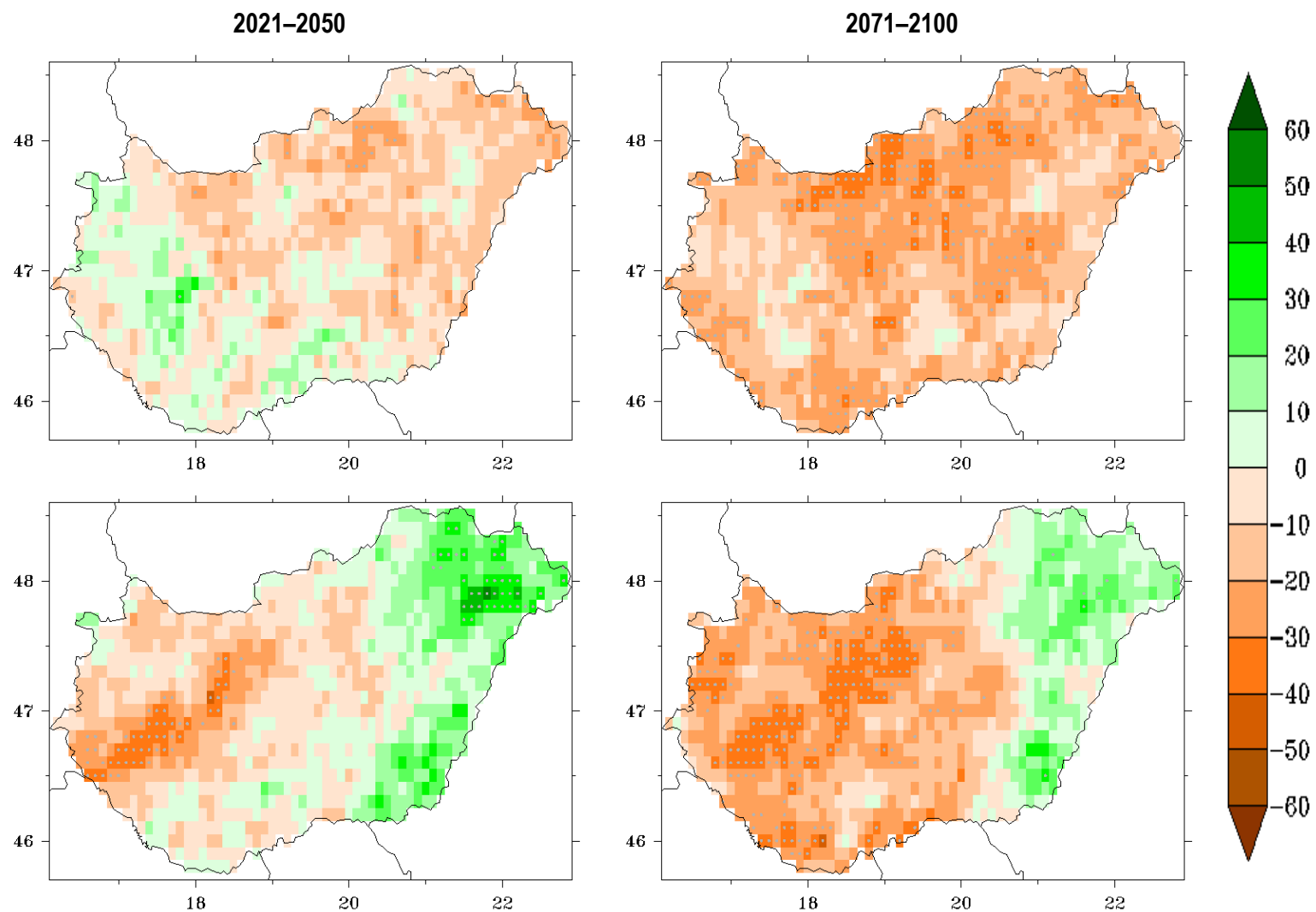


**59. ábra.** A csapadékos napok átlagos téli számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.

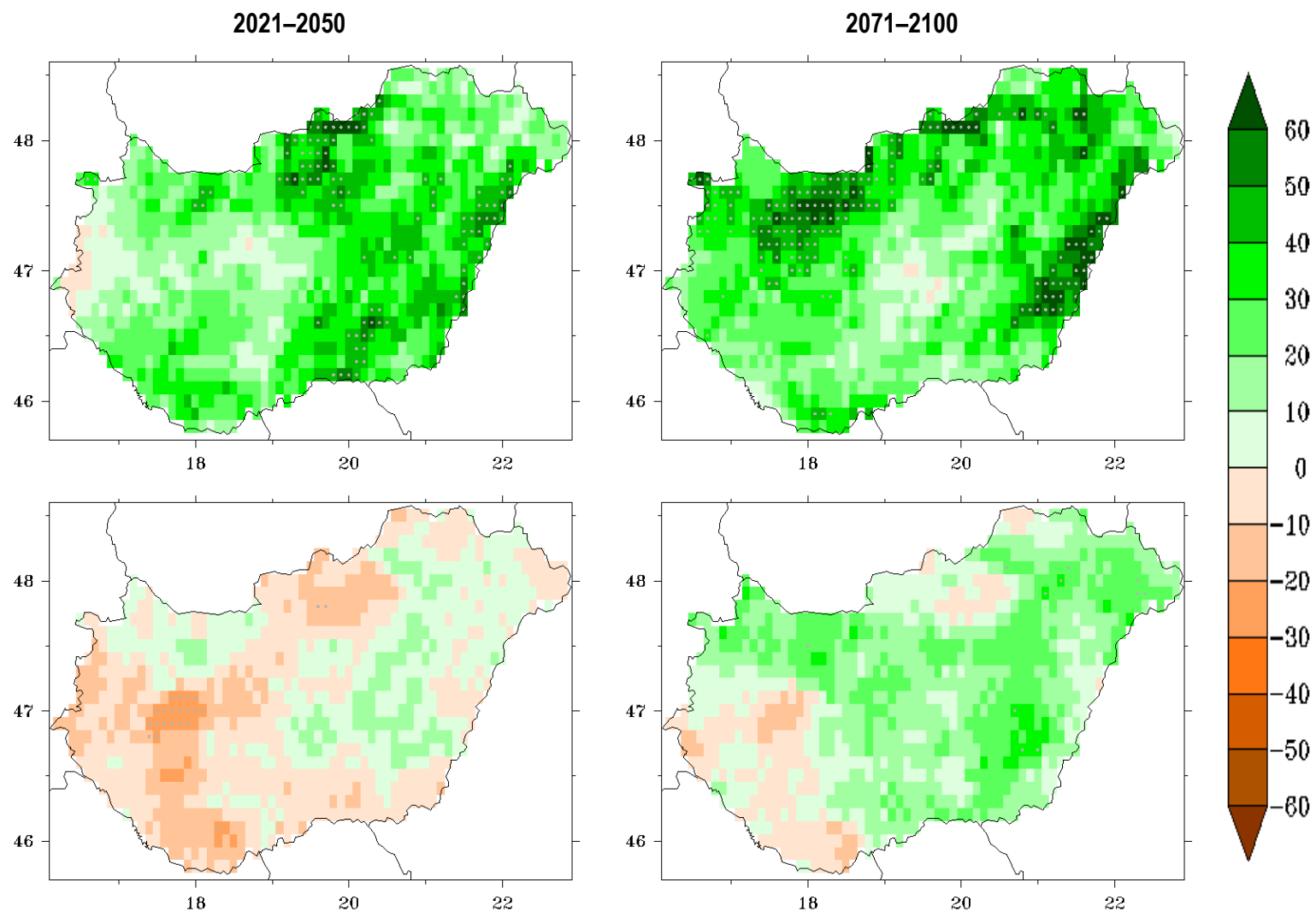




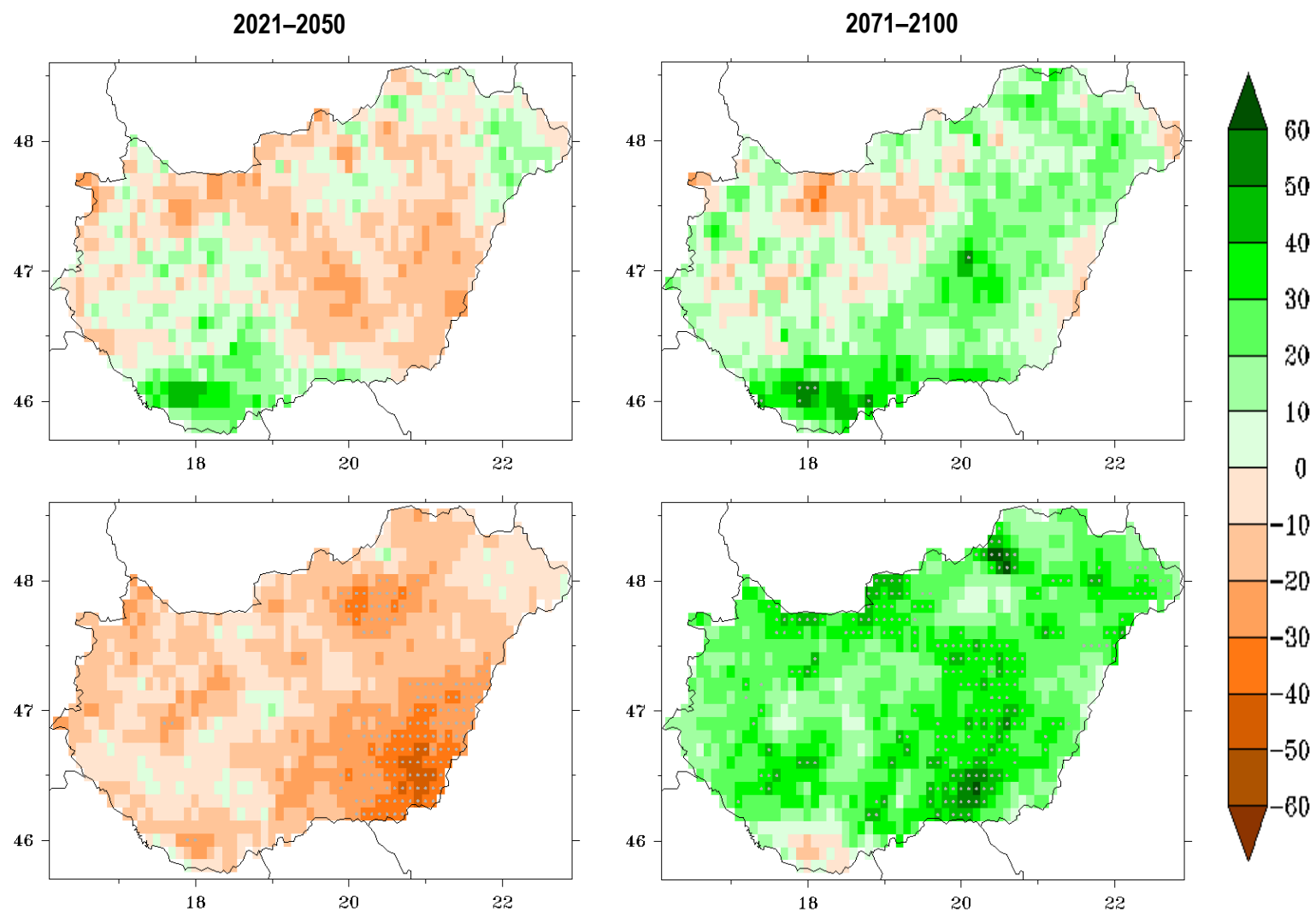
**60. ábra.** A nagy csapadékú napok átlagos tavaszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



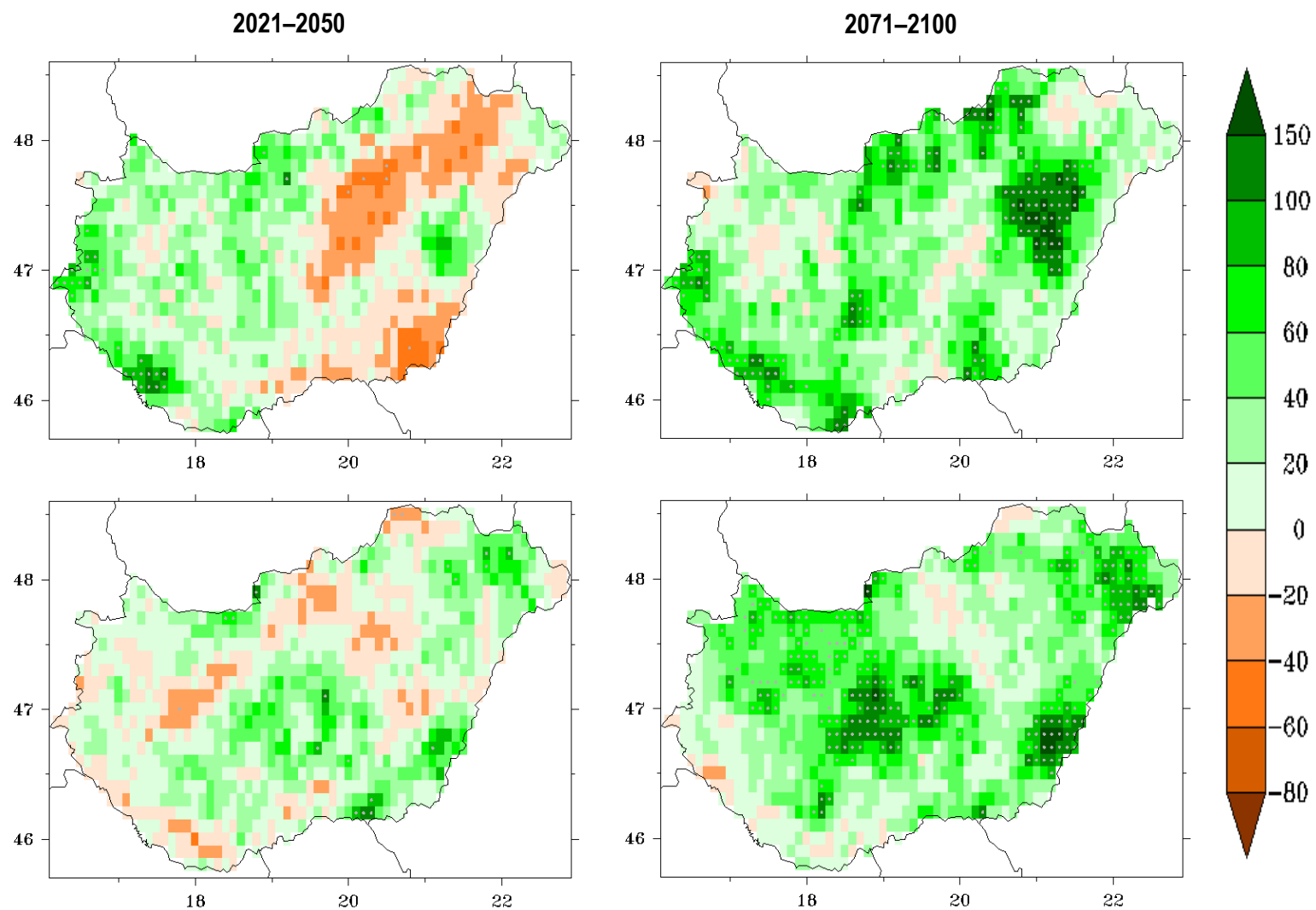
**61. ábra.** A nagy csapadékú napok átlagos nyári számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



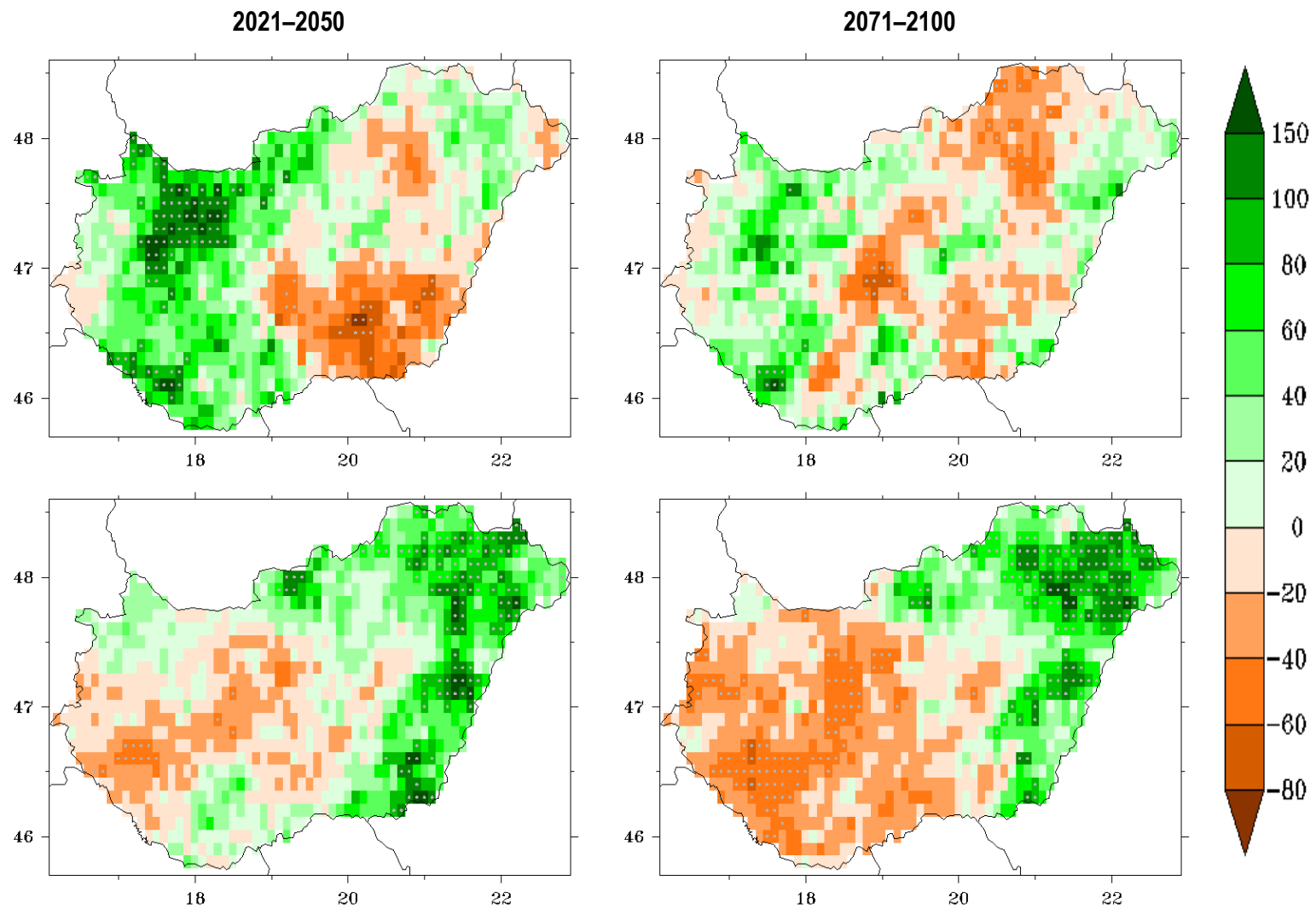
**62. ábra.** A nagy csapadékú napok átlagos őszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



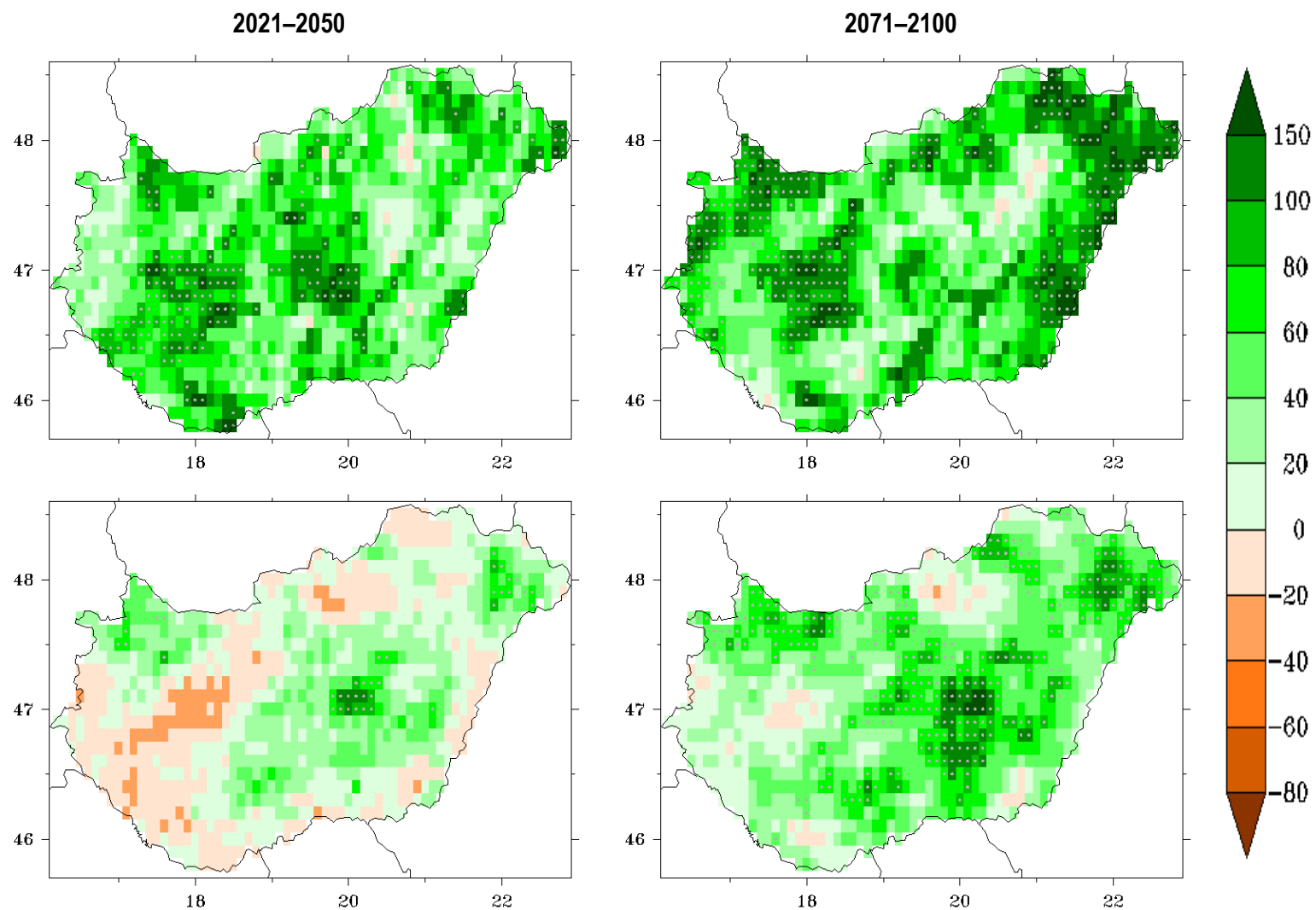
**63. ábra.** A nagy csapadékú napok átlagos téli számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



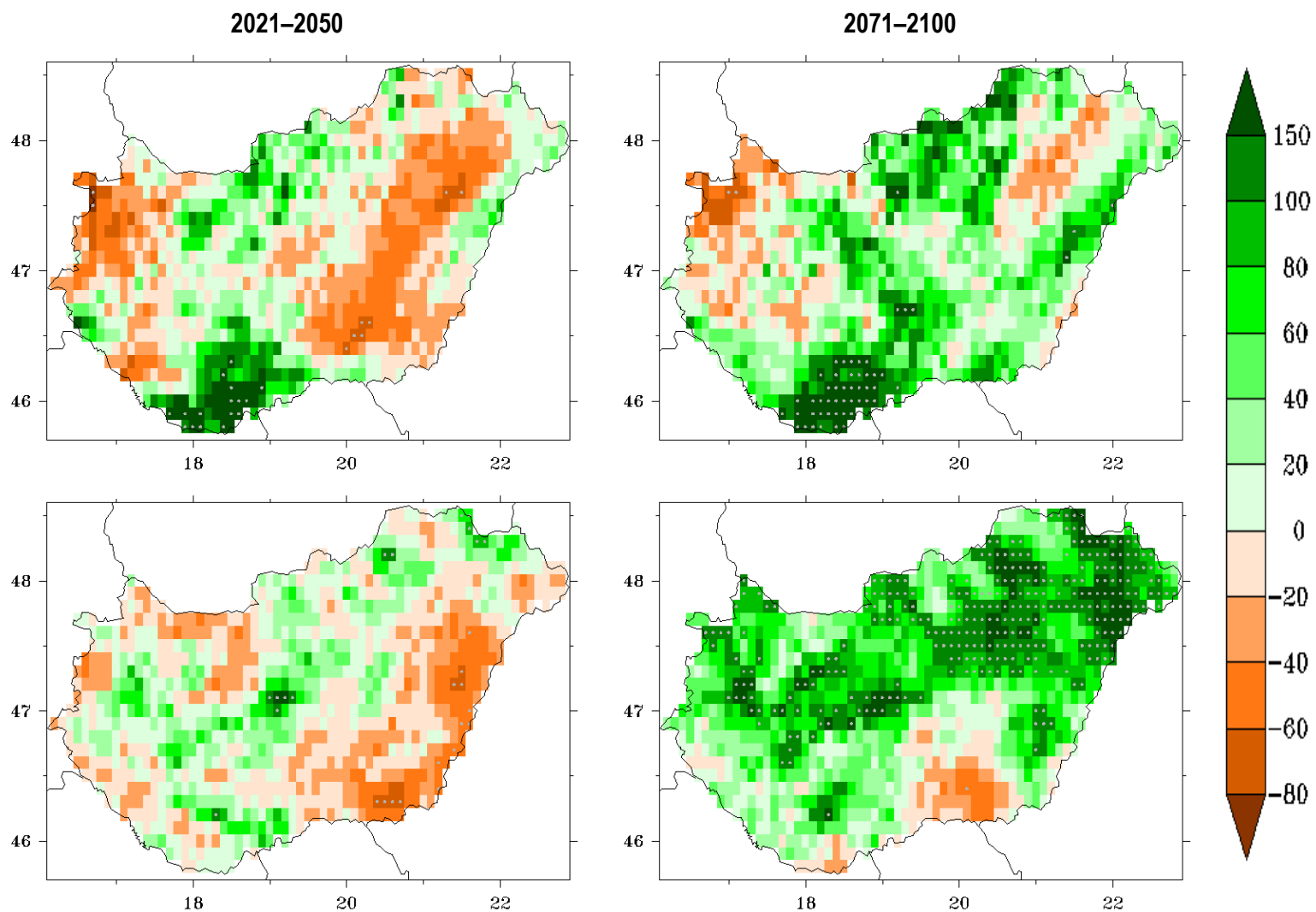
**64. ábra.** Az extrém nagy csapadékú napok átlagos tavaszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



**65. ábra.** Az extrém nagy csapadékú napok átlagos nyári számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.

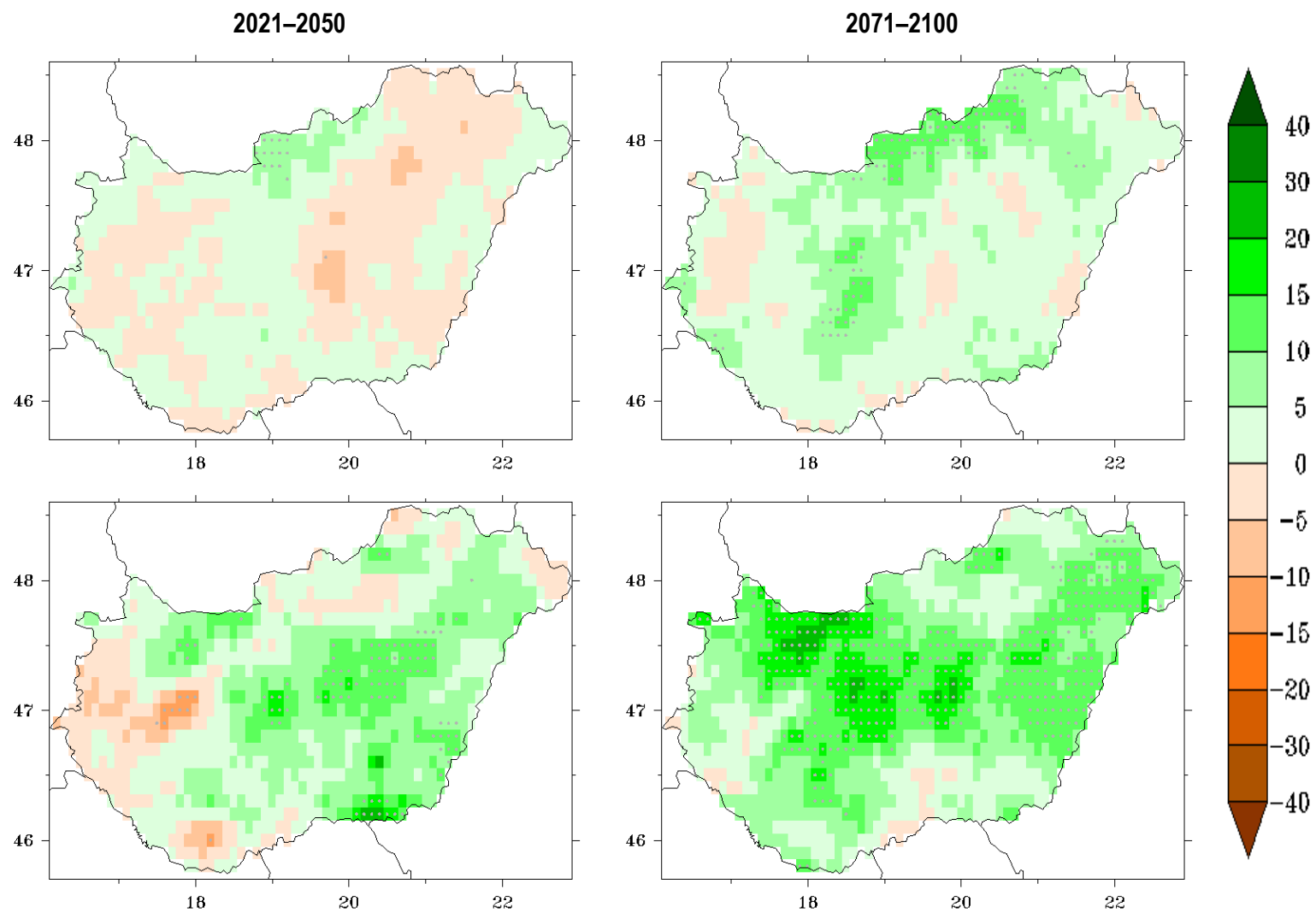


**66. ábra.** Az extrém nagy csapadékú napok átlagos őszi számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.

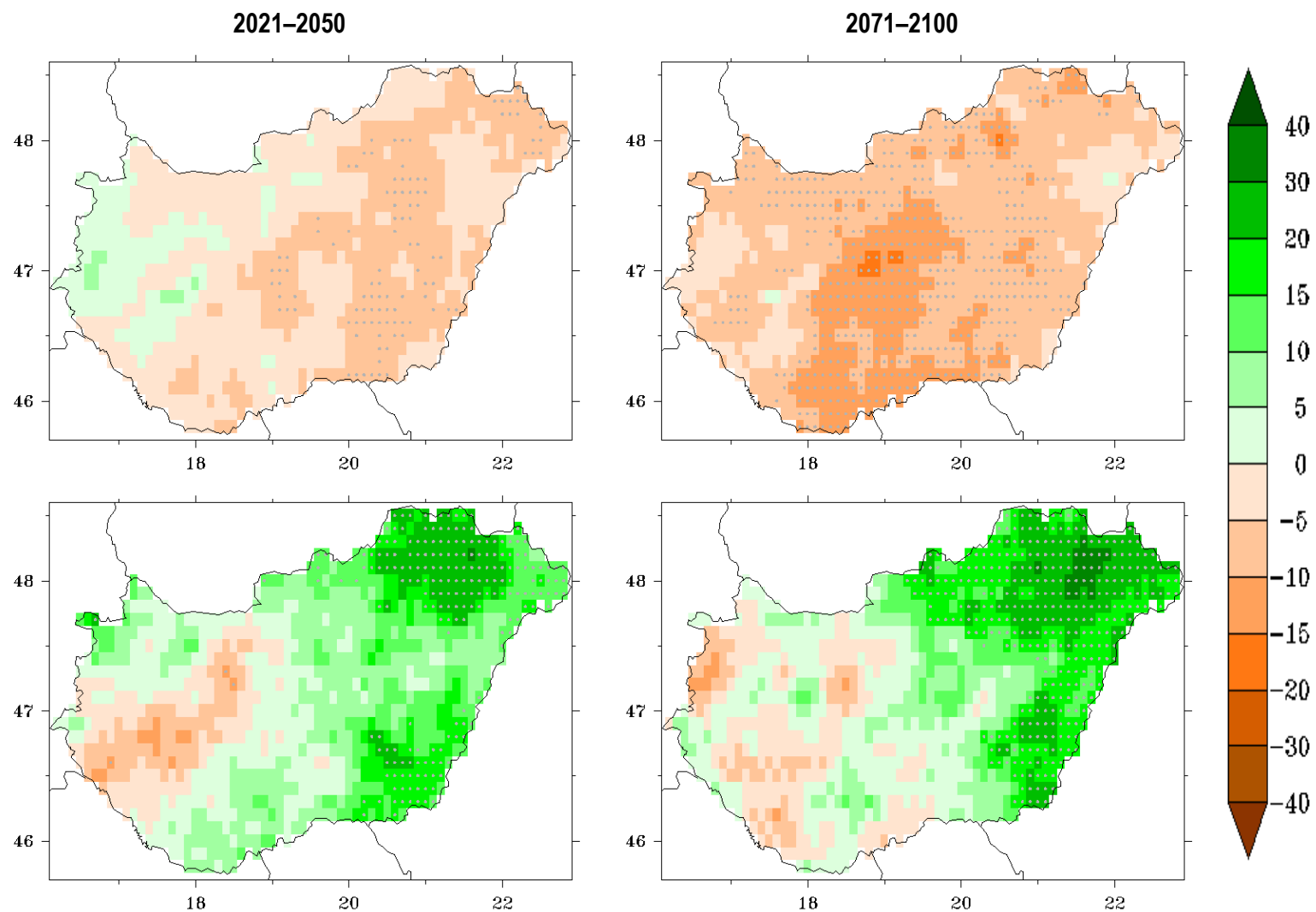


**67. ábra.** Az extrém nagy csapadékú napok átlagos téli számának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.

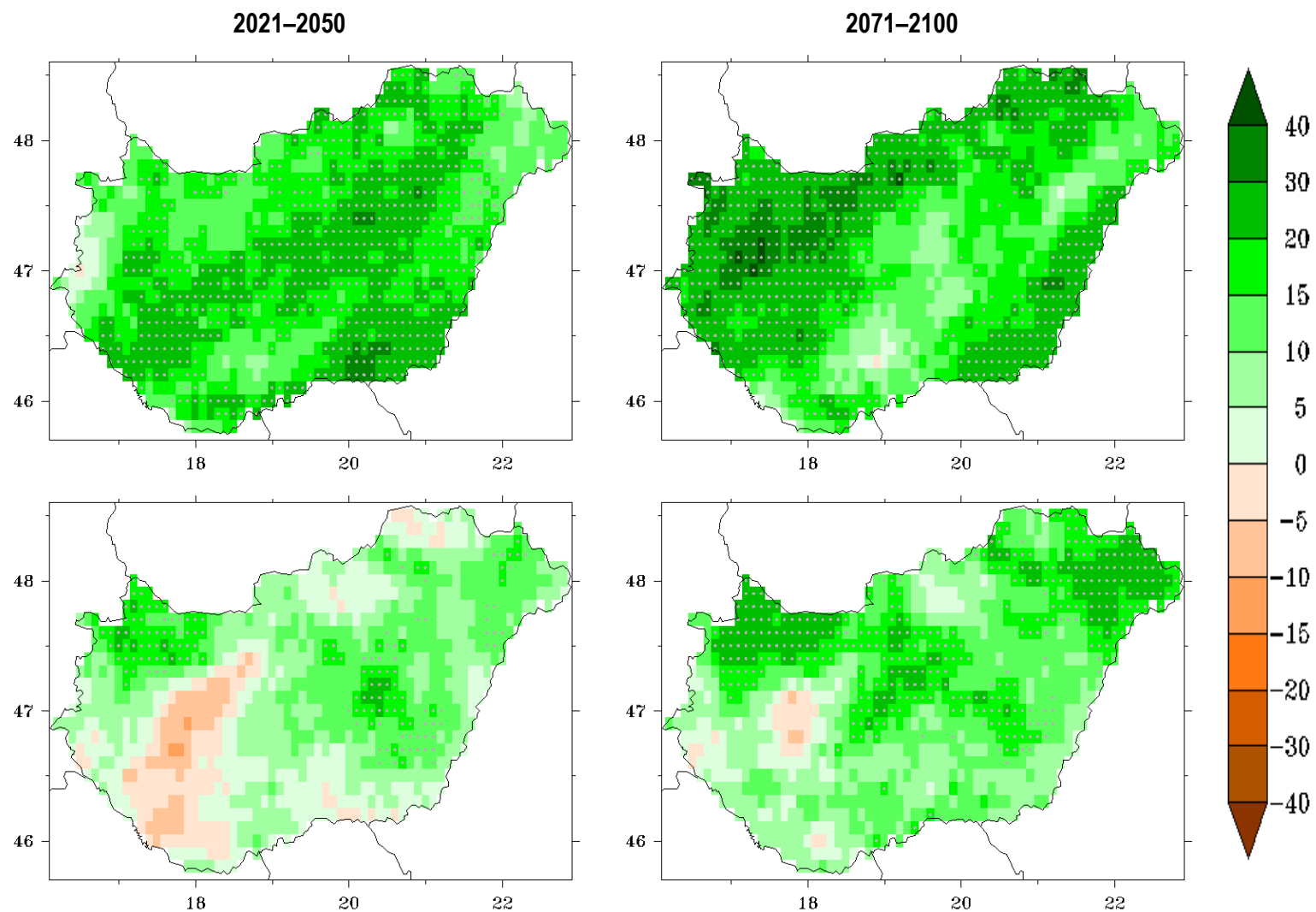




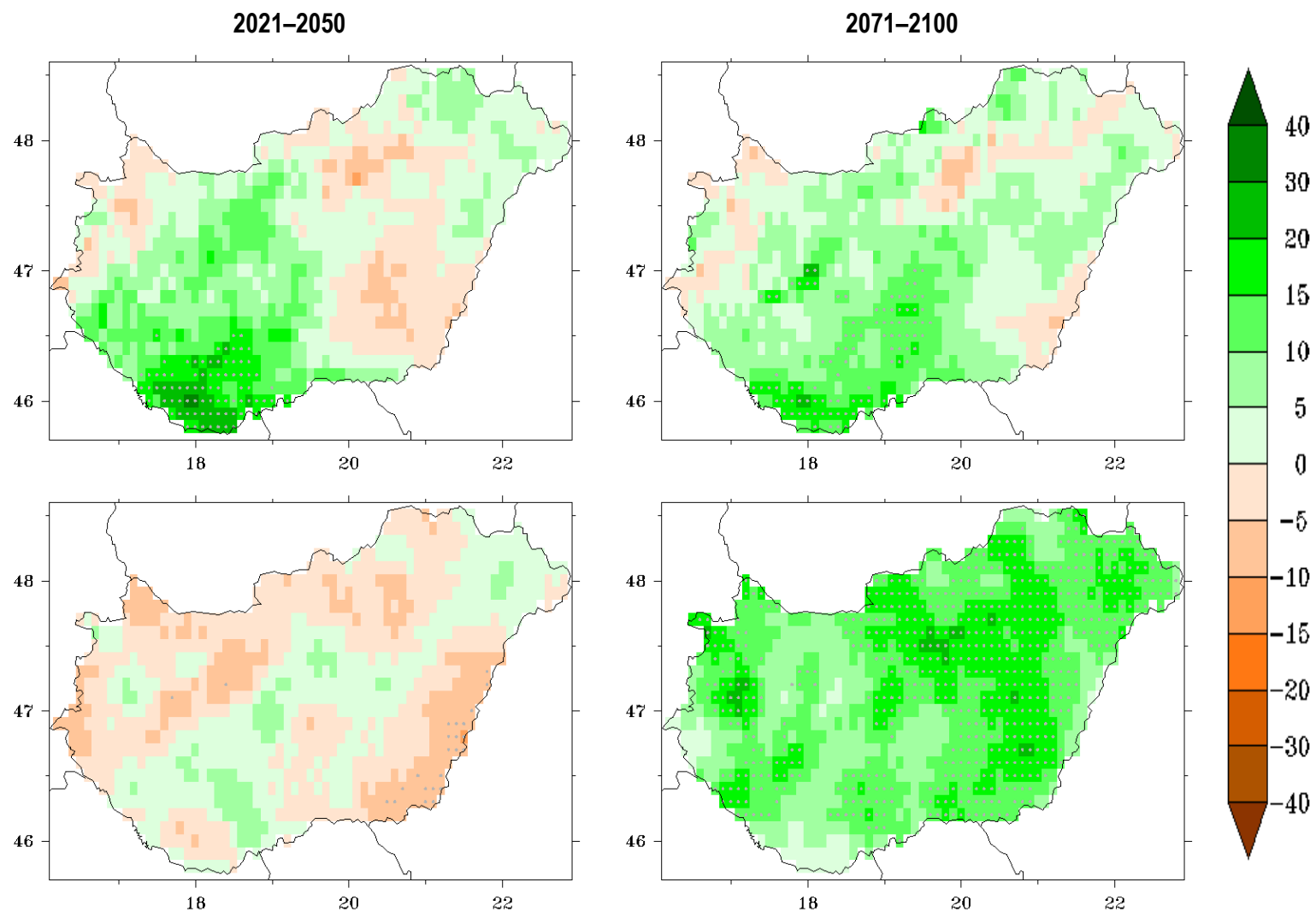
**68. ábra.** Az átlagos tavaszi csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



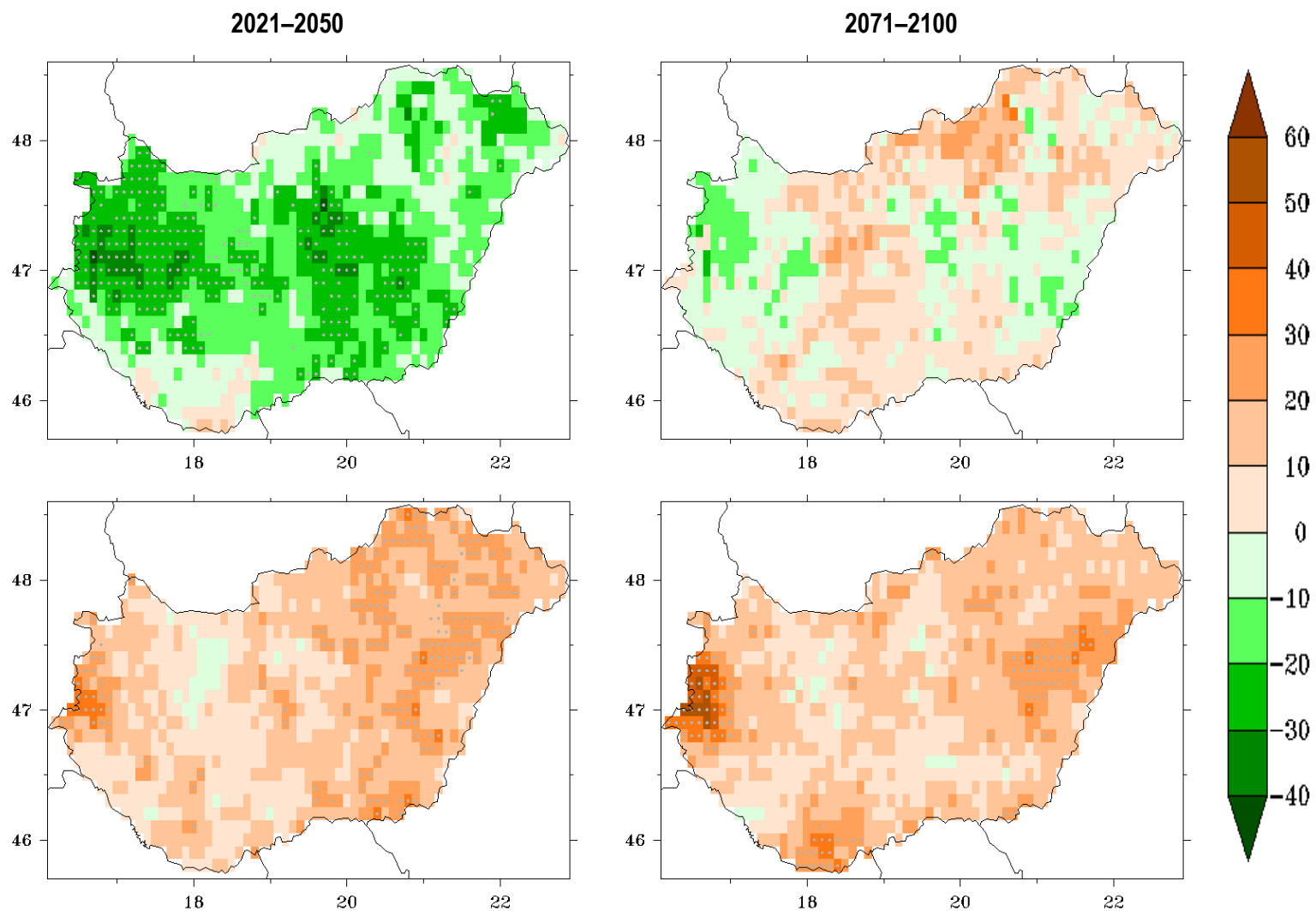
**69. ábra.** Az átlagos nyári csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



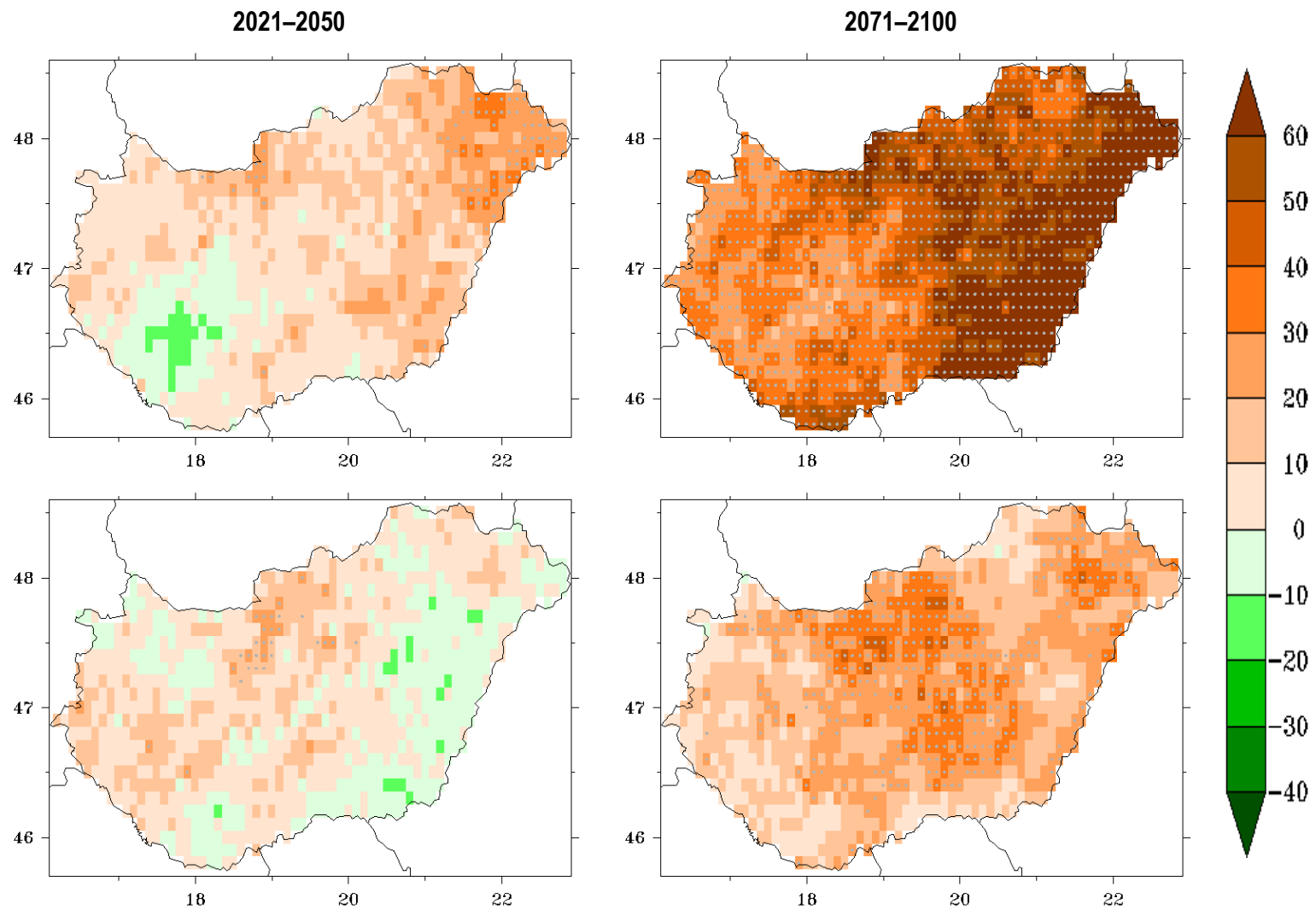
**70. ábra.** Az átlagos őszi csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



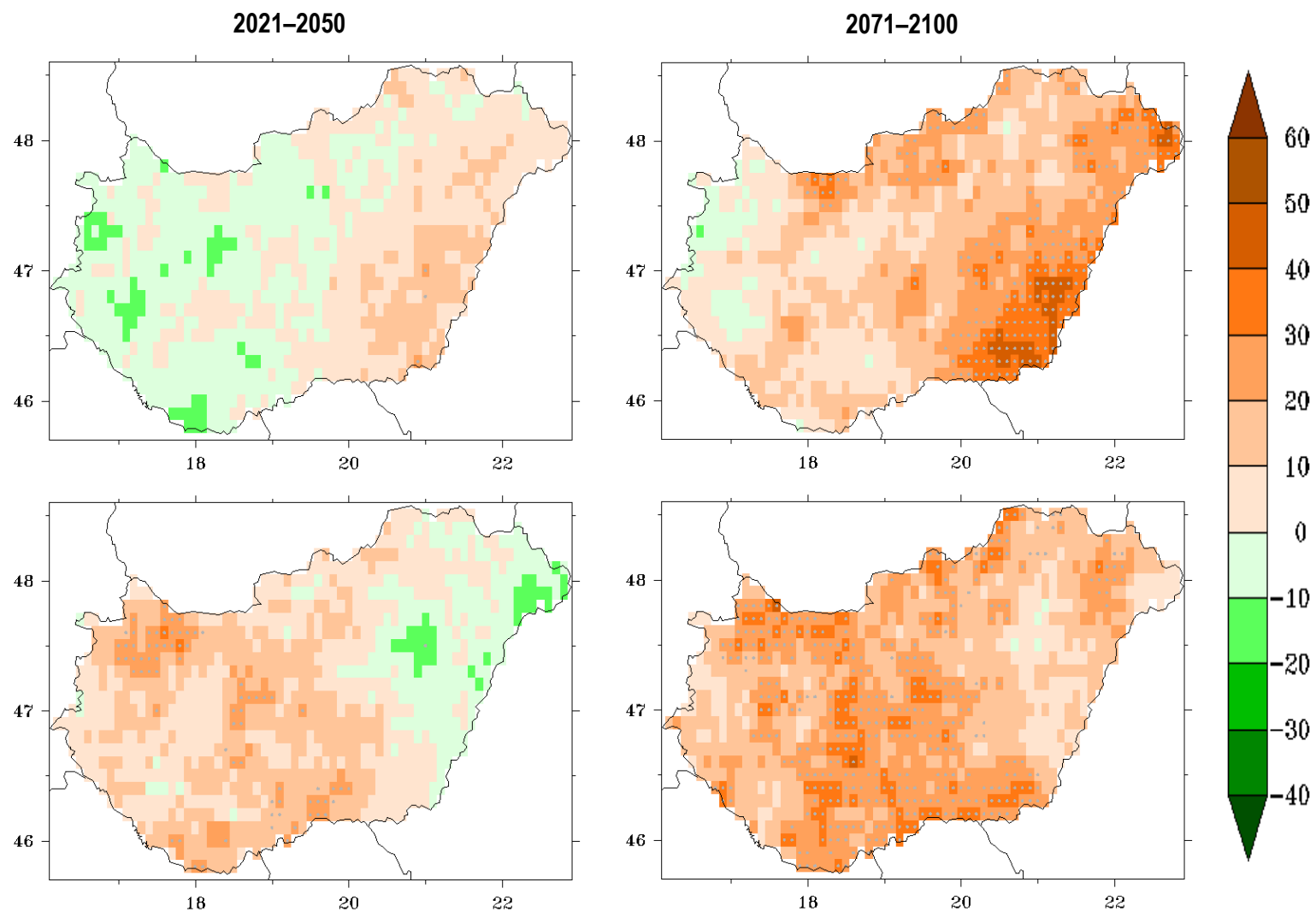
**71. ábra.** Az átlagos téli csapadékintenzitás változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



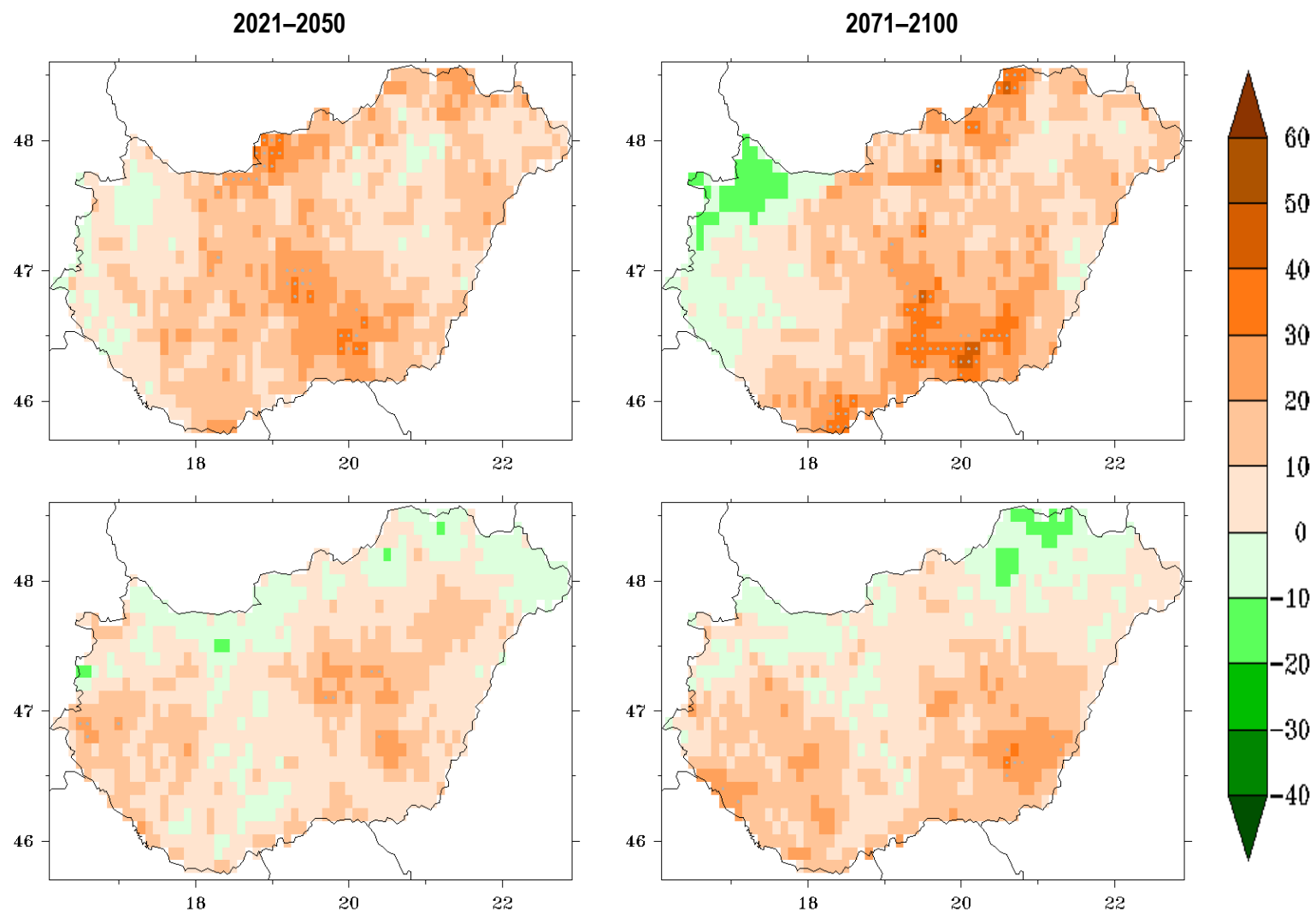
**72. ábra.** Az egymást követő száraz napok átlagos tavaszi hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



**73. ábra.** Az egymást követő száraz napok átlagos nyári hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



**74. ábra.** Az egymást követő száraz napok átlagos őszi hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



**75. ábra.** Az egymást követő száraz napok átlagos téli hosszának változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate és RegCM regionális klímamodellek eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli a szignifikáns változást.



## 5. Összefoglalás

A klímaváltozás vizsgálata éghajlati modellek segítségével lehetséges, s Magyarországon négy regionális klímamodellt alkalmazunk a térségünkben a XXI. században várható változások feltérképezésére (Bartholy et al., 2011). Ezek közül a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer felhasználói számára az ALADIN-Climate és a RegCM modellek eredményei alapján adjuk meg hazánk jövőben jellemző éghajlati viszonyait. A modellekkel az OMSZ-ban és az ELTE Meteorológiai Tanszékén 10 km-es térbeli felbontású regionális modellszimulációk készültek, a jövőbeli emberi tevékenység hatásának figyelembevételére egy közepes kibocsátási forgatókönyvet alkalmazva. A modellek különböző közelítéseket használnak egyes fizikai folyamatok leírására, továbbá a Kárpát-medencén kívül jellemző éghajlati viszonyokat leíró határfeltételeket is más-más globális modellek szolgáltatják számunkra, ami eltérésekhez vezet az eredményekben. Ezért a két modell eredményeinek együttes értékelésével lehetséges az éghajlati projekciókban lévő bizonytalanságok alapfokú megjelenítése, ez ugyanis a várható változások mellett lényeges és nélkülözhetetlen eleme az éghajlatváltozással kapcsolatos objektív hatásvizsgálatoknak.

Jelen tanulmányban áttekintettük a NATÉR-ba beépített klímamodellezési információkat, s részletesen elemeztük az ALADIN és RegCM modellek eredményeit. Elsőként elvégeztük a modelleredmények mérésekkel való validációját az 1961–1990 időszakra, majd áttekintést adtunk a 2021–2050-re és a 2071–2100-ra várható változásokról, referenciaként az 1961–1990 időszakot tekintve. A vizsgálatokat a hőmérsékletre és a csapadékra végeztük el, napi, havi, évszakos és éves skálán. A validáció során a CRU és a CARPATCLIM rácsponti megfigyelési adatbázisokkal vetettük össze a modelladatokat. A jövőre vonatkozó eredmények esetében a becslések bizonytalanságát is megadtuk, ami elsősorban az alkalmazott regionális modellek és a peremfeltételt szolgáltató globális modellek különbségeiből ered. Az alábbiakban összefoglaljuk a vizsgálatok lényegesebb megállapításait:

- Az éghajlati modellek jövőre vonatkozó eredményeit annak ismeretében értelmezhetjük, hogy a modellek mennyire tudják reprodukálni a múltbeli klímát jellemző értékeket. Bár a validáció fontos és kikerülhetetlen lépése az éghajlati modellezésnek, ugyanakkor nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak.
- A NATÉR keretében a hatásvizsgálatokhoz rendelkezésre bocsátott regionális klímamodell-szimulációk validációs elemzéséből kiderült, hogy a hőmérséklet esetén az ALADIN-Climate az átmeneti évszakokban jelentősebb mértékben alulbecsül, míg nyáron felülbecslés jellemzi. A RegCM esetén téli felülbecslés figyelhető meg, melyet a többi három évszak alulbecslése ellensúlyoz éves átlagban.
- Az extrém éghajlati viszonyokat tekintve az ALADIN-Climate kissé felülbecsli mind a meleg, mind a hideg hőmérsékleti indexek előfordulását, míg a RegCM nagymértékben alulbecsli azokat.
- A két modell általánosságban véve nagyobb évi csapadékösszegeket ad, mint a megfigyelések. A havi átlagos összegek menetét az ALADIN jobban követi, ugyanakkor jelentős a május–júliusi időszak értékeinek felülbecslése. A RegCM szimuláció esetén a havi átlagos csapadékösszegek eloszlása egyenletes, a hazánkra jellemző éves csapadékmennyiség követése emiatt gyenge.
- A csapadékvizonyokra vonatkozó éghajlati indexekre a modellek jellemzően pontosabb becslést adnak, mint a hőmérséklettel kapcsolatos indexekre.

- A XXI. században folytatódik az átlaghőmérséklet statisztikailag szignifikáns emelkedése a Kárpát-medencében. A két regionális klímamodell eredményei alapján a hőmérséklet éves átlagban vett növekedése hazánkban 2021–2050-re hozzávetőlegesen 1-2 °C, 2071–2100-ra 3-5 °C. Az évszázad közepére tavasszal és télen az országban szinte mindenütt 1 °C-ot meghaladó, de 2 °C-nál kisebb változások várhatók. Nyáron és ősszel a modellek közötti bizonytalanság nagyobb mértékű: az 1 °C-nál kisebb illetve a 2-3 °C-os változás egyaránt valószínű, utóbbi elsősorban keleten és délen. Az évszázad végére nyáron az ország teljes területén 3 °C-nál nagyobb melegedésre számíthatunk, ami egyes nyári hónapokban és egyes területeken elérheti akár a 6 °C-ot is. A többi évszakban nem valószínű 4 °C-nál nagyobb hőmérsékletemelkedés.
- A két regionális klímamodell ugyanolyan irányú változásokat jelez a különböző hőmérsékleti indexek jövőbeli előfordulására is: az eredmények alapján hazánkban 2021–2050-re és 2071–2100-ra egyaránt a magas napi maximumhőmérséklet értékek (pl. a nyári napok és a hőségnapok) gyakoribbá válásával és az alacsony minimumhőmérsékletű (pl. a fagyos és az extrém hideg) napok ritkább előfordulásával kell számolnunk. A jelzett változások mértéke modellenként számottevően különbözhet, ami részben annak köszönhető, hogy eltérően jellemzik az egyes éghajlati indexek referencia-időszakban való előfordulását.
- A csapadék-projekciók kiértékelésénél ennél jóval összetettebb képet kapunk, például az átlagos csapadékösszegre vonatkozó eredmények már a változások irányában is eltéréseket mutatnak. Ezért a csapadék esetében különösen fontos a rendelkezésre álló eredmények együttes kiértékelése, s a projekciók bizonytalanságának elemzése. A modellek a csapadék éves mennyiségének csökkenését jelzik az ország jelentős részén, ez azonban csak az egyik modell esetében szignifikáns és haladja meg a 10%-ot. Nyáron mindkét modell csapadékcsökkenést mutat: 2021–2050-re 5% alatti, 2071–2100-ra pedig hozzávetőlegesen 20%-os mértékben. A következő évtizedekben tavasszal és ősszel csökkenés és növekedés egyaránt lehetséges a modelleredmények alapján, az évszázad végére azonban ősszel egyértelmű (10%-ot meg nem haladó) növekedéssel számolhatunk. A téli csapadék mennyiségében 2021–2050-re csökkenés várható, míg 2071–2100-ra ez a tendencia csak az ALADIN modell eredményei alapján folytatódik, a RegCM eltérő tendenciákat jelez az évszázad közepére és végére.
- A különböző csapadékindexek esetében a csapadékos napok számában a XXI. század folyamán csökkenést mutatnak a modelleredmények, míg a 10 mm-t és a 20 mm-t meghaladó csapadékos napok gyakoriságában és a csapadékontenzitásban – elsősorban az évszázad végére (a nyár kivételével) – növekedés várható. A száraz időszakok hosszában nyáron és ősszel számíthatunk jelentősebb növekedésre.

## 6. Kitekintés

Az alábbiakban röviden összefoglaljuk, hogy a NATÉR jelenlegi és fejlesztés alatt álló klímaprojekciói mit nyújtanak a felhasználóknak és milyen fejlesztéseket látunk szükségesnek annak érdekében, hogy a NATÉR célkitűzéseit maradéktalanul megvalósítsuk és az éghajlatváltozás hatásaihoz való hazai adaptáció megfelelő szakmai elvek mentén történjen:

1. A NATÉR klímamodelllezési adatainak térbeli és időbeli felbontása: Az eddigi tapasztalatok alapján a felhasználók elsősorban az adatok elérhetősége, térbeli és időbeli részletessége alapján választják ki, hogy melyik modelleredményt használják fel a

hatásvizsgálatokban. A NATÉR rendszerben az ALADIN és a RegCM modellek eredményei egy Magyarországot lefedő 10 km-es felbontású rácson, napi részletességgel állnak rendelkezésre három időszakra: 1961–1990-re, 2021–2050-re és 2071–2100-ra. Az adatokhoz meghatározott felhasználói kör fér hozzá a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI) illetve a Nemzeti Alkalmazkodási Központ (NAK) közvetítésével. A NATÉR alapvetően a hazai mezőgazdasági, ökológiai, turisztikai, egészségügyi, közúti baleseti, valamint a Balatonra vonatkozó hatástanulmányokhoz nyújt megfelelő kiindulási adatokat. Az adatok Magyarországot lefedő tartománya az országhatáron átnyúló vizsgálatok elvégzésére nem alkalmas, s ez legkritikusabban a hidrológiai kérdések esetében jelentkezik. Bizonyos hidrológiai (pl. villámárvizekkel kapcsolatos) kutatásokhoz a modelldatok időbeli részletessége ugyancsak elégtelen. Ezenkívül esetenként a rendelkezésre álló három időszak kiválasztása sem optimális, mert megnehezíti azoknak a hatásvizsgálati módszereknek a kalibrációját, amelyeknél a hatást reprezentáló adatok más időszakra állnak rendelkezésre (pl. az egészségügyi hatásvizsgálatok szükséges országos halálozási adatok esetében). Fontos fejlesztési terület tehát a modelledmények térbeli és időbeli kiterjesztése. Ezeket az adatokat megfelelő szakértelem és klímamodellek hiányában az MFGI/NAK nem tudja előállítani, ami szükségessé teszi az információk előállításáért felelős intézmények számára a fejlesztésekhez szükséges pénzügyi háttér biztosítását. **A NATÉR megfelelő adatokkal való ellátását az Országos Meteorológiai Szolgálat állami alapfeladatai közé kell emelni, s törvényi szabályozással kell biztosítani a tevékenység pénzügyi hátterét.**

2. A NATÉR klímaprojekcióinak reprezentativitása: Csupán a fenti két modellre alapozott projekcióval szemben nem lehetnek túlzott elvárásaink. Egyrészt egy kéttagú ensemble nem elegendő a bizonytalanságok teljes spektrumának feltérképezésére, ugyanis miközben a lehető legfinomabb (10 km-es) felbontású magyarországi regionális klímamodelleket alkalmazzuk, nem tudjuk, hogy a regionális modellek a kapcsolódó határfeltételekként használt globális modellel együtt a bizonytalanságok mely részét mutatják be. Erre jó példa a magyarországi téli csapadékmennyiség következő évtizedekben várható alakulása: az ALADIN és a RegCM modell bemutatott eredményei alapján egyértelműnek látszik a téli összeg csökkenése 2021–2050-re, azonban korábbi vizsgálatainkból (pl. Szépszó, 2014; Pongrácz et al., 2011) már tudjuk, hogy az európai intézetekben futtatott modellszimulációk többsége a téli csapadék növekedését valószínűsíti. Ugyanakkor látszólag paradox módon a kis elemszám miatt nagy a becslések bizonytalansága is, amit ismét a téli csapadék változásain lehet illusztrálni: a két modell eredményei alapján az évszázad végi téli változás iránya teljesen bizonytalan, míg ugyancsak az európai modellszimulációk eredményeinek vizsgálata megmutatta, hogy 2071–2100-ra igen magas a csapadéknövekedés valószínűsége hazánkban ebben az évszakban. Ahogyan említettük, a NATÉR-ba beépített adatok a regionális és a határfeltételt adó globális modellek bizonytalanságainak alapfokú reprezentációjára képesek. „A sugárzási kényszer változásán alapuló új éghajlati scenáriók a Kárpát-medence térségére” című [RCMTÉR](#) projekt keretében folyamatban van a jövőre vonatkozó modellbecslések fejlesztése, mégpedig olyan módon, hogy az ALADIN és a RegCM modellek új kibocsátási forgatókönyvekkel készülő szimulációi az emberi tevékenység leírásának bizonytalanságát is megjelenítsék (Szépszó, 2015). A modellekkel két új kísérletet hajtunk végre egy-egy optimista és pesszimista kibocsátási scenárió alkalmazásával. Felvetődik a kérdés, hogy a projekciós bizonytalanságok megjelenítéséhez minimálisan mekkora klímamodellek-együttes szükséges, illetve mi lenne az ensemble optimális mérete és összetétele. **Az optimális szimuláció-együttes legalább 8-10 körültekintően kiválasztott tagot tartalmaz, amelyek kiegyensúlyozot-**

tan 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. A tagok kiválasztása előtt konzultálni kell a modellező szakemberekkel egy szakmailag elfogadható és hatékony ensemble rendszer kialakítása érdekében – ahogyan ezt magasabb szinten, pl. az európai éghajlati szolgáltatások jelenleg kialakítás alatt álló rendszere (Copernicus Climate Change Services, Riddaway, 2014) esetében teszik.

3. A bizonytalansági információk számszerű figyelembevétele a NATÉR felhasználói által végzett hatásvizsgálatokban: A két modellre alapozott vizsgálatok a jelenlegi lehetőségeinkhez képest elfogadható becslést adnak a Magyarországon várható éghajlatváltozás mértékére és felhívják a figyelmet annak bizonytalan tényezőire. Az itt összefoglalt modelledmények lehetőséget nyújtanak arra is, hogy a szimulációs bizonytalanságok objektíven megjelenjenek a hatásvizsgálatokban. **Ugyanakkor súlyos problémát jelent, hogy a NATÉR jelenlegi felhasználói nem használják fel mindkét szimuláció adatait, s a hatásvizsgálatok jelentős része csak az egyik modell eredményeire támaszkodik, holott a NATÉR eredeti célkitűzése ezzel ellentétes volt.** Ez szakmailag nem elfogadható, mert ahogyan arra a tanulmány elején rámutattunk, az alkalmazkodási lépéseket egyetlen scenárióra alapozni helytelen. Ez a megközelítés számos szakterületen okozhat később problémákat (környezeti és gazdasági következményeket), amit hidrológiai vizsgálatok (pl. Szépszó et al., 2014) már most is konkrétan alátámasztanak. Javasoljuk a modellek adatsorai helyett (mellett) valószínűségi jellegű információk (pl. küszöbértékek) bevezetését a NATÉR-ba, s a hatásvizsgálók orientálását ezek irányába, annak érdekében, hogy elkerüljük a modellek közötti önkényes szelekciót, mind a felhasználók, mind az adatokat kiajánlók körében.
4. A NATÉR felhasználóinak támogatása: Tapasztalataink alapján a NATÉR-ban lévő modelladatok jelenlegi felhasználói kizárólag az MFGI/NAK szakembereivel állnak kapcsolatban. Ennek köszönhetően nem rendelkeznek a modelladatok felhasználásához szükséges megfelelő alapvető információkkal és tudással, és az alkalmazásukhoz szükséges speciális módszerekkel, ezért gyakran helytelenül használják és értelmezik azokat (1. a 3. pontot). Ennek orvoslására mindenképpen **szükségesnek tartjuk a jövőben a klímamodellező szakemberek és a hatásvizsgálatokat végző kutatók közötti közvetlen párbeszédet és konzultációt, amit kérünk az adatok felhasználásának feltételül szabni.** Ez ugyancsak a NATÉR eredeti célkitűzései között szerepelt.

## 7. Summary

To have targeted and sustainable adaptation strategies, detailed and quantitative information on regional climate change and its local impacts is of key importance. The National Adaptation Geographical Information System (NAGiS) has been established in 2013 to support strategic planning and decision making related to the adaptation in Hungary. To define the proper adaptation actions, scientific credibility of the information system has great importance. The most essential input of NAGiS is served by climate data, i.e., observations and future projections. In Hungary, four different regional climate models (RCMs) have been adapted and used for analysing future climate change in detail (Bartholy et al., 2011). Among them, two RCMs are used to provide projected climate information for the users of NAGiS: ALADIN-Climate and RegCM models adapted by the Hungarian Meteorological Service and the Department of Meteorology of the Eötvös Loránd University, respectively. Although the basic governing equations are identical in the two RCMs, different approaches and parametrization schemes are applied. Moreover, the lateral boundary conditions are provided by different global climate models (GCMs) to the regional experiments. These structural differences lead to different results, thus, enabling us to assess the uncertainties of regional climate projections at a certain level. The combined evaluation of an ensemble of RCM simulations is required in objective and correct impact studies, which is an important aim of the NAGiS initiative.

Present paper is dedicated to introduce the scientific background of climate change investigations and give a comprehensive assessment of climate model data included in NAGiS, in order to support proper application and interpretation of RCM results. In chapter 2, description of climate system and its numerical modelling is given, with special focus on regional climate modelling. This part of the document discusses the sources of uncertainties in climate projections as well as international co-operations aiming at assessment of global to regional climate change and related uncertainties. Chapter 3 deals with milestones of climate dynamics activities and steps done in adaptation to climate change impacts in Hungary. In chapter 4, an overview is provided about the climate information available in NAGiS; ALADIN and RegCM results are analysed in detail. The most important conclusions are drawn in chapter 5, and the paper is closed by an outlook with critical evaluation of credibility and user practice of NAGiS climate information, and with raising some development issues.

Climate change simulations of ALADIN and RegCM were achieved over the Carpathian Basin on 10 km horizontal resolution, prescribing anthropogenic activity according to the intermediate SRES A1B emission scenario (Nakicenovic et al., 2000). First, RCM outputs are validated against gridded observational datasets of CRU and CARPATCLIM for the reference period of 1961–1990. Afterwards, future projections are evaluated concentrating on two periods: 2021–2050 for adaptation to climate change on decadal time scale and 2071–2100 for long-term strategic planning. The investigations are focuses on daily, monthly, seasonal and annual mean temperature and precipitation. In the case of future projections, uncertainties of the estimations are also quantified, which are originated primarily from the differences of driving GCMs and driven RCMs.

Validation of simulation results is an important issue in the interpretation of RCM-based climate projections. In this process it is evaluated how well the past climatic conditions are reproduced by the model simulations. Although validation is a highly important and strictly required step in any modelling approach, there is no guarantee that models with good performance for the past will provide reasonable future climate estimations, as well. The validation analysis of the simulation results of the two RCMs available in NAGiS shows that:

- ALADIN-Climate significantly underestimates the spring and autumn temperature conditions, whereas overestimation is found in summer. In case of RegCM, winter temperature is overestimated, which is compensated on annual scale by the smaller

underestimations in the other three seasons. Considering the extreme temperature conditions, ALADIN-Climate is slightly overestimating both the warm and the cold related climatic indices, whereas RegCM underestimates them.

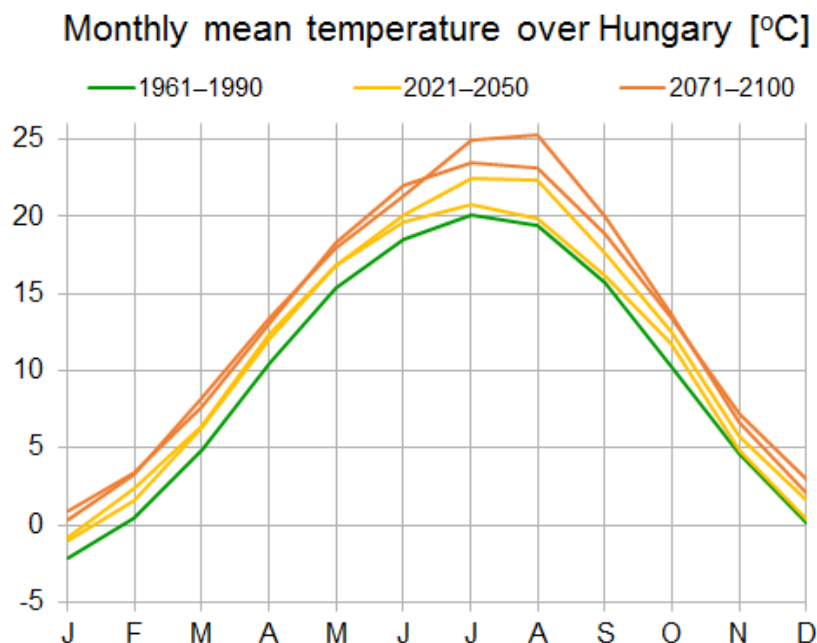
- In general, simulations of both RCMs result in larger annual precipitation totals than measured during the reference period in the country. The annual cycle of monthly mean precipitation amounts is better reproduced by ALADIN-Climate, although precipitation totals in May-June-July are highly overestimated. In case of RegCM the simulated monthly mean precipitation amounts are very similar to each other, thus the annual cycle is relatively poorly reproduced. The RCMs provide generally better estimations for the precipitation-related than the temperature-related indices.

Both past observations and available information for the future based on RCM results show that mean temperature do and will increase over Hungary. This change is statistically significant for each period by the two models, which means that the rate of changes exceed the natural variability. The RCM results for mean temperature can be summarized as follows:

- Annual mean temperature change is about 1-2°C for 2021–2050 and 3-5°C by the end of the century over Hungary (**Table 1**), thus temperature will likely to increase successively during the 21st century (even though also cooler years and seasons will occur due to natural variability).
- By the mid-century, spring and winter mean temperature is likely to increase between 1°C and 2°C over Hungary in the next decades and approach 3°C by the end of century according to both simulations. Larger warming is projected in the eastern and southern parts of Hungary. The uncertainty in model outcomes is much higher in summer and autumn: according to one of the projections the warming is less than 1°C until near future, while the other model indicates 2-3°C increase (**Table 1**). Summer temperature rise in far future will be between 3°C and 5°C, or even higher, for instance in August it may exceed 6°C (**Fig. 1**).

**Table 1.** Annual and seasonal mean temperature changes (°C) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models.

	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
<b>2021–2050</b>	1.1–1.9	1.6	0.7–2.6	0.8–2.0	1.1–1.3
<b>2071–2100</b>	3.1–3.5	2.8–3.1	3.5–4.9	3.0–3.6	2.5–2.9

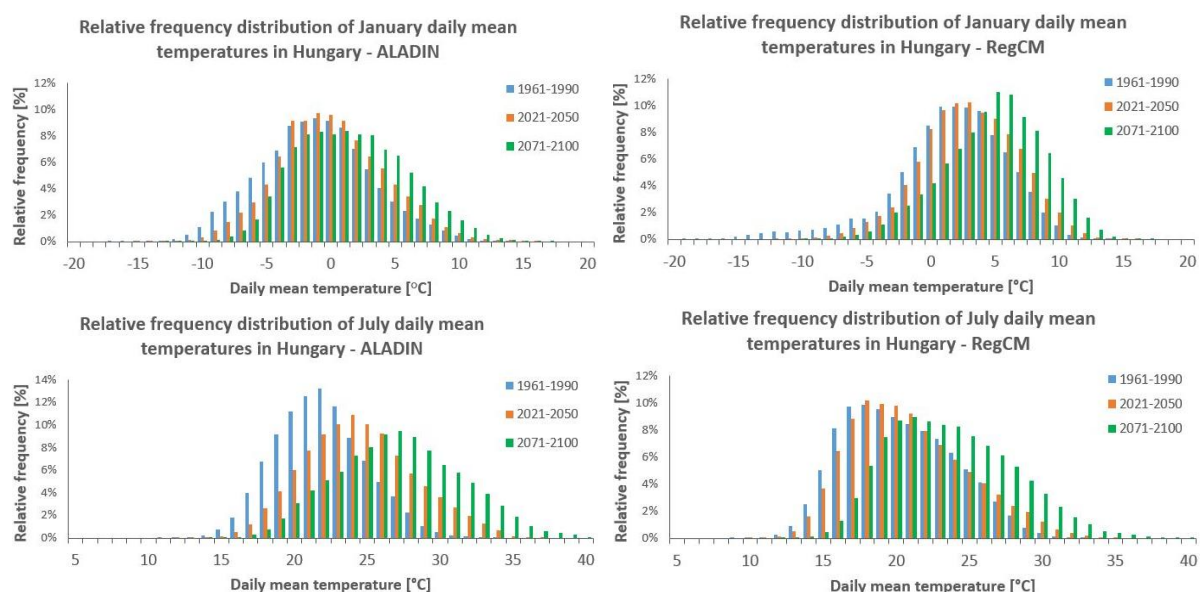


**Fig. 1.** Monthly mean temperature values (°C) over Hungary for 1961–1990 based on observations, for 2021–2050 and 2071–2100 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Future values are calculated as sum of observation values in the reference period and projected changes.

Monthly, seasonal and annual temperature tendencies naturally imply changes in the daily temperature values. Frequency distributions (**Fig. 2**), are investigated for two months: January and July are the coldest and the warmest months in Hungary. In addition, four temperature indices were also investigated: extremely cold day, frost day, summer day and hot day (**Table 2**). Their changes are given in days for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990. The intervals in **Table 2** mean the minimum and maximum changes averaged over Hungary based on the two RCMs. Main conclusions are as follows:

- A clear shift can be observed towards higher temperatures both in January and July (**Fig. 2**). In January, the occurrences of daily mean temperature values below 0°C clearly reduce while the ones belonging to temperatures above 4°C increase. At the end of the century, the most frequent daily temperature values will be above freezing point according to both projections. This shift is even more prominent in July, when daily mean values can grow with 5-6°C and the relative frequency of days with extremely high values is also strongly enhanced.
- As expected, the number of warm extremes, like summer days and hot days is projected to increase significantly, while cold extremes such as frost days and extremely cold days tend to become less frequent. However, the projected actual mean changes are somewhat different due to the fact that the RCMs reproduce differently the occurrences of the extremes in the reference period.
- While 66 summer days were observed in Hungary during 1961–1990, the projected increase will be 4-21 days until 2021–2050, and 28-40 days by the end of the century. In case of hot days, the expected change is 2-24 days for the near future, and 8-49 days for the far future (**Table 2**).

- At the same time, contrary to the warm extremes, a strong reduction is foreseen in the occurrence of cold indices: the number of frost days will likely decrease from 96 days with about one month, while the frequency of extremely cold days may be reduced by half at the end of the century (**Table 2**)



**Fig. 2.** Relative frequency of January (top) and July (bottom) daily mean temperature values (%) in gridpoints over Hungary for 1961–1990, 2021–2050 and 2071–2100 based on results of ALADIN-Climate (left) and RegCM (right) regional climate models.

**Table 2.** Mean annual change of temperature indices (day) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models.

Index	2021–2050	2071–2100
<b>Summer day:</b> daily maximum temperature > 25°C	4–21	28–40
<b>Hot day:</b> daily maximum temperature > 30°C	1.7–24	8–49
<b>Frost day:</b> daily minimum temperature < 0°C	(-23) – (-9)	(-41) – (-25)
<b>Extremely cold day:</b> daily minimum temperature < -10°C	(-5) – (-1.3)	(-7) – (-1.5)

Estimation of future precipitation change in the Carpathian Basin is extremely ambiguous, since it is located between northern and southern regions, where projections available in Europe indicate precipitation increase and decrease, respectively. Different models often project different sign of changes, what is more these changes are not even significant in every season and gridpoint. Precipitation has heavy fluctuation in space and time, therefore, changes are presented in relative form, compared to the model results for a past period, which was 1961–1990 in our case:

- During the 21st century, on annual average only small (below 10%) precipitation decrease is expected in Hungary (**Table 3**), however, on southwestern part of the country stronger, significant decrease may occur according to one of the RCMs.
- The seasonal variability is projected to slightly change mainly due to the clear drying tendency in summer as the highest mean precipitation was observed in this season in

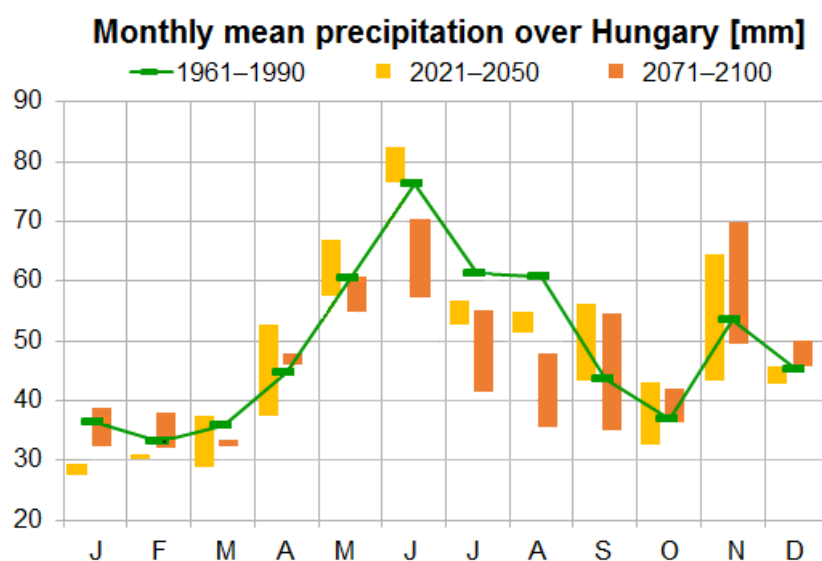


the reference period (**Fig. 3**). The degree of this change is below 5% in the near future, however, by 2071–2100 it will deepen largely, approximately 20% less precipitation may fall on average.

- Based on our model set, winter in the next decades is also clearly exposed to less precipitation with 10% that exceeds the summer changes. In the far future, the direction of changes is uncertain, since decrease turns into increase in one of the models.
- Regarding the transient seasons, only autumn precipitation change at the end of the century is obvious. Both models project considerable increase (on spatial average up to 10%). Based on observed climatology, there is a secondary maximum in November. This seems to be modified in the far-future: November amounts may approximate the June values, according to one of the models.

**Table 3.** Annual and seasonal mean precipitation changes (%) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Changes with same direction is highlighted with brown (decrease) and green (increase) colours.

	Annual	Spring	Summer	Autumn	Winter
<b>2021–2050</b>	(-7) – (-0.2)	(-10) – 3.4	(-5) – (-2.1)	(-3.8) – 14	-10
<b>2071–2100</b>	(-5) – (-2.3)	(-5) – 2.1	(-20) – (-18)	4.6 – 10	(-3.1) – 8



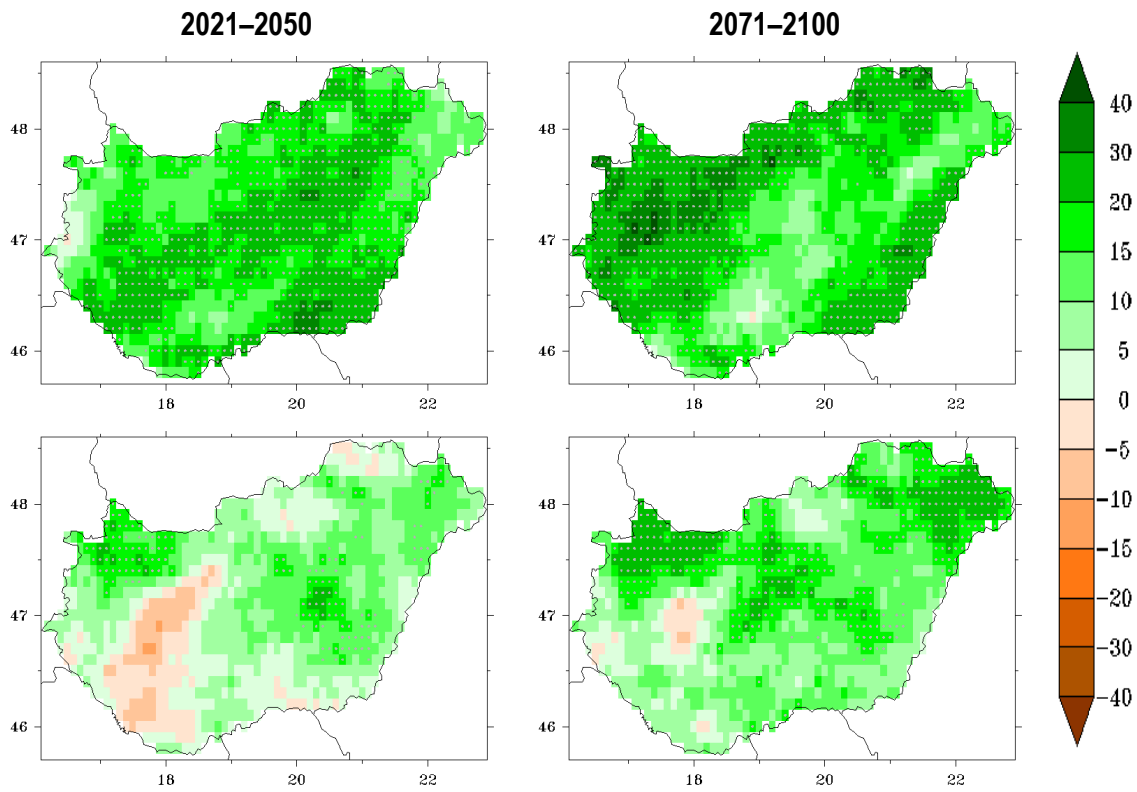
**Fig. 3.** Monthly mean precipitation amounts (mm) over Hungary for 1961–1990 based on observations, for 2021–2050 and 2071–2100 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Future values are calculated from observation reference values multiplied by projected changes.

Changes in daily precipitation are also investigated through derived climate indices. Some of them count the days when the daily amounts exceed a certain threshold (1 mm, 10 mm, 20 mm). Moreover, we also calculated the precipitation intensity i.e., the fraction of precipitation sum and days when precipitation is above 1 mm, and maximum length of dry spells, which is the longest precipitation-free period when the daily sum is less than 1 mm.

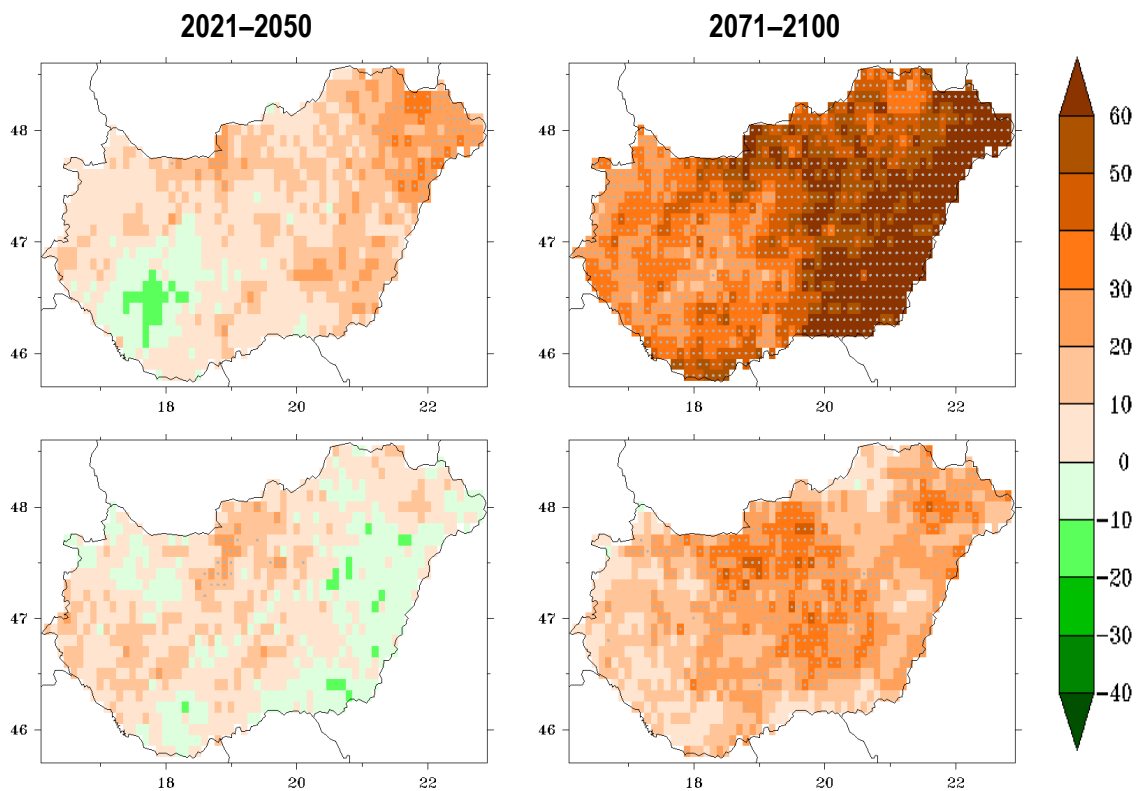
- In the 21st century, fewer days with precipitation are expected in every season, except for spring in 2021–2050, when the direction of changes is uncertain (**Table 4**). At the same time, one may face with more frequent heavy precipitation events by the end of the century, except for summer. The largest increase is projected in autumn and winter.
- Changes in precipitation intensity follow the abovementioned tendencies, however, since the winter precipitation increase is only small, it causes slight enhancement in intensity, as well. Not like autumn, when above 10% change is projected in the majority of gridpoints and is significant in greater extent, according to one of the models (**Fig. 4**). It has to be mentioned, that measurements of past decades revealed the largest precipitation intensity increase in summer, underlining the non-linear character of the climate system.
- In future, Hungary may be exposed to longer dry periods. The highest increase is projected in summer (**Fig. 5**) and autumn in 2071–2100; according to one of the models, summer changes are significant in every gridpoint and may exceed 60% in the Southeast.

**Table 4.** Mean seasonal changes of precipitation indices (%) over Hungary for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Changes with same direction is highlighted with brown (decrease) and green (increase) colours.

Index		2021–2050	2071–2100
<b>Precipitation day:</b> daily precipitation > 1 mm	spring	(-13) – 0.9	(-14) – (-6)
	summer	-8	(-25) – (-23)
	autumn	(-10) – (-0.8)	(-12) – (-9)
	winter	(-15) – (-11)	-7
<b>Heavy precipitation day:</b> daily precipitation > 10 mm	spring	(-6) – 4.9	3.6–4.9
	summer	(-6) – (-1)	(-19) – (-12)
	autumn	(-3) – 25	12–30
	winter	(-15) – (-3)	10–25
<b>Extremely heavy precipitation day:</b> daily precipitation > 20 mm	spring	9–11	37–38
	summer	14–19	(-0.3) – 2.1
	autumn	10–56	39–68
	winter	(-3.9) – (-1)	31–63
<b>Precipitation intensity:</b> precipitation / number of days with precipitation > 1 mm	spring	0.1–4.1	3.7–9
	summer	-3.4–7	(-8) – 8
	autumn	7– 18	12–20
	winter	(-1.1) – 4.5	5.4–13
<b>Maximum length of dry periods:</b> consecutive dry days with precipitation < 1mm	spring	(-16) – 14	1.9–14
	summer	3.7–9	19–47
	autumn	0.9–7	16–19
	winter	6.2–11	7.5–11



**Fig. 4.** Mean change of autumn precipitation intensity (%) for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Grey dots represent significant changes.



**Fig. 5.** Mean change in maximum length of summer dry periods (%) for 2021–2050 and 2071–2100 with respect to the reference period of 1961–1990 based on results of ALADIN-Climate and RegCM regional climate models. Grey dots represent significant changes.

The climate projection information available in NAGiS provides reasonable basis for objective impact assessments. Nevertheless, further developments are needed which are concisely summarized below:

1. Climate information of NAGiS provides appropriate input data for impact and vulnerability studies, e.g., on agriculture, ecology, tourism, human health, road accidents, Lake Balaton. However, the data cannot be applied in transboundary investigations, most critically in hydrological analyses. In addition, temporal and horizontal resolution of the model outputs are not sufficient for certain case studies. All that suggests that even though NAGiS is maintained by Geological and Geophysical Institute of Hungary and National Adaptation Centre (MFGI/NAK), **climate data provision for NAGiS should be official task of Hungarian Meteorological Service and its financial support has to be ensured by the Hungarian government.**
2. A 2-member ensemble provides moderate information about uncertainties of future climate projections in Hungary. However, **an optimal ensemble should consist of at least 8-10 RCM simulations chosen carefully. In order to establish an efficient and scientifically sound ensemble system, consultation is needed with climate modelling practitioners.**
3. Serious problem is that current users of NAGiS usually neglect one of the two available climate simulations. This single model (“deterministic”) approach is not correct, especially in climate studies, moreover, it is in contradiction with original objectives of NAGiS. **It is proposed to provide probabilistic information (besides, or optimally, instead of individual time series) for the users in order to orientate them towards taking the uncertainty into account and avoid the arbitrary selection among the model data.**
4. According to recent experiences, users cooperate only with colleagues at MFGI/NAK, but do not consult with climate modelling practitioners at all. Due to this fact, they are not aware of the proper way for application and interpretation of model data, consequently, they often utilize climate projection data in inappropriate way. **To overcome this problem, direct consultation and dialogue are desired between the impact community and climate modellers; furthermore, that should be required as precondition for using the data.**

## Irodalom

- Bartholy J., Horányi A., Krüzselyi I., Pieczka I., Pongrácz R., Szabó P., Szépszó G., Torma Cs., 2011: A várható éghajlatváltozás dinamikus modelleredmények alapján. In: Klímaváltozás – 2011: Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére, 170–234.
- Christensen, J.H., Carter, T.R., Rummukainen, M., Amanatidis, G., 2007: Evaluating the performance and utility of climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change* 81, 1–6.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* 81, 7–30.
- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- Giorgi, F., Bates, G., 1989: The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Monthly Weather Review* 117, 2325–2347.
- Hawkins, E., Sutton, R., 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of American Meteorological Society* 90, 1095–1107.
- Hawkins, E., Sutton, R., 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics* 37, 407–418.
- Horányi A., Szépszó G., Bartholy J., Pongrácz R., 2011: Az éghajlati modellek korlátai. In: Klímaváltozás – 2011: Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére, 85–91.
- IPCC AR4 WGI, 2007: *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L.). Cambridge University Press, Cambridge, Egyesült Királyság, 946 pp.
- 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 pp.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsman, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2013: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, Springer Berlin Heidelberg, 1–16.
- Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., 2011: The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX. An international downscaling link to CMIP5. *CLIVAR Exchanges* 56, 16 (2), 34–40.
- Knutti, R., Sedlacek, J., 2013: Robustness and uncertainties in the new CMIP5 coordinated climate model projections. *Nature Climate Change* 3, 369–373.
- Lakatos M., Bihari Z., 2011: A közelmúlt megfigyelt hőmérsékleti és csapadéktendenciái. In: Klímaváltozás – 2011: Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére, 146–169.
- 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.

- Láng I., Csete L., Jolánkai M., 2007: A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok – A VAHAHA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 220 pp.
- Meehl, G. A. et al., 2007: The WCRP CMIP3 multimodel dataset – A new era in climate change research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 88, 1383–1394.
- Meinshausen, M. et al., 2011: The RCP Greenhouse Gas Concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109, 213–241.
- Mitchell, T.D., Carter, T.R., Jones, Ph.D., Hulme, M., New, M., 2004: A comprehensive set of climate scenarios for Europe and the globe. Tyndall Centre Working Paper 55.
- 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, USA.
- NÉS, 2008: Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia, 2008–2025. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest, 114 pp.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Miklós, E., 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 9, 387–398.
- Riddaway, B., 2014: Copernicus Climate Change and Atmosphere Monitoring Services. ECMWF Newsletter 141, p. 2.
- 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 pp.
- Szépszó G., 2015: A sugárzási kényszer változásán alapuló új éghajlati scenáriók a Kárpát-medence térségére. Az RCMTÉR projekt tájékoztató kiadványa, pp. 5.
- Szépszó, G., Lingemann, I., Klein, B., Kovács, M., 2014: Impact of climate change on hydrological conditions of Rhine and Upper Danube rivers based on the results of regional climate and hydrological models. *Natural Hazards* 72, 1, 241–262. DOI: 10.1007/s11069-013-0987-1.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012: A Summary of the CMIP5 Experiment Design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498.
- Torma Cs., 2011: Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 125 pp.
- 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. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 84–100. DOI: 10.1175/2010JHM1234.1.
- van der Linden, P., J.F.B. Mitchell (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
- Zsebeházi G., 2013: A XXI. század során Magyarországon várható éghajlatváltozás jellemzése a hazai és ENSEMBLES-beli ALADIN és REMO regionális éghajlati modellfuttatások eredményei alapján. MSc diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 87 pp.