

**Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék**

**A KÁRPÁT-MEDENCÉRE VÁRHATÓ
KLÍMAVÁLTOZÁS A XXI. SZÁZAD SORÁN
ENSEMBLES SZIMULÁCIÓK ALAPJÁN**



Készítette: Miklós Erika

ELTE TTK Meteorológus MSc, II. évfolyam

Témavezetők:

Dr. habil. Bartholy Judit

Dr. Pongrácz Rita

Budapest, 2011.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Adatok.....	5
2.1. A vizsgált paraméterek és az ENSEMBLES projekt ismertetése	5
2.2. Az E-OBS adatbázis bemutatása	10
3. Validáció.....	11
4. A várható változások elemzése.....	18
4.1. A Magyarországra várható változások időbeli eloszlása	18
4.2. A várható változások térbeli eloszlása	23
5. A minimum-és maximumhőmérséklet várható változásának elemzése	35
6. Az RCA és a RACMO modell becslésének összehasonlítása különböző meghajtó feltételek esetén.....	40
7. Következtetések	46
Irodalomjegyzék	48
Köszönetnyilvánítás.....	50

1. Bevezetés

A XXI. század egyik talán legégetőbb problémája a klímaváltozás. A hőmérséklet várható emelkedése, a globális cirkuláció megváltozása, az extrém időjárási események gyakoriságának megnövekedése mind-mind olyan események, melyekre fel kell készülnie az emberiségnek. A valószínűsíthető változásokat a legjobb tudásunk szerint kell becsülnünk annak érdekében, hogy mérsékelni tudjuk őket vagy legalábbis felkészülhessünk rájuk.

Az éghajlatváltozás kutatása során globális (az egész Földre kiterjedő) és regionális modelleket használnak, hogy ne csak a klímaváltozás átlagos mértékéről, de a területi eloszlásáról is minél pontosabb becslést kaphassunk. Sajnos a Kárpát-medencében jellemző éghajlati viszonyok vizsgálatához a globális klímamodellek (GCM-ek) nem elég finom felbontásúak, így a térségen belül várható változások értékeléséhez közvetlenül nem alkalmazhatók. A regionális skálájú éghajlatváltozások széles körben elterjedt eszközei a regionális klímamodellek (RCM-ek), melyek finomabb térbeli felbontással rendelkeznek a GCM-ekhez viszonyítva, s így kisebb térségek elemzésekor is kielégítő szimulációkkal szolgálnak. A rohamos számítástechnikai fejlődésnek köszönhetően a regionális modellek mára már akár az 5-10 km-es horizontális felbontást is elérhetik (pl.: Torma et al., 2008), ami azt jelenti, hogy például egy Magyarország által lefedett területet megfelelő módon lehet velük vizsgálni.

A klímaváltozás elemzésének szempontjából lényeges a modellek folyamatos fejlesztése, javítása. Az Európai Unió 2001 óta több, az egész kontinenst átfogó programot is finanszírozott, melyek a klímaváltozás várható mértékét becsülték (PRUDENCE, MICE, STARDEX, ENSEMBLES). A különböző projektek keretein belül a résztvevő intézmények az A2, B2, illetve A1B scenáriókra végezték a klímamodellezést. A különböző forgatókönyvek szerepe abban rejlik, hogy mivel egyre nagyobb bizonyossággal állíthatjuk, hogy az antropogén források nagyban befolyásolják a klímát, ezért figyelembe kell vennünk az antropogén gázok légköri koncentrációjának valószínűsíthető tendenciáit. A becsült népesség változások, energiaigények és források alapján várható üvegházgáz koncentrációváltozástól függően jelenleg 4 alap forgatókönyvet alkalmaznak, melyek több esetet írnak le.

Az A2 forgatókönyv az emberiség számának lassú, de állandó növekedésével számol, a világ sokféleségének megmaradását és a helyi értékek megőrzését feltételezi. A

gazdasági fejlődés és a technikai változások várhatóan mindenhol érvényesülnek, de a különböző scenáriók közül ez esetben a leglassabban (Nakicenovic és Swart, 2000). Az A1B forgatókönyv az A1 scenáriónak az alsóportja, mely a felhasznált források közti egyensúlyra épülést feltételez. Ez azt jelenti, hogy nem támaszkodik egy kizárólagos energiaforrásra, továbbá minden energiaszolgáltató, illetve végfelhasználói technológia hasonló ütemű fejlődését feltételezi. 2100-ra a forgatókönyv szerint várhatóan 717 ppm lesz a szén-dioxid koncentráció a légkörben, ami a scenáriók közül egy közepes becslésnek tekinthető. A B2 forgatókönyv a társadalmi és környezeti problémák regionális és helyi megoldását helyezi előtérbe. A Föld népességének folyamatos, az A2 scenáriónál lassabb tempójú növekedését feltételezi. A gazdasági növekedés közepes gyorsasággal zajlik, a technológiai változások visszafogottabbak, de szerteágzóbbak, mint a másik három alapscenárió esetében (Nakicenovic és Swart, 2000). Ez az egyik legoptimistább forgatókönyv, mert a 2100-ra előrejelzett várható szén-dioxid koncentráció alig haladja meg a 600 ppm-et, míg az A2 scenárió esetében ugyanez például 850 ppm.

A különböző projektek szimulációinak feldolgozása már az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén és az Országos Meteorológiai Szolgálatnál is több éve zajlik. A PRUDENCE (Predicting of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risk and Effects, 2001-2004, <http://prudence.dmi.dk>) projekt keretében végzett szimulációk Kárpát-medencére vonatkozó elemzése már megtörtént a csapadékösszegekre és az átlaghőmérsékletre is (Szabó, 2007; Bartholy et al., 2007a, 2007b, 2007c, 2008a, 2008b).

E dolgozat témája az ENSEMBLES (van der Linden és Mitchell, 2009) projekt modell outputjainak vizsgálata, melyhez az átlag-, a minimum-, a maximum hőmérsékletet és a havi csapadékösszeget tartalmazó, másfél évszázadot felölelő szimulált mezősorok álltak rendelkezésre. A dolgozatban először az ENSEMBLES projektet mutatjuk be, majd a validációs vizsgálatok eredményeiről számolunk be. A három hőmérsékleti paraméter és a csapadék várható változásának elemzése, majd két kiemelt RCM különböző GCM meghajtásban végzett eredményeinek összehasonlítása után, a 7. fejezetben a legfontosabb következtetéseinket összegezzük.

2. Az adatok

Az összes meteorológiai paraméter közül, melyek várható változását modellekkel szimuláljuk talán a legérdekesebb és a közönség számára legfontosabb, a hőmérséklet és a csapadék változása. Ezen két paraméter már önmagában annyi mindent befolyásol (egészségügy, mezőgazdaság, hidrológiai ciklus, közlekedés), hogy nem meglepő, miért is ezek vizsgálatával kezdik meg egy nagyobb projekt modellfuttatásainak elemzését.

Kutatásaink során a Kárpát-medence, és azon belül Magyarország területére végeztük elemzéseinket az átlag,- maximum,- minimumhőmérséklet és a csapadékösszeg havi várható változására vonatkozóan a XXI. század végére, melyhez az ENSEMBLES projekt A1B scenáriót figyelembevevő szimulációit használtuk fel.

A szimulált adatokat vizsgáltuk egyrészt három 30 éves éghajlati normál időszakra, valamint ezen kívül egységesen a teljes 150 éves szimulációs idősorra is. A kiválasztott időszakok a következők voltak: 2021-2050, 2071-2100, és referencia időszakként 1961-1990. A különböző időszakokra vonatkozó adatsorokat összehasonlítottuk egyrészt havi, másrészt évszakos és éves bontásban. Elemzéseinkben a paraméterek várható változását vizsgáltuk. A validáció során az ERA40-reanalízis adatbázissal (Uppala et al., 2005) meghajtott RCM-ek eredményeit hasonlítottuk össze az E-OBS adatbázisból (Haylock et al., 2008) kapott eredményekkel. Vizsgálatainkat kiegészítettük évszakos trendelemzéssel.

A következő alfejezetekben áttekintjük az ENSEMBLES projektre és az E-OBS adatbázisra vonatkozó legfontosabb információkat.

2.1. Az ENSEMBLES projekt

Az ENSEMBLES projekt az Európai Unió 6. Keretprogramjának támogatásával valósult meg 2004 és 2009 közt. A projektet Paul van der Linden és John Mitchell, a Climate Science és a brit Met Office igazgatója vezette. A kutatásokban 20 ország 66 intézménye vett részt. A résztvevők főként az európai országok közül kerültek ki, de néhány tengerentúli partner is csatlakozott az átfogó kutatáshoz. Ezen kívül még további 30, nagyrészt európai szervezet is csatlakozott a projekthez, de ezek saját forrásból finanszírozott kutatások voltak, melyek nem jártak szerződésben rögzített kötelezettségekkel.

Nagyság, időtartam és költségvetés szempontjából is az ENSEMBLES az egyik legnagyobb klímaváltozást kutató projekt (a teljes elköltött összeg mintegy 22,8 millió euró). A projekt szoros együttműködést alakított ki több klímaváltozással foglalkozó testülettel, pl. a CMIP (Coupled Model Intercomparison Project, Csatolt modellek összehasonlításával foglalkozó projekt), a NARCCAP (North American Regional Climate Change Assessment Program, Észak-amerikai regionális klímaváltozást összegző program), a WCRP (World Climate Research Programme, Éghajlati Kutatások Világprogramja), a BALTEX (Baltic Sea Experiment, Balti-tengeri kutatás), a C4MIP (Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project, Csatolt szén-ciklussal működő klímamodellek összehasonlítását végző projekt), a CFMIP (Cloud Feedback Model Intercomparison Project, Felhő-visszacsatolást tartalmazó modellek összehasonlító projektje), valamint az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Éghajlatváltozási Kormányközi Testület) programjaival. Az ENSEMBLE szorosan kötődik az Európai Unió előzőleg támogatott projektjeihez is, egyrészt a résztvevők átfedése, másrészt a kutatási téma hasonlósága miatt. Ilyenek például a PRUDENCE, a STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European Regions, Az extrémumok statisztikus és regionális dinamikus leskalázása Európa területére, 2002-2005, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex>), a MICE (Modelling the Impact of Climate Extremes, Az éghajlati extrémumok hatásának modellezése, 2002-2004, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mice>) és a DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to interannual prediction, Az Európai ensemble modell rendszer fejlesztése éves éghajlati előrejelzéshez, <http://www.ecmwf.int/research/demeter>)).

Az ENSEMBLES projekt céljai a következők voltak:

- Kialakítani a tudomány jelenlegi állása szerinti legjobb, a klímaváltozás becslésére is alkalmas hosszútávú prognózis-rendszert;
- Nagy felbontású, jó minőségű globális és regionális klímamodellek felhasználása Európa térségére. A kapott nagy felbontású rácshálózati adatok lehetőséget adnak arra, hogy segítségükkel előállítsanak egy objektív valószínűségi becslést az elkövetkező klíma bizonytalanságáról évszakos, évtizedes vagy még hosszabb időskálára;
- Meghatározni és csökkenteni a bizonytalanságokat a földi éghajlati rendszerben fellépő fizikai; kémiai; biológiai és antropogén visszacsatolások

bemutatásával (beleértve a vízkészletet, a földhasználatot, a levegőminőséget és a szénkörforgalomra jellemző visszacsatolásokat);

- Maximálisan kihasználni az eredményeket azáltal, hogy összekapcsoljuk az ENSEMBLES projekt kimenő adatait más felhasználási területekkel, pl. a mezőgazdálkodással, az egészségüggyel, az élelmiszerbiztonsággal, a vízkészlet- gazdálkodással, valamint a biztosítási szektorral.

Az ENSEMBLES projektben alkalmazott együttes szimulációk rendszere lehetőséget ad arra, hogy pontosabb képet kapjunk a regionális éghajlat valószínűsíthető változásáról. A modellfuttatások (1. táblázat) elsődleges célja az A1B scenárió vizsgálata volt az 1951-2100 időszakra. E szerint a forgatókönyv szerint a XXI. század végére becsült CO₂ koncentráció 717 ppm (Nakicenovic és Swart, 2000). A modellek validációjához az ERA40 adatbázist használták kezdeti- és peremfeltételnek az 1958-2001 közötti időszakra.

A vizsgálat során 11 regionális modellfuttatást elemeztünk (ezeket csillaggal megjelöltük az 1. táblázatban), melyekhez a meghajtó kezdeti- és peremfeltételeket 3 különböző globális modell szolgáltatta: a brit Hadley Központ (HadCM, Gordon et al., 2000), a német Max-Planck Intézet (ECHAM, Roeckner et al., 2006; Rowell, 2005) és a francia Météo-France modellje (ARPEGE, Déqué et al., 1998). A HadCM meghajtású modellek közül négyet választottunk ki: a svéd SMHI intézet által futtatott RCA szimulációkat, az ír C4I által futtatott RCA3 szimulációkat, a svájci ETHZ intézet által futtatott CLM szimulációkat, s a brit Hadley Központ által futtatott HadRM3Q szimulációkat. Az ECHAM meghajtású modellek közül ötöt vizsgáltunk: a dán DMI intézet által futtatott HIRHAM szimulációkat, a német Max Planck Intézet által futtatott REMO szimulációkat, a svéd SMHI intézet által futtatott RCA szimulációkat, valamint a holland KNMI intézet által futtatott RACMO szimulációkat. Végül az ARPEGE meghajtású modellek közül kettőt értékeltünk: a francia CNRM intézet által futtatott ALADIN szimulációkat és a Dán Meteorológiai Intézet által futtatott HIRHAM szimulációkat.

A Max Planck Intézet éghajlati vizsgálatokra kifejlesztett globális modellje az ECHAM5 légköri modell (Roeckner et al., 2006), mely eredetileg az ECMWF (Európai Középtávú Előrejelző Központ, Simmons et al., 1989) modelljéből fejlődött tovább, a jelenleg alkalmazott már az ötödik verziója. Nevét az összetevői adják, 'EC' az ECMWF-ből, a 'HAM' pedig Hamburgból, ahol a Max Plank Intézet székhelye van. A modellnek alapbeállításban 19 vagy 31 vertikális szintje van melyek a felszíntől, 10 hPa-ig terjednek, mivel először kizárólag a troposzféra vizsgálatára tervezték (Roeckner et al., 2003). A légkör nagyobb részének vizsgálatára azonban kifejlesztettek egy olyan verziót is, mely már 39 vagy 90 vertikális szintet is tartalmaz és ezek a 0,01 hPa nyomási szint magasságáig nyúlnak fel. A modell horizontális felbontása 100 km.

Az ARPEGE modellt mind a Météo-France-ban, mind az ECMWF-nél használják (Yessad, 2010). Ennek a spektrális globális modellnek változó a horizontális felbontása: változik a Földközi-tenger térségében 60 km, a Csendes-óceán déli részén viszont sokkal kevésbé részletes 700 km (Déqué et al., 1998). Kifejlesztésekor az antropogén klímaváltozás és az évszakos előrejelzés tanulmányozását tűzték ki célul. A modell 31 vertikális szintet különböztet meg a Föld felszínétől 80 km magasságig. A felső 20 szinten állandó a nyomás, és mivel ezek a szintek 200 hPa fölött találhatók, ebből adódóan a sztratoszféra pontos leírását biztosítják. A modell egyik nagy előnye, a változó horizontális felbontásból ered; a célterület közelében sokkal finomabb felbontás állítható be.

A brit Hadley Központ globális modelljének a legújabb változata a HadCM3 (Gordon et al., 2000), mely egy továbbfejlesztett légköri és óceáni elemből áll össze. Az IPCC 2001-ben megjelent Harmadik Helyzetértékelő jelentésében nagyrészt ennek a modellnek az eredményeit használták fel. Az óceáni komponens horizontális felbontása $1,25^\circ \times 1,25^\circ$, a légköri komponensé pedig $2,5^\circ \times 3,75^\circ$ (ez körülbelül 300 km-nek felel meg). A modell nem igényel külön felpörgési időt, mivel 400 év időtartamú szimuláció áll rendelkezésre, melynek kezdetén a kiindulási mezőket mérések alapján adhatjuk meg. A HadCM3 légköri rész 19 vertikális szintet alkalmaz és 30 perces az időlépcsőt, az óceáni részben pedig további 20 vertikális szint van és az időlépcső 1 óra. A légköri és óceáni almodell összekapcsolása 1 napos intervallumokkal történik. A modell különlegessége abban rejlik, hogy más modellekkel ellentétben eddigiekkel ellentétben nincs szükség fluxuskorrekciókra a megfelelően pontos szimulációs eredményekhez.

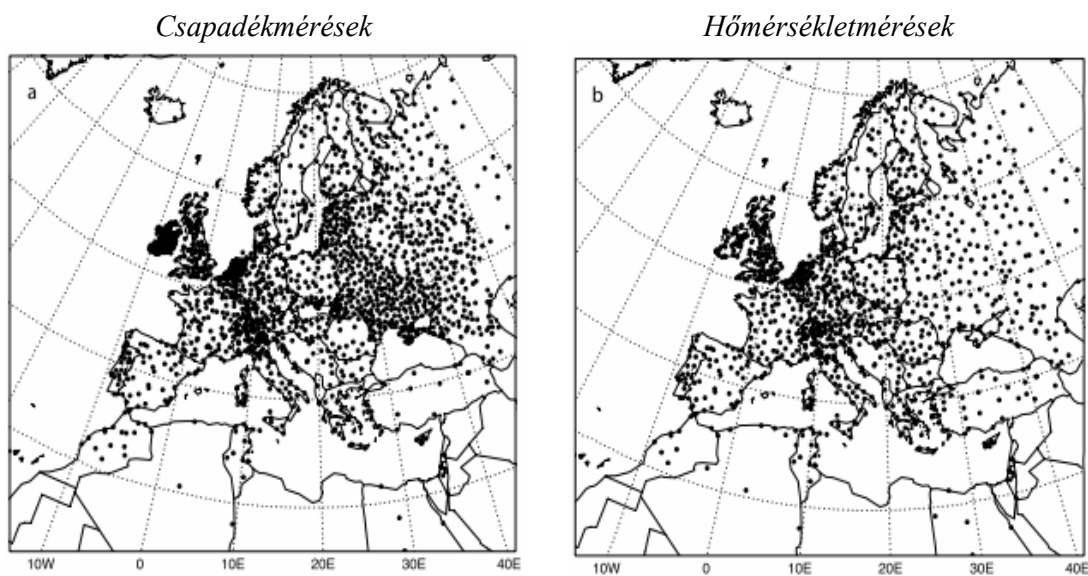
1. táblázat: Az ENSEMBLES projektben résztvevő intézetek és a modellek, a felhasznált GCM és felbontás szerint feltüntetve (* jel szerepel a dolgozatban vizsgált modellek sorában)

Intézmény/ Felelős kutató	Szenárió	Meghajtó GCM	Regionális modell	Horizontális felbontás	
C4I Ray McGrath	A2	ECHAM5	RCA3	25km	
CNRM Michel Déqué	A1B A1B	ARPEGE ARPEGE_RM5.1	Aladin Aladin	25km 25km	*
KNMI Erik van Meijgaard	A1B A1B A1B A1B A1B	ECHAM5-r3 ECHAM5-r1 ECHAM5-r2 ECHAM5-r3 MIROC	RACMO RACMO RACMO RACMO RACMO	25km 50km 50km 50km 50km	*
OURANOS Dominique Paquin	A1B	CGCM3	CRCM	25km	
SMHI Erik Kjellström	A1B A1B A1B A1B	ECHAM5-r3 BCM ECHAM5-r3 HadCM3Q3	RCA RCA RCA RCA	50km 25km 25km 25km	*
MPI Daniela Jacob	A1B	ECHAM5-r3	REMO	25km	*
METNO Jan Erik Haugen	A1B A1B	BCM HadCM3Q0	HIRHAM HIRHAM	25km 25km	
C4I Ray McGrath	A1B	HadCM3Q16	RCA3	25km	*
UCLM Manuel de Castro	A1B	HadCM3Q0	PROMES	25km	
ETHZ Christoph Schär	A1B	HadCM3Q0	CLM	25km	*
HC Erasmus Buonomo	A1B A1B A1B A1B A1B A1B	HadCM3Q0 HadCM3Q3 HadCM3Q16 HadCM3Q16 HadCM3Q16 HadCM3Q16	HadRM3Q0 HadRM3Q3 HadRM3Q16 HadCM3Q0 HadCM3Q3 HadCM3Q16	25km 25km 25km 3,75x2,5° 3,75x2,5° 3,75x2,5°	*
DMI Ole B. Christensen	A1B A1B A1B	ARPEGE ECHAM5-r3 BCM	HIRHAM HIRHAM5 HIRHAM5	25km 25km 25km	*
ICTP Filippo Giorgi	A1B	ECHAM5-r3	RegCM	25km	*
VMGO Igor Shkolnik	A1B	HadCM3Q0	RRCM	25km	
GKSS Burkhardt Rockel	A1B	IPSL	CLM	25km	

2.2. Az E-OBS adatbázis

Minden éghajlati vizsgálat előfeltétele a minél pontosabb mérési adatokból előállított referencia adatbázis. Az ENSEMBLES projekt keretein belül létrehoztak egy egyedi térbeli kiterjedésű adatsort, az ún. E-OBS adatbázist (Haylock et al., 2008). Az E-OBS közreadása rendkívül nagy jelentőségű, mivel egyrészt minden korábbi adatbázisnál több európai mérést használ fel térben (1. ábra) és időben egyaránt; másrészt napi felbontásban tartalmaz hőmérséklet- és csapadék-megfigyeléseken alapuló, 25 km-es horizontális felbontású rácshálózatra interpolált idősorokat az 1950-2009 időszakra.

Az adatbázis előállítása három fő lépésen keresztül történt. Először a havi csapadékösszegeket és a havi hőmérsékleti középértékeket interpolálták, majd a napi anomáliákat krigeléssel (optimális interpolációval) határozták meg, s ezután egyesítették az így kapott becsléseket. Haylock et al. (2008) kimutatták, hogy az eredmény bizonytalansága nagyban függ az évszaktól és attól, hogy az adott területen hány megfigyelés állt rendelkezésre.



1. ábra: Az összes felhasznált mérőállomás a csapadék (bal oldalon) és a hőmérséklet (jobb oldalon) esetén

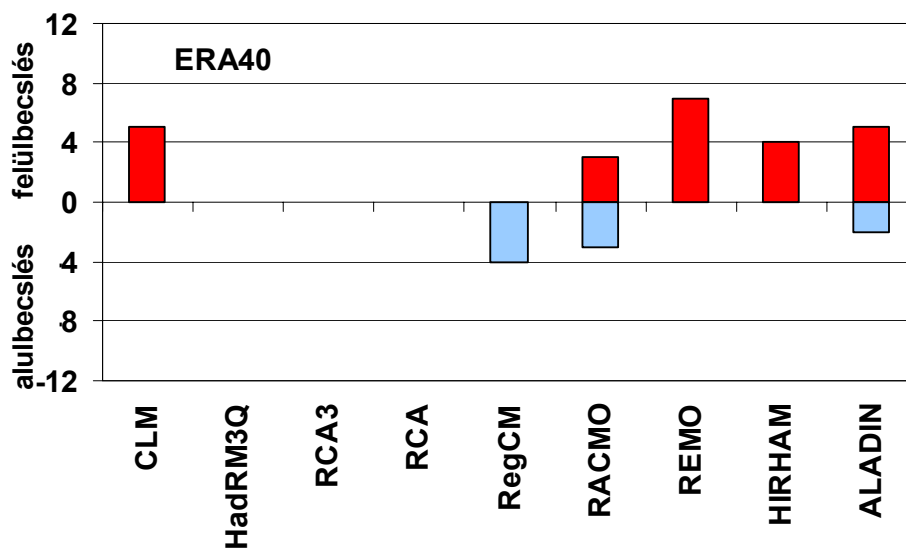
3. Validáció

A klímamodellek validációja során a vizsgált modellt a múltra futtatjuk, és az eredményeket összevetjük egy referencia adatbázissal. Vizsgálatunkban mind az ERA40-reanalízis, mind a GCM-ek által adott kezdeti,- és peremfeltételekkel futtatott RCM-szimulációkat összehasonlítottuk az 1961-1990 közötti E-OBS adatokkal. Az 2.-7. ábrán látható diagramok az E-OBS adatbázistól való szignifikáns különbségeket összegzik modellenként. A diagramok azt mutatják, hogy az egyes modellszimulációk hány hónapban becslik szignifikánsan fölé vagy alá a referencia adatbázisból származtatott havi átlagértékeket. Szignifikancia vizsgálatként a Welch-próbát alkalmaztuk és a 95%-os hibahatárt vettük figyelembe. A hőmérséklet esetében az 1 °C-nál nagyobb, míg a csapadékösszeg esetében a 10 mm-nél nagyobb hibákat vizsgáltuk meg. Mind a négy változóra (Tátlag, Tmax, Tmin, P) megnéztük külön-külön, hogy mekkora a magyarországi rácspontra vonatkozó átlagos hiba az ERA40 által hajtott és a globális modell által hajtott RCM-szimulációk esetén.

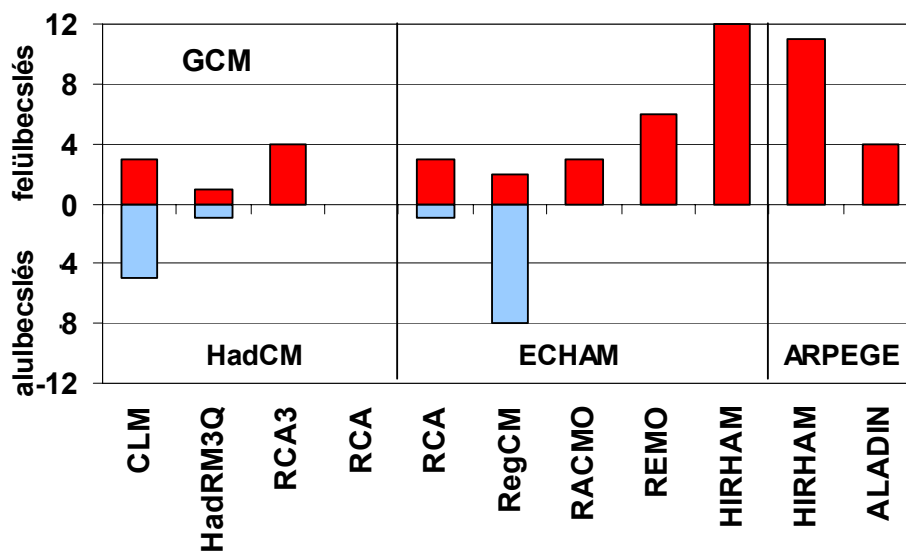
A 2. és a 3. ábra a havi átlaghőmérséklet két szimulációjának szignifikáns hibáit szemlélteti. Az ERA40 által meghajtott kilenc regionális modelltől (2. ábra) öt mutat szignifikáns felülbecslést 3-7 hónapban. Három modell (a HadRM3Q, az RCA3 és az RCA) pontosnak bizonyult a vizsgálat során, míg a legnagyobb hőmérsékleti hibákat a REMO modell adta. Kis mértékben ugyan (2-4 hónap), de három modell esetében alulbecslést is tapasztalhatunk. Abban az esetben, amikor az ERA40 hajtja meg a regionális modellt, elsősorban a regionális modellek saját hibáit figyelhetjük meg. Amikor a GCM hajtja meg az RCM-et, akkor viszont nem csak kizárólag az RCM becslési hibáit érzékelhetjük, hanem a globális és regionális modellpár együttes hibáit. Az átlaghőmérséklet esetében összességében a REMO és az ALADIN modell terhelte a legnagyobb hibával.

A GCM meghajtású RCM-ek (3. ábra) vizsgálatánál azt látjuk, hogy a HadCM meghajtású RCA modelltől eltekintve mindegyik modell több hónapban is szignifikáns hibát eredményezett. A 2. ábrához hasonlóan itt is a fölébecslések száma nagyobb. Alulbecslés 4 modell esetében fordul elő, leginkább az ECHAM meghajtású RegCM modell esetében, ekkor 8 hónapra terjedt ki a szignifikáns alulbecslés. A legnagyobb hibákat a HIRHAM modell nyújtotta, ami akár az ECHAM-, akár az ARPEGE globális modell által meghajtott esetben szinte egész évben felülbecsül. Láthatjuk, hogy mivel itt

már megjelenik a GCM hibája is, így összességében több hónapban tapasztalhatunk szignifikáns hibát, mint az ERA40 meghajtású RCM-ek esetében.



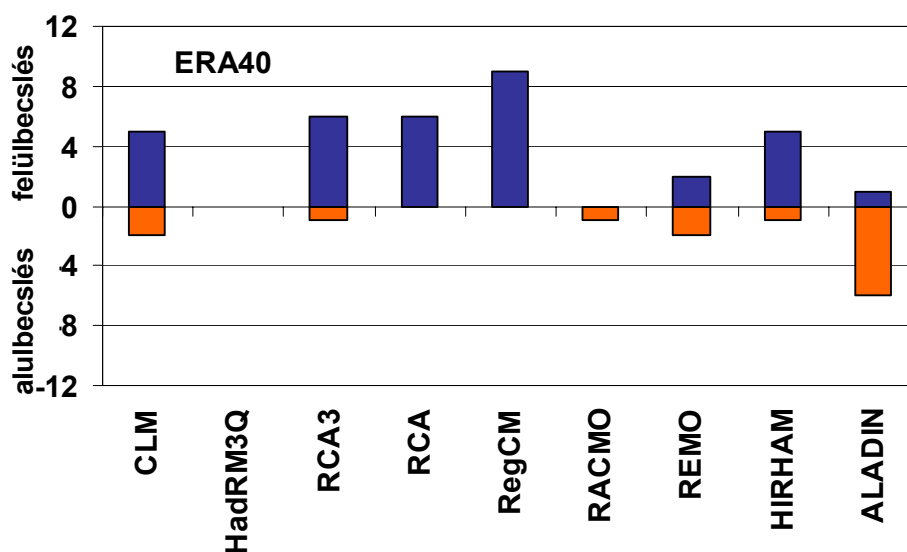
2. ábra: Az ERA40 által hajtott regionális modellek szimulációinak havi átlaghőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990



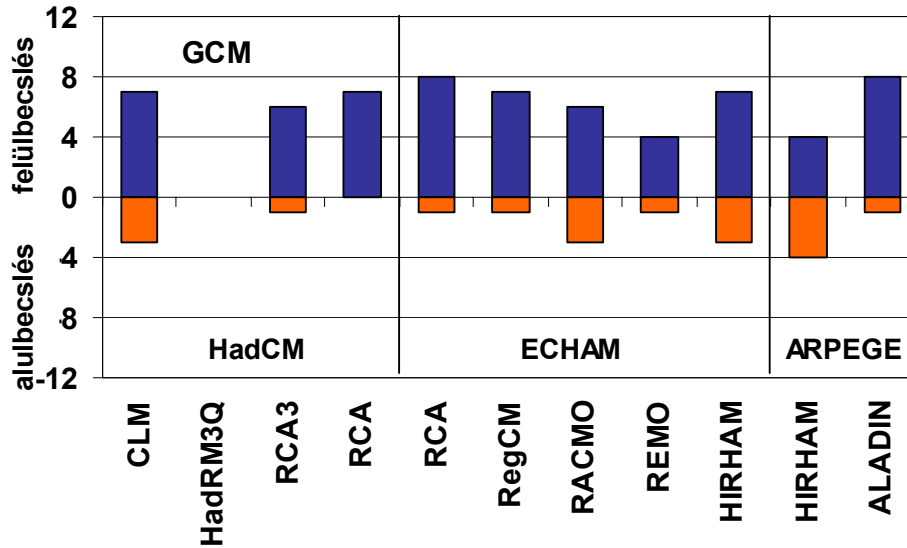
3. ábra: A globális modellek által hajtott regionális modellek szimulációinak havi átlaghőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

A 4. és az 5. ábra a havi csapadékösszegek validációs vizsgálatának eredményét szemlélteti. Az ERA40 által hajtott regionális modellek (4. ábra) esetén főként felülbecslések fordultak elő. A legnagyobb hibákat az RCA3, az RCA és a RegCM regionális modellje adta, ezek 6-9 hónapban becsülték felül az E-OBS adatbázis nyújtotta értékeket. Szignifikáns alulbecslés csak kis mértékben fordul elő, kivéve az ALADIN modellt, mely 6 hónapban becsülte alá az adatbázist. A hőmérsékleti vizsgálat eredményeivel összevetve azt látjuk, hogy azok a modellek, melyek ott a legpontosabbnak bizonyultak (RCA3, RCA), adják a csapadékösszeg esetén a legnagyobb hibát.

A globális modellek által meghajtott RCM-ek esetén (5. ábra) szintén a felülbecslés dominál. Habár még mindig csak pár hónapban fordul elő alulbecslés, de majdnem minden modellnél találunk rá példát. A felülbecslés gyakorisága átlagosan 6-7 hónap között mozog. Az egyetlen modell, amely nem ad hibát az a HadCM meghajtású HadRM3Q. A legtöbb szignifikáns alulbecslést az ARPEGE hajtotta HIRHAM modell (4 hónapban), míg a legtöbb felülbecslést az ECHAM hajtotta RCA és az ARPEGE hajtotta ALADIN modell (8 hónapban) mutatja.



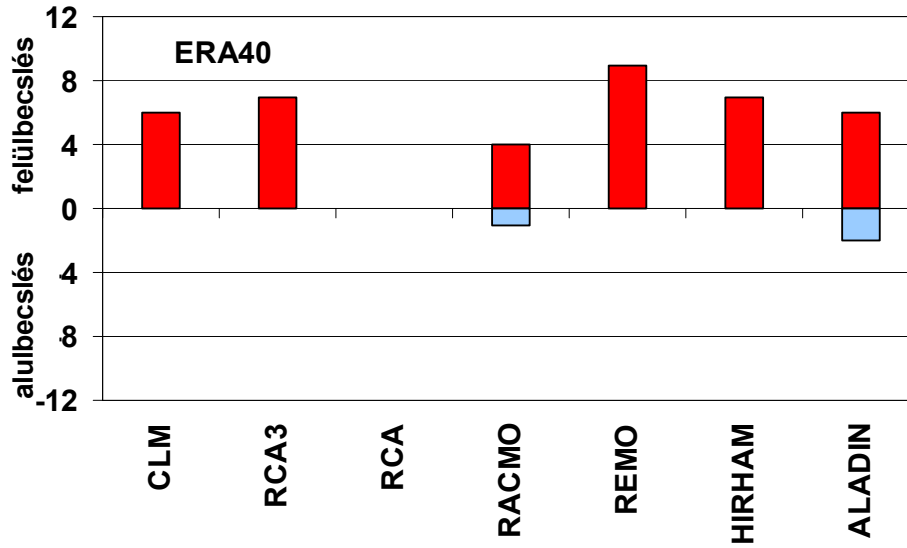
4. ábra: Az ERA40 által hajtott regionális modellek szimulációinak havi csapadékösszeg összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990



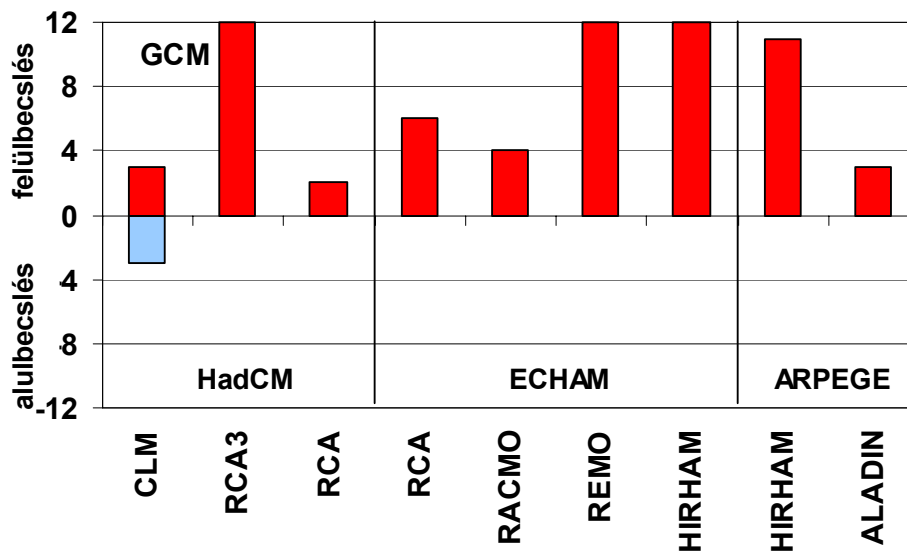
5. ábra: A globális modellek által hajtott regionális modellek szimulációinak havi csapadékösszeg összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

A 6. ábrán a minimumhőmérséklet validációs vizsgálatának eredményeit láthatjuk. Az ERA40 által hajtott modellek esetében alulbecslés csak két regionális modell esetében jelenik meg, de a hiba ekkor is csak 3 hónapban szignifikáns. A felülbecslések száma már számottevőbb, az RCA modell kivételével mindegyik esetben tapasztalhatjuk. Szignifikáns eltérések az E-OBS adatbázistól 4-8 hónapban fordulnak elő a különböző RCM-ek esetén. A legnagyobb hibát a REMO modell mutatja. Ezt az eredményt kaptuk a havi átlaghőmérsékleti adatokra is, tehát láthatjuk, hogy mivel a különböző hőmérsékleti változókat hasonlóan becslik a regionális modellek, a hibák is hasonlóak.

A GCM meghajtott esetben (7. ábra) alulbecslést ismét csak egy modellenél tapasztalunk (CLM) szignifikánsan 3 hónapon át. A felülbecslések ez esetben már minden modellenél megjelennek, habár a HadCM által hajtott RCA modell esetén nagyon kis mértékben (2 hónap). Az RCA3, a REMO és a HIRHAM modell az év minden hónapjában felülbecsli az E-OBS adatbázist. A REMO modellt nézve észrevehetjük, hogy az ERA40-nel meghajtván az év jelentős részében a mérésekhez képest szignifikánsan melegebb klímát becsül Magyarországra, de amikor a globális modell hibája is hozzáadódik az RCM-éhez, az év teljes egészében jellemző a jelentős felülbecslés.



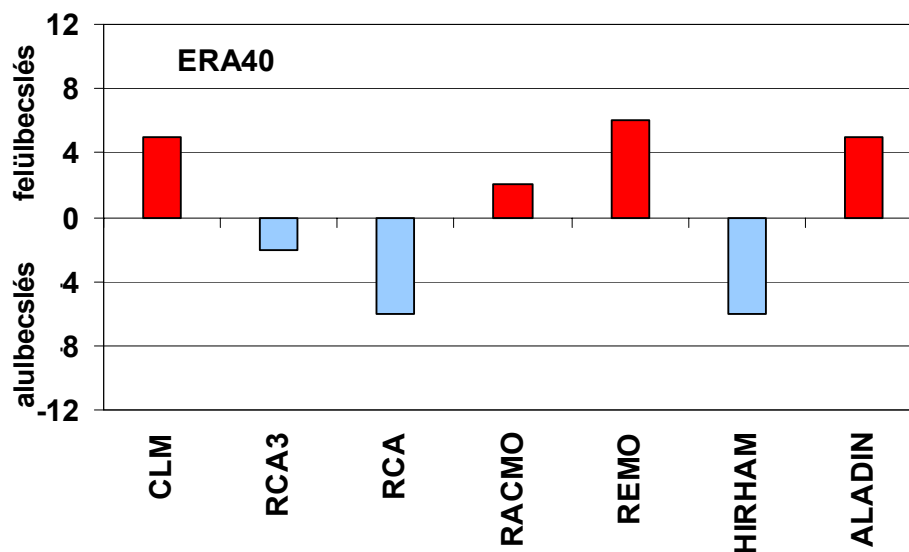
6. ábra: Az ERA40 által hajtott regionális modellek szimulációinak havi minimumhőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990



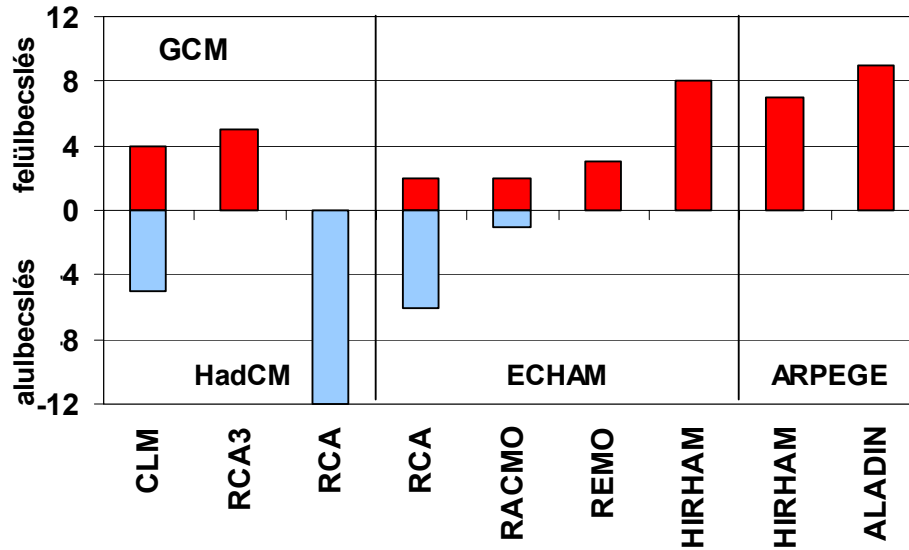
7. ábra: A globális modellek által hajtott regionális modellek szimulációinak havi minimumhőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

A 8. és a 9. ábrán a maximumhőmérséklet validációs vizsgálatának az eredményeit látjuk rendre az ERA40, illetve a GCM által meghajtott RCM-ek esetén. Az ERA40-es szimulációk között ez esetben egy modell sem ad hibátlan becsléseket. Az RCA modell mely a korábbi változók esetén alig volt hibával terhelt, most 6 hónapban is alulbecsli az E-OBS adatbázist. Habár minden modell esetében megjelennek szignifikáns alá- vagy fölébecslések, ezek átlagosan 4-5 hónapban fordulnak elő, ami jóval kisebb, mint amit az előzőekben a GCM meghajtású esetben tapasztaltunk. A legtöbb szignifikáns hibát viszont ez esetben is a REMO és a HIRHAM modell nyújtja (6 hónap).

A globális modell által meghajtott modellek esetében (9. ábra) azt látjuk, hogy négy modell becsli alá az E-OBS adatbázis eredményeit. A HIRHAM által meghajtott RCA modell 12 hónapban mutat szignifikáns alábecslést a vizsgálatok szerint, így jelen esetben ez a modell bizonyul a legrosszabbnak. Ezt a modellt leszámítva a többi 2-9 hónapban mutat felülbecslést. A felülbecslési hibák közül az ALADIN modell, melyet az ARPEGE GCM-je hajt meg, eredményezi a legtöbb hibát, mivel 9 hónapban becsli felül az adatbázisból kapott eredményeket.



8. ábra: Az ERA40 által hajtott regionális modellek szimulációinak havi maximumhőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990



9. ábra: A globális modellek által hajtott regionális modellek szimulációinak havi maximumhőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

Lezárásként elmondhatjuk, hogy a vizsgálatból jól látszik, hogy az ERA40 által meghajtott regionális modellek az év nagyobb részében pontosabbak, mint a globális modellekkel meghajtott verziók. Ennek oka, hogy az előbbi esetben a modell csak az RCM hibájával terhelt, míg utóbbiban ehhez még hozzájön a GCM hibája is. Mind a négy változó esetében a szignifikáns felülbecslések fordultak elő nagyobb számban. A hőmérsékleti változók esetén az RCA modell bizonyult a legpontosabbnak, míg a csapadék esetében a HadRM3Q.

4. A várható változások elemzése

A szimulációs hibák miatt a XXI. századra vonatkozó értékelést az ún. delta-módszerrel végezzük, vagyis a GCM által meghajtott futtatások jövőbeli és múltbeli különbségeit tekintjük. Így módon feltételezzük, hogy a klímaváltozás során az éghajlati modellek hibái nem változnak, s a különbség képzéssel ez a hiba kiküszöbölhető. A következő alfejezetekben a 2021-2050 és 2071-2100 időszakra várható térbeli és időbeli változásokat mutatjuk be és értékeljük az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyítva az átlaghőmérséklet és a csapadékösszeg esetén.

4.1. A Magyarországra várható változások időbeli eloszlása

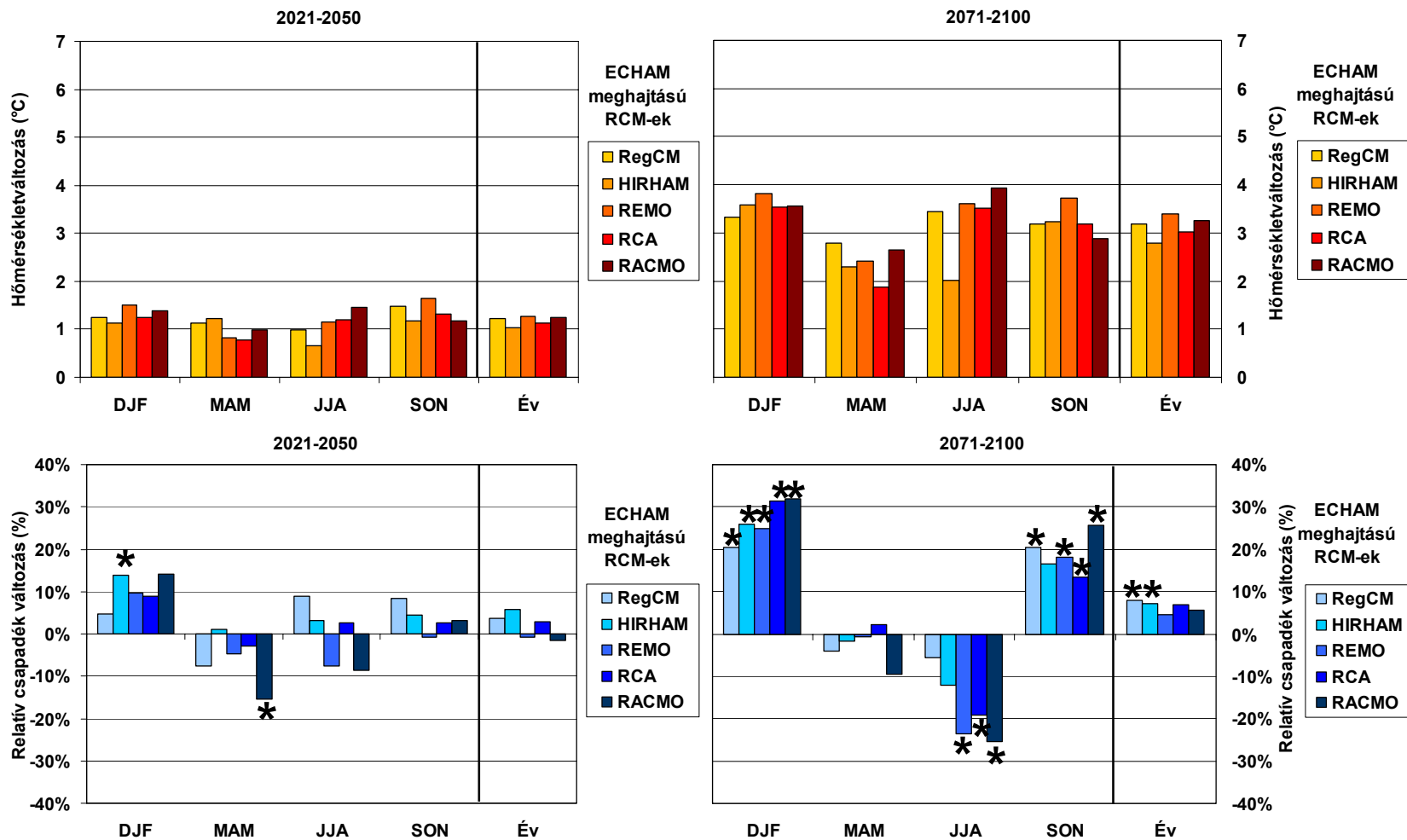
Elsőként a modellenként becsült évi és évszakos klímaváltozást elemezzük, melyet a magyarországi rácspontok átlagai alapján határoztunk meg. A várható változások a meghajtott GCM-ek szerinti csoportosítással szerepelnek az ábrákon. A várható havi csapadékösszeg változásokat ábrázoló diagramokon látható fekete csillagok jelölik azokat a változásokat, amelyek a statisztikai t-próba (Dévényi és Gulyás, 1988) szerint 0,95 szinten szignifikánsnak bizonyultak. A hőmérsékletnél csillagokat azért nem kellett használnunk, mert mind a XXI. század közepére, mind pedig a végére vonatkozó várható változások egyöntetűen szignifikánsak.

A 10-12. ábrák felső diagramjai a hőmérséklet, az alsók pedig a csapadék szimulációk különbségét mutatják a referencia időszakhoz (1961-1990) képest. Az ECHAM GCM-mel meghajtott öt regionális modell (10. ábra) mind a két jövőbeli időszakra a hőmérséklet várható emelkedését becsli (2021-2050-re mintegy 1-1,5 °C-ot). A legnagyobb várható változási értéket a REMO modell adja ősszel, míg a legkisebbet a HIRHAM nyáron. A 2071-2100 időszakra a várható évszakos hőmérsékletemelkedés már a 2-4 °C-ot is elérheti. A csapadék esetében mind a közelebbi, mind a távolabbi jövőről azt mondhatjuk, hogy nyáron várhatóan csökken, télen és ősszel pedig nagy valószínűséggel nő a csapadékmennyiség. A 2021-2050 időszakban csak téle és tavaszra prognosztizál szignifikáns változást egy-egy modell, de ezen vizsgálat szempontjából az összes GCM közül az ECHAM a legmeggyőzőbb. A 2071-2100 időszakra télen mind az öt, ősszel négy

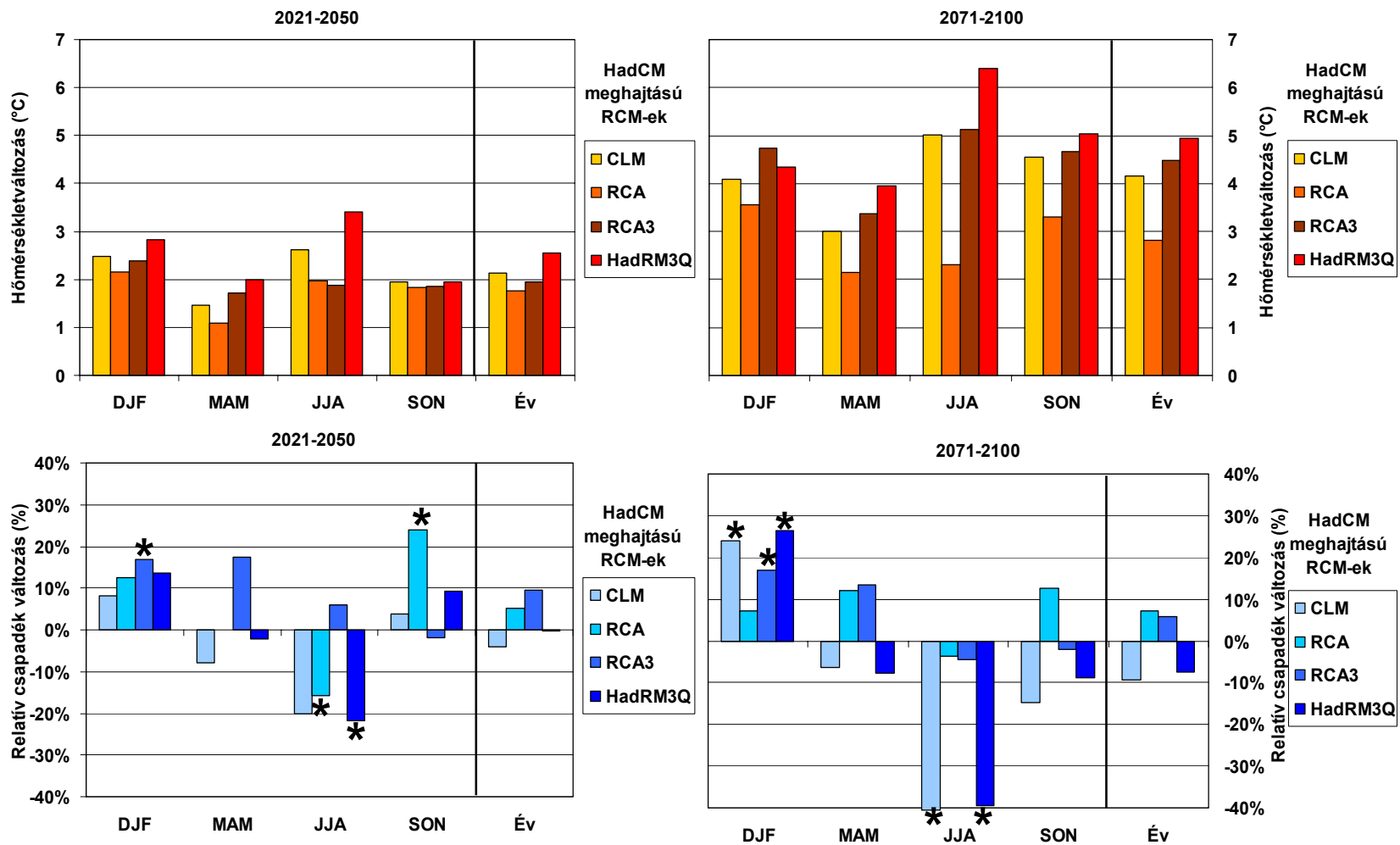
és még nyáron is három modell eredménye bizonyult statisztikailag 0,95 szinten szignifikánsnak. Éves skálán a csapadék mennyiségének várható növekedését jelzik a modellek, közülük a RegCM és a HIRHAM szimulációk által prognosztizált csapadéknövekedés szignifikáns.

A 11. ábrán a HadCM globális modell által meghajtott CLM, RCA, RCA3 és HadRM3Q modellek alapján Magyarországra várható klímaváltozási eredményeket láthatjuk. A 2021-2050 időszakra várható évszakos hőmérsékletemelkedés elérheti a 3,5 °C-ot is, átlagban azonban 2 °C körüliek az értékek. Már a közelebbi jövőre vonatkozó szimulációk esetén kitűnik, hogy ezzel a GCM-mel meghajtott regionális modellszimulációk egységesen magasabb változásokat prognosztizálnak, mint az ECHAM által meghajtott RCM-ek. A 2071-2100 időszakot vizsgálva ezt az észrevételt erősíti az is, hogy a várható változások nagysága ekkor 2-5 °C, de ez az érték a HadRM3Q modell esetében a 6,5 °C-ot is elérheti nyáron. A legalacsonyabb várható változásokat mind a két időszakra az RCA modell becsli. A relatív csapadékváltozásról elmondhatjuk, hogy a közelebbi jövőre négy modellfuttatás is szignifikáns változást jelez. Míg ezek közül egy-egy modell a csapadék várható téli és őszi emelkedését prognosztizálja, addig nyáron két modell is szignifikáns csökkenést valószínűsít. A távolabbi jövőre nézve az ECHAM meghajtású modellszimulációk által télre becsült növekedés, s a nyárra várható csökkenés jelenik meg a HadCM által meghajtott szimulációk eredményeiben is. Télén három, nyáron pedig két modell változásai szignifikánsak.

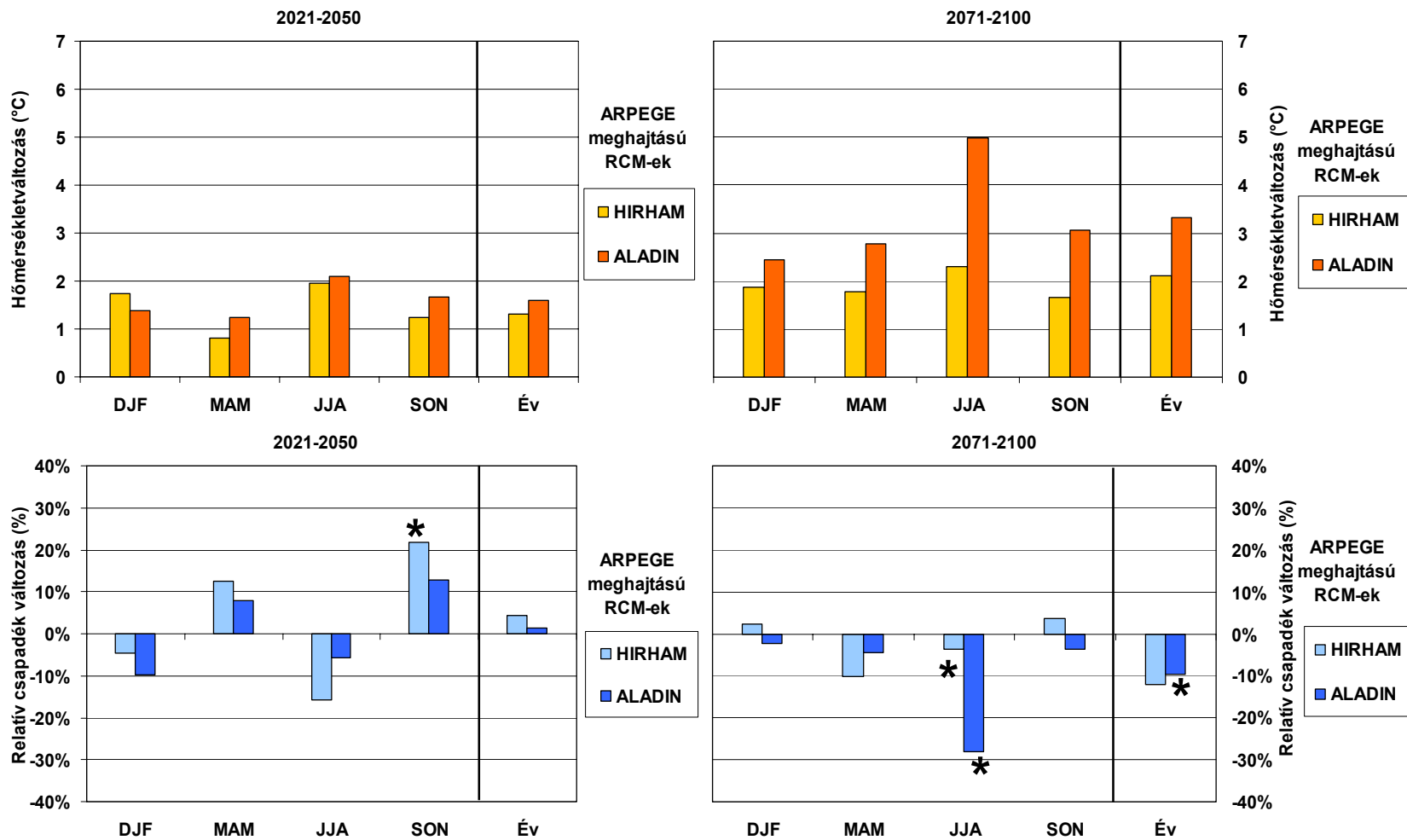
A 12. ábrán a harmadik globális modell, az ARPEGE két modelljének szimulációit láthatjuk. A közelebbi jövőre a várható hőmérsékletemelkedés 1-2 °C körüli, míg a távolabbi jövőre 2-3 °C. A 2071-2100 időszakban az ALADIN modell minden évszak esetében magasabb értékeket mutat, mint a HIRHAM modell. Nyáron az ALADIN modell kimagasló, 5 °C-os várható változást prognosztizál. A 2021-2050 időszakban a téli és a nyári évszakra jelez várhatóan csapadék csökkenést, ami azonban nem szignifikáns 95%-os szinten és ellentétben áll az eddigi modellek szimulációival, ahol a téli növekedés mindenhol megfigyelhető volt. A közelebbi jövőre vonatkozó futtatások közül csak a HIRHAM ősze vonatkozó eredménye szignifikáns. A 2071-2100 időszakra a nyári évszakra mind a két modell szignifikáns csapadékcsökkenést valószínűsít. Télre a HIRHAM modell egy nagyon kis mértékű növekedést mutat, mely ugyan egyezik az eddig látottakkal, de ellentétben az ALADIN modell eredményeivel, melyeknek a kezdeti és peremfeltételeket ugyanaz a modell nyújtotta. Az éves becslést nézve a csapadék várható csökkenésére lehet számítani.



10. ábra: A 2021-2050 és 2071-2100 időszakra vonatkozó várható havi hőmérséklet- és csapadékváltozás az ECHAM modell által meghajtott RCM-ek szerint (referencia időszak: 1961-1990)



11. ábra: A 2021-2050 és 2071-2100 időszakra vonatkozó várható havi hőmérséklet- és csapadékváltozás a HadCM modell által meghajtott RCM-ek szerint (referencia időszak: 1961-1990)



12. ábra: A 2021-2050 és 2071-2100 időszakra vonatkozó várható havi hőmérséklet- és csapadékváltozás az ARPEGE modell által meghajtott RCM-ek szerint (referencia időszak: 1961-1990)

4.2. A várható változások térbeli eloszlása

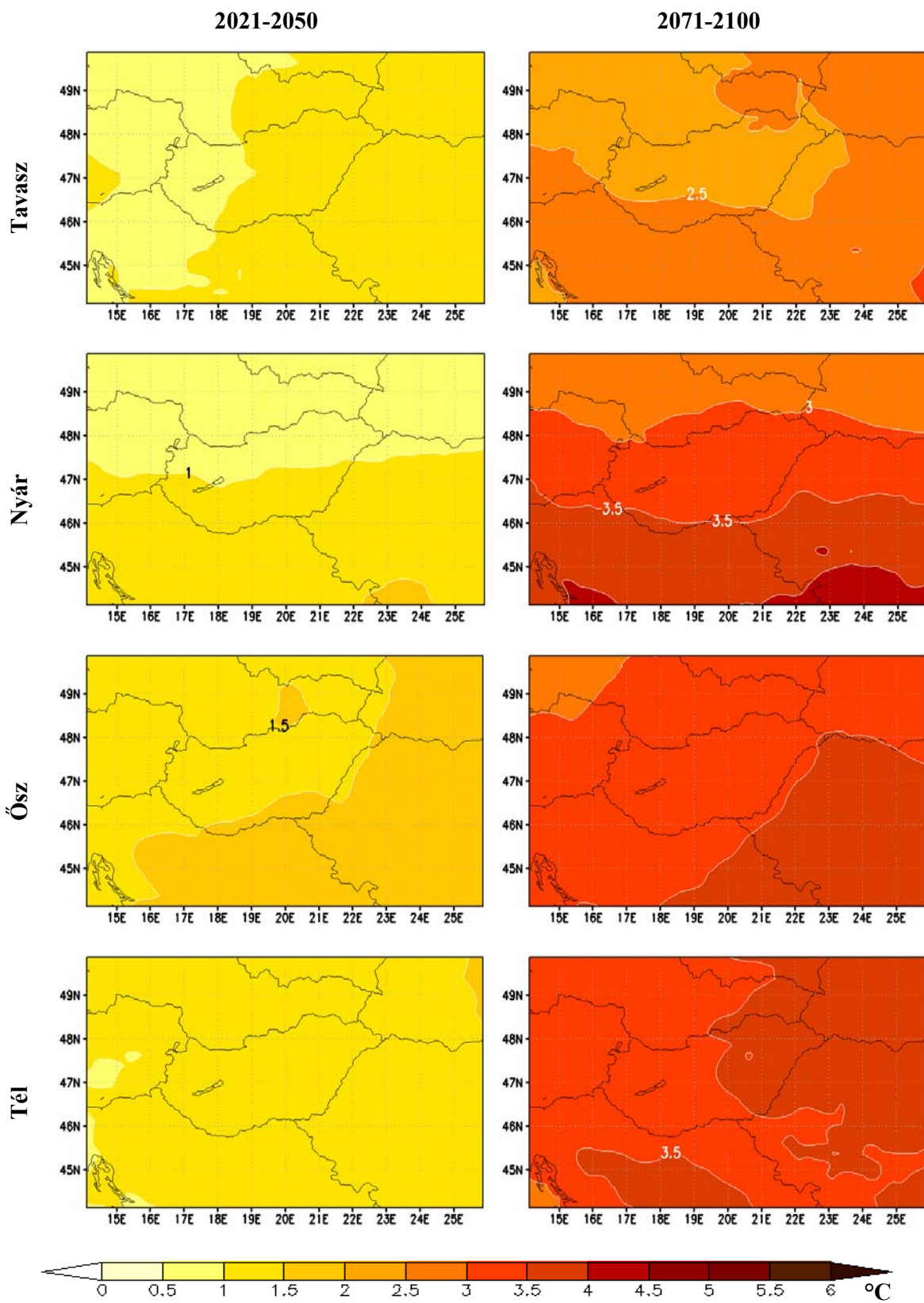
A Kárpát-medencében várható változások térbeli eloszlásának vizsgálatához térképes megjelenítést alkalmaztunk. Az elemzésekhez először minden modellre külön-külön ábráztuk a hőmérséklet és a csapadék várható változását, majd a három meghajtó globális modell alapján kompozit térképeket készítettünk. Utolsó lépésként készült egy-egy olyan kompozit térkép is a két vizsgált paraméterre, melyen már mind a 11 modell által szimulált várható változást figyelembe vettük.

A 13. ábrán látható az ECHAM globális modell által meghajtott öt modell hőmérsékletváltozási kompozitja. A közelebbi jövőt tekintve a várható változások mértéke megegyezik az előző fejezetben bemutatott értékekkel. A közelebbi jövőre a várható változások nagysága 1 °C és 1,5 °C között mozog. A területi eloszlást figyelve észrevehetjük, hogy délre, illetve délkeletre haladva egyre nagyobb hőmérsékletváltozások valószínűsíthetők. 2071-2100-ra a várható változások értéke megduplázódik, de a területi eloszlásban nincs lényeges változás. A legnagyobb várható változásokra (3-3,5 °C között) nyáron számíthatunk.

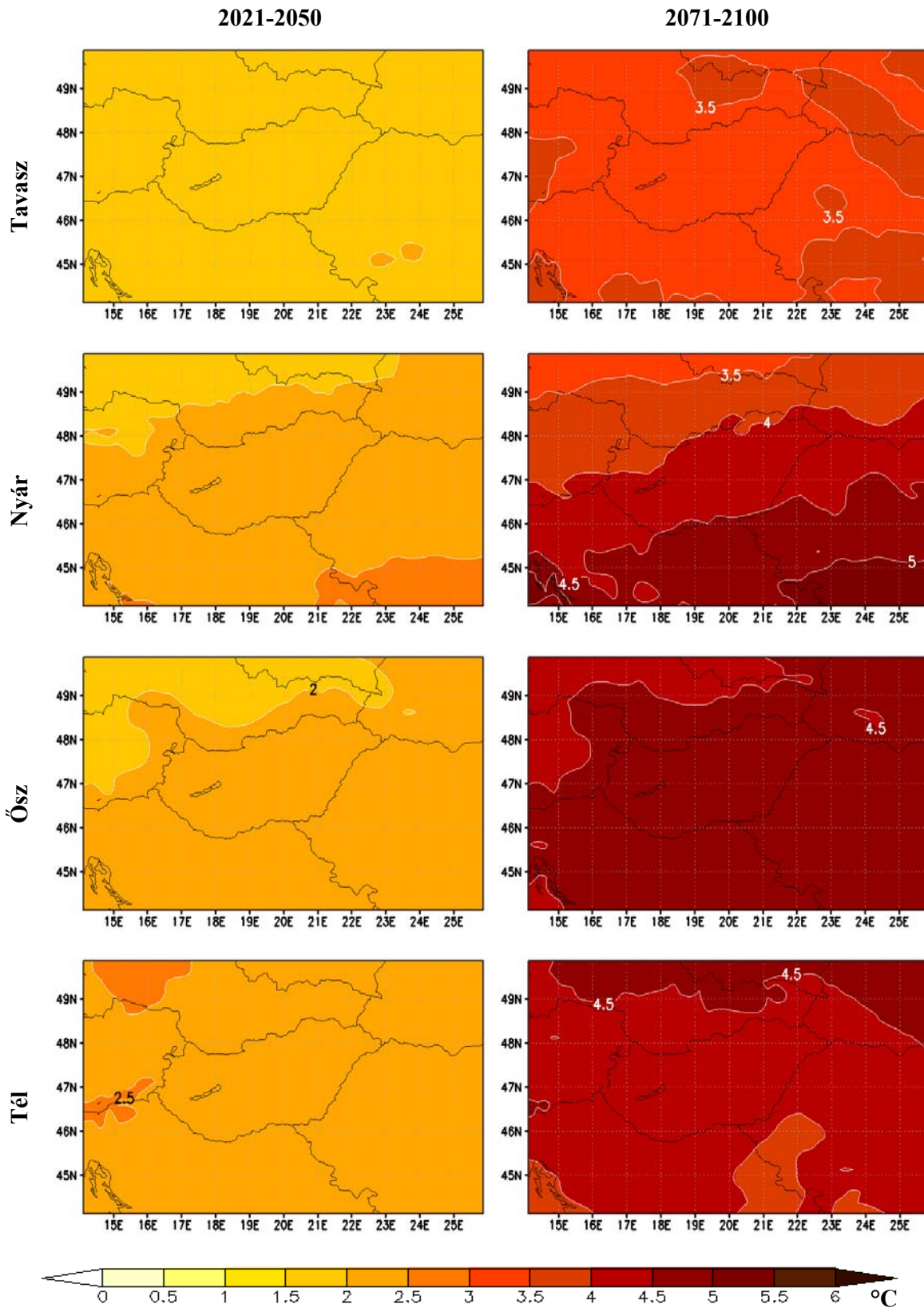
A 14. ábrán a HadCM által meghajtott RCM-ek által becsült hőmérsékletváltozások kompozit térképe látható. A 2021-2050 időszakra 1-2 °C-os várható hőmérséklet-emelkedést prognosztizálnak a modellek. A teljes Kárpát-medence kivágatot vizsgálva láthatjuk az előzőekben tapasztaltakat, miszerint a nagyobb várható értékek dél, délkelet felé jelennek meg de ha csak hazánk területét vizsgáljuk, azt vesszük észre, hogy a várható változások eloszlása homogén. A távolabbi jövőben várható hőmérsékletváltozást ábrázoló kompozitokon jól látható, hogy az értékek nagysága itt is kb. a duplájára nő, a területi eloszlás azonban alig változik. Nyár és ősz esetében továbbra is dél felé haladva fordulnak elő a magasabb értékek, de télen inkább a vizsgált kivágat északi részén számíthatunk nagyobb hőmérsékletváltozásra. A legnagyobb várható hőmérsékletemelkedés ősszel figyelhető meg.

A 15. ábrán az ARPEGE globális modell hajtotta ALADIN és HIRHAM modellek becsléseinek kompozitja látható. A közelebbi jövőre 1 °C és 1,5 °C között mozog a várható hőmérsékletemelkedés mértéke, a térbeli eloszlást tekintve pedig nyáron és ősszel délkelet felé tapasztalunk nagyobb értékeket. Télen az ország szinte egész területén 1 °C körül mozog a várható változás értéke, de az északkeleti és délkeleti területeken 1,5 °C-os értékek is megjelennek. 2071-2100-ban a várható változások nagysága 2-4 °C között

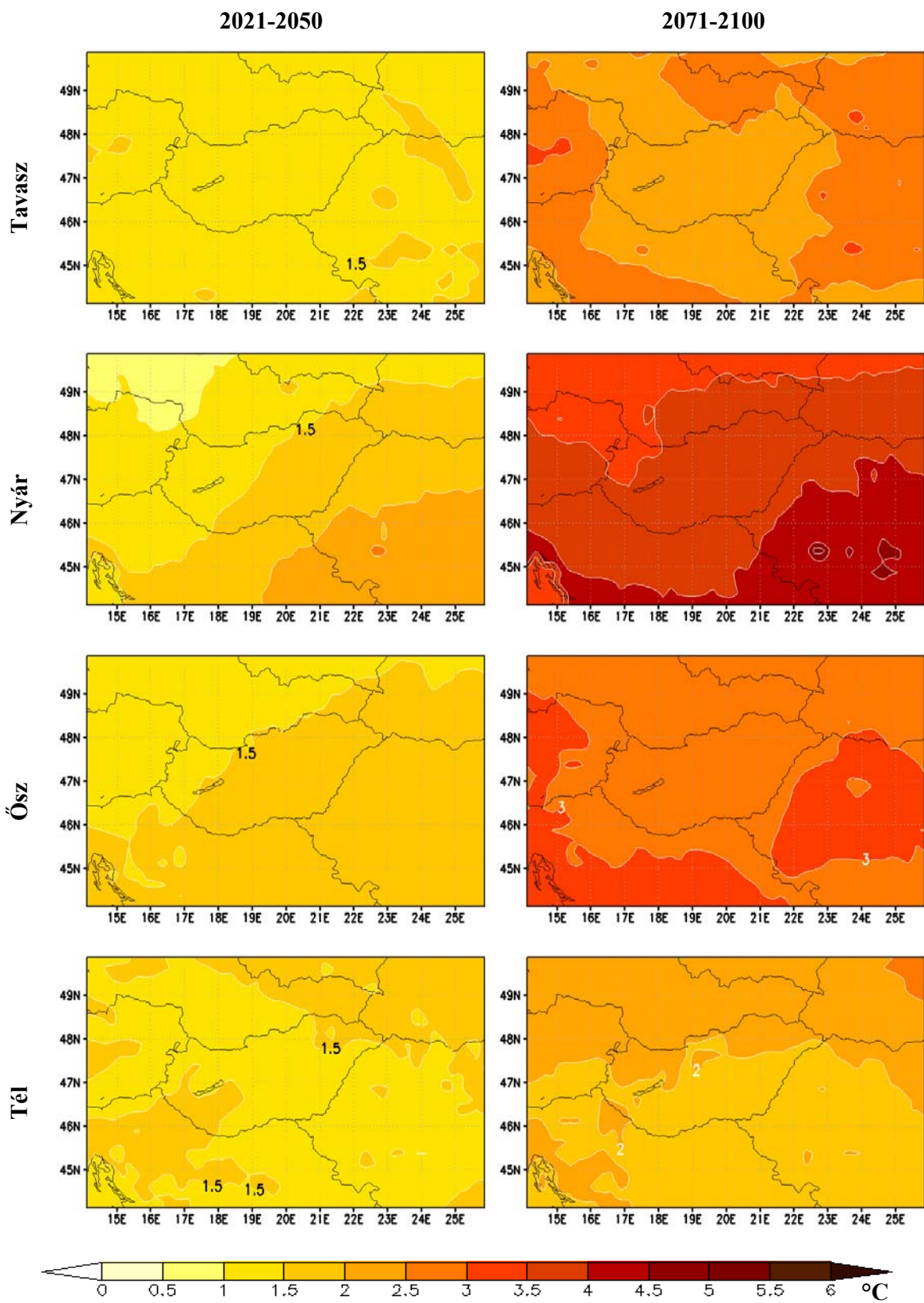
mozog. A területi eloszlás változatlan, kivéve télen, amikor a nagyobb értékek északon valószínűsíthetőek



13. ábra: A várható évszakos hőmérsékletváltozás területi eloszlása a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra az ECHAM modell által meghajtott RCM-ek alapján (referencia időszak: 1961-1990)



14. ábra: A várható évszakos hőmérsékletváltozás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100 időszakra a HadCM modell által meghajtott RCM-ek alapján (referencia időszak: 1961-1990)



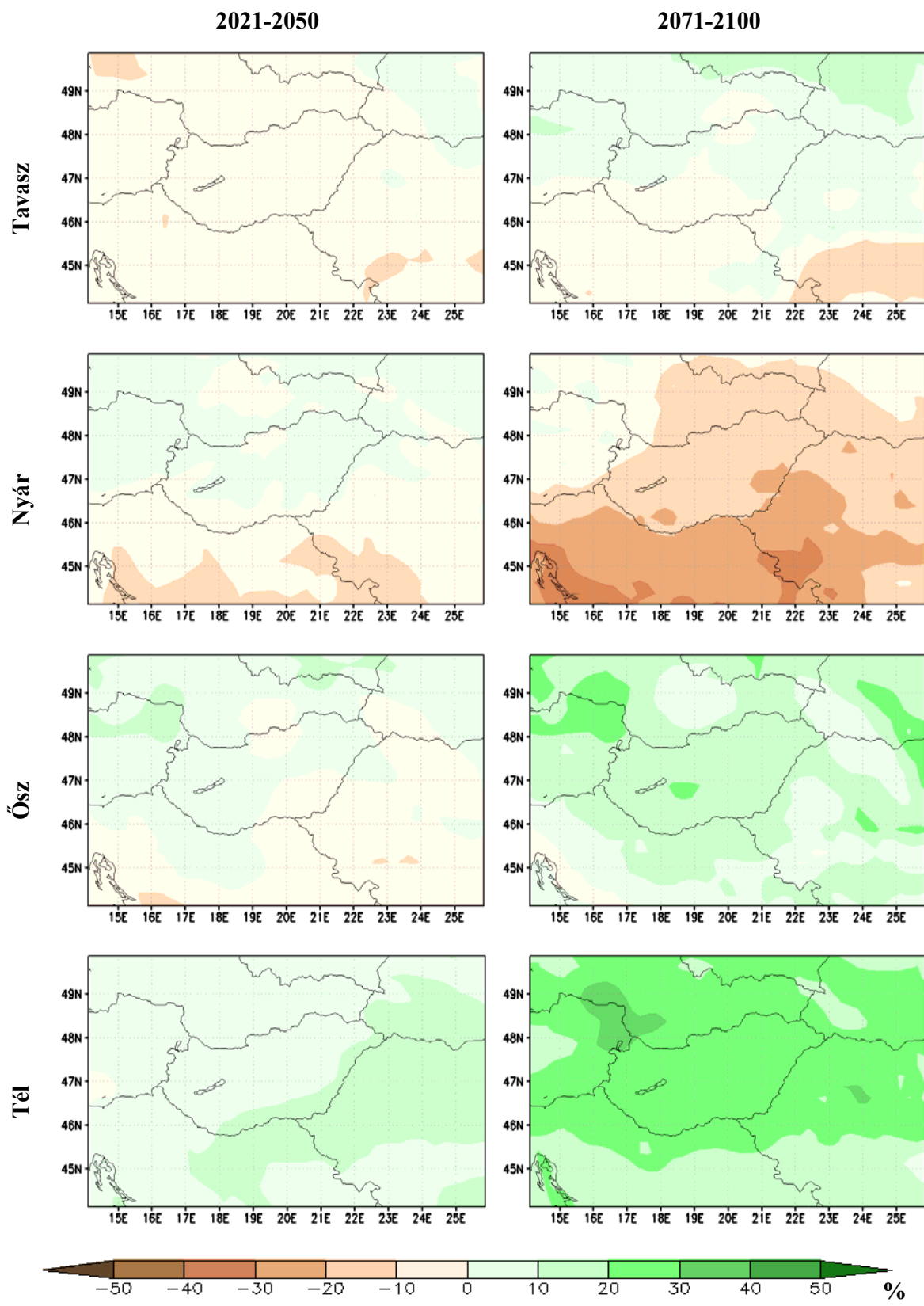
15. ábra: A várható évszakis hőmérsékletváltozás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100 időszakra az ARPEGE modell által meghajtott RCM-ek alapján (referencia időszak: 1961-1990)

A 16.-18. ábrán a két vizsgált időszakra valószínűsíthető évszakos csapadékváltozás kompozit térképei láthatók százalékos formában; a várható hőmérsékletváltozáshoz hasonlóan a meghajtott GCM-ek szerint készült kompozitokat elemezzük

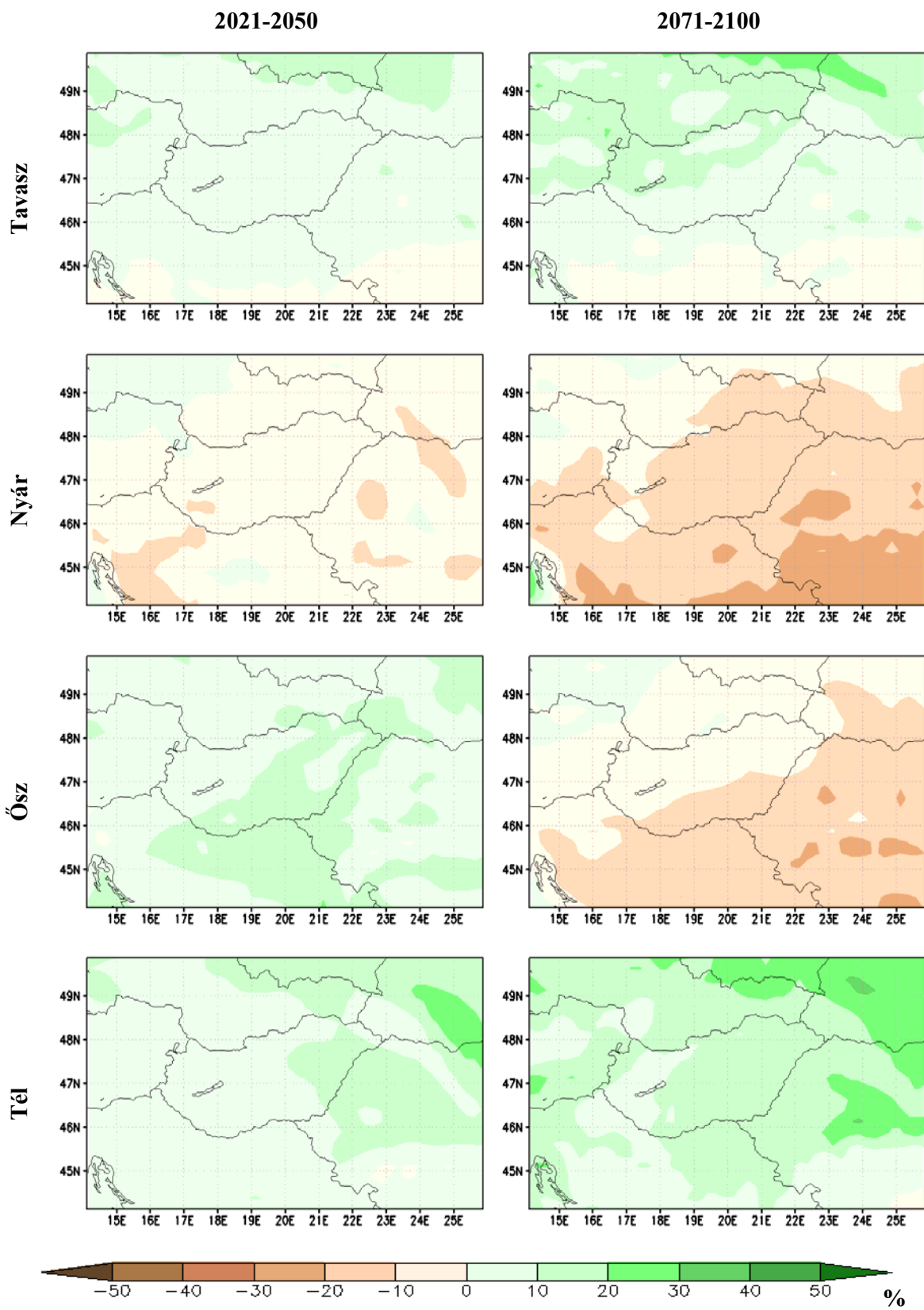
A 16. ábrán az ECHAM által meghajtott öt modell eredményeiből számolt kompozit mezőket láthatjuk. A 2021-2050 időszak képeit vizsgálva észrevehetjük, hogy a várható csapadékváltozások 10% körüliek. Csökkenésre számíthatunk tavasszal, míg növekedés telre prognosztizálható. A csapadék mennyisége télen várhatóan dél felé növekszik. A 2071-2100 időszakra becsült változások az évszázad közepére várható tendenciáknak mintegy kétszerese, 1961-1990-hez viszonyítva 20% körüli módosulás valószínűsíthető. A területi eloszlásban azt látjuk, hogy észak felé haladva nő a várható csapadék mennyisége és délre erősödik a várható szárazodás. A várható legnagyobb emelkedés a csapadék mennyiségében télen, míg a legnagyobb csökkenés (akár 30%) nyáron figyelhető meg.

A HadCM modell által hajtott regionális modellek becsült évszakos csapadékváltozásaiból képzett kompozitjai a 17. ábrán láthatók. Ezek alapján 2021-2050-re várhatóan növekedni fog a csapadék mennyisége egész évben, a nyarat leszámítva. A várható változások mértéke 10% és 20% között mozog. Ősszel és télen megfigyelhetjük, hogy az ország keleti területein valószínűsíthetők a legnagyobb változási értékek. A távolabbi jövőt vizsgálva látjuk, hogy a várható változások iránya az őszt leszámítva minden évszak esetében azonosak a közelebbi jövőre becsült változások irányával, csak nagyobb mértékűek. Észak felé továbbra is várhatóan nőni fog a csapadék mennyisége vagy csökkenni a szárazodás mértéke. Ősszel azt láthatjuk, hogy a közelebbi jövőre megfigyelt várható növekedés helyett 2071-2100-ra kis mértékű csökkenést prognosztizálnak a modellek.

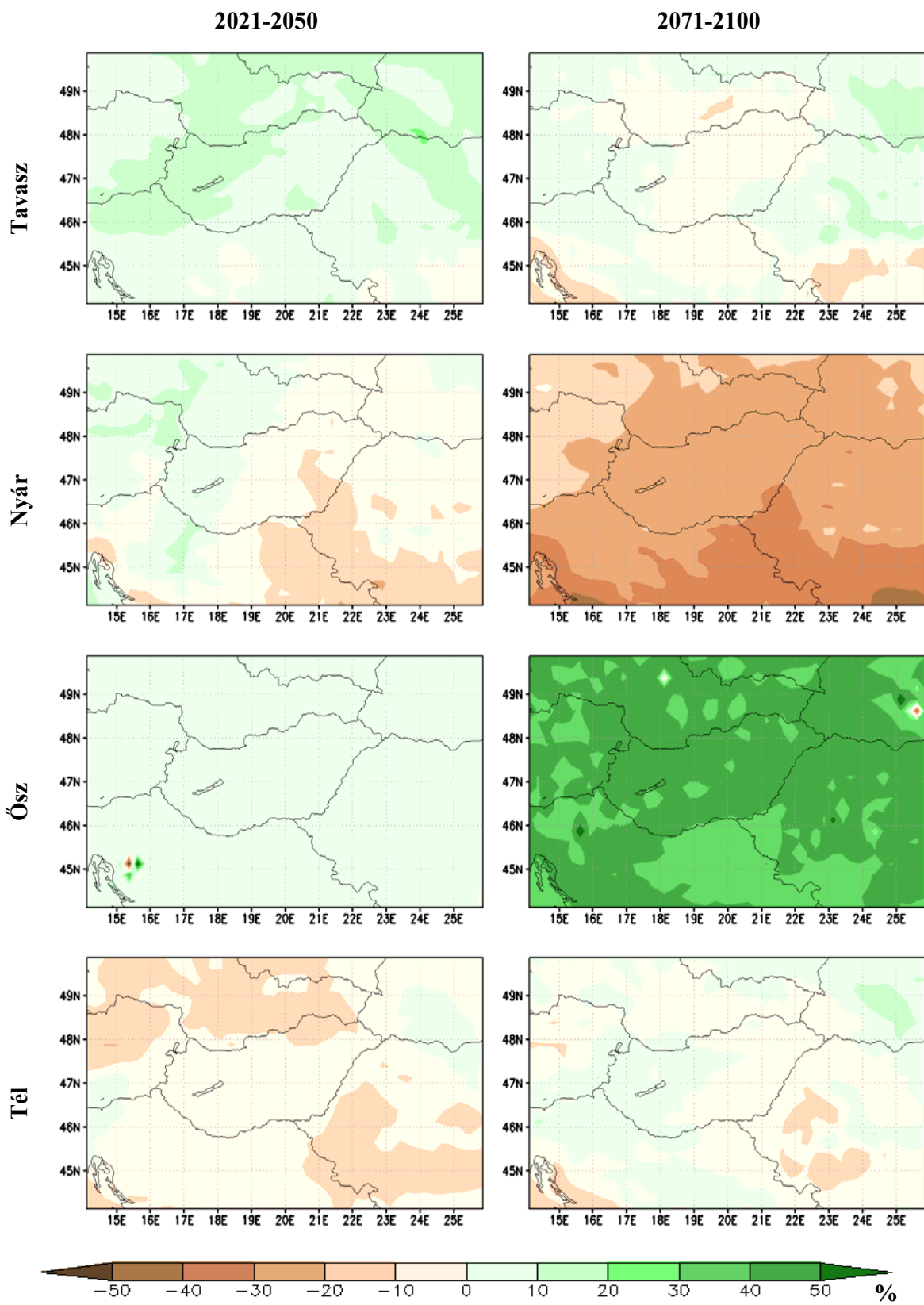
A 18. ábrán az ARPEGE modell által meghajtott két regionális modell klíma-előrejelzései alapján készült kompozit képeket találjuk. A 2021-2050 időszakban tavasszal és ősszel várható növekedést, míg nyáron és télen csökkenést láthatunk a térképeken. A várható változások mértéke nem haladja meg a 20%-ot. A nyári változásokat ábrázoló térképeken szembejövő, hogy északnyugat felé haladva egyre kisebb mértékű szárazodásra számíthatunk a vizsgált régióban. A 2071-2100 időszakban a várható változások mértéke megduplázódik. A vizsgált kompozit mezők közül itt figyelhető meg mind a legnagyobb várható szárazodás, mind pedig a várható legnagyobb növekedés a csapadék mennyiségében. A változások elérhetik akár a 40%-ot is (nyár) és az ország határain belül eső rácsponthoz 10%-nál kisebb a területi változékonyság mértéke.



16. ábra: A várható évszakos csapadékváltozás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100 időszakra az ECHAM modell által meghajtott RCM-ek alapján (referencia időszak: 1961-1990)



17. ábra: A várható évszakos csapadék változás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100-as időszakra a HadCM modell által meghajtott RCM-ek alapján (referencia időszak: 1961-1990)

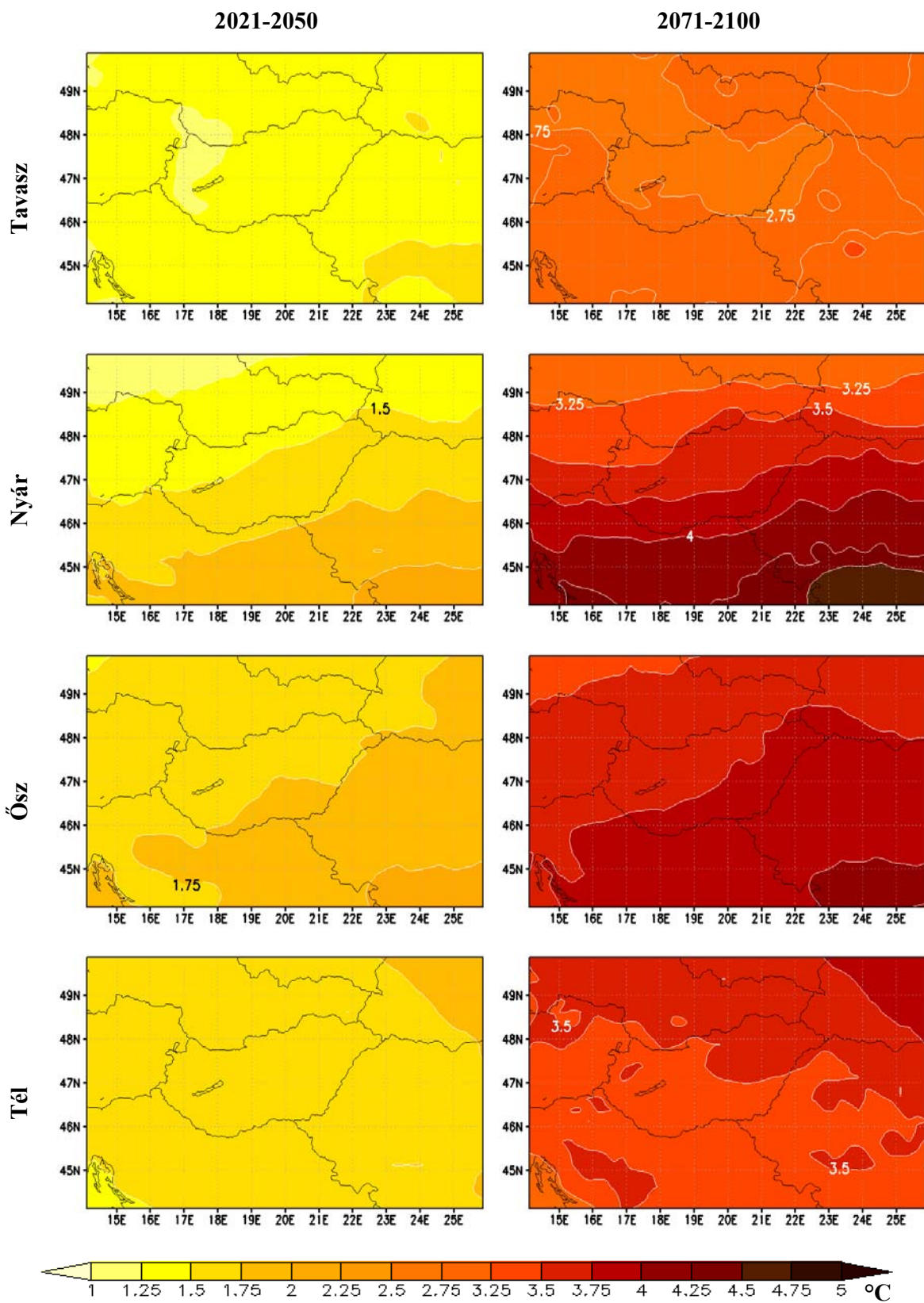


18. ábra: A várható évszakos csapadék változás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100-as időszakra az ARPEGE modell által meghajtott RCM-ek alapján (referencia időszak: 1961-1990)

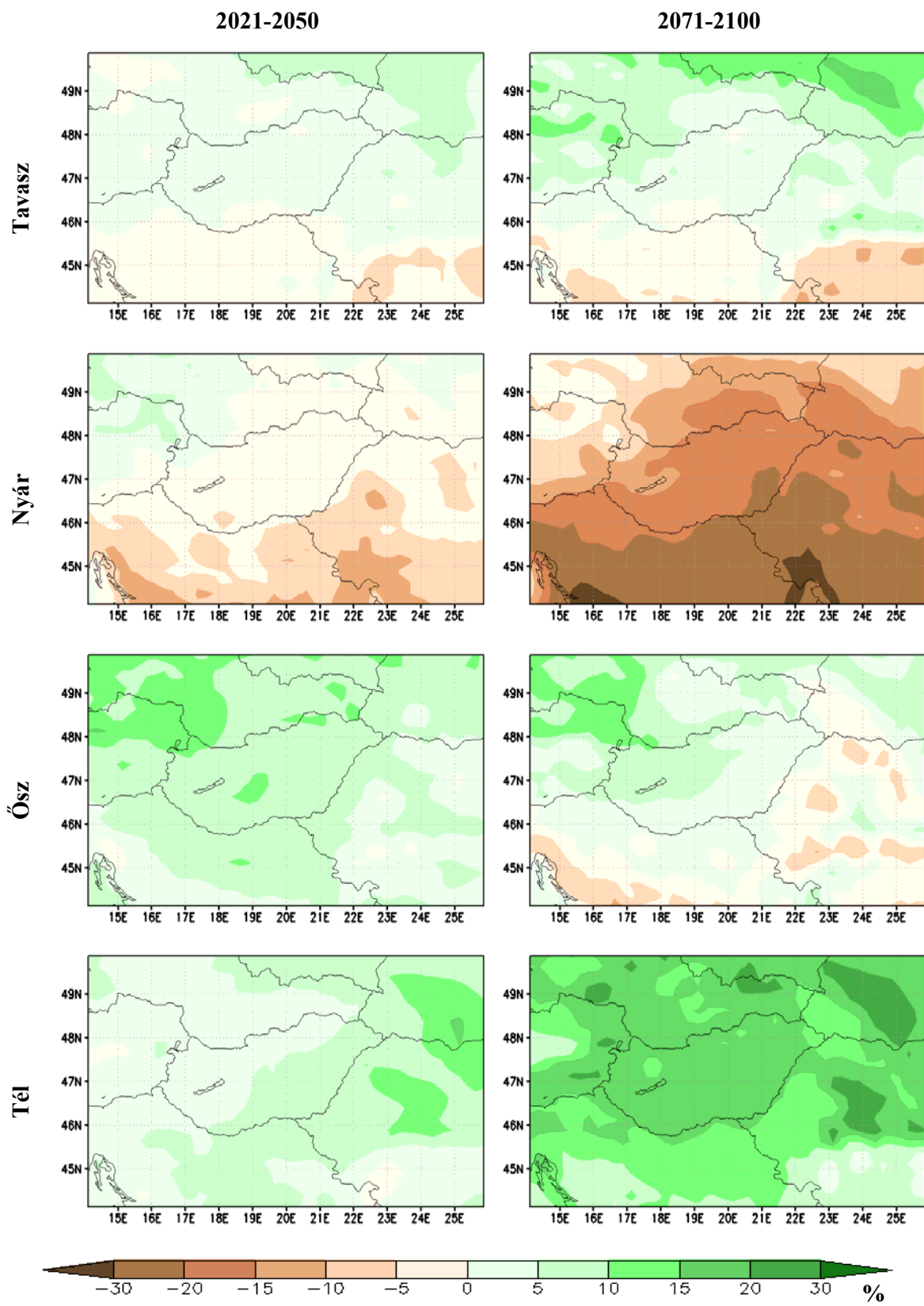
A XXI. századra várható éghajlatváltozás becslésére elkészítettük az összes 150 évnvi szimulációt felölelő RCM figyelembevételével számított kompozit térképeket is. A 19. ábra a hőmérsékletre, a 20. ábra a csapadékra összegzi a 11 vizsgált modellfuttatás alapján 2021-2050-re, illetve 2071-2100-ra valószínűsíthető évszakos változásokat.

A hőmérséklet esetében (19. ábra) látjuk, hogy a 2021-2050 időszakra becsült átlagos változások mértéke 1 °C és 1,75 °C között mozog. A legnagyobb várható hőmérsékletemelkedésre ősszel, az ország déli területein számíthatunk, a legkisebb mértékűre pedig tavasszal az ország északnyugati területein. Nyáron és ősszel dél felé haladva nő a várható változások nagysága. A 2071-2100 időszakra becsült hőmérsékletnövekedés a közelebbi jövőhöz képest nagyobb, 2,5 °C és 3,75 °C között mozog. A legkisebb mértékű melegedés várhatóan tavasszal, míg a legnagyobb nyáron és ősszel valószínűsíthető. A tél kivételével itt is látható, hogy a várható változások értékei dél felé haladva egyre magasabbak.

A csapadék mennyiségében várható jövőbeli változásokat a 20. ábra foglalja össze. A közelebbi jövőben nyár kivételével minden évszakban várhatóan nőni fog a csapadék mennyisége. A legnagyobb változás várhatóan ősszel jelentkezik, az értéke 5% és 10% között mozog. Tavasszal és nyáron délnyugat felé haladva egyre nagyobb a várható szárazodás mértéke. Ősszel észak, északnyugat felé haladva várhatóan egyre nagyobb mértékben nő a csapadék mennyisége, míg télen ugyanerre kelet, délkelet felé haladva számíthatunk. A 2071-2100 időszakban a várható változások mértéke a század közepéhez viszonyítva megduplázódik. A legnagyobb mértékű csapadéknövekedés télen és a legnagyobb mértékű szárazodás nyáron prognosztizálható. Tavasszal és télen a várható változások az ország területén belül szinte teljesen homogén eloszlásúak. Nyáron délkelet felé valószínűsíthető erősödés a várható szárazodásban (mint ahogy ez a GCM-ek szerinti csoportosításban is látszódott), ősszel pedig arra számíthatunk, hogy a csapadék mennyisége várhatóan északnyugat felé nő majd meg erőteljesebben.



19. ábra: A várható évszakis hőmérsékletváltozás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100-as időszakra a vizsgált 11 modellfuttatás alapján (referencia időszak: 1961-1990)



20. ábra: A várható évszakos csapadék változás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100-as időszakra a vizsgált 11 modellfuttatás alapján (referencia időszak: 1961-1990)

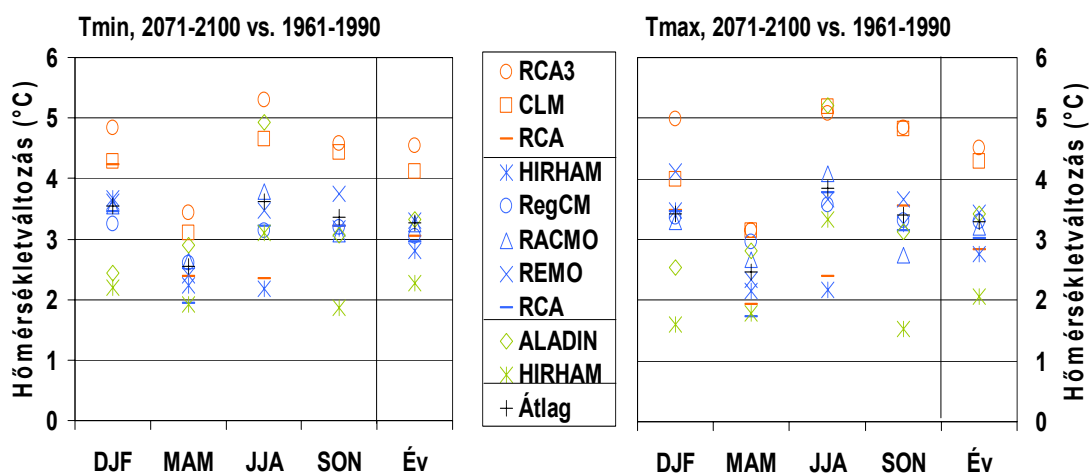
5. A minimum-és maximumhőmérséklet várható változásának elemzése

A napi átlaghőmérsékletek várható évszakos változásán kívül meghatároztuk a napi szélsőértékek (T_{max} és T_{min}) évszakos átlagaiban 2021-2050-re és 2071-2100-ra prognosztizált változásokat. Az egyes regionális modellek által a magyarországi rácsponatok alapján számolt átlagos évszakos becsült változásokat a 21. ábra összegzi 2071-2100-ra vonatkozóan. A három meghajtó GCM szerint különböző színek jelölik a modelleket és az azonos RCM-eket pedig azonos módon jeleztük. A várható évszakos és éves változások összes modell-szimuláció figyelembe vételével számított átlagos értékét egy fekete kereszt szemlélteti.

A minimum-és a maximumhőmérséklet 2071-2100-ra becsült változása mind a négy évszak esetén és éves szinten is hasonló. A Welch-próba alapján a prognosztizált változások minden esetben statisztikailag szignifikánsak 95%-os szinten. A minimumhőmérséklet esetén láthatjuk, hogy a legnagyobb hőmérsékletváltozást 2071-2100-ra minden évszakban az RCA3 modell valószínűsíti (nyáron a legnagyobb az érték: $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). A meghajtó GCM-ek szerint csoportosítva a HadCM által vezérelt RCM-ek szimulálják a legnagyobb várható változásokat, valamint kisebbet az ECHAM modell és végül a legkisebb változásokat az ARPEGE outputjaival meghajtott RCM-szimulációk vetítenek előre. A változások nagysága tavasszal $2-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, az év további részében pedig várhatóan $2-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Az átlagos értékek ennek köszönhetően $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ között változnak. A legkisebb várható hőmérsékletemelkedést az ARPEGE által hajtott HIRHAM modell szimulálja ősszel, értéke $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A maximumhőmérséklet XXI. század végére várható változásának vizsgálatakor szembevetjük, hogy egy-két kivétellel a modellszimulációk eredményei hasonló eredményeket mutatnak, mint a minimumhőmérséklet esetén. A várható legnagyobb változásokat itt is az ECHAM modell által meghajtott RCM-szimulációk adják és a legkisebbeket pedig az ARPEGE által vezéreltek (bár megjegyezzük, hogy míg az ARPEGE csak két regionális modellt hajt meg, addig az ECHAM ötöt). A várható legnagyobb hőmérsékletemelkedést az ALADIN modell valószínűsíti nyáron ($5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$), a legkisebbet pedig ősszel az ARPEGE által meghajtott HIRHAM modell (hasonlóan a

minimumhőmérséklethez), és ennek értéke 1,5°C. Az évszakos változások átlagos becslést értékei egész évben 2 °C és 4 °C között ingadoznak.



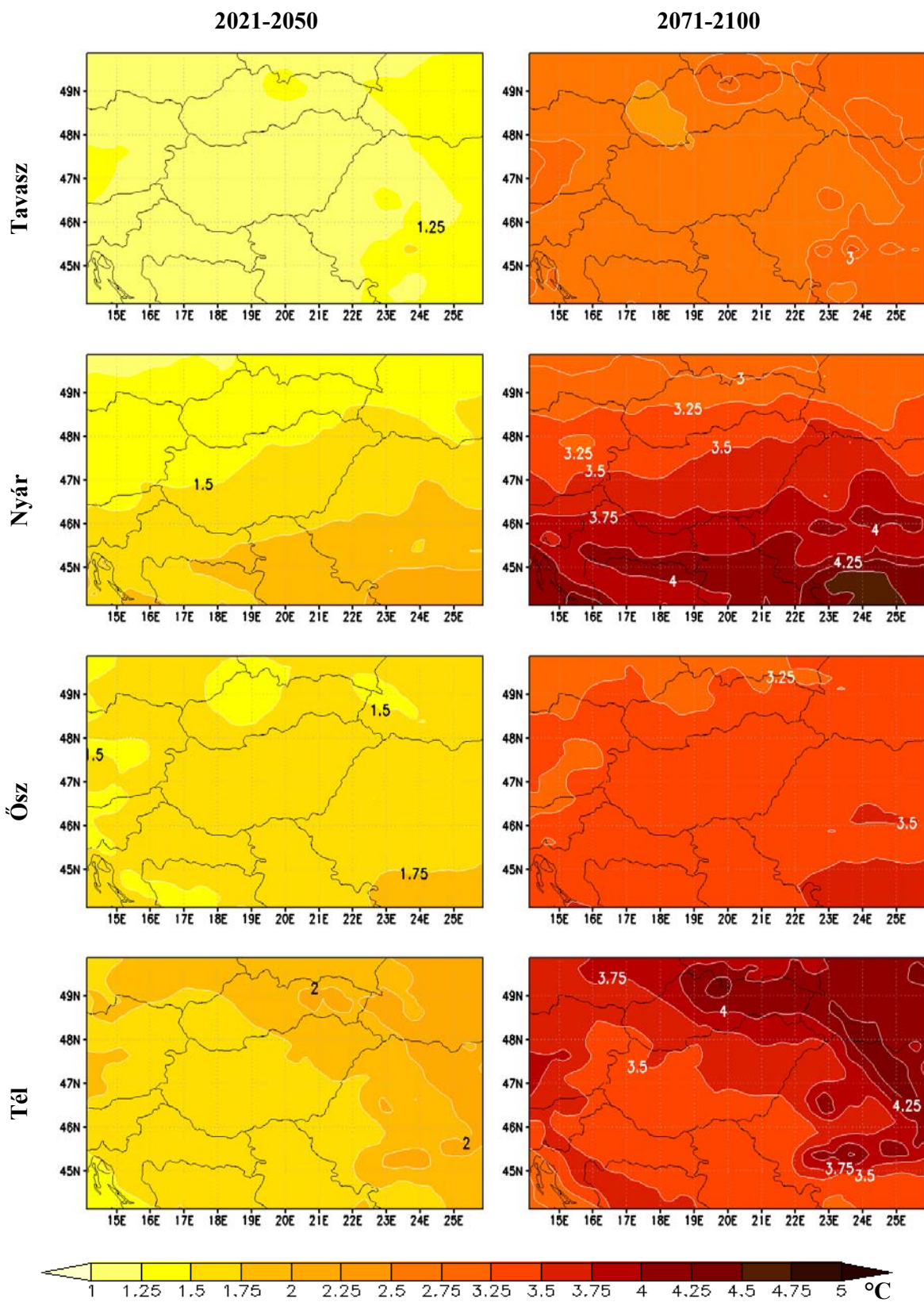
21. ábra: A napi minimum- és maximumhőmérséklet évszakos átlagaiban a 2071-2100 időszakra várható változás a különböző RCM-ek szerint (referencia időszak: 1961-1990)

A várható változások térbeli szerkezetének vizsgálatához a 4. fejezetben bemutatott elemzésekhez hasonlóan itt is elkészítettük a Kárpát-medence kivágatára vonatkozó évszakos kompozit térképeket. A 22. és a 23. ábra szemlélteti a 10 modellszimuláció becslései alapján összeállított a 2021-2050 és a 2071-2100 időszakra vonatkozó évszakos hőmérsékletváltozásokat.

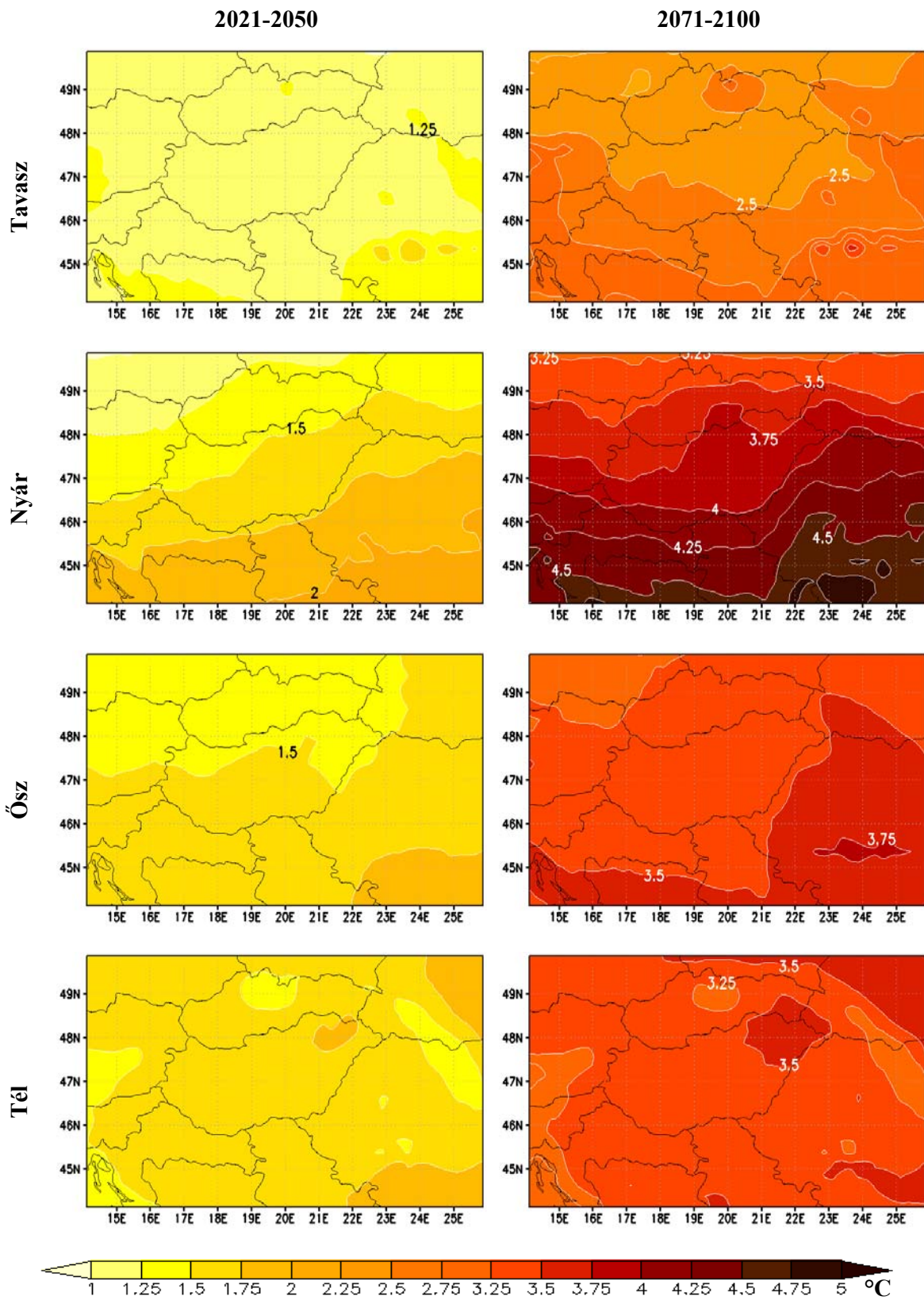
A minimumhőmérséklet várható változása a 22. ábrán látható. Mind a négy évszak esetében a hőmérséklet emelkedése valószínűsíthető a XXI. század során. A 2021-2050 időszakra 1,5-2 °C a várható növekedés mértéke, míg a 2071-2100 időszakra 3-4 °C. A legerőteljesebb várható melegedések télen és nyáron jelennek meg, főként a távolabbi jövőre vonatkozó szimulációkban. Tavasszal és ősszel hazánk egyes régióiban a várható hőmérsékletemelkedés különbsége nem éri el a 0,25 °C-ot. Nyáron mind a két időszakban dél felé haladva, egyre nagyobb várható hőmérsékletemelkedésre számíthatunk, télen viszont az ország északkeleti térségében valószínűsíthető a maximális növekedés.

A 23. ábrán látható a maximumhőmérsékletben várható évszakos emelkedés mértéke. A közelebbi jövő szimulációi 1-2°C növekedést becsülnek, a XXI. század végére pedig 2,5-4,5 °C emelkedésre számíthatunk. A legnagyobb várható hőmérsékletemelkedés a távolabbi jövőben nyáron várható, értéke az ország déli részén a 4 °C-ot is meghaladja. A minimumhőmérséklethez hasonlóan tél kivételével egész évben dél felé haladva

fokozatosan növekvő hőmérsékletemelkedésre számíthatunk mind a két időszakra. Nagyobb hőmérséklet növekedési mérték télen inkább északkeleten valószínűsíthető. Ősszel és tavasszal hazánk területén belül a hőmérsékletváltozás mértékében nem számíthatunk nagy különbségekre. A minimumhőmérséklethez hasonlóan az egyes régiókra becsült emelkedések itt sem haladják meg a 0,5 °C-ot.



22. ábra: A várható évszakos minimumhőmérséklet változás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100-as időszakra a vizsgált 11 modellfuttatás alapján (referencia időszak: 1961-1990)



23. ábra: A várható évszakos maximumhőmérséklet változás területi eloszlása a 2021-2050 és 2071-2100-as időszakra a vizsgált 11 modellfuttatás alapján (referencia időszak: 1961-1990)

6. Az RCA és a HIRHAM modell becslésének összehasonlítása különböző meghajtó feltételek esetén

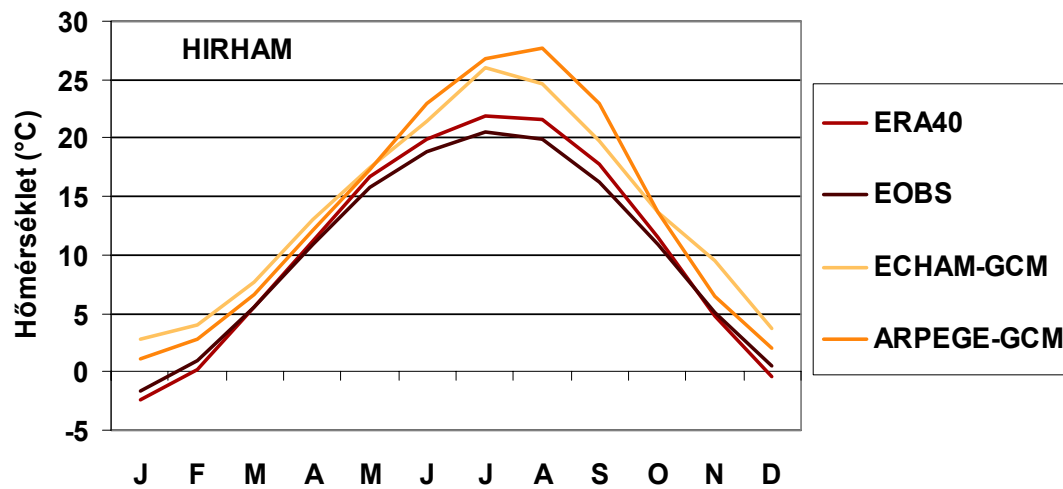
A regionális modellek-szimulációk eredményében rejlő bizonytalanságok több forrásból származtak. Egyrészt megjelennek a regionális modell hibái, másrészt átadódnak a globális modelleké is. Ahhoz, hogy eldönthessük, hogy a kapott hibákból mekkora részben tehető felelőssé a GCM, és milyen mértékben járul hozzá ehhez az RCM saját hibája, olyan szimulációkat vizsgálunk, amelyek során egy adott RCM-et különböző globális modellekkel hajtunk meg. Az ENSEMBLES projekt keretében 1951-2100 időszakra két ilyen RCM-futtatás is történt.

Az egyik RCM a Dán Meteorológus Szolgálat által futtatott HIRHAM, mely 19-36 vertikális szintet tartalmaz. A másik regionális modell az RCA modell, a Svéd Hidrometeorológiai Intézet szimulációit szolgáltatta, melyben 16-40 vertikális szint található. Mind a két RCM 25 km-es horizontális rácsfelbontású. Az ERA40-reanalízis adatbázisból származó kezdeti-és peremfeltételek felhasználásával elemezhetjük az RCM-ek saját hibáit.

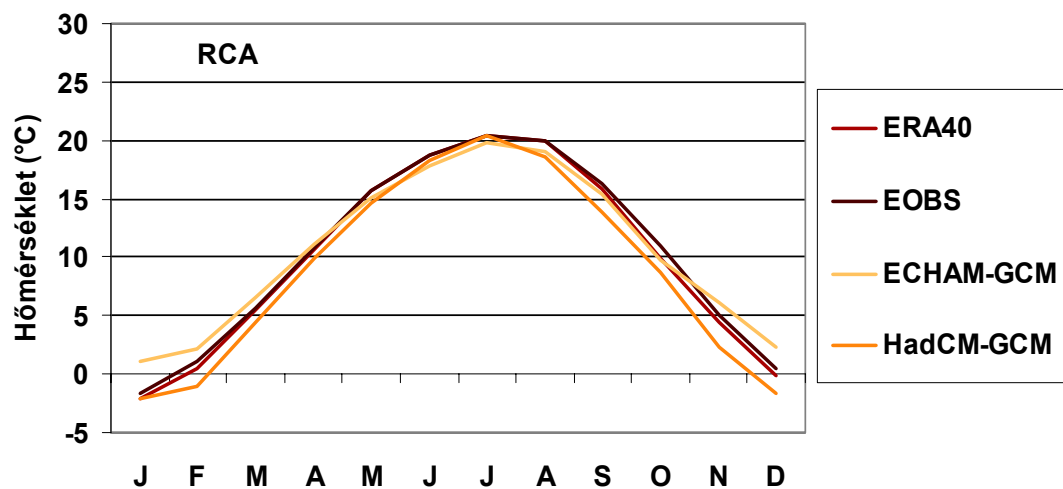
A HIRHAM regionális modell az ECHAM és az ARPEGE globális modellekkel lett meghajtva és egy közös ERA40-nel vezérelt futtatás tartozik hozzájuk. Az E-OBS adatbázisból számolt havi középhőmérsékleteket mind a két modellszimuláció felülbecsli (24. ábra). Az ARPEGE által hajtott HIRHAM modell májustól októberig, míg az ECHAM által hajtott novembertől májusig becsül erőteljesebben felül. A hiba mértéke a nyári félévben elérheti akár a 7 °C-ot is, a téli félévben azonban nem emelkedik 5 °C fölé. Májusban és októberben a felülbecslés a két különböző meghajtó esetén azonos mértékű. Az ERA40-nel meghajtott szimuláció novembertől márciusig kis mértékben (1 °C) alulbecsül, ám az év többi részében felülbecslést tapasztalunk (2 °C).

Az RCA modell ECHAM által meghajtott szimulációja októbertől ápriliséig felülbecsli az E-OBS adatbázis alapján meghatározott havi átlaghőmérsékletet, míg a nyári szakaszban alulbecsli (25. ábra). A HadCM brit modell által hajtott futtatások egész évben alulbecslést mutatnak, és a hiba mértéke egész évben közel azonos mértékű (1-3 °C). Az ECHAM által vezérelt szimuláció esetén a havi hőmérsékleti hiba mértéke januárban a legnagyobb, de ekkor is csak 3 °C körüli. Az ERA40 hajtotta szimuláció nyáron szinte

teljesen pontos becslést ad, a piros vonal alig tűnik ki a bordó (E-OBS) alól. A hiba értéke ez esetben alig éri el az 1°C-ot.



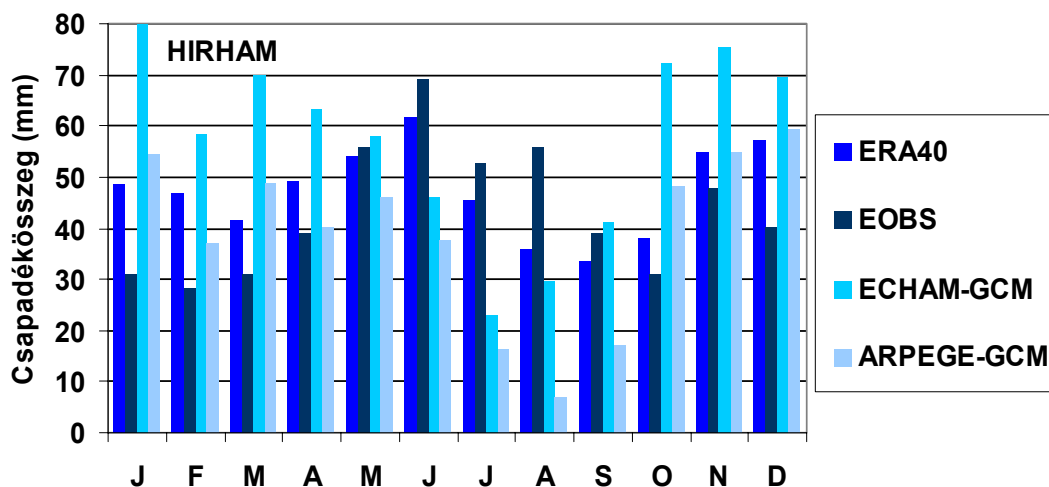
24. ábra: A HIRHAM modell szimulációinak havi átlaghőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990



25. ábra: Az RCA modell szimulációinak havi átlaghőmérsékleti összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

A csapadéokra vonatkozó validációs eredményeket láthatjuk a 26. és a 27. ábrán. A HIRHAM modell szimulációja esetén az ECHAM által hajtott futtatás szeptembertől májusig fölé-, nyáron pedig alábecsül. A legnagyobb hiba télen jelenik meg, főként januárban, ekkor az értéke az 50 mm-t is eléri. A nyáron látható alulbecslés mind a három

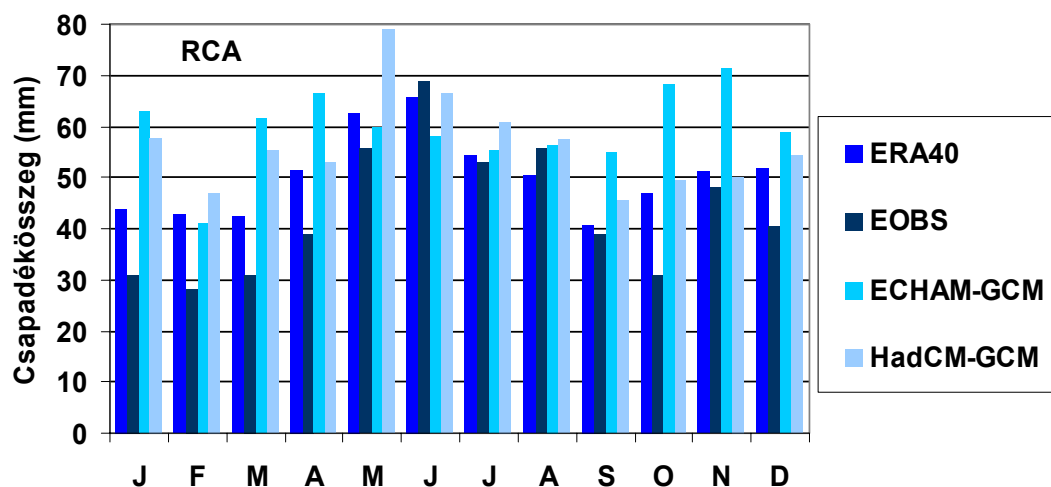
hónapban 30 mm közelében mozog. Az ARPEGE GCM által hajtott HIRHAM modell októbertől májusig mutat felülbecslést, ami hasonló az ECHAM által meghajtott szimulációhoz, de itt a hiba mértéke 10-200 mm közötti. Az előzőekkel ellentétben a nagyobb becslési hiba nyáron látható, amikor az ARPEGE által vezérelt RCM erősen alulbecsli az E-OBS adatbázis által kapott eredményeket (az eltérés akár a 40 mm-t is elérheti). Az ERA40-nel meghajtott futtatás hasonló hibákat produkál, mint az ARPEGE modellel meghajtott szimuláció. A hiba mértéke itt is kisebb mértékű (10-20 mm), mint az ECHAM modellnél látott. A legpontosabban szimulált hónap a május, ekkor mind a három futtatás csekély hibát jelez.



26. ábra: A HIRHAM modell szimulációinak havi csapadékösszeg összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

A 27. ábrán az RCA modellfuttatás havi csapadékösszegre vonatkozó eredményei láthatók. Mind az ECHAM, mind pedig a HadCM hajtotta szimuláció június hónaptól eltekintve egész évben felülbecsli az E-OBS adatbázisból számított havi csapadékokat. Az eltérés értéke nyáron nagyon kis mértékű, azonban ősszel és télen elérheti a 37 mm-t is (október) az ECHAM hajtotta RCM-szimuláció esetében. A HadCM által vezérelt RCM hibái kisebb mértékűek, átlagosan 10 és 20 mm között mozognak, s januárban kaptuk a legnagyobb hibát, melynek értéke 27 mm. Az ERA40-es futtatás június és augusztus hónapokban becsli alul az E-OBS adatbázist, de a hiba mértéke nem számottevő. Az év többi részében előforduló felülbecslés valamelyest nagyobb, de ezek is alig haladják meg a

10 mm-t. A csapadék szempontjából legpontosabban becsült hónapok a három futtatás alapján: a június és az augusztus.

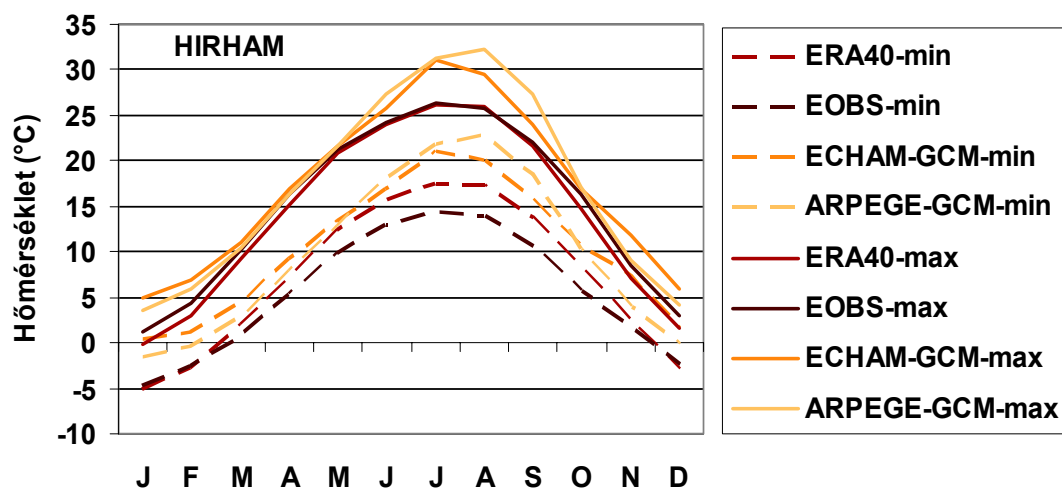


27. ábra: Az RCA modell szimulációinak havi csapadékösszeg összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

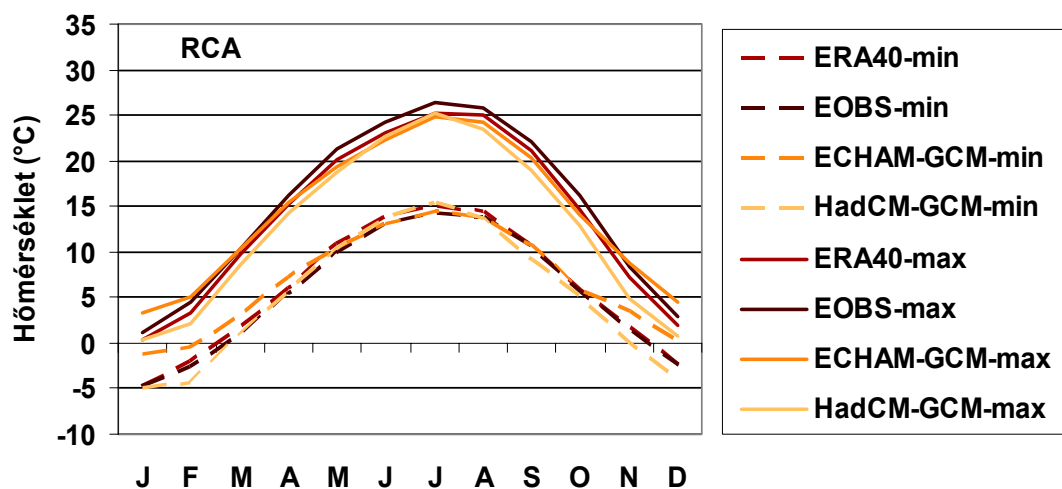
A minimum- és maximum-hőmérsékletre vonatkozó összehasonlító validációs vizsgálatokat a 28. és a 29. ábra szemlélteti. A folytonos vonalak a maximum- míg a szaggatottak a minimumhőmérsékleteket jelölik. A színezésnél az átlaghőmérséklethez hasonlóan legsötétebbnek az E-OBS adatbázist választottuk, legvilágosabbnak pedig a két globális modell hajtotta RCM-et.

A HIRHAM modell esetében (28. ábra) a maximumhőmérsékletnél láthatjuk, hogy mind a két GCM hajtotta szimuláció az év egészében felülbecsli az E-OBS-ot. Októbertől májusig az ECHAM által hajtott futtatás, míg az év többi részében az ARPEGE által hajtott futtatás mutat nagyobb mértékű hibát. Márciustól májusig a két futtatás majdnem azonos az adatbázisból származó eredményekkel. A legnagyobb hibák mind a két meghajtás esetében nyáron fordulnak elő, az ECHAM modellnél az érték 5 °C körül (július), míg az ARPEGE modellnél 7 °C körül mozog (augusztus). Az ERA40 hajtotta RCM szeptembertől márciusig kis mértékben alulbecsli az E-OBS-ot, majd a nyári időszakban szinte hibamentesen sikerül reprodukálnia (a hiba értéke néhány esetben nem éri el a 0,1 °C-ot sem). A minimumhőmérséklet esetében egyedül az ERA40 által hajtott RCM mozog közel az E-OBS adatbázisból számolt szimulációhoz, de ez is csak télen. Az év többi részében az ERA40-es szimuláció hibája 3 °C körül van. A két GCM közül, októbertől májusig az ECHAM meghajtású HIRHAM modell, majd az év többi részében

az ARPEGE meghajtású becslés erőteljesebben felül. A legnagyobb hibák (6-8 °C) mind a két globális modell esetében nyáron jelentkeznek.



28. ábra: A HIRHAM futtatások napi maximum- és minimum- hőmérsékleteiből számított havi átlagainak összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990



29. ábra: Az RCA futtatások napi maximum- és minimum- hőmérsékleteiből számított havi átlagainak összehasonlítása az E-OBS adatbázissal, 1961-1990

A 29. ábrán az RCA modell validációs vizsgálatánál megfigyelhető, hogy mind a három szimuláció közel mozog az E-OBS adatbázisból számolt értékekhez, erőteljesebb hibák mind a maximum-, mind pedig a minimumhőmérséklet esetében télen jelennek meg. A maximumhőmérséklet esetén az ERA40 által meghajtott modell egész évben kis mértékben alulbecsli az adatbázist (0,5-1 °C). Novembertől márciusig az ECHAM által

hajtott RCM felülbecsül, az év többi részében azonban nagyobb mértékű alulbecslést mutat. A hiba értéke elérheti a 2 °C-ot. A HadCM által meghajtott szimuláció az ERA40-hez hasonlóan egész éves alulbecslést mutat, melynek éves átlagos értéke 2 °C. A minimumhőmérséklet vizsgálatokor láthatjuk, hogy az ERA40-s futtatás februártól szeptemberig kismértékű felülbecslést mutat, az év többi részében viszont majdnem teljesen hiba nélkül becsli az értékeket. A HadCM GCM által hajtott RCM-szimuláció októbertől márciusig alulbecsül, majd májusig közel tökéletesen reprodukálja az E-OBS alapján számított havi minimumhőmérsékleteket, ezután viszont nyáron kis mértékben felülbecsül. Az ECHAM modell által hajtott RCM októbertől májusig mutat felülbecslést, az év további részében azonban a becslések közel tökéletesek. A felülbecslés értéke januárban a legnagyobb, ekkor eléri a 3 °C-ot.

Összegezve a fenti eredményeket elmondhatjuk, hogy mind a négy változó esetében azt tapasztaltuk, hogy mind az alul-, mind a felülbecslések mértéke kisebb gyakorisággal és mértékben fordul elő az RCA modell esetében, mint a HIRHAM modellnél. Az ERA40 által meghajtott RCM vizsgálatokból kitűnik, hogy a HIRHAM modell az E-OBS adatbázishoz képest melegebb éghajlati viszonyokat szimulál Magyarország térségére.

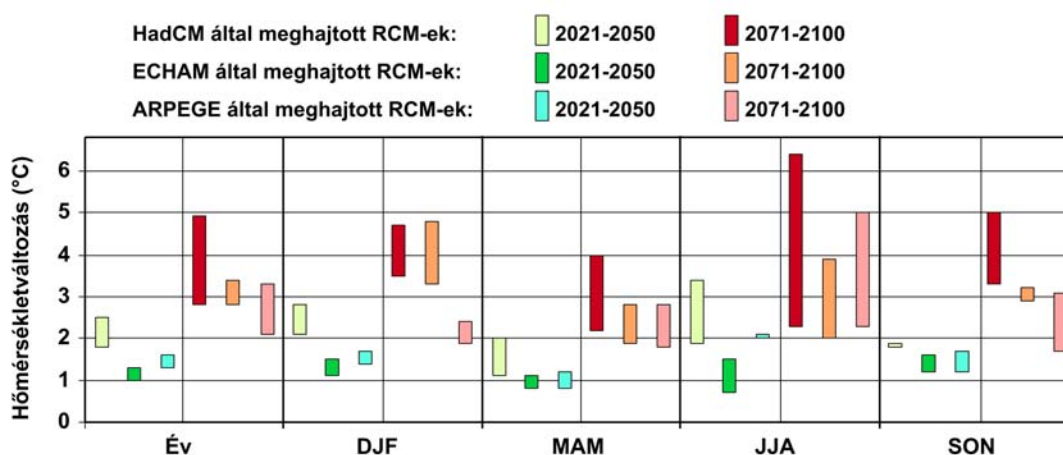
A hőmérsékleti változókat vizsgálva az állapítható meg, hogy az ECHAM által meghajtott RCA modell szintén közelítőleg jó eredményeket ad, a HIRHAM modell esetén azonban jóval megnöveli a felülbecslés mértékét. Ha az ARPEGE modell adja a kezdeti- és peremfeltételeket a modellnek (HIRHAM), a felülbecslés mértéke annyira megnő, hogy nagyobb hibákat kapunk, mint az ECHAM általi meghajtás esetében tapasztaltuk. A HadCM modell hajtotta RCA modell esetén az ERA40 hajtotta esethez képest szintén megnő a hiba mértéke, de nem számottevően.

A csapadékra vonatkozó validációs elemzés alapján az RCA modell ez esetben is kisebb hibákat (10 mm) eredményezett, mint a HIRHAM modell (20 mm). Mind a két modell esetén a különböző szimulációk hibái azonos irányúak, nyáron alulbecslik, az év többi részében pedig felülbecslik az E-OBS adatbázist. Az ECHAM által hajtott HIRHAM szimulációk erőteljesebb felülbecslési hibát produkálnak (akár 50 mm), mint az ECHAM által hajtott RCA szimulációk (maximum 40 mm). Az ARPEGE modell kisebb felülbecsléssel terheli a regionális modellt, de nyáron felerősíti az alulbecslés mértékét. Végül a HadCM modell által hajtott RCA modell esetén azt látjuk, hogy a felülbecslések erőteljesebbek, mint az ERA40-es szimulációnál tapasztaltuk, de kisebbek, mint az ECHAM által vezérelt RCM esetén.

7. Következtetések

Ebben a dolgozatban az ENSEMBLES projekt modellfuttatásait vizsgáltuk a Kárpát-medence, azon belül pedig Magyarország területére. Az elemzések során a különböző hőmérsékleti változók és a csapadék XXI. századra várható változását mutattuk be. Eredményeink alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le.

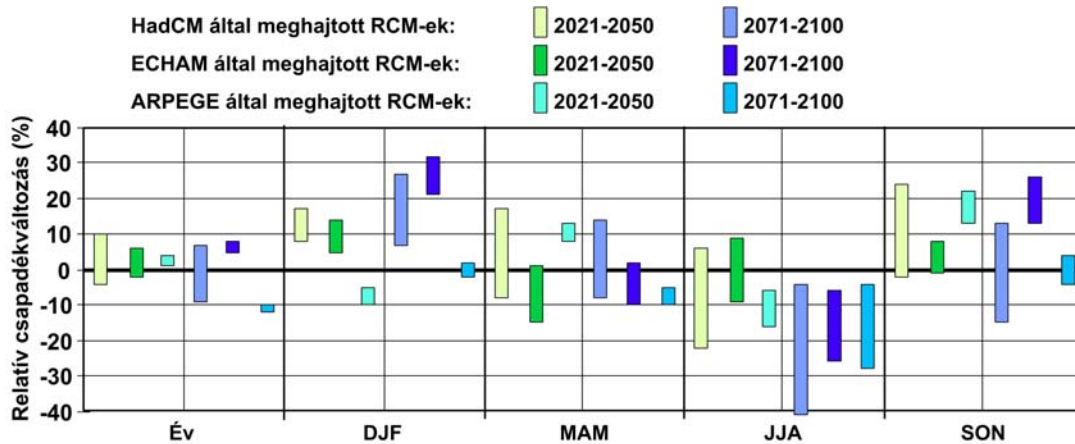
- 1) A validáció során azt tapasztaltuk, hogy mind a négy változó esetén a felülbecslések voltak gyakoribbak. Az ERA40 által meghajtott RCM-ek nagyobb százalékban pontosabbak, mint a GCM által meghajtottak, mivel csak a regionális modell hibájával terheltek.
- 2) Az átlaghőmérséklet esetén a közelebbi jövőre vonatkozó évszakos emelkedés becsült mértéke átlagosan 1-2 °C, míg a távolabbi jövőre vonatkozóan 2-4 °C. Egyes modellek esetében a növekedés várható értéke akár a 6,4 °C-ot is elérheti (30. ábra). A legnagyobb hőmérsékletemelkedésre nyáron számíthatunk.



30. ábra: A 2021-2050 és 2071-2100 időszakra vonatkozó várható évszakos hőmérsékletváltozás értékei a különböző GCM meghajtású szimulációk szerint (referencia időszak: 1961-1990)

- 3) A minimum-és maximumhőmérséklet esetén a várható változások nagysága 2021-2050-re 0,5-2,5 °C között mozog, 2071-2100-ra pedig 1,5-4 °C között. Az átlaghőmérséklethez hasonlóan bizonyos modellek kiugróan magas melegedést prognosztizálnak, mely akár az 5,3 °C-ot is elérheti.

- 4) A várható csapadékváltozások közül inkább a távolabbi jövőre vonatkozóan valószínűsíthetünk szignifikáns tendenciákat. Télen összességében a csapadék növekedése, nyáron pedig a klíma szárazabbá válása prognosztizálható (31. ábra).



31. ábra: A 2021-2050 és 2071-2100 időszakra vonatkozó várható évszakos csapadékváltozás értékei a különböző GCM meghajtású szimulációk szerint (referencia időszak: 1961-1990)

- 5) Az eredményeinket összevetettük a PRUDENCE projekt és az ELTE-n lezajló korábbi éghajlatkutató vizsgálatok eredményeivel. Számottevő különbséget nem találtunk.

Irodalomjegyzék

- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2007a): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research*, 5, pp. 1-17.
- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2007b): A 21. század végén várható regionális éghajlatváltozás Magyarországon. *Földrajzi Értesítő*. LVI., 3-4. szám, pp. 147-168.
- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2007c): A hőmérsékleti extrémumok várható alakulása a Kárpát-medence térségében a XXI. század végén. „Klíma-21” Füzetek, 51. szám, pp. 3-17.
- Bartholy, J., Pongrácz R., Gelybó Gy. (2008a): Milyen mértékű éghajlatváltozás várható a Kárpát-medencében? *Léggör*, 53/2., pp. 19-24.
- Bartholy, J., Pongracz R., Gelybó Gy., Szabó P. (2008b): Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. *Időjárás*, 112, pp. 249-264.
- Déqué M., Marquet P., Jones R.G., (1998): Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation mode. *Climate Dyn.*, 14, pp. 173-189.
- Dévényi, D., Gulyás, O., (1988): *Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában.*, Tankönyvkiadó, Budapest., 443 p.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J.F.B., Wood, R.A., (2000): The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, pp. 147-168.
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation., *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, 113 p.
- van der Linden P., and 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, UK., 160 p.
- Nakicenovic, N., Swart, R., eds. (2000): *Emissions Scenarios. A special reports of IPCC Working Group III.* Cambridge University Press, UK., 570 p.

- Szabó, P. (2007): A Kárpát-medence térségében 2071-2100-ra várható regionális klímaváltozás elemzése a PRUDENCE-eredmények felhasználásával. ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (diplomamunka), 56 p.
- Uppala, S. M.; Kallberg, P. W.; Simmons, A. J.; Andrae, U.; Bechtold, V. D.; Fiorino, M.; Gibson, J. K.; Haseler, J.; Hernandez, A.; Kelly, G. A.; Li, X.; Onogi, K.; Saarinen, S.; Sokka, N.; Allan, R. P.; Andersson, E.; Arpe, K.; Balmaseda, M. A.; Beljaars, A. C. M.; Van De Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Caires, S.; Chevallier, F.; Dethof, A.; Dragosavac, M.; Fisher, M.; Fuentes, M.; Hagemann, S.; Holm, E.; Hoskins, B. J.; Isaksen, I.; Janssen, P. A. E. M.; Jenne, R.; McNally, A. P.; Mahfouf, J. F.; Morcrette, J. J.; Rayner, N. A.; Saunders, R. W.; Simon, P.; Sterl, A.; Trenberth, K. E.; Untch, A.; Vasiljevic, D.; Viterbo, P.; Woollen, J. (2005): The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, pp. 2961-3012.
- Roeckner E., Bauml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblueh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U., Tompkins A., (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM-5: Model description., Max Planck-Institut für Meteorologie, MPI Report 349, 140 p.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., Schulzweida, U., (2006): Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model., *J. Climate*, 19, pp. 3771-3791.
- Rowell, D.P., (2005): A scenario of European climate change for the late 21st century: seasonal means and interannual variability. *Climate Dynamics*, 25, pp. 837-849.
- Simmons, A. J., Burridge, D. M., Jarraud, M., Girard, M. & Wergen, W. (1989). The ECMWF medium-range prediction model's development of the numerical formulations and the impact of increased resolution. *Meteorol., Atmos. Phys.*, 40, pp. 28–60.
- Torma Cs., Bartholy J., Pongracz R., Barcza Z., Coppola E., Giorgi F., (2008): Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás*, 112 (No.3-4.), pp. 233-247.
- Yessad K., (2010): Basic about ARPEGE/IFS, ALADIN and AROME in the cycle 37 of ARPEGE/IFS., 72p.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozathoz szükséges kutatásokat az alábbi pályázatok támogatták: az OTKA T-049824 és K-78125 számú pályázatait, az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című (2006/TKI/246) programja, a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, az NKFP-3A/0082/2004 és az NKFP-6/079/2005 pályázat, az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), valamint az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozása (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003). A felhasznált regionális klímamodell-szimulációkat az ENSEMBLES projekt (505539) keretében állították elő, melyet az EU FP6 integrált program támogatott.

Szeretnék ezen kívül köszönetet mondani Pongrácz Rita és Bartholy Judit tanárnőknek valamint Pieczka Ildikónak a kitartó fáradtságos munkájért, hogy dolgozatomban segítettek, javították és tökéletesítették.