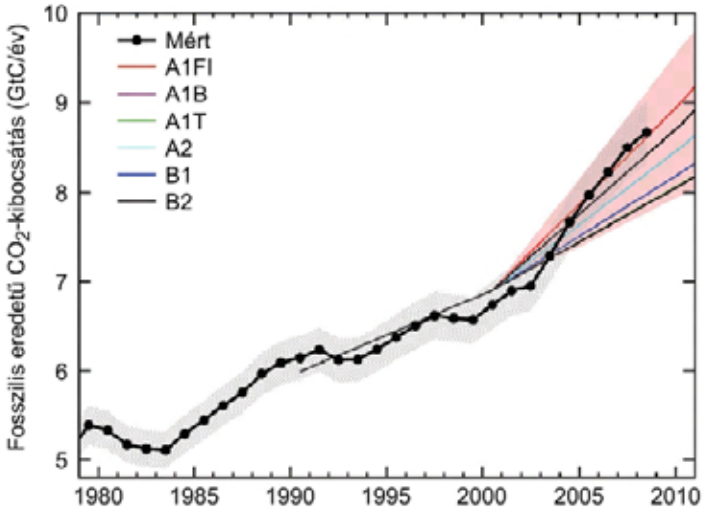
EXTRÉM ESEMÉNYEK VÁRHATÓ VÁLTOZÁSA REGIONÁLIS KLÍMAMODELL-EREDMÉNYEK ALAPJÁN

K-78125 számú OTKA pályázat

KUTATÁSI ZÁRÓJELENTÉS
2009-2013

Vitathatatlan tény, hogy a Föld felszínközeli légrétege melegszik, valamint számos üvegházhatású gáz koncentrációja emelkedett az utóbbi egy-két évszázadban. E változások mértéke sokkal nagyobb annál, mint amit a természetes folyamatok indokolhatnának, illetve az általunk belátható földtörténet során valaha is bekövetkezett. Az elmúlt 800 ezer évre vonatkozó jégfuratminták elemzéséből tudjuk, hogy míg ebben a hosszú időszakban a szén-dioxid koncentráció 170–300 ppm intervallumban mozgott, addig az elmúlt két évszázadban 280 ppm-ről 400 ppm-re nőtt, s az optimista becslések szerint sem valószínű, hogy a XXI. század végére 560 ppm alatt tartható. Miért érdekes számunkra a légköri szén-dioxid gáz – akár kétszeresre növekvő – koncentrációváltozása, mely jelenleg a légkör 0,04%-át sem teszi ki? Az üvegházhatás 33 °C-kal növeli a felszínközeli átlaghőmérsékletet, enélkül nem lenne lakható a Föld. Amennyiben ennyire fontosak az üvegházhatású gázok, köztük a szén-dioxid, akkor hogyan lehetséges, hogy nagymértékű koncentrációnövekedésük csak néhány tizedfokos globális melegedést (0,74 °C-ot 1906–2005 között) okozott a légkör felszínközeli rétegeiben? Egyrészt jelentős mértékben csökkentette az üvegházgázok melegítő hatását az ugyancsak antropogén eredetű légszennyezés növekedése, mely az aeroszolkoncentráció emelkedését eredményezte (az aeroszolrészecskék fokozódó légköri jelenléte hűtő hatást vált ki). Másrészt, az elmúlt 50 évben az üvegházhatású gázok koncentrációnövekedése miatt megjelenő többletenergia nagy része, mintegy 84%-a az óceánnak adódott át, további 7%-a, illetve 5%-a a tengeri jég és a gleccserek olvadására, illetve a szárazföldek melegítésére használódott fel, s csupán 4%-a maradt a légkörben.

A 2001-ben, illetve 2007-ben megjelent átfogó IPCC-jelentések az ún. SRES szcenáriókat használták. Ezeket a kibocsátási forgatókönyveket Nakicenovic és Swart 2000-ben tette közzé, s az akkori elképzelések szerint a XXI. századra vonatkozó népességalakulási és gazdasági növekedési becslések alapján határozták meg az optimista, közepesnek tekinthető, valamint pesszimista kibocsátási tendenciákat. Az azóta eltelt időszakban nyilvánvalóvá vált, hogy a közelmúlt valódi kibocsátásai még a legpesszimistább becslést is meghaladják (1. ábra), s a 2013-2014 során megjelenő újabb IPCC-jelentésekben már új közelítés szerepel a jövőre vonatkozóan.



1. ábra. A fosszilis tüzelőanyag felhasználásából eredő szén-dioxid globális kibocsátásának alakulása, 1980–2008. (Le Quéré et al., 2009)

Jelen kutatás során a Magyarországra vonatkozó múltbeli és jövőben várható tendenciákat vizsgáltuk, elemeztük a nemzetközi és hazai klímamodellezési eredmények alapján. A beszámolóban elsőként a felhasznált klímamodellek rövid bemutatása szerepel, majd a hőmérsékleti extrémumokkal kapcsolatos eredményeinket foglaljuk össze, s ezt követően a csapadékra vonatkozó legfontosabb eredményeket összegezzük.

1. Felhasznált klímamodellek

A kutatás során egyrészt már lezárult nemzetközi (európai) projektek – a PRUDENCE és az ezt követő ENSEMBLES – online elérhető modellfuttatásait, másrészt saját modellfuttatások output mezőit használtuk fel.

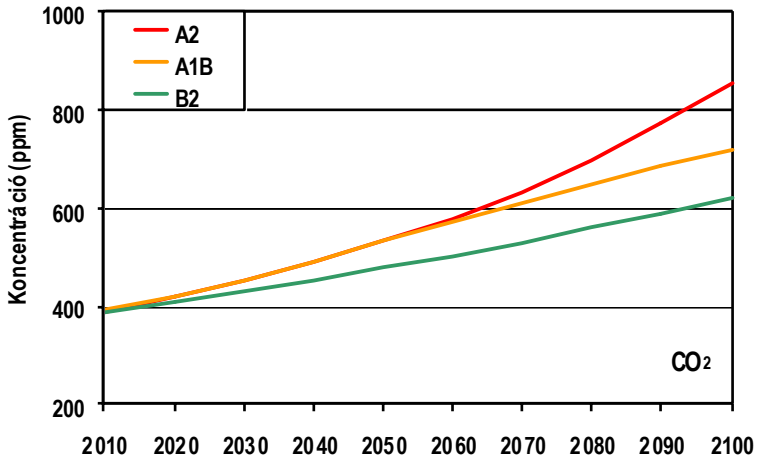
1.1. PRUDENCE outputok

A PRUDENCE projektben (http://prudence.dmi.dk/) kilenc Európai Uniós országból összesen 21 egyetem, nemzeti meteorológiai szolgálat és kutatóintézet vett részt, a projekt vezetője a Dán Meteorológiai Intézet volt, a résztvevők között többek között megtalálhatjuk a brit Hadley Központot, a hamburgi Max Planck Intézetet, valamint a trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központot (Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, ICTP). A regionális modellszimulációk kiindulási- és peremfeltételeihez három globális éghajlati modell – a brit Hadley Központ által kifejlesztett HadCM (Gordon et al., 2000; Rowell, 2005), a német Max-Planck Intézet által fejlesztett ECHAM (Roeckner et al., 2003; 2006) és a francia Météo-France modellje, az ARPEGE (Déqué et al., 1998) – outputjait használták fel. A szimulációk során mindösszesen 10 regionális éghajlati modell került alkalmazásra (Christensen, 2005). A futtatásokban a teljes európai térségre egységesen 50 km-es horizontális felbontást alkalmaztak. Minden esetben az éghajlati szimulációk referencia időszaka 1961-1990 volt, az éghajlati projekciók célidőszaka pedig 2071-2100. A regionális modellek mindegyikét az A2 szcenárióra futtatták, s ahol csak lehetőség volt rá, a B2 szcenárióra is. Az A2 szcenárió a világ sokféleségének megmaradásával, valamint az emberiség lélekszámának állandó, de lassú növekedésével számol. A gazdasági és technikai fejlődés várhatóan minden földrajzi régióban érvényesül, de az összes forgatókönyv közül ez esetben a leglassabban (Nakicenovic és Swart, 2000). 2100-ra a globális szén-dioxid szint 850 ppm-re történő növekedését feltételezi, mely az ipari forradalom előtti légköri mennyiség közel háromszorosa. A B2 szcenárió a felmerülő környezeti és társadalmi problémák regionális szintű megoldását helyezi előtérbe. A földi népességszám várhatóan növekszik, de az A2 feltételezésénél lassabban. A gazdasági növekedés közepes ütemű, a technológiai változások visszafogottabbak, ugyanakkor szerteágazóbbak, mint a másik három alapszcenárió esetén (Nakicenovic és Swart, 2000). Még ez az optimistának tekinthető B2 szcenárió is a szén-dioxid globális koncentrációjának 600 ppm-re, vagyis az ipari forradalom előtti szint több mint kétszeresére történő növekedével számol a XXI. század végére.

1.2. ENSEMBLES outputok

A 2004-2009 között futó, átfogó ENSEMBLES projekt (http://ensemblesrt3.dmi.dk/) során 25 km-es horizontális felbontást alkalmazó RCM-ek 1951-2100 közötti szimulációit készítették el a teljes európai térségre (van der Linden és Mitchell, 2009). A projektet a Brit Meteorológiai Szolgálat vezette. A kutatásban összesen 20 ország 66 intézete vett részt, legfőképp Európából, s az egész világról (pl. USA, Japán, Ausztrália) csatlakoztak támogató partnerek. A vizsgálatokat a résztvevőkön kívül további 30 (főként európai) szervezet munkatársai végezték. A szimulációs futtatásokhoz az RCM-ek számára szükséges meghajtó kezdeti- és peremfeltételeket a PRUDENCE-ben is alkalmazott három GCM szolgáltatta. Ezúttal viszont a szimulációk

mindegyike a közepesnek tekinthető A1B szcenáriót (Nakicenovic és Swart, 2000) vette figyelembe. Ez a globális emisszió-szcenárió azt feltételezi, hogy a Föld teljes népessége néhány évtizeden belül mintegy 9 milliárdra növekszik, majd ezt követően a XXI. század végére fokozatosan 7 milliárdra csökken. Az A1B szcenárió gyors gazdasági és technológiai fejlődést prognosztizál, s a becslések szerint az ehhez szükséges energiaigényt a fosszilis tüzelőanyagok és a megújuló/nukleáris energiahordozók közel hasonló arányban fogják fedezni. Ez a lehetséges forgatókönyv a légköri szén-dioxid koncentráció-szintjének valamelyest lassuló ütemű növekedését vetíti előre, mely 2100-ra meghaladhatja a 715 ppm-et (Nakicenovic és Swart, 2000).



2. ábra. A szén-dioxid becsült koncentráció-változásai 2010-2100 időszakban az A2, A1B és B2 szcenáriók alapján.

1.3. PRECIS outputok

A különböző emisszió-forgatókönyvek (2. ábra) alkalmazásával kapott regionális klímaszcenáriók összehasonlító vizsgálata során a Brit Meteorológiai Szolgálat Hadley Központjának HadCM3 (Gordon et al., 2000) második generációs globális csatolt óceán-légkör modelljét alkalmaztuk a Közép-Európa térségét lefedő RCM meghajtására. A GCM légköri és óceáni almodelljének horizontális felbontása egyaránt 2,5º×3,75º a szélességek, illetve a hosszúságok mentén (azaz összesen 96×73 rácspontra adja meg a globális légköri paramétereket). Ez a felbontás az Egyenlítőnél 417 km×278 km-es, míg a 45°-ös szélességi fokon 295 km×278 km rácshálózatot jelent. A HadCM3 vertikálisan 19 légköri, illetve 20 óceáni szintet tartalmaz. Ebbe a GCM-be ágyazva alkalmazható a PRECIS regionális modell a Föld bármely térségére (Wilson et al., 2010). A fejlesztők ajánlásai szerint a kiválasztott térség kiterjedése lehetőleg ne haladja meg az 5000×5000 km^2-t. A választható rácsfelbontás 0,22° (~25 km) vagy 0,44° (~50 km). A modellfejlesztés célja az volt, hogy nemzeti éghajlatváltozási hatástanulmányok készítéséhez adjanak közre egy olyan eszközt, amely jól alkalmazható érzékenységvizsgálatokhoz, regionális adaptációs elemzésekhez. A peremfeltételeket a definiált modell-domain oldalsó széleinél kell megadni, míg a domain felső határára nincs külső betáplált kényszer. Oldalsó peremfeltételekként a felszíni légnyomást, a horizontális szélsebesség-komponenseket, a léghőmérsékletet és a légnedvességadatokat kell megadnunk.

A PRECIS modell részletesen tartalmazza a sugárzási egyenleg komponenseit, a légköri mozgásrendszerek dinamikai folyamatait, a felhő- és csapadékképződést, a kén körforgalmát, valamint a talajhidrológiai folyamatokat. A korlátos tartományú modell számára szükséges peremfeltételeket reanalízis mezősorok vagy egy globális modellből származó rácsponti adatsorok is adhatják. A PRECIS-ben szereplő felszínborítottsági mező mérési eredmények felhasználásával készült, s a modellfuttatáshoz szükségesek a vízfelszínek hőmérsékleti és jégborítottsági idősorai.

Jelen kutatásban vizsgálataink során a PRECIS regionális modell 1.8. verzióját (Wilson et al., 2010) alkalmaztuk. A kezdeti- és peremfeltételeket egyrészt az ERA40 (1961–1990), másrészt a

HadAM3P globális klímamodell (1961–1990, 2071–2100 A2 és B2 szcenárió), illetve a HadCM3 globális klímamodell (1951–2100, A1B szcenárió) szolgáltatta hat órás időlépcsővel. Modellfuttatásainkat Közép-Kelet-Európára, egy 123×96 rácspontból álló rácshálózatra végeztük, mely térség sarokpontjai a következők:

ÉNy: 53,39°É, 2,27°K
DNy: 39,57°É, 3,83°K
ÉK: 50,27°É, 34,38°K
DK: 37,20°É, 27,94°K

A regionális modell által alkalmazott horizontális felbontás 0,22°, az integrálási időlépcső pedig 5 perc. Az eredményeket napi felbontásban állnak rendelkezésre összesen 173 különböző meteorológiai és éghajlati változóra. A PRECIS modell felpörgési ideje 2 év, ezért a szimulációs futtatás első két évét nem vettük figyelembe az elemzések során.

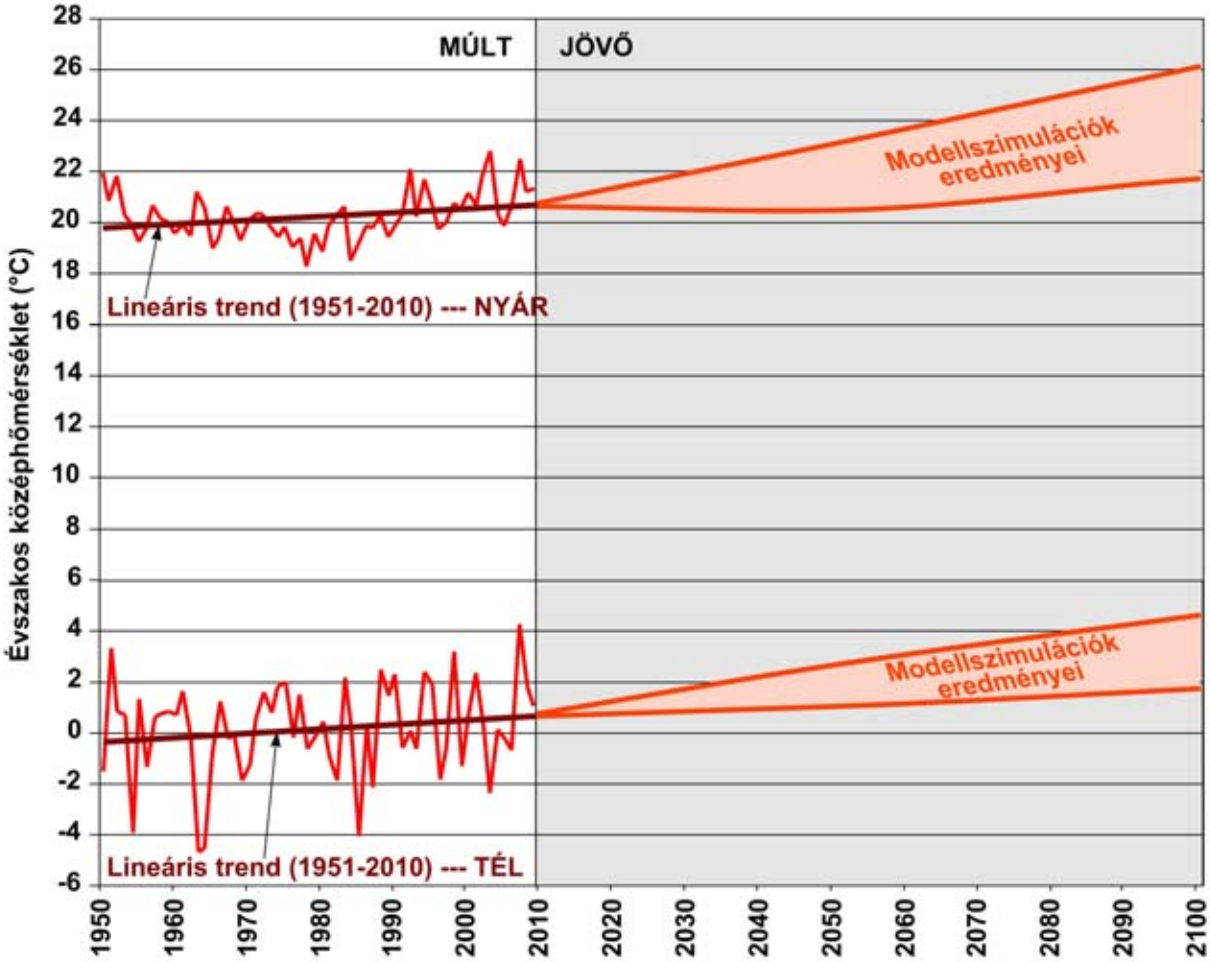
1.4. RegCM outputok

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén a CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment, http://www.cecilia-eu.org) Európai Uniós projekt keretében került sor a RegCM regionális modell adaptálására a Kárpát-medence térségére (Torma et al., 2008). A 120×100 rácspontot tartalmazó integrálási tartományt a következő sarokpontok jelölik ki: 51,0°É, 11,4°K, és 43,8°É, 25,8°K. A RegCM futtatások számára szükség kezdeti- és határfeltételeket a hamburgi ECHAM5 (Roeckner et al., 2003, 2006) globális modell biztosította. Vizsgálataink során az A1B globális emisszió szcenárió (Nakicenovic és Swart, 2000) figyelembevételével készítettük el a modellszimulációkat.

A RegCM regionális klímamodellt eredetileg az amerikai Légköri Kutatások Nemzeti Központjában (National Center for Atmospheric Research, NCAR) fejlesztették ki az 1980-as évek végén (Dickinson et al., 1989, Giorgi, 1989). A klímamodell dinamikai alapja egy összenyomható, véges differenciál közelítést alkalmazó hidrosztatikus modell (Giorgi et al., 1993a; 1993b). Vizsgálatainkhoz 10 km-es horizontális felbontással, 18 vertikális szintre a 3-as verziószámú RegCM (RegCM3) modellt alkalmaztuk, mely magában foglalja az ún. Bioszféra-Légkör-Transzfer-Sémát, BATS (Dickinson et al., 1993) a felszíni folyamatok kezelésére. A határréteg fizikáját a Holtslag et al. (1990) által kidolgozott séma szerint kezeli a modell. További fizikai parametrizációs eljárásokat is tartalmaz a modell: például sugárzás átviteli csomagot (Kiehl et al., 1996), a nagyskálájú felhőzet és csapadék sémát (Pal et al., 2000), valamint a konvektív csapadékot előidéző folyamatokat leíró Grell (1993) sémát. A modell jelenleg a trieszti Elméleti Fizikai Kutatóintézeten (ICTP) keresztül hozzáférhető.

2. Hőmérséklet

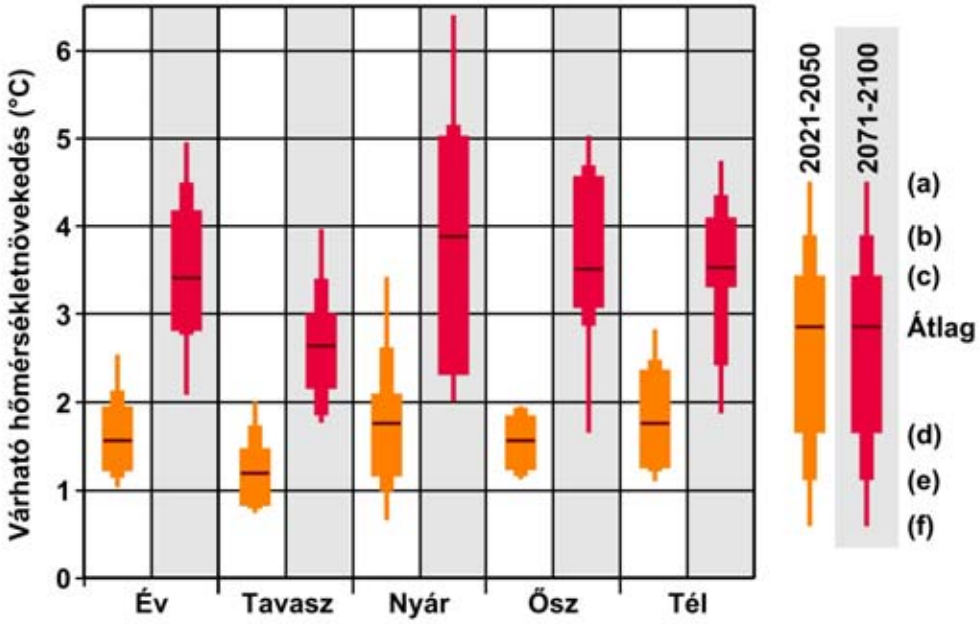
A hőmérséklettel kapcsolatos hazai extrémumok várható tendenciája szorosan kapcsolódik az általános melegedési trendhez. A jövőre vonatkozó évszakos melegedés várhatóan nyáron lesz a legnagyobb mértékű, egyes modellszimulációk jelzése szerint a jelenleginél átlagosan akár 6 °C-kal melegebb nyarak is előfordulhatnak Magyarországon (Pongrácz et al., 2011). A becsült jövőbeli tendenciák és a XX. század második felétől napjainkig bekövetkezett múltbeli változást hasonlíthatjuk össze a 4. ábrán nyárra, illetve télre. Jól látszik, hogy habár a lineáris trendegyüttható nagyjából megegyezik, a nyári középhőmérsékletek évek közötti változékonysága kisebb, mint a télieké. Ugyanakkor a jövőre vonatkozó modellszimulációk becslései nyáron mutatnak nagyobb bizonytalanságot.



4. ábra. A XX. század közepétől napjainkig detektált nyári és téli melegedés Magyarország térségére és a XXI. századra várható hőmérsékleti tendenciák az A1B szcenárióra vonatkozó modellszimulációk eredményei alapján. A grafikon a napi középhőmérséklet évszakos átlagaira vonatkozik. A múltra vonatkozó idősor az E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008) alapján készült.

Az ENSEMBLES projekt keretében futtatott regionális éghajlati modellek összesen 11 szimulációját felhasználva elemeztük a napi középhőmérséklet XXI. századra várható alakulását. Ehhez az 1961-1990 referencia időszakot hasonlítottuk össze a közelebbi és a távolabbi jövőt reprezentáló 2021-2050, illetve 2071-2100 időszakkal. Az A1B szcenárió figyelembevételével a hazai rácspontokra számított éves és évszakos átlagos hőmérsékletváltozásokat foglalja össze az 5. ábra. Az egyes oszlopok jelzik a jövőre vonatkozó becslések bizonytalanságát: minél nagyobb az oszlop magassága, annál jobban szóródnak a jövőre vonatkozó becslések. A legvékonyabb vonalak hossza az összes modellbecslés teljes tartományát lefedik. A vékonyabb téglalapok a várható melegedés 82%-os valószínűségi tartományát jelölik ki. A vastagabb téglalapok (a négy

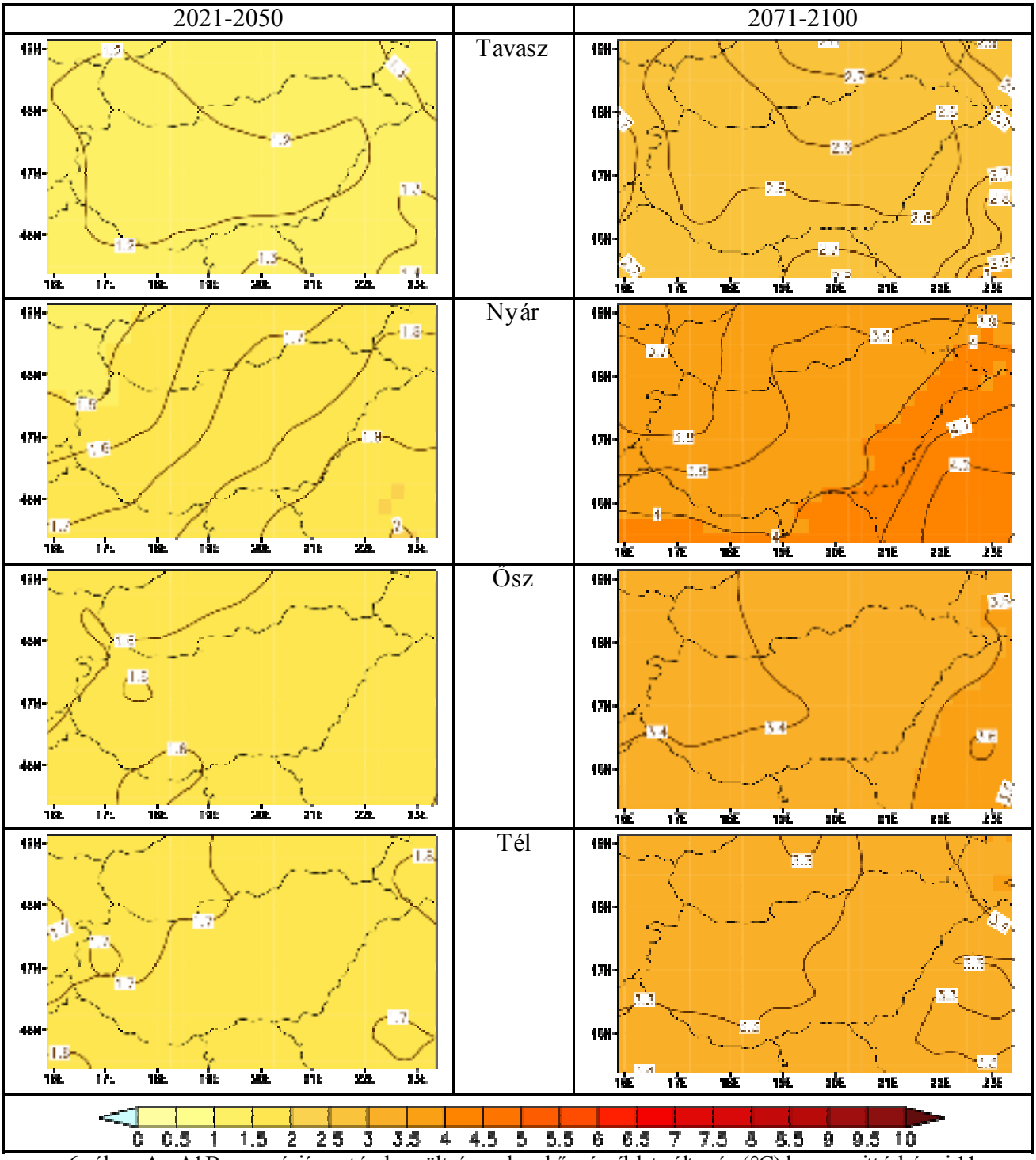
legszélsőségesebb modellbecslés elhagyásával) a 64%-os valószínűségi tartományt jelenítik meg sárgával a 2021-2050 időszakra, pirossal a 2071-2100 időszakra.



5. ábra. Magyarországra várható átlagos éves és évszakos melegedés 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra az A1B szcenárió esetén, referencia időszak: 1961-1990. A legszélesebb téglalapok – (c) és (d) között – által jelzett változási intervallumok a várható változásokat 64%-os valószínűséggel tartalmazzák, a vékonyabb téglalapok – (b) és (e) között – 82%-os valószínűséggel, a vékony vonalak – (a) és (f) között – az összes rendelkezésre álló modellbecslést figyelembe veszik.

A várható globális változások tükrében nem meglepő, hogy az évszázad közepére prognosztizált melegedés mértéke hazánk térségében is kisebb, mint az évszázad végére becsült. Jól látható az is, hogy a különböző modellek által a közeljövőre valószínűsített hőmérsékletváltozások nagyon kis mértékben térnek el egymástól, s a bizonytalanság nagyobb a távolabbi jövőben. 2021-2050 időszakra az éves átlaghőmérsékletben 1-2,5 °C-os emelkedésre számíthatunk az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyítva, míg a 2071-2100 időszakra ez az érték 2-5 °C. A becsült melegedés mértéke, s egyben annak bizonytalansága is nyáron a legnagyobb.

A XXI. század közepére és végére az A1B szcenárió esetén várható évszakos melegedés területi eloszlását a 6. ábra térképsorozata részletesebben is szemlélteti. Jól látható, hogy a négy évszak közül egyértelműen nyáron várható a legnagyobb mértékű hőmérsékletnövekedés. A várható évszakos melegedés területi eloszlását tekintve a 11 felhasznált modellszimuláció meghajtó GCM-enként súlyozott átlagaként becsült hőmérsékletnövekedés ebben az évszakban északnyugatról délkelet felé haladva egyre növekszik.



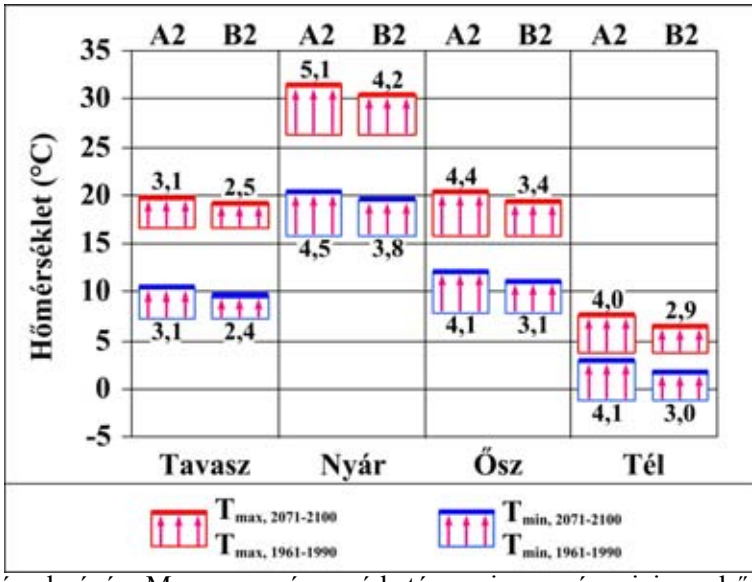
6. ábra. Az A1B szcenárió esetén becsült évszakos hőmérsékletváltozás (°C) kompozittérképei 11 modellszimuláció eredményei alapján, referencia időszak: 1961-1990

A hazai napi maximum- és minimumhőmérséklet várható évszakos változásaira vonatkozóan az A2 és B2 szcenáriók figyelembevételével készült becslések eremény eit az 1. táblázatban és a 7. ábrán összegezzük. A várható évszakos változásokat. Az 1. táblázatban a Magyarország teljes területére készített kompozittérképek alapján a maximum- és minimumhőmérsékletek várható évszakos változásának országon belüli legkisebb és legnagyobb mértékét foglaljuk össze. A legnagyobb melegedés mindkét szcenárió és mindkét hőmérsékleti változó esetén nyáron várható: a maximumhőmérsékletek várható növekedése 4,9-5,4 °C (A2), illetve 4,0-4,4 °C (B2), a minimumhőmérsékleteké: 4,2-4,8 °C (A2 esetén), illetve 3,5-4,0 °C (B2 esetén). A nyári várható melegedés térbeli eloszlása egyértelműen zonális szerkezetet mutat, északról dél felé haladva egyre nagyobb hőmérséklet-növekedésre számíthatunk. A többi három évszakban általában nyugat-keleti

gradiens jellemző, s a változás mértéke várhatóan nagyobb lesz a keleti országrészben. A 7. ábrán az országos átlagokat szemléltetjük évszakonként és szcenáriónként. A kis téglalapok alsó oldala a napi maximum-, illetve minimumhőmérsékletek referencia időszakra vonatkozó országos átlagértékét, míg a felső, vastagított oldala a 2071-2100 jövőbeli időszakra vonatkozó várható átlagértéket mutatja. A téglalapok belsejében lévő nyilak a várható változás irányát, a fölé, illetve alá írt számértékek pedig a várható hőmérsékletemelkedés országos átlagát jelenítik meg. Amint a számértékekből kitűnik, a minimumhőmérsékletek valószínűsíthető növekedése általában (tél kivételével) kisebb, mint a maximumhőmérsékleteké, mely arra utal, hogy a napi hőingás mértéke várhatóan növekszik a jövőben.

1. táblázat: A 2071-2100 időszakra Magyarországra várható átlagos évszakos emelkedés értékei a napi maximum- és minimumhőmérsékletekre (referencia időszak: 1961-1990). Az intervallumok a Magyarország területén az adott évszakban várható legkisebb és legnagyobb átlagos értéket jelzik a PRUDENCE projekt keretében végzett RCM szimulációk eredményei közül.

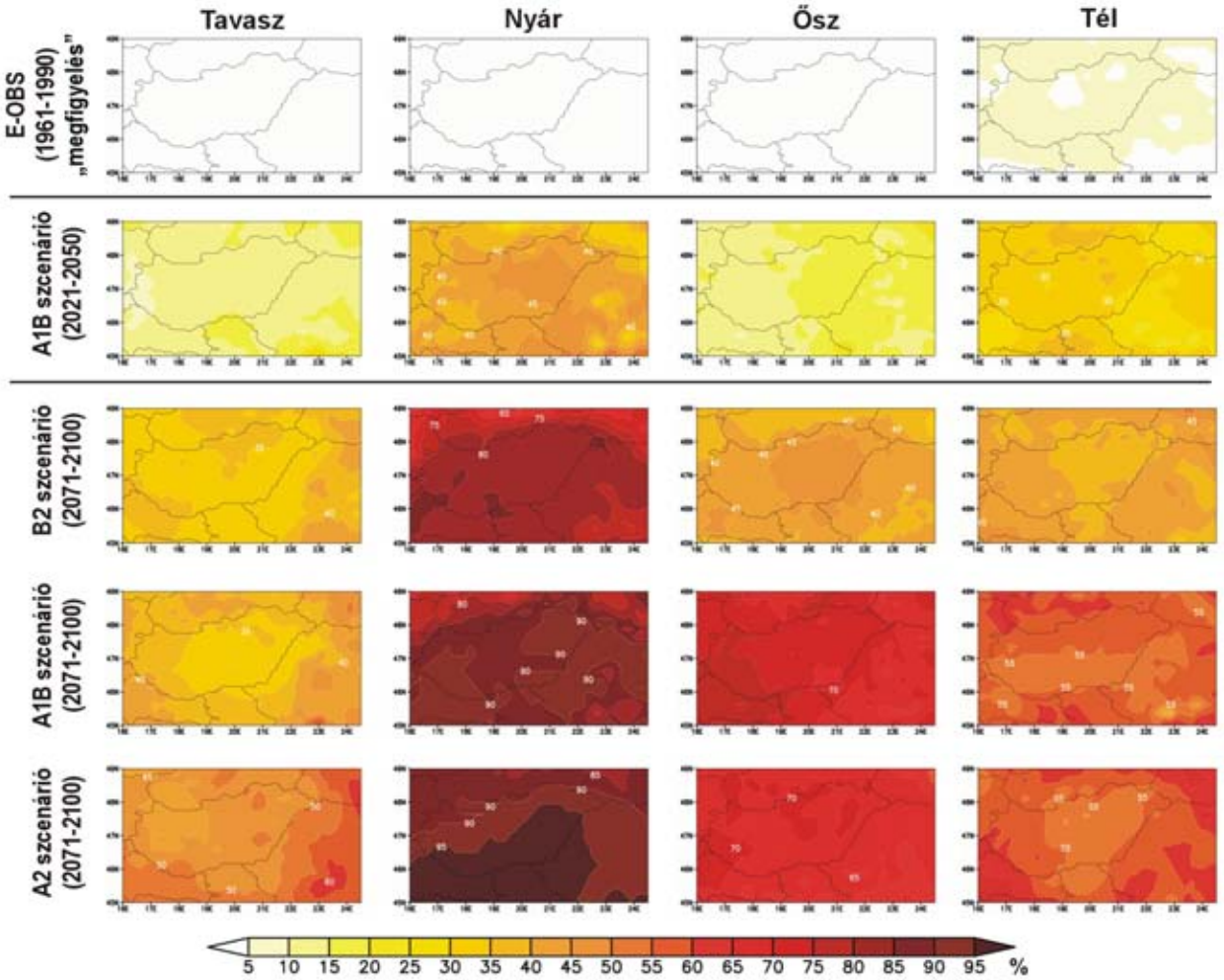
	Szcenárió	Tavasz (MÁM)	Nyár (JJA)	Ősz (SzON)	Tél (DJF)
Maximum	A2	2,8-3,3 °C	4,9-5,4 °C	4,3-4,6 °C	3,7-4,2 °C
	B2	2,4-2,6 °C	4,0-4,4 °C	3,3-3,5 °C	2,6-3,0 °C
Minimum	A2	3,0-3,2 °C	4,2-4,8 °C	4,0-4,2 °C	3,8-4,6 °C
	B2	2,3-2,7 °C	3,5-4,0 °C	3,0-3,2 °C	2,8-3,5 °C



7. ábra. A XXI. század végére Magyarországra várható maximum- és minimumhőmérséklet-változás évszakos átlagos értékei (az A2 szcenárió esetén 16, a B2 szcenárió esetén 8 modellszimuláció eredményei álltak rendelkezésre a PRUDENCE projekt keretében végzett futtatásokból). Az 1961-1990 közötti referencia-időszak hőmérsékletei a Budapesten mért értékeket jelzik.

A hatásvizsgálatok szempontjából jól használható, átfogó információkat szolgáltat a következő elemzés (Bartholy et al., 2011). A vizsgálat során mindenegyes rácspontra meghatároztuk, hogy a szimulált hőmérsékleti idősorok alapján a referencia időszak (1961–1990) havi átlagaitól vett eltérés bizonyos küszöbértékeket milyen gyakorisággal fog meghaladni a jövőben. A kapott eredményeket évszakos bontásban, térképes formában ábrázoltuk. A szimulált mezőkből meghatározott információt kiegészítettük a referencia időszak havi anomáliáit figyelembe vevő évszakos térbeli eloszlást illusztráló térképekkel. Példaként a 8. ábra a +4 °C-nál nagyobb hőmérsékleti anomáliák előfordulási gyakoriságának területi eloszlását jeleníti meg évszakos bontásban a jelen (1961–1990) klimatikus viszonyok mellett, valamint a 2021–2050 és a 2071–2100 jövőbeli időszakokra. A felhasználók számára értékes információt adhat, hogy az adott küszöbértékek túllépésének gyakorisága az ország mely területein milyen mértékben változhat a

jövőben. A múltban a téli hónapokban a +4 °C-ot meghaladó pozitív anomáliák a teljes időszak 5–10%-ában fordultak elő, az év többi részében a jelenség előfordulásának gyakorisága még az 5%-ot sem érte el. A PRECIS modellszimulációk szerint mindkét vizsgált jövőbeli időszakban igen jelentős lesz a múltbeli átlagos hőmérsékletnél legalább +4 °C-kal magasabb havi átlaghőmérsékletek előfordulási gyakorisága. A 2071–2100-ra télen várható változás kisebb mértékű (35–60% közötti), mint a nyáron várható (80–100%), ez igaz minden szcenárió esetén. A közelebbi jövőben várható változás még kisebb mértékű (2021–2050-re télen 30–40%, míg nyáron 35–50%). A térbeli szerkezetben nyáron megfigyelhető É-D irányú gradiens a délebbi területek nagyobb melegedését valószínűsíti.



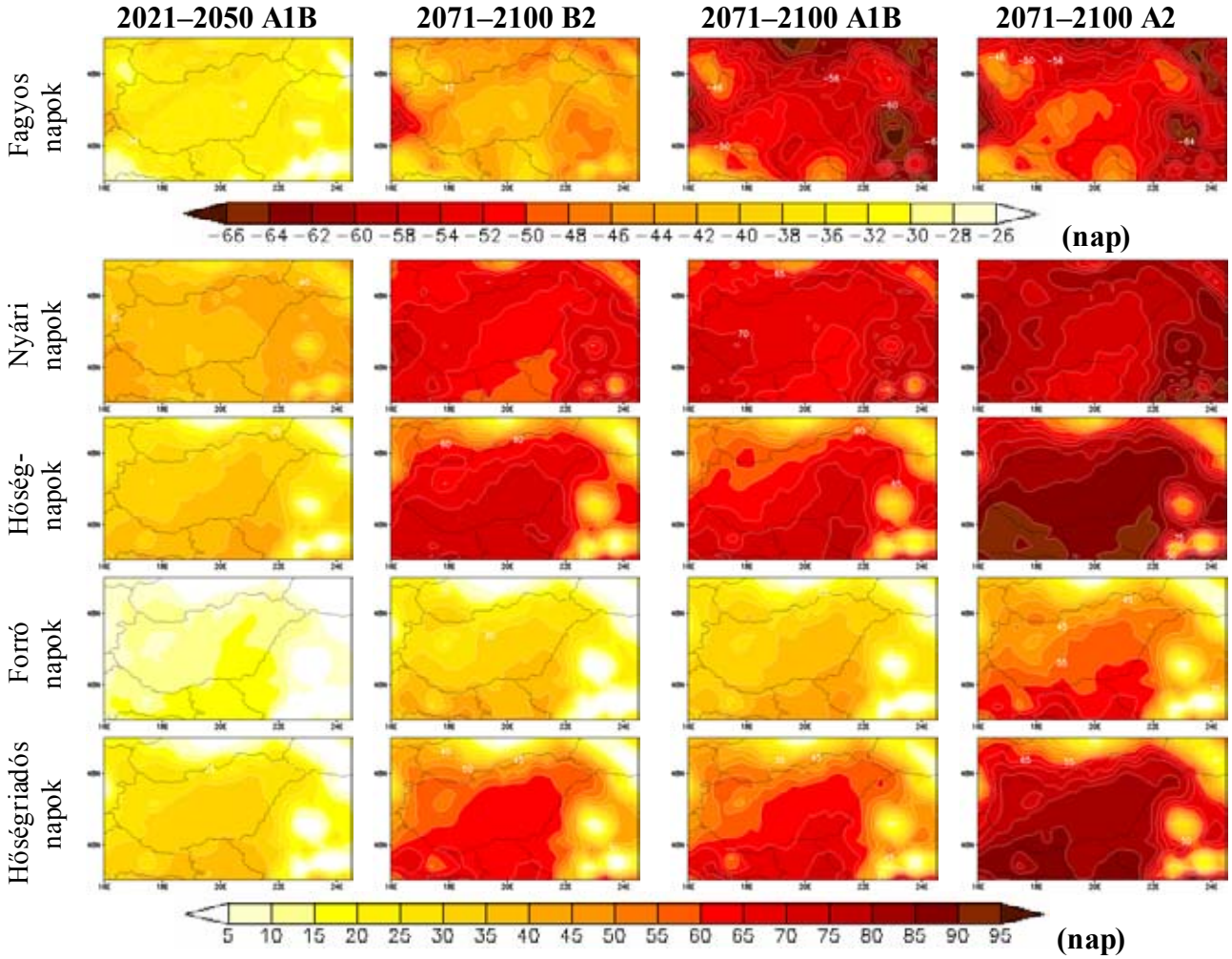
8. ábra: Az 1961–1990 referencia-időszak átlagos hőmérsékleti értékeihez viszonyítva +4 °C-nál nagyobb havi hőmérsékleti anomáliák előfordulási gyakorisága tavasszal, nyáron, ősszel és télen, PRECIS szimulációk alapján (Bartholy et al., 2011)

Az éghajlat regionális változásának vizsgálatakor nem csak az átlagértékek elemzése fontos, hanem az alkalmazkodás szempontjából kiemelt jelentősége van a szélsőségeknek is. Ezek elemzéséhez például olyan extrém éghajlati indexeket (Karl et al., 1999; Bartholy és Pongrácz, 2007) használhatunk fel, melyek valamilyen előre definiált küszöbérték átlépésének gyakoriságát vagy tartamát mérik. Az indexek múltbeli magyarországi átlagos éves értékeit, valamint a PRECIS-szimulációk alapján a jövőre várható megváltozásukat a 2. táblázat foglalja össze. Mindhárom forgatókönyv esetén a negatív hőmérsékleti extrémumok előfordulásának csökkenését és a pozitív extrémumok gyakoribbá válását jelzik előre a modellszimulációk. A várható változás mértéke a közeljövőre vonatkozóan megközelítőleg a fele a távoli jövőre számított változás értékének, és a legtöbb index esetén a legnagyobb változások az A2 forgatókönyv megvalósulása esetén várhatók, az A1B és B2 szcenáriók sokkal kisebb változásokat valószínűsítenek.

2. táblázat: Hőmérsékleti indexek múltbeli (1961–1990) előfordulásának és jövőbeli várható változásának magyarországi átlaga a PRECIS modellszimulációk alapján

	Átlagos érték (nap)	**Átlagos változás (nap)**			
Hőmérsékleti index (Definíció)	**1961–1990 E-OBS**	**2021–2050 A1B**	**2071–2100 B2**	**2071–2100 A1B**	**2071–2100 A2**
Fagyos napok száma (T_{min} < 0 °C)	93	–35	–43	–54	–51
Nyári napok száma (T_{max} > 25 °C)	67	38	66	68	76
Hőségnapok száma (T_{max} > 30 °C)	14	34	68	65	86
Forró napok száma (T_{max} > 35 °C)	0,3	12	30	34	53
Hőségriadós napok száma ($T_{közép}$ > 25 °C)	4	30	59	59	80

A 9. ábráról az előbbi összegzésen kívül leolvasható egyfajta zonális elrendeződés is: a délebbi térségekben nagyobb változások valószínűsíthetők. A térképeken az is megfigyelhető, hogy a hegységekben, a magasabban fekvő területeken a meleg hőmérsékleti szélsőségeket jellemző hőségnapok sokkal kisebb mértékű növekedése várható (mely százalékban kifejezve múltbeli előfordulásukhoz képest még így is igen jelentős), a fagyos napok számában várható változás azonban az átlagosnál nagyobb.



9. ábra. Hőmérsékleti indexek várható változása az 1961–1990 referencia időszakhoz képest a különböző kibocsátási forgatókönyveket figyelembevevő PRECIS-szimulációk alapján.

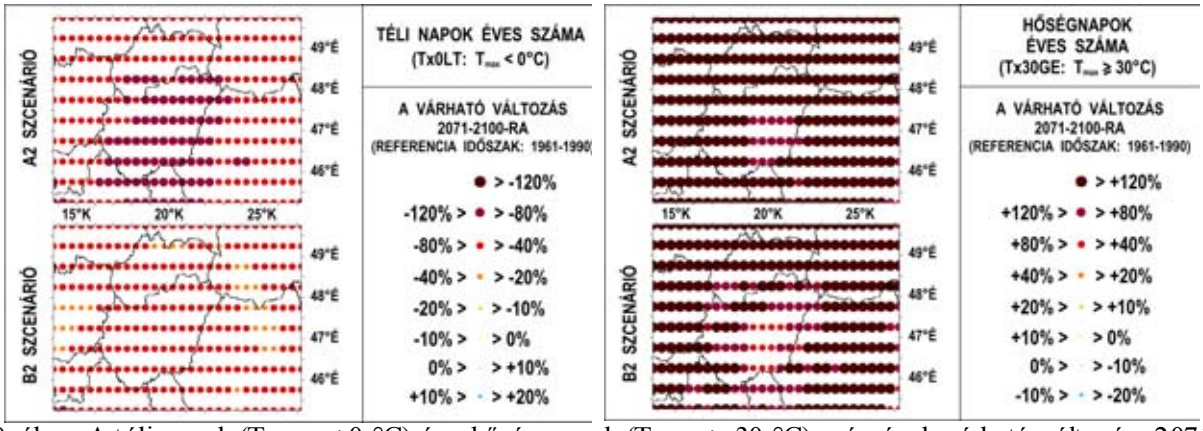
Ugyanezen indexek idősorait előállítottuk a PRUDENCE keretében futtatott regionális klímamodellek szimulációs mezősorait felhasználva is (Bartholy et al., 2008). Példaként ebben az összefoglaló tanulmányban egy olyan modellt választottunk a magyarországi kivágatra számított extrém indexek változásának bemutatására, melyből mind az A2, mind a B2 szcenárióra rendelkezésre állnak futtatási eredmények. A Dán Meteorológiai Intézet (DMI) modellszimulációi a hőmérséklet és a csapadék szempontjából egyaránt átlagosnak vehető a többi PRUDENCE-szimulációhoz viszonyítva. A 3. táblázatban foglaljuk össze az extrém hőmérsékleti indexek várható alakulását a DMI modellszimuláció alapján. A XX. század második felében már elindult és detektálható változások (Bartholy és Pongrácz, 2007) a XXI. század végére várhatóan tovább erősödnek. Az A2 szcenárió esetén nagyobb mértékű változásokra számíthatunk, mint a B2 esetén. Az alacsony hőmérséklettel összefüggő indexek (Tx0LT, FD, Tn-10LT, Tx10, Tn10) jelentős csökkenése és a magas hőmérsékletekhez kapcsolódó indexek (SU, Tx30GE, Tx35GE, Tn20GT, Tx90, Tn90) erőteljes növekedése egyaránt a Kárpát-medence éghajlatának várható melegedésére utal. Különösen jelentős mértékű a forró napok (Tx35GE), a túl meleg éjszakák (Tn20GT) és a hőségnapok (Tx30GE) számának valószínűsíthető emelkedése (melyek az A2 szcenáriót tekintő modellbecslések szerint országos átlagban rendre elérik a 300%-ot, a 229%-ot, illetve a 156%-ot, a B2 szcenárió esetén pedig a 300%-ot, a 169%-ot, illetve a 109%-ot). A hideg téli szélsőségek gyakoriságának várható csökkenése kisebb mértékű, mint a meleg nyári szélsőségek növekedése.

3. táblázat: Extrém hőmérsékleti indexek változása Magyarországra a DMI regionális modellje alapján

Extrém index jele, neve és definíciója	Kontroll-futás: 1961-1990	A2 szcenárió: 2071-2100 (Várható változás)	B2 szcenárió: 2071-2100 (Várható változás)	Detektált tendencia: 1961-2001 (mérések alapján)
SU: Nyári napok száma (T_{max} > 25°C)	80 nap/év	122 nap/év (+54%)	109 nap/év (+37%)	+
Tx30GE: Hőségnapok száma ($T_{max} \geq$ 30°C)	30 nap/év	74 nap/év (+156%)	61 nap/év (+109%)	+
Tx35GE: Forró napok száma ($T_{max} \geq$ 35°C)	4 nap/év	33 nap/év (> +300%)	20 nap/év (> +300%)	+
Tn20GT: Túl meleg éjjelek száma (T_{min} > 20°C)	24 nap/év	75 nap/év (+229%)	62 nap/év (+169%)	+
Tx90: Meleg napok száma ($T_{max} > T_{max,90\%}$)	36 nap/év	80 nap/év (+123%)	68 nap/év (+88%)	+
Tn90: Meleg éjszakák száma ($T_{min} > T_{min,90\%}$)	36 nap/év	88 nap/év (+143%)	75 nap/év (+108%)	+
Tx0LT: Téli napok száma (T_{max} < 0°C)	18 nap/év	3 nap/év (-82%)	6 nap/év (-65%)	–
FD: Fagyos napok száma (T_{min} < 0°C)	73 nap/év	27 nap/év (-64%)	48 nap/év (-37%)	–
Tn-10LT: Zord napok száma (T_{min} < -10°C)	6 nap/év	<1 nap/év (-95%)	1 nap/év (-87%)	–
Tx10: Hideg napok száma ($T_{max} < T_{max,10\%}$)	36 nap/év	10 nap/év (-73%)	20 nap/év (-46%)	–
Tn10: Hideg éjszakák száma ($T_{min} < T_{min,10\%}$)	36 nap/év	9 nap/év (-75%)	17 nap/év (-52%)	–

A 10. ábrán két hőmérsékleti extrémindexben (a téli napok és a hőség napok éves számában) 2071-2100 közötti időszakra várható (s az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyított) változásokat hasonlítjuk össze az A2, illetve a B2 szcenárió esetén. Mindkét paraméternél egyértelmű a jelentős mértékű melegedés hatása: a téli napok évi számának számottevő csökkenése

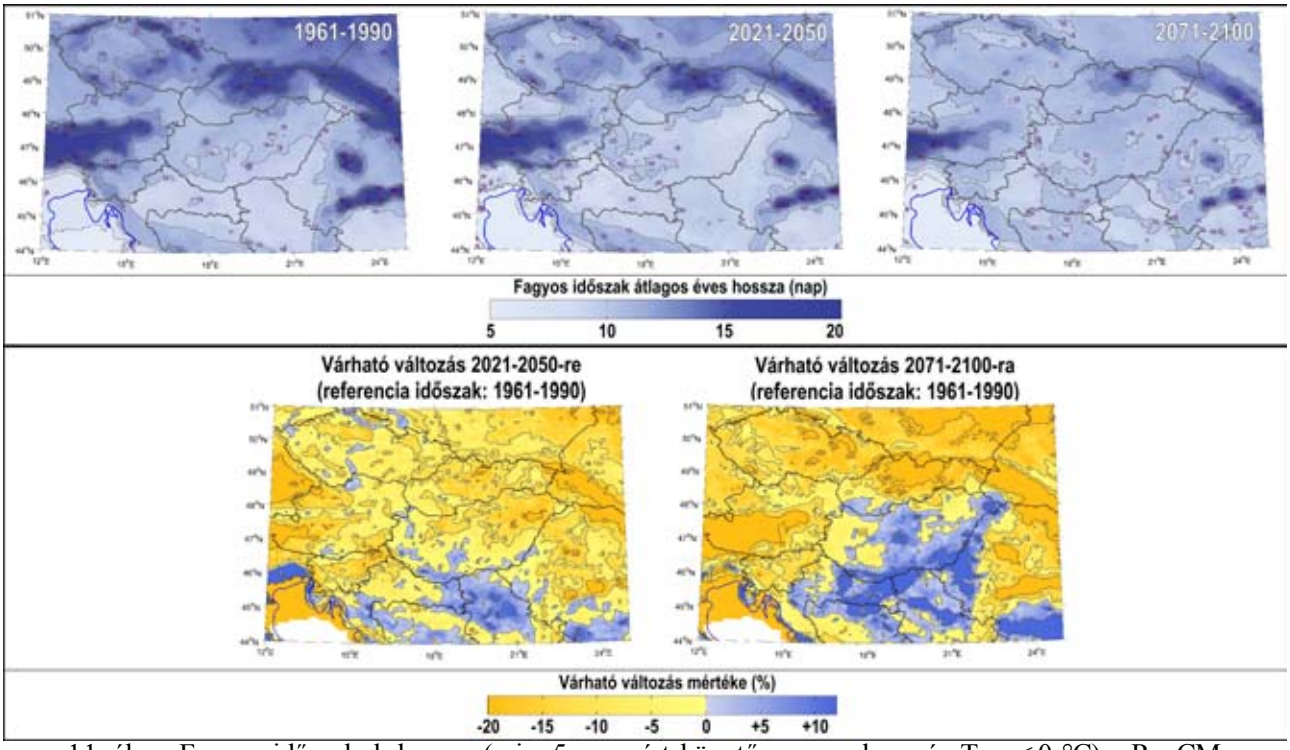
(a magyarországi rácspontok területi átlagát tekintve 82%-os az A2 szcenárió esetén, és 65%-os a B2 szcenárió esetén), valamint a hőség napok évi számának jelentős növekedése (A2 esetén átlagosan 156%-os, B2 esetén 109%-os) prognosztizálható. A két bemutatott extrém hőmérsékleti index közül az egyik (hőség napok évi száma) a pozitív extrémek esetén várható területi különbségekre ad példát, míg a másik (téli napok évi száma) a negatív hőmérsékleti szélsőségekben várható tendenciák tipikus területi eloszlását illusztrálja. A térképeken jól látható, hogy a pozitív extrémek esetén nagyobb változásra számíthatunk a magasabban fekvő hegyvidéki területeken, s valamivel kisebbre a sík vidékeken. Ezzel ellentétes a negatív hőmérsékleti extrém indexek várható tendenciájának területi eloszlása: az alföldi térségben valószínűsíthető a nagyobb változás.



10. ábra: A téli napok (Tmax < 0 °C) és a hőség napok (Tmax > 30 °C) számának várható változása 2071–2100 időszakra a PRUDENCE projekt keretében végzett DMI-modellszimulációk alapján az A2 és a B2 szcenárió esetén. Referencia időszak: 1961-1990.

A RegCM-outputok feldolgozása során összesen 131 éghajlati index – melyek közül 75 hőmérséklettel, 56 csapadékkal kapcsolatos – évi, évszakos változásait elemeztük 2021-2050, illetve 2071-2100 időszakra az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyítva.

Ebben az összefoglaló tanulmányban a különféle lehetséges hőmérsékleti extrém indexek közül a mezőgazdaságban kiemelt fontossággal bíró fagyos időszakok várható alakulását, valamint a referencia időszakhoz viszonyított megváltozását mutatjuk be a 11. ábrán a közelebbi jövőre (2021-2050) és távolabbi jövőre (2071-2100) vonatkozóan. Az alkalmazott definíció szerint azon időszakokat tekintjük fagyosnak, amikor legalább 5 egymást követő napon keresztül a napi minimum-hőmérséklet 0 °C alatti (Tmin < 0 °C). A fagyos időszakok területi eloszlását a domborzat nagy mértékben meghatározza, ezt jól illusztrálja a három felső térkép. A RegCM szimulációk alapján a Kárpátok és az Alpok térségében évente átlagosan több, mint 20 fagyos nap volt, a jövőben sokkal kisebb területen lesz ilyen hosszú fagyos időszak mindkét régióban. Kisebb mértékű változás várható az alacsonyabban fekvő térségekben, sőt egyes területeken akár néhány százalékos növekedés is valószínűsíthető. A 2071-2100-ra várható változások abszolút értékben általában nagyobbak, mint a 2021-2050-re várható változások. A RegCM szimulációk alapján hazánk térségében a referencia időszakban országos átlagban 10-12 nap hosszúságú fagyos időszakkal számolhattunk, mely a XXI. század során várhatóan 1-2 nappal lerövidül.



11. ábra: Fagyos időszakok hossza (min. 5 egymást követő nap, mely során $T_{min} < 0$ °C) a RegCM szimulációk alapján és a várható változás mértéke az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyítva

Végezetül a humán-egészségügy szempontjából elsődleges fontosságú extrém helyzetekre, azaz a hőségriadókra vonatkozóan a PRECIS-futtatások alapján végzett elemzéseinket (Pongrácz et al., 2013) foglaljuk össze.

Hazánkban 2004-ben a hőségriasztás egyes fokozatait a szignifikáns egészségkárosító hatás figyelembevételével az Országos Környezet-egészségügyi Intézet (OKI) az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat (ÁNTSZ) Budapest Fővárosi Intézetével, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálattal (OMSZ) együttműködve dolgozta ki (Bujdosó és Páldy, 2006). A három fokozatból álló riasztási rendszert az 1970–2000 időszakra vonatkozó budapesti halálozási és meteorológiai adatok elemzése alapján határozták meg. A hőségriasztás egyes fokozatai a hőmérsékleti küszöbérték meghaladásának szintjétől és az előrejelzett időtartamtól függenek. Így megkülönböztetjük az alábbi három fokozatot:

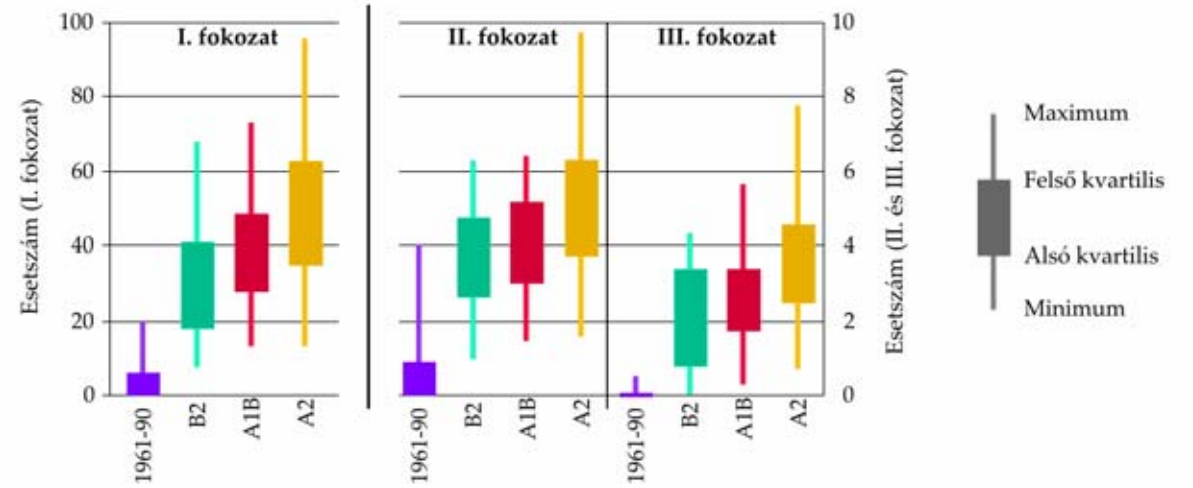
I. fokozatú hőségriadóról beszélhetünk, amikor az előrejelzések szerint a napi középhőmérséklet meghaladja a 25 °C-ot. Ilyenkor a mentőszolgálat felkészül a várhatóan megnövekvő betegforgalomra.

II. fokozatú hőségriadó az az időszak, amikor az előrejelzések szerint a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon keresztül meghaladja a 25 °C-ot. Ekkor szükség van média (TV, rádió) közlemények kiadására, a forgalmas helyszíneken vizet osztanak, megnyitják a légkondicionált helyiségeket, valamint a víz- és elektromos művek felfüggesztik a nem fizető ügyfelek kikapcsolását.

III. fokozatú hőségriadó lép életbe, ha az előrejelzések szerint a napi középhőmérséklet legalább 3 egymást követő napon keresztül meghaladja a 27 °C-ot. Ebben az esetben szigorúan ellenőrzik a II. fokozatnál megtett intézkedéseket.

Az OMSZ Budapestre vonatkozó állomási méréseiből megadott napi középhőmérsékletek alapján megállapítható, hogy az 1961–1990 időszakban Budapesten 315 napot nyilváníthatunk I. fokozatú hőségriasztásnak, melyből 49 alkalom felelt meg a II. fokozatú hőségriasztás feltételének, s mindösszesen csupán 3 eset a III. fokozatú hőségriasztásának. A legsúlyosabb (III. fokozatú) esetek időtartama 3-4 nap volt, melyeket 1961, illetve 1968 nyarán regisztráltak, továbbá 1990.07.30.-ától kezdve 3 egymást követő napon keresztül haladta meg a 27 °C-ot a budapesti állomáson mért napi középhőmérséklet.

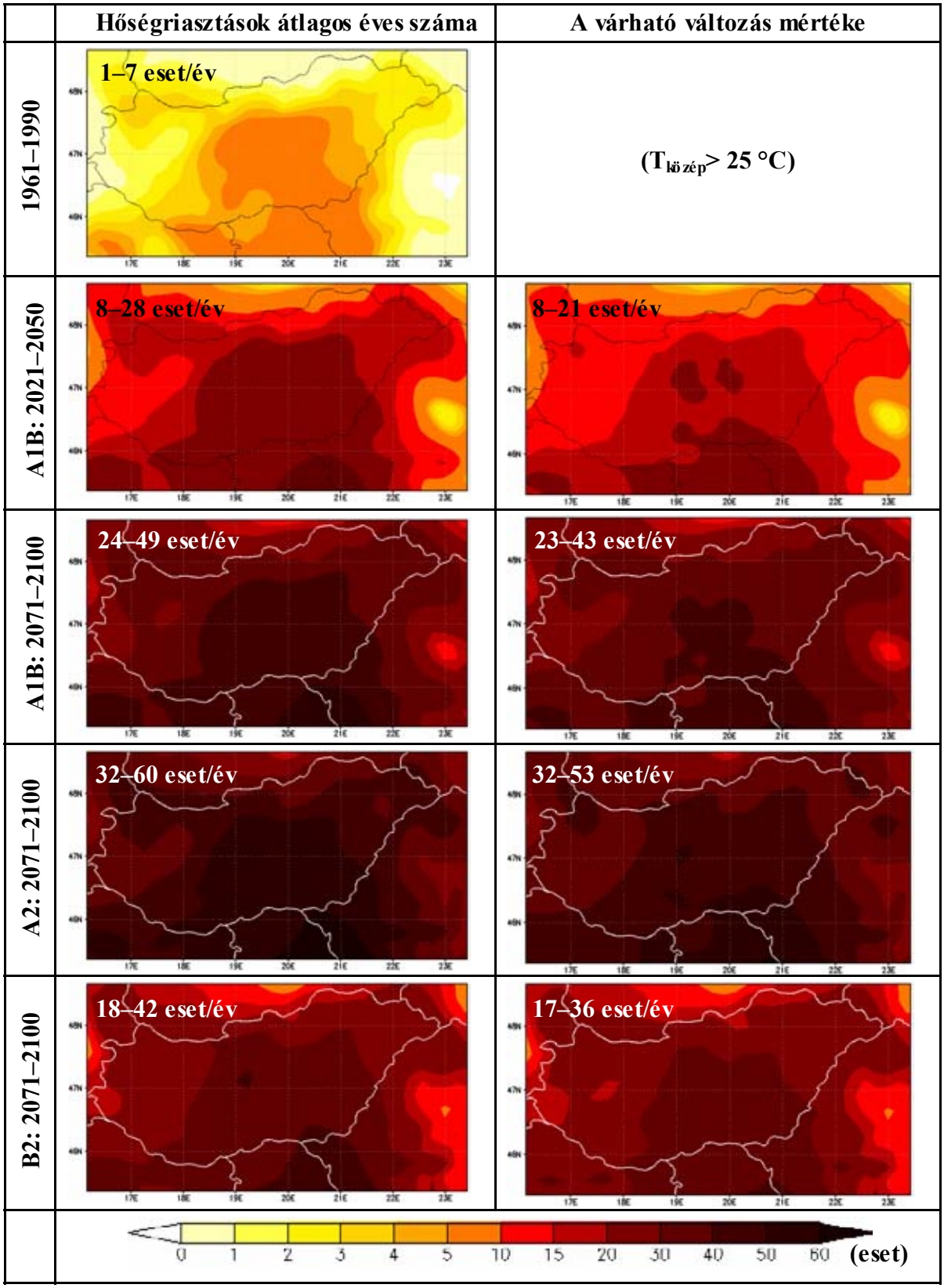
Vizsgálataink során elemeztük a Formayer és Haas (2010) módszerének felhasználásával korrigált éghajlati (PRECIS) szimulációk alapján meghatározott hőségriasztások számának és időtartamának átlagos éves értékeit, valamint a 2021–2050 és 2071–2100 jövőbeli időszeletekre várható változások mértékét. A 12. ábrán egyértelműen látszik, hogy a magyarországi gyakorlatban alkalmazott hőségriadó fokozatokhoz tartozó esetszámok várható változásai növekedési tendenciát mutatnak a 2071–2100 jövőbeli időszakra az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyítva. A XXI. század végére a különböző fokozatú hőségriasztások előfordulásában jelentős mértékű növekedés valószínűsíthető, melynek mértéke akár tízszeres is lehet a referencia időszakhoz képest. Míg 1961–1990 ben az I. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 4 volt, 2071–2100-ban az összes jövőre vonatkozó szcenárió szerint ez az érték elérheti átlagosan a 30–40 esetszámot is. A II. és III. fokozatú hőségriasztások átlagos éves száma 0,5, illetve 0,03-ról az évszázad végére várhatóan 4–5, illetve 2–3 esetre növekedhet.



12. ábra. A korrigált PRECIS-szimulációk alapján számított hőségriasztások területi átlaga Magyarországra vonatkozóan, 1961–1990, illetve 2071–2100 időszakban

A hőségriadók gyakoriságváltozása mellett az időtartamukban is érzékelhető a növekedési trend. A korrigált éghajlati szimulációk alapján a XXI. század végén a hőségriasztások átlagos éves időtartama akár kétszer hosszabb lehet, mint ez a referencia időszakban volt tapasztalható. A 2071–2100 időszakban a II. fokozatú hőségriadó az optimistább B2 szcenárió esetén átlagosan 6 napig fog tartani, a közepes A1B, valamint a pesszimista A2 forgatókönyv esetén várhatóan átlagosan 8 napig. A III. fokozatú hőségriadó esetében a korrigált A1B tranziens futtatás, valamint az A2-t figyelembevevő futtatás alapján a meghosszabbodás mértéke várhatóan átlagosan 4 nap, míg a B2 emisszió szcenárió teljesülése esetén átlagosan 2 nappal növekedhet meg a III. fokozatú hőségriasztás átlagos időtartama.

A változások területi eloszlását ebben az összefoglaló tanulmányban az I. fokozatra mutatjuk be részletesebben. A 13. ábrán a legalább I. fokozatot elérő hőségriadók évi átlagos gyakorisága, illetve az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyított különbsége látható hazánk térségében. Az évi átlagos előfordulás számában (a bal oldali térképeken) mindhárom időszakban és mindhárom szcenárió esetén zonális szerkezetet vehetünk észre, melyet a domborzat valamelyest módosít. Így az ország déli és északi, északkeleti tájai között igen jelentős különbségek jelennek meg, például az 1961–1990 időszakban északon a hőségriasztások átlagos éves száma 1–3 nap, ugyanakkor délen ez az érték 5–6 nap.



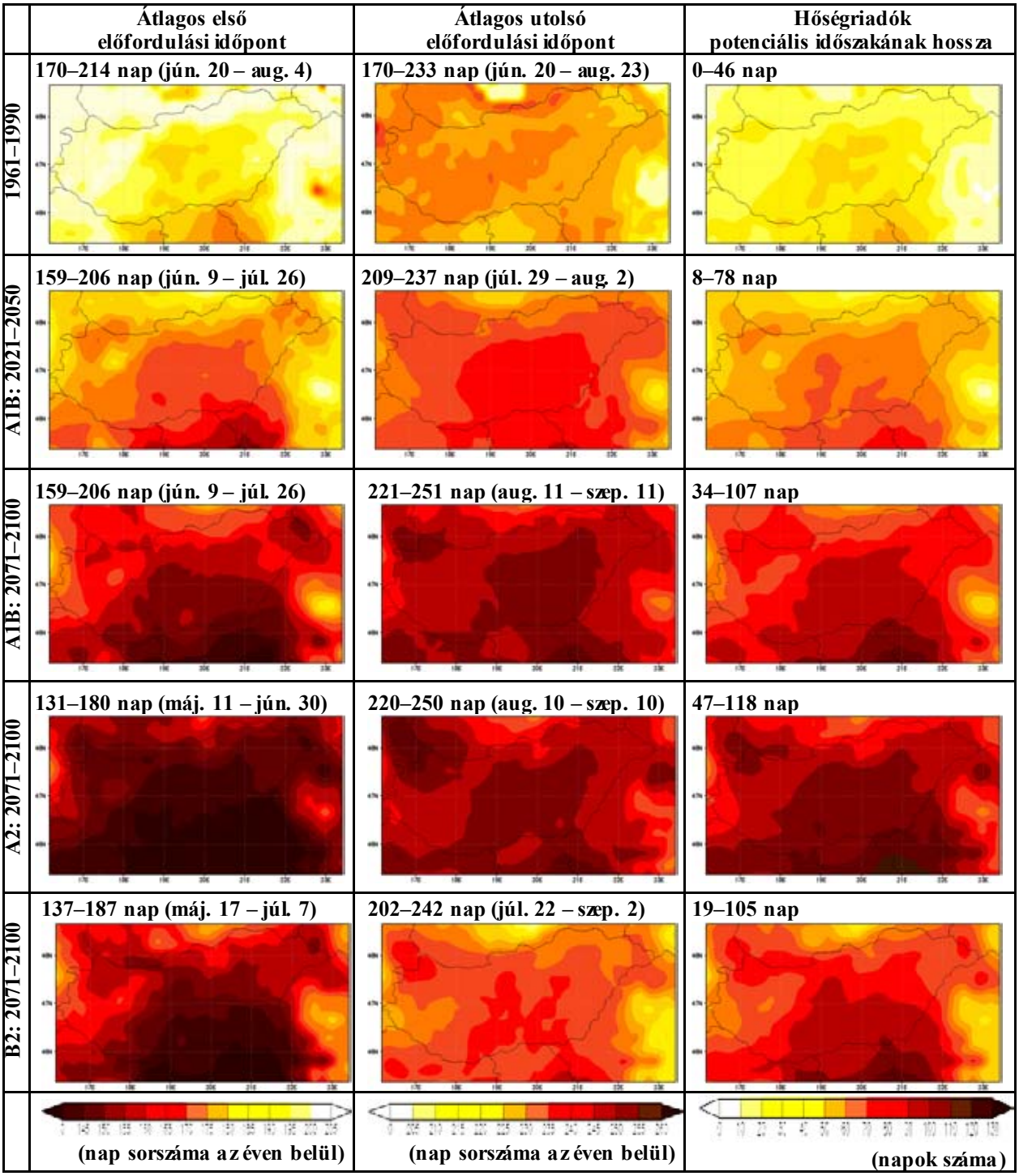
13. ábra. I. fokozatú hőségriasztások ($T_{közép}$ > 25 °C) átlagos éves előfordulási gyakorisága (a bal oldali oszopban), illetve ezek különbsége (a jobb oldali oszlopban) a PRECIS modellszimulációk korrigált eredményei alapján az 1961–1990, 2021–2050 és 2071–2100 időszakra. A várható változások az összes hazai rácspontra szignifikánsak 95%-os szinten.

A 13. ábra jobb oldalán lévő térképek az időszakok közötti különbségeket szemléltetik. Ezek alapján észrevehető, hogy a 2021–2050 időszakban az 1961–1990 időszakhoz képest átlagosan 8–21 nappal növekedhet a hőségriasztások gyakorisága, míg a 2071–2100 időszakra ez a növekedés átlagosan 23–43 nap körüli az A1B tranziens futtatás alapján. Ehhez viszonyítva a jövőre vonatkozóan pesszimistább A2 szcenárió megvalósulása esetén a várható változás mértéke átlagosan 10 nappal nagyobb (32–53 nap/év), s a B2 optimistább forgatókönyv alapján 6–7 nappal kisebb (17–36 nap/év) lehet. A változások térbeli szerkezete szintén jellemzően zonális, melyet a domborzat módosít. Így a szimulációk alapján a legnagyobb mértékű gyakoriságnövekedésre az ország középső részén a déli határ közelében számíthatunk.

A hőségriadók éven belüli lehetséges jövőbeli előfordulását az első és utolsó megjelenés átlagos időpontjai alapján vizsgálhatjuk. A térképes megjelenítés során ezt kiegészítettük a hőségriadók potenciális előfordulási időszaka hosszának térbeli eloszlásával. A 14. ábrán a legalább I. fokozatú hőségriasztásokra vonatkozóan mutatjuk be eredményeinket. A bal felső térképen láthatjuk, hogy a korrigált éghajlati szimulációk alapján meghatározott hőségriasztás az 1961–1990 időszakban leghamarabb az ország déli részén következett be. Ennek időpontja átlagosan az év 185–190. napjára, azaz július 5–10. közé esett. A Nyugat-Dunántúlon ez két héttel későbbre tolódott, s a legkésőbbi első előfordulási időpont a középhegységeinkben fordult elő, átlagosan az év 205–210. napján, azaz július 25–30. között. Ezzel párhuzamosan az éven belüli utolsó hőségriasztások (14. ábra középső oszlopában a felső térkép) az 1961–1990 időszakban a Dunántúlon és Közép-Magyarországon átlagosan az év 225–230. napján, azaz augusztus 15–20. között fordultak elő. Az Alföld keleti és déli térségeiben, valamint hazánk északi régióiban ez mintegy 5 nappal korábban következett be, átlagosan az év 220–225. napján, azaz augusztus 10–15. között. A legkorábbi utolsó előfordulási időpont a Nyírségre volt jellemző, átlagosan az év 215–220. napján, azaz augusztus 5–10. között. A leghosszabb potenciális előfordulási időszak – mely akár a 40 napot is meghaladja – az ország középső vidékein jelentkezett. A legrövidebb előfordulási időszak az ország északi részén volt jellemző, ennek hossza átlagosan csupán 10-20 nap volt.

A 2021–2050 időszakra vonatkozó éghajlati szimuláció szerint átlagosan 10–15 nappal korábban jelenhet meg először I. fokozatú hőségriadó, illetve ugyanennyivel később az utolsó előfordulás. A fokozódó regionális felmelegedés következményeképpen 2071–2100 időszakra az ország déli területein már a 155–160. napon (június 5–10. között) lehetséges a hőségriasztás, átlagosan pedig az 1961–1990 referencia időszakhoz képest 30 nappal korábban következhet be I. fokozatú hőségriadó, illetve ugyanennyivel később az utolsó hőségriasztási nap. A pesszimistább A2 szcenárió megvalósulása esetén az éven belüli első előfordulási időpont átlagosan 5 nappal korábban következhet be, mint az A1B forgatókönyv szerint. A B2 szcenárió optimistább jövőképét igazolja az is, hogy a hőségriasztások átlagos utolsó előfordulási időpontja ez esetben átlagosan 5–10 nappal korábban következik be, mint az A1B tranziens futtatás esetén.

Általánosságban véve az előfordulási időpontokat és a potenciálisan veszélyeztetett időszak hosszát bemutató térképeken is zonális szerkezetet figyelhetünk meg, melyet a domborzat módosít. A magasabban fekvő területeken később kezdődik, hamarabb végződik, és így természetesen rövidebb ideig tart a hőségriasztások szempontjából kritikus időszak. A regionális melegedési tendencia miatt a hőségriasztások potenciális időszakának hosszában is egyértelműen megjelenik a várható növekedő trend. A 4. ábra utolsó oszlopában lévő térképeken megfigyelhető, hogy a PRECIS szimulációk korrigált hőmérsékleti mezőit felhasználva végzett számításaink alapján a múltbeli 10–40 napos időszak 2021–2050-re átlagosan 15 nappal hosszabbodik meg. A XXI. század végén pedig a Duna-Tisza közén, valamint a délkeleti országrészben akár 3 hónapig is eltarthat a hőségriasztások szempontjából fokozottan veszélyes időszak.

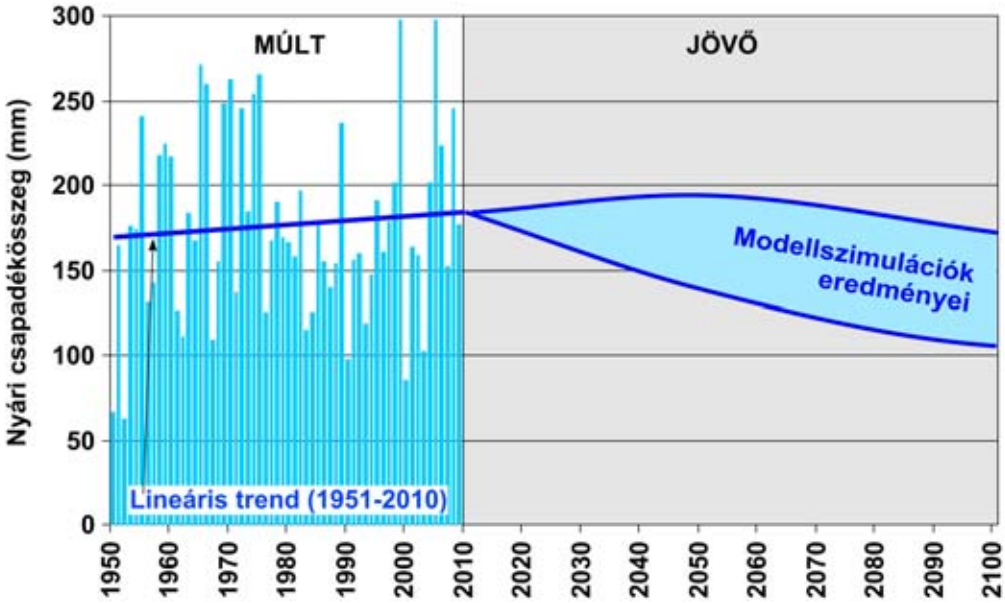


14. ábra. I. fokozatú hőségriasztások ($T_{közép}$ > 25 °C) első és utolsó előfordulási időpontjainak éves átlaga, valamint a potenciális előfordulás időszakának hossza a PRECIS regionális éghajlati modell korrigált outputjai alapján az 1961–1990, a 2021–2050 és a 2071–2100 időszakra vonatkozóan

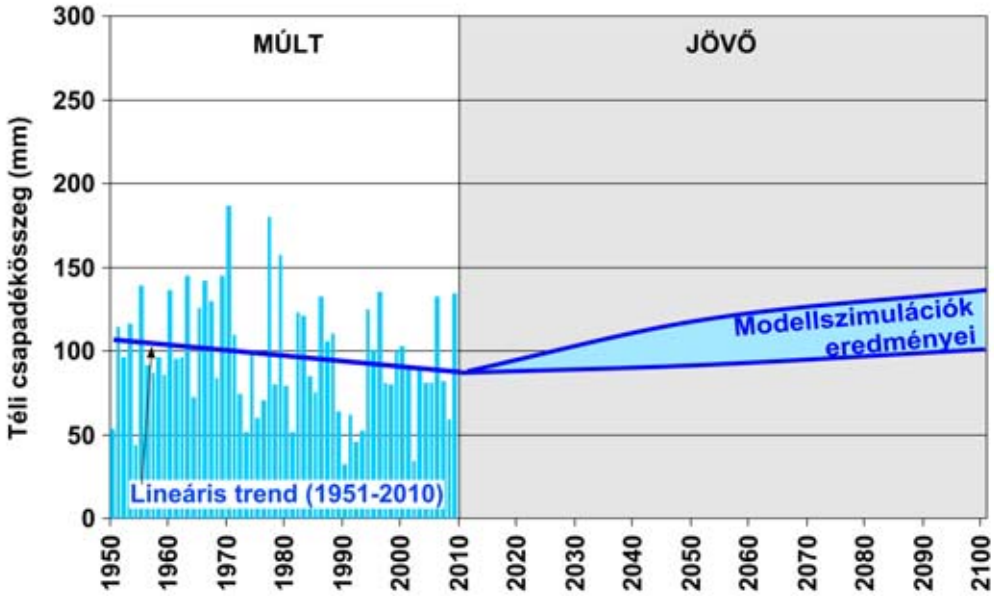
3. Csapadék

A hőmérséklethez hasonlóan ebben az alfejezetben is elsőként a csapadék múltbeli tendenciáját hasonlítjuk össze a jövőre vonatkozó becslésekkel. A múltra vonatkozóan az E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008) alapján a teljes országra meghatározott lineáris trend növekvő a XX. század második felében, a trendegyüttható értéke 5,2 mm/évtized. Az utolsó harminc évre illesztett lineáris trendegyüttható értéke 24 mm/évtized, azonban sem ez, sem a félévszázadra számított trendegyüttható statisztikailag nem szignifikáns a relatíve nagy mértékű évek közötti változékonyság miatt. A rácsponti csapadékösszegek változásaira illesztett lineáris trend trendegyütthatóit a teljes 1951-2010 időszakot tekintve az ország területének nagyobb hányadán növekvő trendet detektálhatunk, melynek maximális értéke 20 mm/évtized a Dunántúl déli részén. A csökkenő tendencia hazánk északi részén jellemző, a középső térségben -10 mm/évtized a kapott trendegyüttható maximális értéke. Ha csak az utolsó 30 évet tekintjük, akkor is a pozitív trendegyütthatók dominálnak a Magyarország területén, melyek maximális értéke az Alpokalja vidékén és az Északi-középhegység térségében meghaladja a 40 mm/évtized értéket. A csökkenő trend az előzőekkel ellentétben főként a Dél-Dunántúlon jelentkezett -10 mm/évtized értéket is meghaladó mértékben.

Az ENSEMBLES projekt keretében futtatott modellszimulációk felhasználásával becsült jövőbeli tendenciák és a XX. század második felétől napjainkig bekövetkezett múltbeli változást hasonlíthatjuk össze a 15. és a 16. ábrán nyárra, illetve télre. A modellszimulációk mindkét évszakban az eddigi tendenciák megváltozását valószínűsítik. A nyári és téli ellentétes irányú becsült változások a teljes csapadékösszeg éven belüli átrendeződéséhez vezetnek a század végére. Míg a nyári csapadék hazánk területén az utóbbi 60 évben jellemzően 100 mm és 250 mm között volt, addig a téli 50 mm és 150 mm közé esett. A grafikonokról jól látszik, hogy a nyári csapadékösszegnek nem csak az értéke, hanem a változékonysága is lényegesen nagyobb volt a télinél. A jövőre becsült csapadékváltozások szintén nagyobb bizonytalanságot mutatnak nyáron, mint télen.

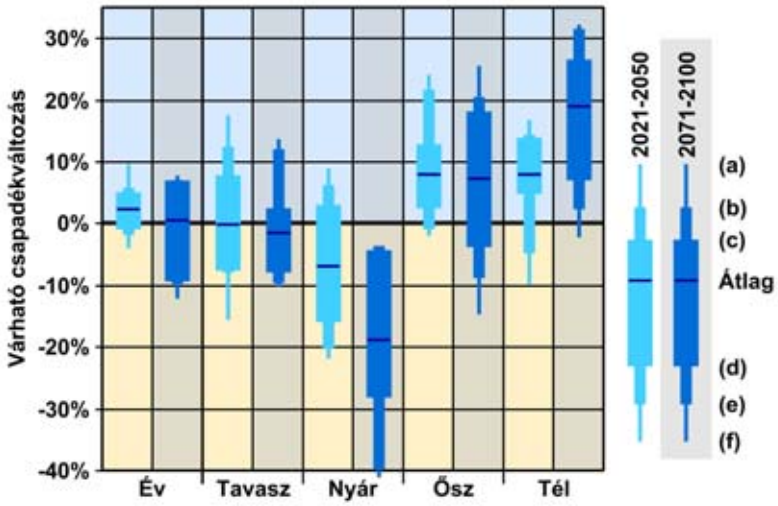


15. ábra. A XX. század középétől napjainkig detektált nyári csapadéknövekedés Magyarország térségére és a XXI. századra várható csapadék tendenciák az A1B szcenárióra vonatkozó ENSEMBLES-modellszimulációk eredményei alapján. A múltra vonatkozó idősor az E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008) alapján készült.



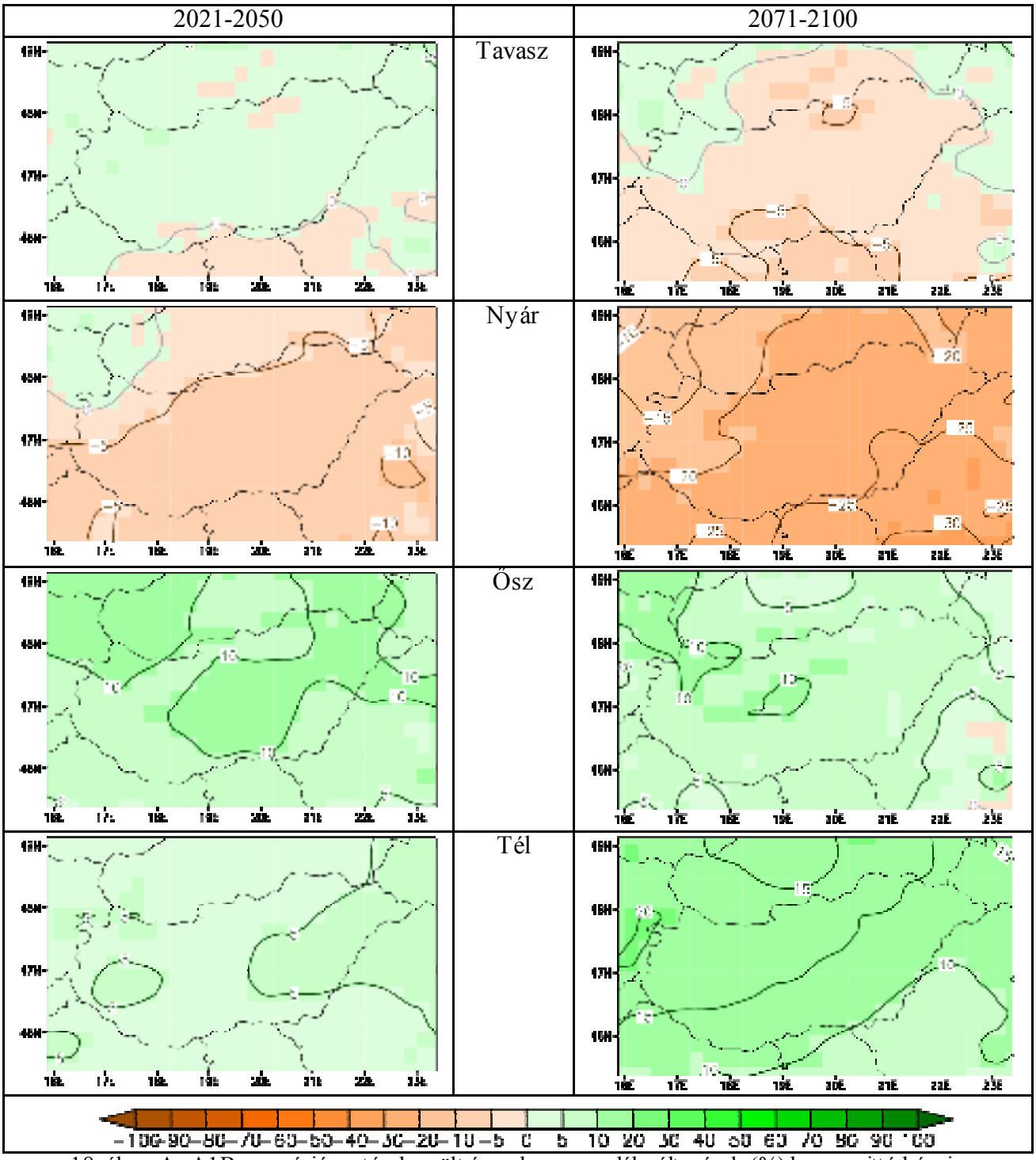
16. ábra. A XX. század közepétől napjainkig detektált téli csapadékcsökkenés Magyarországtérségére és a XXI. századra várható csapadék tendenciák az A1B szcenárióra vonatkozó ENSEMBLES-modellszimulációk eredményei alapján. A múltra vonatkozó idősor az E-OBS adatbázis (Haylock et al., 2008) alapján készült.

A hőmérséklettel ellentétben a csapadékbecslések bizonytalansága sokkal nagyobb. Az egyes modellszimulációk által prognosztizált változások sokszor előjelükben sem azonosak. A 11 rendelkezésre álló ENSEMBLES-modellszimuláció felhasználával az évszázad közepére csak kis mértékű változások várhatók, melyek a legtöbb modellszimuláció esetén nem szignifikánsak. A XXI. század végére kapott eredmények alapján télen összességében a csapadék növekedése, nyáron pedig a klíma szárazabbá válása prognosztizálható (17. ábra). Az átmeneti évszakokban kisebb mértékű változásra számíthatunk, mely azonban statisztikailag szintén nem szignifikáns. Az ellentétes előjelű téli és nyári tendenciák miatt az évi csapadékösszegben nem várhatunk jelentősebb változást, a modellek által jelzett évi csapadékváltozás abszolút értékben nem haladja meg a 10%-ot.



17. ábra. A Magyarországra várható átlagos éves és évszakos csapadékösszeg megváltozása 2021-2050 és 2071-2100 időszakokra az ENSEMBLES keretében rendelkezésre álló 11 modellfuttatás alapján az A1B szcenárió esetén, referencia időszak: 1961-1990. A legszélesebb téglalapok – (c) és (d) között – által jelzett változási intervallumok a várható változásokat 64%-os valószínűséggel tartalmazzák, a vékonyabb téglalapok – (b) és (e) között – 82%-os valószínűséggel, a vékony vonalak – (a) és (f) között – az összes rendelkezésre álló modellbecslést figyelembe veszik.

A XXI. század végére várható csapadékváltozások területi eloszlását évszakonként tekintve a 11 ENSEMBLES-modellszimuláció eredményeiből képzett kompozittérképek alapján a legnagyobb mértékű (mintegy 15-20%-os) csapadéknövekedés télen, a legnagyobb mértékű (mintegy 10-30%-os) szárazodás pedig nyáron prognosztizálható térségünkben (18. ábra).

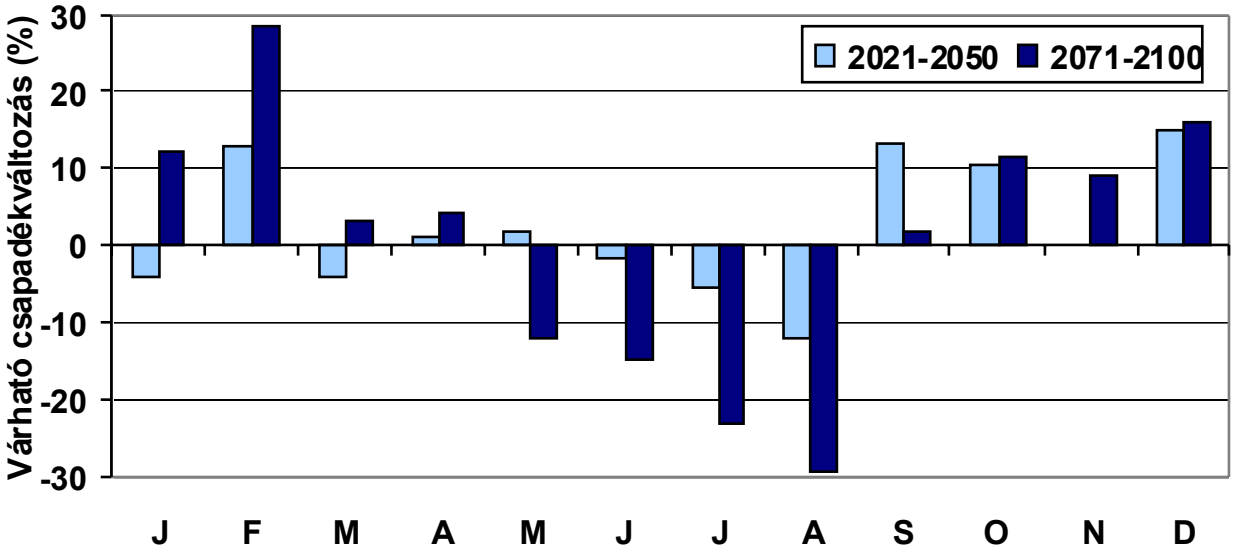


18. ábra. Az A1B szcenárió esetén becsült évszakos csapadékváltozások (%) kompozittérképei az ENSEMBLES keretében rendelkezésre álló 11 modellszimuláció eredményei alapján, referencia időszak: 1961-1990

A télen várható változásokban az ország területén belül nincs nagy különbség, a kompozittérkép alapján az egyes rácspontok közötti eltérés nem haladja meg az 5%-ot. Az átmeneti évszakokban kis mértékű csapadéknövekedést valószínűsítenek a modelloutputok átlagai. Ősszel

arra számíthatunk, hogy a csapadék mennyisége várhatóan északnyugat felé haladva növekszik Magyarország területén belül, s a Fertő-tó környékén akár a 10%-os csapadéknövekedési mértéket is meghaladhatja. Nyáron délkelet felé haladva számíthatunk egyre erősödő szárazodásra, s így a határvidék közelében már 30%-ot meghaladó mértékű lehet a csapadékcsökkenés.

A 11 ENSMEBLES-modellszimuláció összesített eredményeit havi bontásban szemléltetve (19. ábra) a XXI. század közepére prognosztizált változások még kis mértékűek (nem haladják meg a 15%-ot), s statisztikailag sem szignifikánsak. Az évszázad végére azonban jelentős mértékű csapadéknövekedés valószínűsíthető a téli félév hónapjaiban, különösen decembertől februárig, ugyanakkor nagymértékű, szignifikáns csapadékcsökkenés várható a nyári félévben, elsősorban május-június-július-augusztus hónapokban. Az augusztusi szárazodó tendencia meghaladja a 25%-ot. Az éves csapadékösszeg jelentős mértékű változása nem várható, hiszen a téli és a nyári ellentétes tendenciák részben kioltják egymást.



19. ábra. A 2021-2050 és 2071-2100 időszakra vonatkozó, A1B szcenárió esetén várható átlagos havi csapadékváltozás mértéke a 11 modellszimuláció alapján (referencia időszak: 1961-1990)

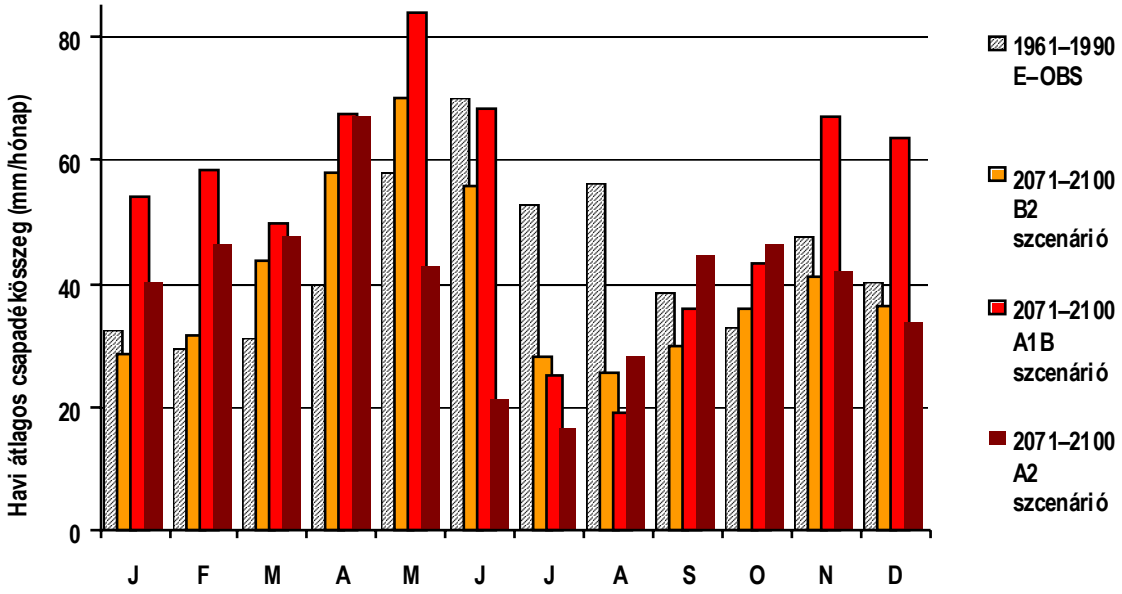
A különböző kibocsátási forgatókönyvekhez kapcsolódó modellszimulációk értékelését a hőmérséklethez hasonlóan a csapadék esetén is a PRECIS-modell felhasználásával végeztük (Pieczka et al., 2011). Az ENSEMBLES modelloutputokhoz hasonlóan ezek a szimulációk esetén is a becsült csapadékváltozások sok esetben nem, vagy csak az ország egyes területein szignifikánsak. Az is előfordul, hogy a három alkalmazott szcenárió által prognosztizált változások eltérő előjelűek. Az eltérések ellenére a különböző szimulációk egységesen a csapadék éven belüli eloszlásának módosulását és a térség szárazabbá válását prognosztizálják a nyári időszakban.

Az évszakos csapadékösszegekre vonatkozó eredményeket a 4. táblázat összegzi. Az abszolút értékben 10 mm/hónapnál nagyobb változások a magyarországi rácspontok mindegyikében statisztikailag szignifikánsnak bizonyultak, az ennél kisebbek nem, vagy csak az ország egy részén. Ugyan a forgatókönyv választásából származó bizonytalansági intervallum nyáron a legnagyobb, mégis ez az egyetlen olyan évszak, ahol a becsült változás előjele egyértelműen negatív mindhárom szcenárió esetén, s az évszázad végére statisztikailag szignifikáns. Noha a tél csapadékviszonyainak jövőbeli alakulása a nyárénál kevésbé tűnik bizonyosnak, a PRECIS modell szimulációi az évszak nedvesebbé válását jelzik, főként az A1B szcenárió esetén. Az átmeneti évszakok várható csapadékváltozásai viszonylag kicsik, nem szignifikánsak, és az egyes szimulációkból adódó eredmények különböző előjelűek.

4. táblázat: A várható átlagos évszakos csapadékváltozás a magyarországi rácspontok átlagában a PRECIS modell különböző szimulációi alapján (referencia-időszak: 1961–1990). Az abszolút értékben 10 mm/hónapnál nagyobb átlagos változásokat szürke háttér jelöli. Zárójelben tüntettük fel a változások relatív értékét.

Változás (1961–1990 átlagához képest) Csapadék (mm/hónap)		**Tavasz**	**Nyár**	**Ősz**	**Tél**
2021–2050	**A1B**	1 (2%)	–10 (–17%)	4 (8%)	6 (13%)
2071–2100	**B2**	–5 (–8%)	–28 (–43%)	–8 (–18%)	–2 (–6%)
	A1B	3 (5%)	–19 (–33%)	–2 (–4%)	15 (34%)
	A2	–8 (–13%)	–37 (–58%)	–4 (–8%)	5 (14%)

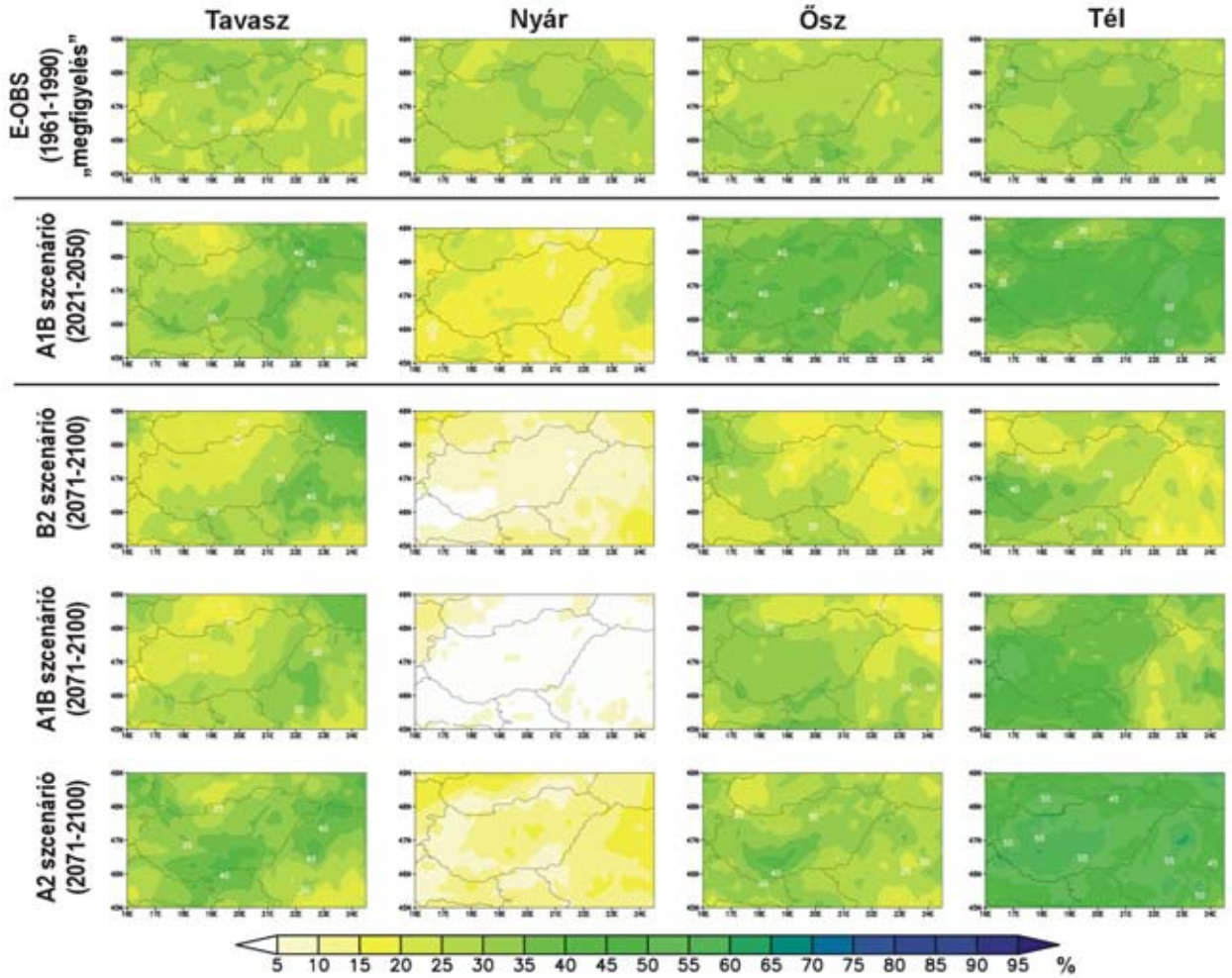
A csapadék éven belüli menetét, illetve annak megváltozását a 20. ábra jeleníti meg. Az 1961–1990 referencia időszakban Magyarországon átlagosan a legcsapadékosabbak a késő tavaszi, kora nyári hónapok voltak, melyekben a havi csapadékösszeg meghaladta a 60 mm-t. A legszárazabb két hónap pedig január és február volt, 30 mm körüli átlagos havi csapadékösszeggel. A PRECIS szimulációk számításai szerint a csapadék éven belüli eloszlása a jövőben valószínűleg módosul. A legszárazabb hónapok többé nem a téli hónapok lesznek, hanem a nyáriak, július és augusztus, 20–30 mm körüli átlagos csapadékösszeggel. Az A2 szcenárió júniusra is igen kevés, 20 mm körüli átlagos értéket valószínűsít, mely mind a múltbeli értéknél, mind a két másik szimuláció eredményénél lényegesen kevesebb. Az év legcsapadékosabb időszaka valamivel előrébb tolódik (A2 esetén áprilisra 65–70 mm értékkel, B2 esetén április, május, júniusra havi 55–65 mm értékkel, A1B esetén ugyanezen időszakra, 60 mm-t meghaladó értékekkel). Az A2 és B2 szcenáriók azt valószínűsítik, hogy a csapadék éven belüli eloszlása a jelenleginél valamivel egyenletesebb lesz. Ez a tendencia az A1B szcenárió esetén csak évszakos felbontásban prognosztizálható, mivel az adott évszakon belüli hónapok becsült csapadékváltozása egymástól igen eltérő, főként nyáron.



20. ábra: A 2071–2100 időszakra becsült átlagos havi csapadékösszegek éves menete a 3 PRECIS-szimuláció alapján az 1961–1990 referencia időszakra vonatkozó mérésekkel összehasonlítva (Pieczka et al., 2011)

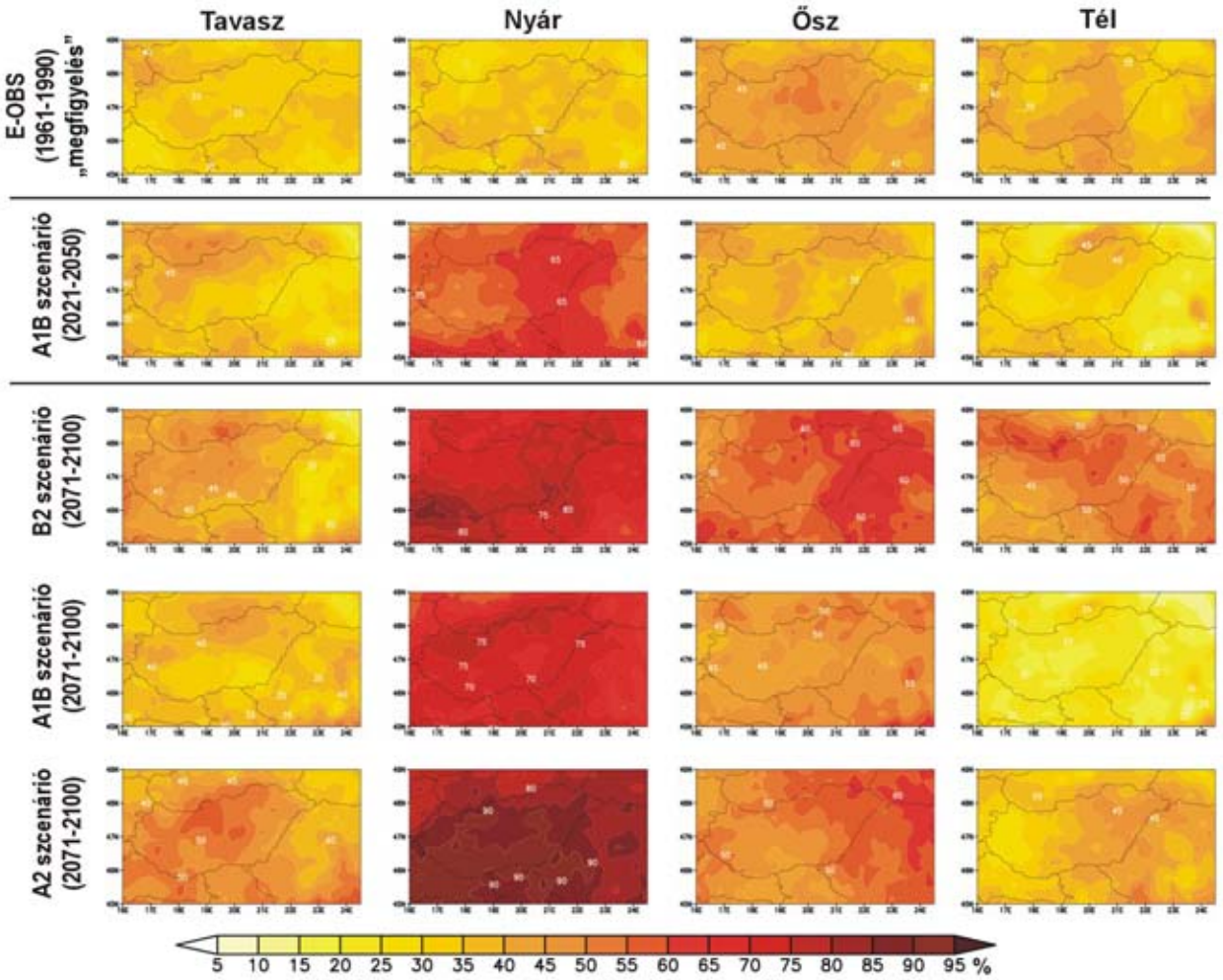
Az eddigiekből kitűnik, hogy a PRECIS modellszimulációk nyárra egyértelműen az éghajlat szárazabbá válását valószínűsítik a Kárpát-medence térségében, melyet a negatív havi anomáliák gyakoriságnövekedése is jelez: 30–40%-ról 80–90%-ra az A2, 70–80%-ra a B2 és A1B kibocsátási forgatókönyv esetén (21. ábra), s a pozitív anomáliák gyakoriságcsökkenése az ország egész területén: 25–30%-ról 0–10%-ra az A2, 0–20%-ra a B2 és az A1B esetén (22. ábra).

E vizsgálat alapján is 2021–2050 időszakra kisebb változások várhatók, mint 2071–2100-ra, bár úgy tűnik, a változások nem lesznek lineárisak: a nyári szárazodás gyorsabban játszódik majd le, mint a telek csapadékosabbá válása. A térképsorozat alapján elmondható, hogy az A2 forgatókönyv esetén nagyobb mértékű gyakoriságváltozásra számíthatunk, mint akár a B2, akár az A1B szcenárió esetén.



21. ábra: Az 1961–1990 referencia időszak átlagos csapadékösszegeihez viszonyítva +20%-nál nagyobb havi pozitív anomáliák előfordulási gyakorisága tavasszal, nyáron, ősszel és télen, PRECIS szimulációk alapján (Bartholy et al., 2011)

A téli évszakra várható változások nem egyirányúak és sokkal kisebbek, de a korábban már említett téli csapadéknövekedés leolvasható az A2 szcenárió esetén a Dunántúlra (25–35%-ról 50%-ra), az A1B esetén pedig az egész ország térségére (45–60%-ra). Az A2 figyelembevételével futtatott szimulációban a téli hónapokban a csapadékosabb időszakok gyakoriságnövekedése az egész ország területén valószínűsíthető, míg a száraz időszakok gyakoriságcsökkenésére elsősorban a Dunántúl térségében számíthatunk. Az A1B szcenárió esetén a jelenség még hangsúlyosabb és várhatóan az egész országra kiterjed.



22. ábra: Az 1961–1990 referencia időszak átlagos csapadékösszegeihez viszonyítva –20%-nál nagyobb havi negatív anomáliák előfordulási gyakorisága tavasszal, nyáron, ősszel és télen, PRECIS szimulációk alapján (Bartholy et al., 2011)

Az átlagos csapadékviszonyok várható alakulása mellett elsősorban hidrológiai, vízgazdálkodási és mezőgazdasági hatásvizsgálatok céljából kiemelten fontos a szélsőségek elemzése, mind a nagy csapadékok, mind a szárazságok szempontjából. Ehhez különféle csapadékindexeket (Bartholy és Pongrácz, 2007) alkalmazhatunk. Az ENSEMBLES-szimulációk alapján az 5. táblázatban összefoglalt eredmények azt jelzik, hogy hazánkban a XXI. század végére nyáron jellemzően szárazodásra számíthatunk, ugyanakkor a csapadékesemények valószínűsíthetően nagyobb intenzitásúak lesznek (főként ősszel és télen). Télen várhatóan intenzívebb lesz a csapadékhullás, de ebben az időszakban összességében is a csapadék növekedése prognosztizálható.

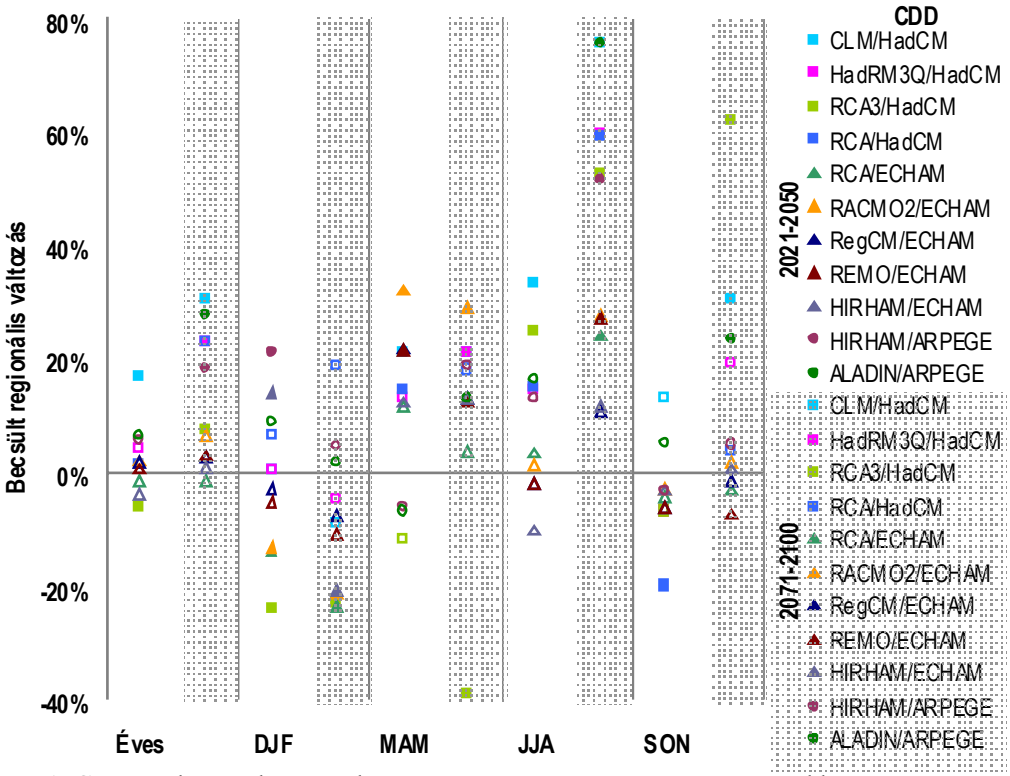
A következőkben az extrém viszonyokat jelző indexre vonatkozóan mutatjuk be részletesebben a kapott eredményeket. A diagramokon a magyarországi rácspontok 1961–1990 időszakhoz viszonyított átlagos várható változása látható a XXI. század közepére (2021–2050) és végére (2071–2100). A távolabbi jövőre vonatkozó eredményeket szürke háttérrel emeltük ki. Az eredményül kapott várható átlagos változások közül beszínezett szimbólumok jelölik a 95%-os szinten szignifikáns változásokat. A térképes megjelenítést csak az évszakos változási mezőkre mutatjuk be, hiszen az éves változásokban ezek eredőjeként megjelenő tendenciák sokszor félrevezetőek lehetnek az egymással ellentétes évszakos változások miatt.

5. táblázat. A vizsgált csapadék indexek várható változása hazánk területén 2071–2100 időszakra 11 ENSEMBLES-modellszimuláció alapján az A1B szcenárió esetén (referencia időszak: 1961–1990). A táblázatban szereplő százalékértékek a növekedő, a csökkenő, illetve a szignifikáns változást nem jelző modellbecslések arányát mutatják. A zöld szín az éghajlat nedvesebbé, a barna pedig az éghajlat szárazabbá válására utalnak. A zöld, illetve sárga hátterű cellák azokat a változásokat emelik ki, melyek esetén a modellek több mint fele azonos irányú tendenciát jelez.

Index	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél	Modellek becslése
CDD: Az egymást követő száraz napok maximális száma.	27%	↗ 82%	27%	-	növekedés
	9%	-	-	36%	csökkenés
	64%	18%	73%	64%	nem szign.
RR1: Azon napok száma, amelyeken a lehullott csapadék mennyisége meghaladja az 1 mm-t.	↗ 64%	-	-	36%	növekedés
	9%	↘ 100%	36%	-	csökkenés
	27%	-	64%	64%	nem szign.
RR5: Azon napok száma, amelyeken a lehullott csapadék mennyisége meghaladja az 5 mm-t.	9%	-	27%	-	növekedés
	9%	↘ 82%	9%	↘ 73%	csökkenés
	82%	18%	64%	27%	nem szign.
RR10: Azon napok száma, amelyeken a lehullott csapadék mennyisége meghaladja a 10 mm-t.	9%	-	↗ 64%	↗ 91%	növekedés
	-	↘ 64%	-	-	csökkenés
	91%	36%	36%	9%	nem szign.
RR20: Azon napok száma, amelyeken a lehullott csapadék mennyisége meghaladja a 20 mm-t.	27%	-	↗ 73%	↗ 82%	növekedés
	-	9%	-	-	csökkenés
	73%	91%	27%	18%	nem szign.
RX1: Az 1 nap alatt lehullott maximális csapadékösszeg	27%	27%	↗ 64%	↗ 82%	növekedés
	-	-	-	-	csökkenés
	73%	73%	36%	18%	nem szign.
RX5: Az 5 nap alatt lehullott maximális csapadékösszeg.	9%	-	↗ 55%	↗ 73%	növekedés
	-	18%	-	-	csökkenés
	91%	82%	45%	27%	nem szign.
SDII: Csapadékintenzitás: a teljes csapadékösszeg és a csapadékos napok számának hányadosa – a csapadékos napokon lehullott átlagos csapadékmennyiség	36%	36%	↗ 100%	↗ 91%	növekedés
	-	9%	-	-	csökkenés
	64%	55%	-	9%	nem szign.

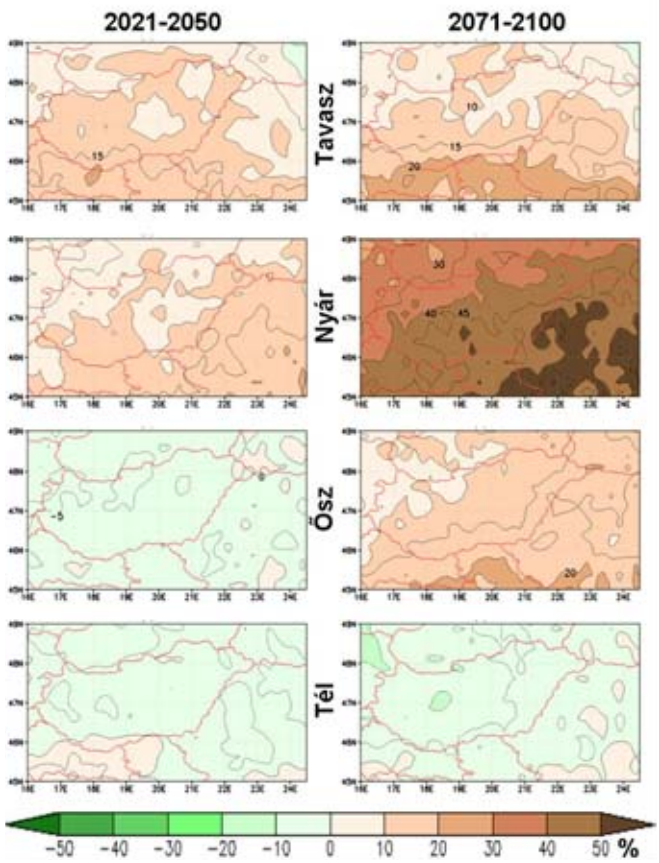
Elsőként az egymást követő száraz napok maximális számának (CDD) várható alakulását tekintjük át. Magyarországon éves átlagban nagyrészt növekedésre számíthatunk (23. ábra): a távolabbi jövőben öt modellszimuláció (az ARPEGE és a HadCM által meghajtott RCM-szimulációk többsége) szerint lesz ez a változás szignifikáns, mintegy 10–30%-os. A becsült évszakos változásokat sorra véve az alábbi következtetéseket foglalhatjuk össze. (1) Télen a modellszimulációk többsége csökkenő trendet valószínűsít 2071–2100-ra. A HIRHAM/ECHAM, a RACMO2 és az RCA/ECHAM is szignifikáns csökkenést prognosztizál, amelynek mértéke meghaladja a 20%-ot. A 2021–2050-re becsült változás nagyobb bizonytalanságú, a szignifikáns változást jelző modellek eredményei ellentétes előjelűek. Ennek oka az, hogy a csapadék mind térben, mind időben rendkívül változékony meteorológiai elem, ezért nagy a szórás és az éghajlati becslések bizonytalansága. (2) Tavasszal feltehetőleg mindkét időszakban meg fog növekedni az egymást követő száraz napok maximális száma, a statisztikailag szignifikáns becslések szerint mintegy 20–35%-kal. (3) Nyáron 2021–2050-re még nem szignifikáns a modellek által becsült növekedések többsége, de 2071–2100-ra minden modellszimuláció egyértelműen a CDD értékének növekedését valószínűsíti, s ezek nagy többsége 95%-os szinten szignifikáns. A legnagyobb mértékű (70–80%) növekedést a CLM és az ALADIN szimulációi jelzik. (4) Ősszel csupán három

modellszimuláció feltételez szignifikáns változást: a CLM és az ALADIN 20–25%-os, az RCA3 pedig kb. 60%-os növekedést jelez a XXI. század végére.

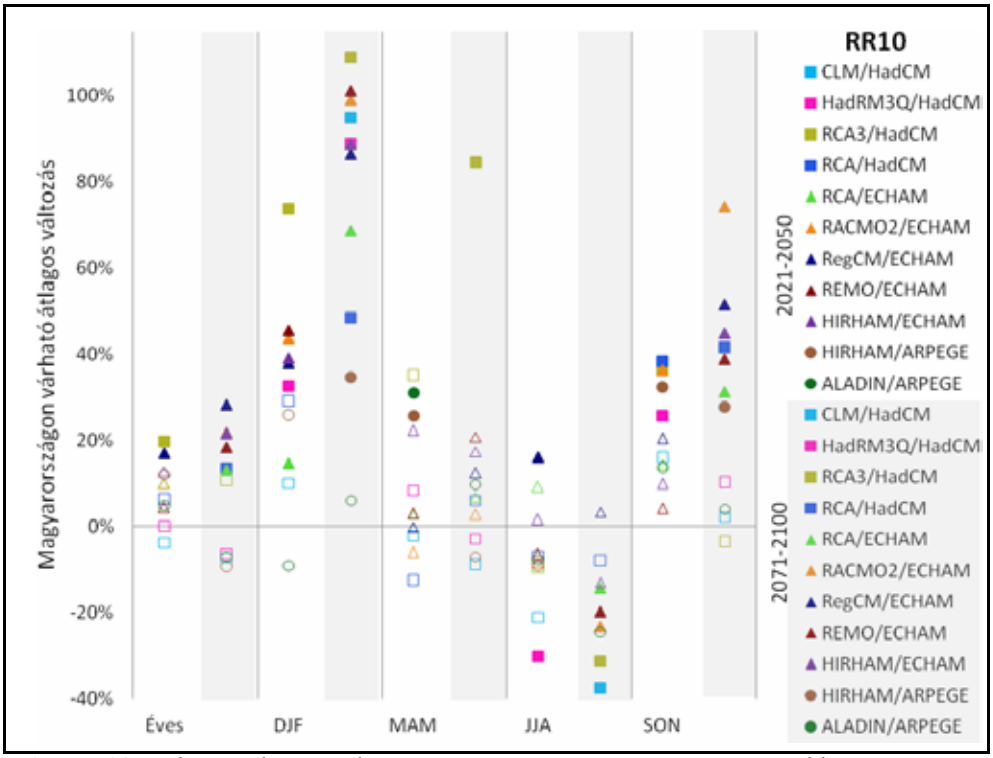


23. ábra. A CDD várható átlagos változása Magyarországon a XXI. század közepére és végére az ENSEMBLES-modellszimulációk alapján (referencia időszak: 1961–1990). Beszínezett szimbólumok jelölik a 95%-os szinten szignifikáns változásokat.

A becsült változások térbeli szerkezetét a 24. ábrán mutatjuk be. A kompozit térképek alapján általában a XXI. század közepéig várható tendenciák további erősödésére számíthatunk a század végére (kivéve az őszt). Részletesebben áttekintve az évszakos becsléseket tartalmazó térképeket, az alábbi következtetéseket összegezhetjük. (1) Tavasszal kb. 10–15%-os növekedésre számíthatunk hazánk területén; a legnagyobb (20%-ot meghaladó) mértékű változás a Kárpát-medence déli részén várható a 2071–2100 időszakra. (2) Nyáron az évszázad közepére 10%-os a hazánk területére becsült átlagos növekedés, mely az évszázad végére mintegy 43%-ká fokozódik. Láthatjuk, hogy az index értékeiben prognosztizált változások mértéke északnyugatról délkeletre haladva nő, s vizsgált tartomány délkeleti részén a CDD értékének becsült átlagos növekedése akár az 50%-ot is meghaladhatja. (3) Ősszel csupán a távolabbi jövőben valószínűsíthető jelentősebb (10–20%) változás; az évszázad közepére becsült tendencia a legtöbb modellszimuláció esetén nem szignikáns, s átlagosan inkább a száraz időszak hosszának csökkenése várható, amely azonban a vizsgált célterületen belül sehol sem éri el a 10%-ot. (4) Amennyiben a 11 modellszimuláció által prognosztizált változások átlagát tekintjük, télen egyik időszakra vonatkozóan sem várható jelentős változás az egymást követő száraz napok maximális számának értékében.

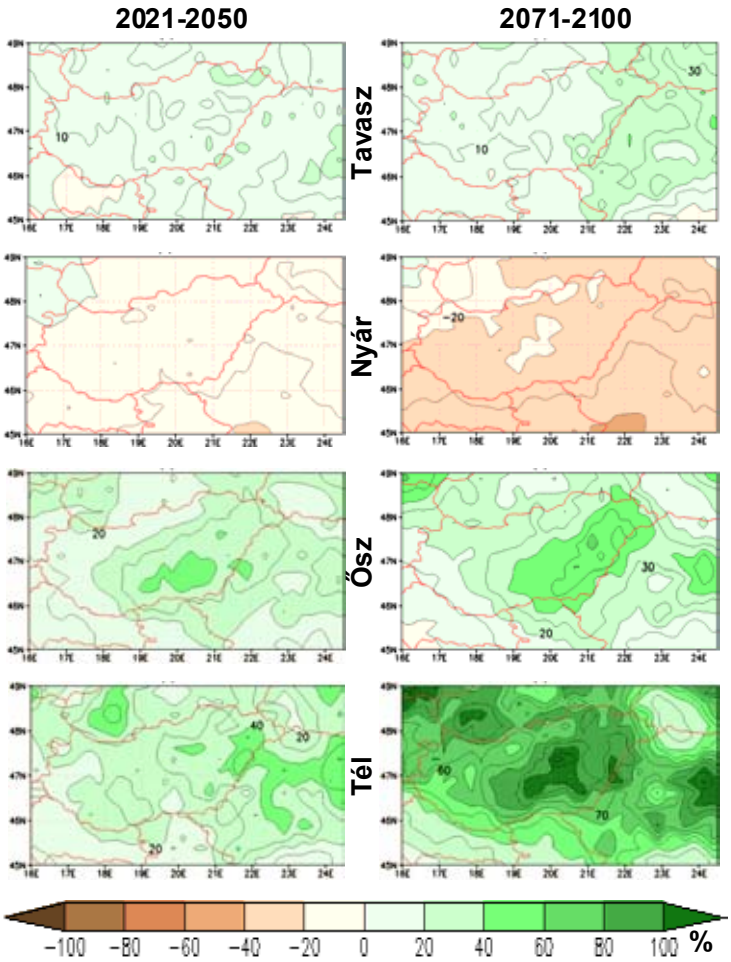


24. ábra. Kompozit térkép a CDD index évszakonként várható relatív változásáról (%) 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra az ENSEMBLES keretében futtatott 11 RCM-szimuláció eredményei alapján (referencia időszak: 1961–1990)



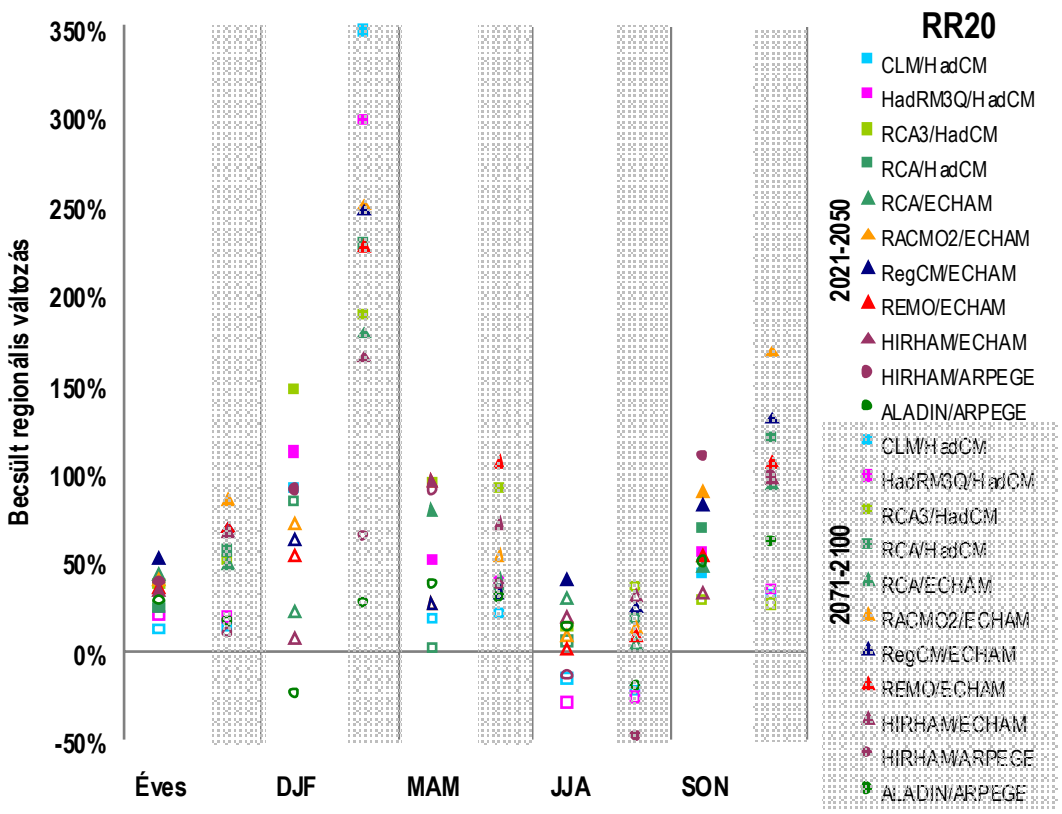
25. ábra. Az RR10 várható átlagos változása Magyarországon a XXI. század közepére és végére az ENSEMBLES-modellszimulációk alapján (referencia időszak: 1961–1990). Beszínezett szimbólumok jelölik a 95%-os szinten szignifikáns változásokat.

A CDD-hez hasonló módon a 25. és a 26. ábrán a 10 mm-nél nagyobb csapadékú napok (RR10) számának várható változását mutatjuk be 2021-2050 és 2071-2100 időszakra az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyítva. A hazai rácspontok értékeiből képzett országos átlagértékek változását grafikon formájában, a modellszimulációk átlagolásával kapott kompozitokat pedig térképes formában ábrázoltuk. A 25. ábrán jól látszik a télre és őszre várható növekedő tendencia, melyek nagy része statisztikailag szignifikáns. A teljes évre és a többi évszakra vonatkozóan a becsült változások nagy rész statisztikailag nem szignifikáns. A kompozittérképek (26. ábra) alapján különösen a valószínűsíthető téli jelentősebb növekedést emeljük ki.



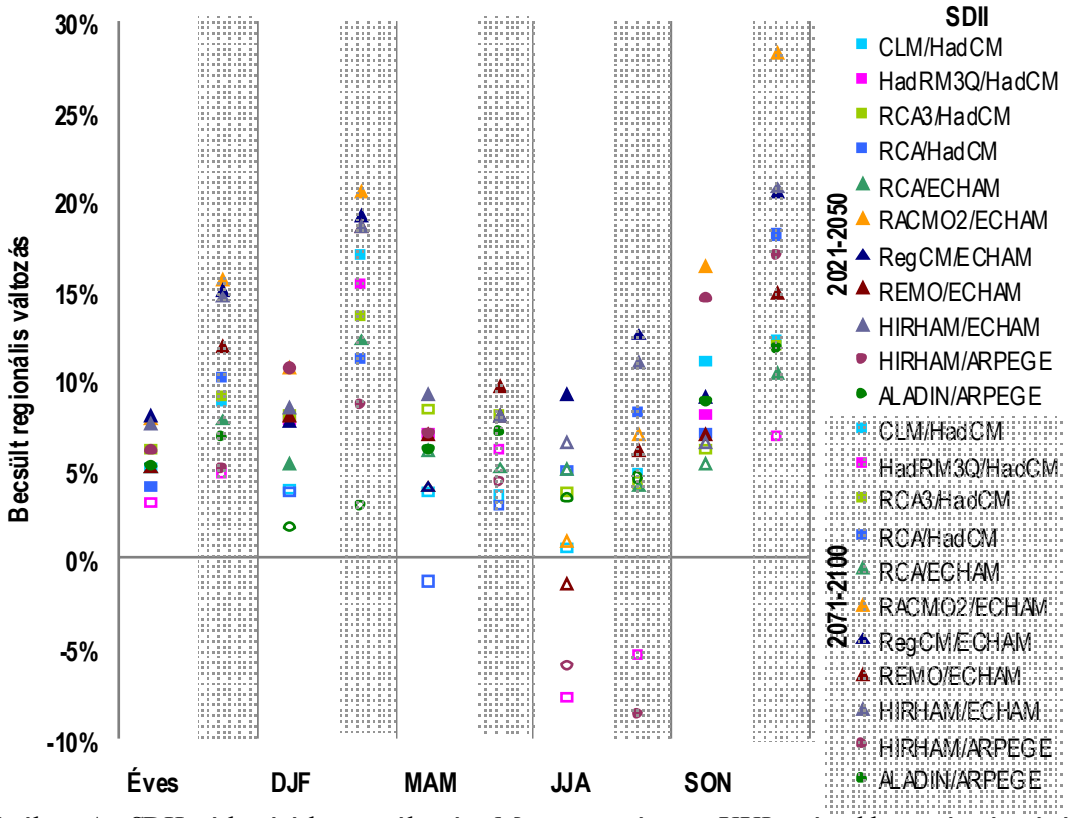
26. ábra. Kompozit térkép az RR10 index évszakonként várható relatív változásáról (%) 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra az ENSEMBLES keretében futtatott 11 RCM-szimuláció eredményei alapján (referencia időszak: 1961–1990).

Az ENSEMLES projekt keretében végzett modellfuttatások alapján a 20 mm-nél nagyobb csapadékú napok (RR20) számának várható változását a 27. ábrán mutatjuk be 2021-2050 és 2071-2100 időszakra az 1961-1990 referencia időszakhoz viszonyítva. A hazai rácspontok értékeiből képzett országos átlagértékek változását grafikon formájában összegző ábra kiemeli a télre és őszre várható növekedő tendenciát, melyek nagy része az évszázad végére statisztikailag szignifikáns.



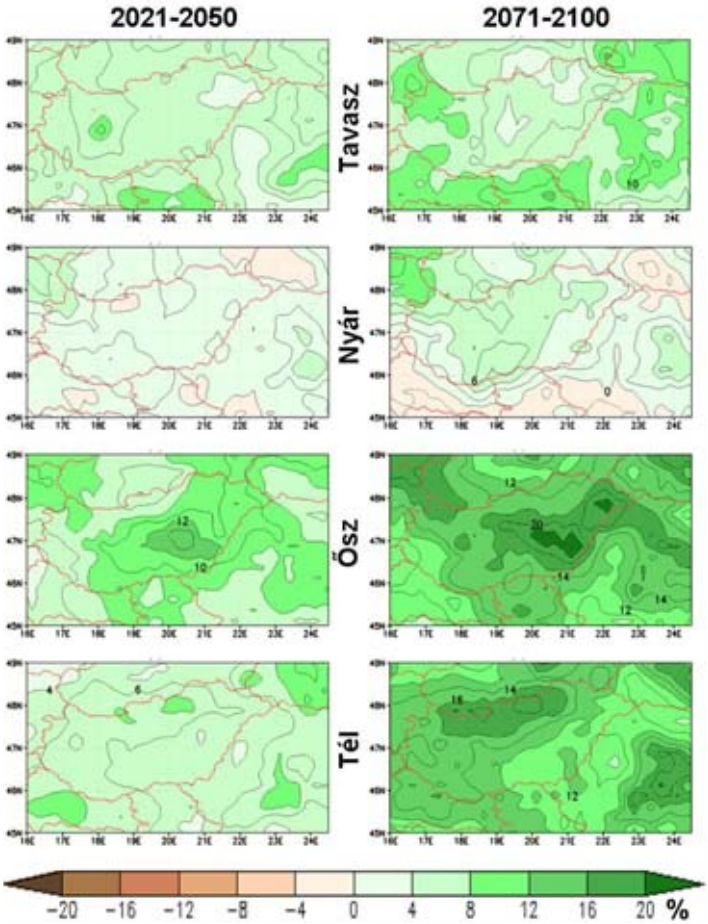
27. ábra. Az RR20 várható átlagos változása Magyarországon a XXI. század közepére és végére az ENSEMBLES-modellszimulációk alapján (referencia időszak: 1961–1990). Beszínezett szimbólumok jelölik a 95%-os szinten szignifikáns változásokat.

Az ENSEMBLES keretében végzett RCM-szimulációk alapján hazánkban a csapadékintenzitás (SDII) várhatóan mind a négy évszakban és éves átlagban is szignifikánsan meg fog növekedni (28. ábra). A valószínűsíthető évszakos változásokat tekintve az alábbi következtetéseket foglalhatjuk össze. (1) Télen a közelebbi jövőben kb. 10%-os, a távolabbi jövőben pedig mintegy 20%-os növekedés várható, amely az ALADIN kivételével az összes modellszimuláció szerint szignifikáns változást jelent. (2) Tavasszal valószínűsíthető a legkisebb mértékű növekedés, mely mindkét időszakra maximálisan csupán 10%-os (2021–2050-re a HIRHAM/ECHAM, 2071–2100-ra a REMO/ECHAM modellszimuláció szerint), s a rendelkezésre álló modellszimulációk alig fele jelez szignifikáns változást. (3) Nyáron a modellszimulációk többsége növekedést prognosztizál, amelynek mértéke azonban nem haladja meg a 15%-ot. A közelebbi jövőre csupán egy modellszimuláció (RegCM/ECHAM) jelez szignifikáns (mintegy 10%-os) növekedést, a 2071–2100 időszakra viszont már négy szimuláció (RegCM/ECHAM, HIRHAM/ECHAM, RCA/HadCM, REMO/ECHAM) szerint lesz szignifikáns az SDII növekedése (5–15%). (4) A legnagyobb mértékű növekedés ősszel várható. A 2021–2050 időszakra vonatkozóan 5–20%-os változást jeleznek a modellszimulációk. A XXI. század második felében valószínűsíthetően tovább nő a csapadékintenzitás, s 2071–2100-ra a 11 modellszimulációból 10 szerint szignifikáns lesz az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyított növekedés mértéke, amely akár a 30%-ot is elérheti (a RACMO2/ECHAM modellszimuláció szerint).



28. ábra. Az SDII várható átlagos változása Magyarországon a XXI. század közepére és végére az ENSEMBLES-modellszimulációk alapján (referencia időszak: 1961–1990). Beszínezett szimbólumok jelölik a 95%-os szinten szignifikáns változásokat.

A becsült átlagos változások kompozit térképeit (29. ábra) nézve is szembetűnő a zöld szín dominanciája, ami az index értékének várható növekedését jelzi Magyarország térségében. Részletesebben áttekintve az évszakos becsléseket, az alábbi következtetéseket összegezhetjük. (1) Tavasszal átlagosan 4–8%-os növekedés várható; a távolabbi jövőben az általunk vizsgált kivágat déli és keleti részén a 10%-ot is meghaladhatja a változás mértéke. (2) A csapadékintenzitás legkisebb (mintegy 6%) mértékű növekedése a 11 klímaszimuláció alapján nyáron valószínűsíthető, sőt, egyes területeken, például a Kárpát-medence északkeleti és déli részén akár kis mértékű csökkenésre is számíthatunk (ez a modellszimulácók nagy többsége alapán azonban statisztikailag nem szignifikáns). (3) A legnagyobb mértékű növekedés ősszel várható: ezt a 28. ábra is alátámasztja, hiszen 10 szimuláció szerint is 95%-os szinten szignifikáns a becsült növekedés. Az Alföldön az évszázad közepéig átlagosan 12%-kal, a 2071–2100 időszakra pedig akár 20%-kal is nőhet az index értéke. (4) Télen 2021–2050-re még nem várható jelentős változás. A XXI. század végére viszont az index várható változásának mértéke feltehetően a Kárpát-medence egész területén eléri a 8%-ot. Az Északi-középhegységben, valamint hazánk északnyugati részén pedig akár a 16%-ot is meghaladhatja a becsült növekedés mértéke.

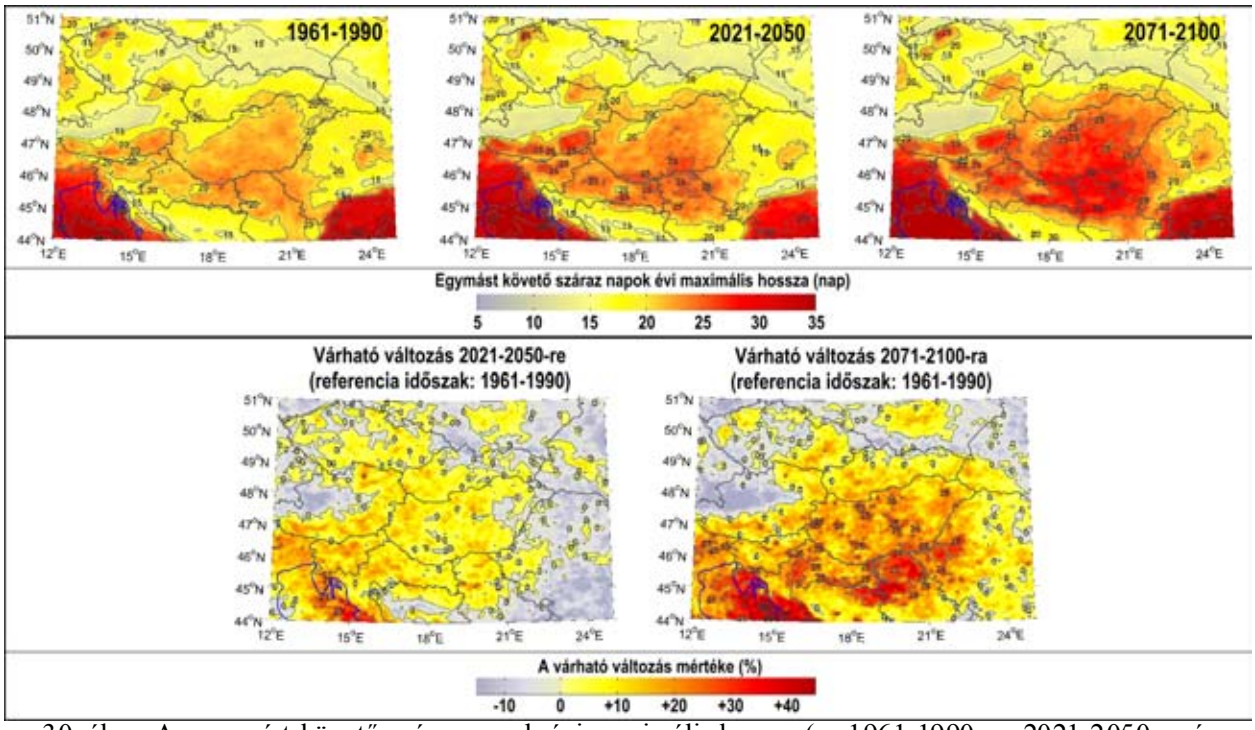


29. ábra. Kompozit térkép az SDII index évszakonként várható relatív változásáról (%) 2021–2050 és 2071–2100 időszakokra az ENSEMBLES keretében futtatott 11 RCM-szimuláció eredményei alapján (referencia időszak: 1961–1990).

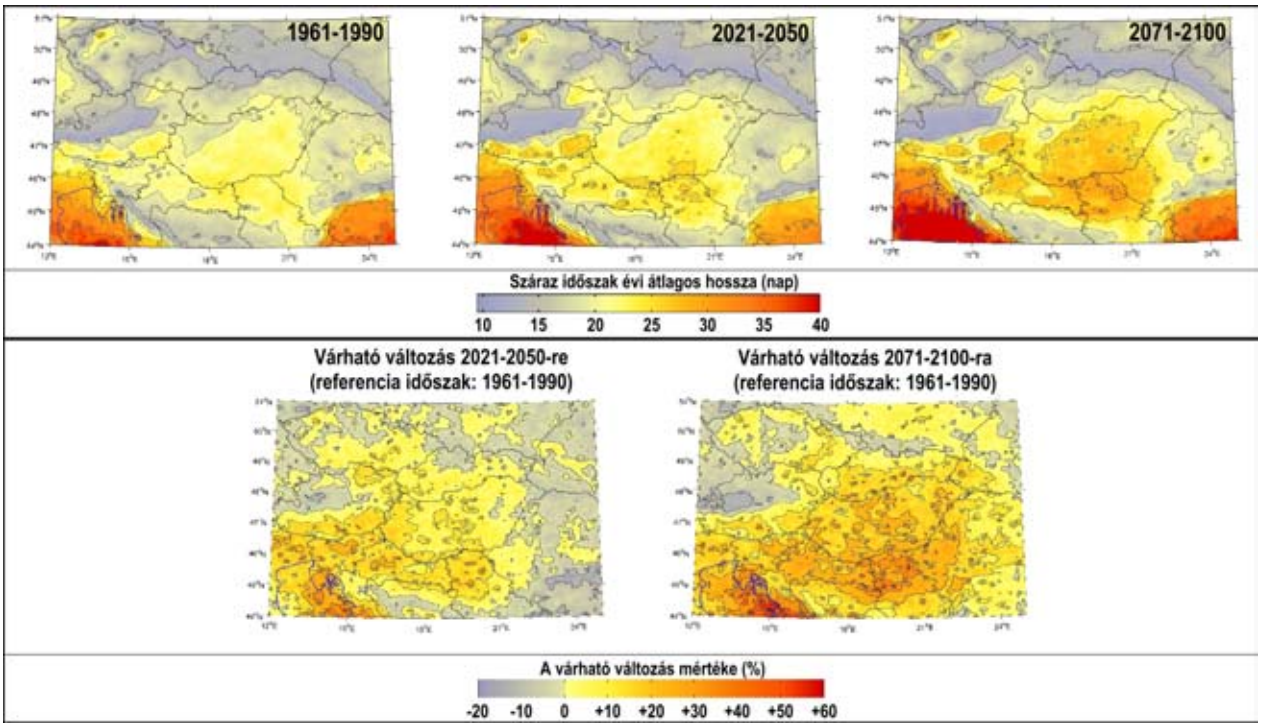
Az eddigiekhez képest finomabb (10 km-es) horizontális felbontású RegCM-szimulációk eredményei alapján a csapadékviszonyokkal kapcsolatos extrém indexek közül két szárazságot és egy csapadékosságot jellemző paraméter elemzését mutatjuk be a fejezet hátralévő részében. Elsőként a 30. ábra felső három térképén az egymást követő száraz napok évi maximális hosszát láthatjuk, melyeket a RegCM 1961-1990-re, 2021-2050-re, s 2071-2100-ra vonatkozó szimulációi alapján határoztunk meg. Az alsó két térkép a közelebbi és a távolabbi jövőre várható változások mértékét jelzi a referencia időszakhoz viszonyítva. Definíció szerint száraz napnak tekintettük azon napokat, melyeken a napi csapadékösszeg nem haladta meg az 1 mm-t. A térképeken látható térbeli szerkezet a három szimulációs időszakban nagy mértékben hasonlít egymásra. A hegyvidéki területeken az egymást követő száraz napok évi maximális hossza nem haladja meg a 15-20 napot, a Kárpát-medence térségében viszont magasabb értékek jellemzőek. A XXI. század közepére várható változások kisebb mértékűek, mint a század végére várhatóak. A magasabban fekvő területeken, s az integrálási tartomány északi részén kisebb változásokra számíthatunk, s a száraz időszakok évi maximális hossza néhány százalékkal csökkenhet. A Kárpát-medencén belül 2071-2100-re 25%-ot meghaladó mértékű növekedés valószínűsíthető, főként a déli térségekben.

A 31. ábrán a száraz periódusok átlagos éves hosszát és a referencia időszakhoz viszonyított várható változás mértékét elemezhetjük. Definíció szerint száraz periódusnak tekintettük azokat az időszakokat, melyek egymást követően legalább 5 száraz napot tartalmaznak (száraz napokon a csapadékösszeg nem haladhatja meg az 1 mm-t). A területi eloszlás mindhárom vizsgált időszakban hasonló: az integrálási tartomány északi térségeiben, főképp a hegyvidéki területeken rövidebb (15-20 napnál jellemzően kisebb értékeket találunk); a Kárpát-medencében, s az Adriai-régióban 20 napnál jellemzően hosszabb átlagos száraz periódusok adódtak a RegCM szimulációk csapadék-mezői alapján. Magyarország területén egyértelműen növekvő tendenciára számíthatunk a XXI.

század során, a század közepére ez a pozitív trend 0-15% között valószínűsíthető a referencia időszakhoz viszonyítva, a század végére pedig 10-30%-ra.



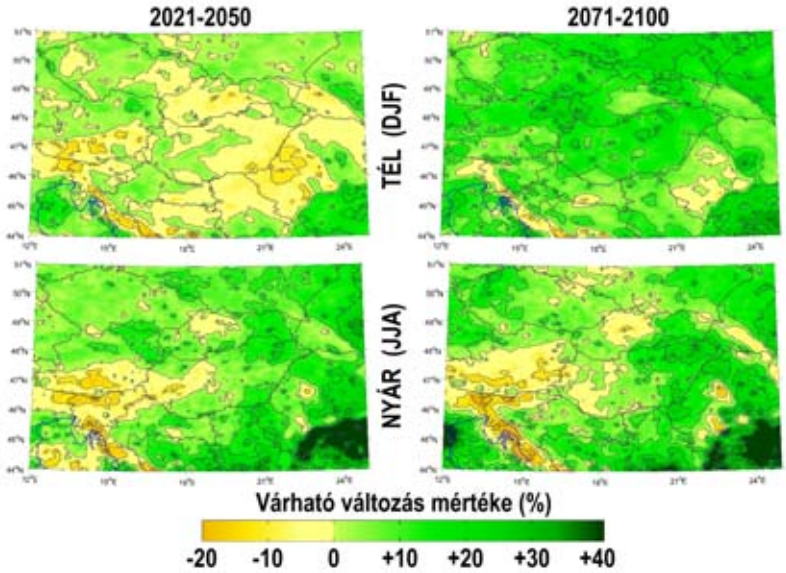
30. ábra: Az egymást követő száraz napok évi maximális hossza (az 1961-1990-re, 2021-2050-re és 2071-2100-ra vonatkozó RegCM-szimulációk alapján), valamint a várható változás mértéke a referencia időszakhoz (1961-1990) viszonyítva.



31. ábra: A száraz periódusok átlagos éves hossza (az 1961-1990-re, 2021-2050-re és 2071-2100-ra vonatkozó RegCM-szimulációk alapján), valamint a várható változás mértéke a referencia időszakhoz (1961-1990) viszonyítva.

A 32. ábrán a téli és a nyári csapadékos napokon lehulló átlagos napi csapadékösszegek referencia időszakhoz (1961-1990) viszonyított várható változásait mutatjuk be a 2021-2050, illetve a 2071-2100 időszakra vonatkozóan. A számítások során csupán azon napokat vettük számításba,

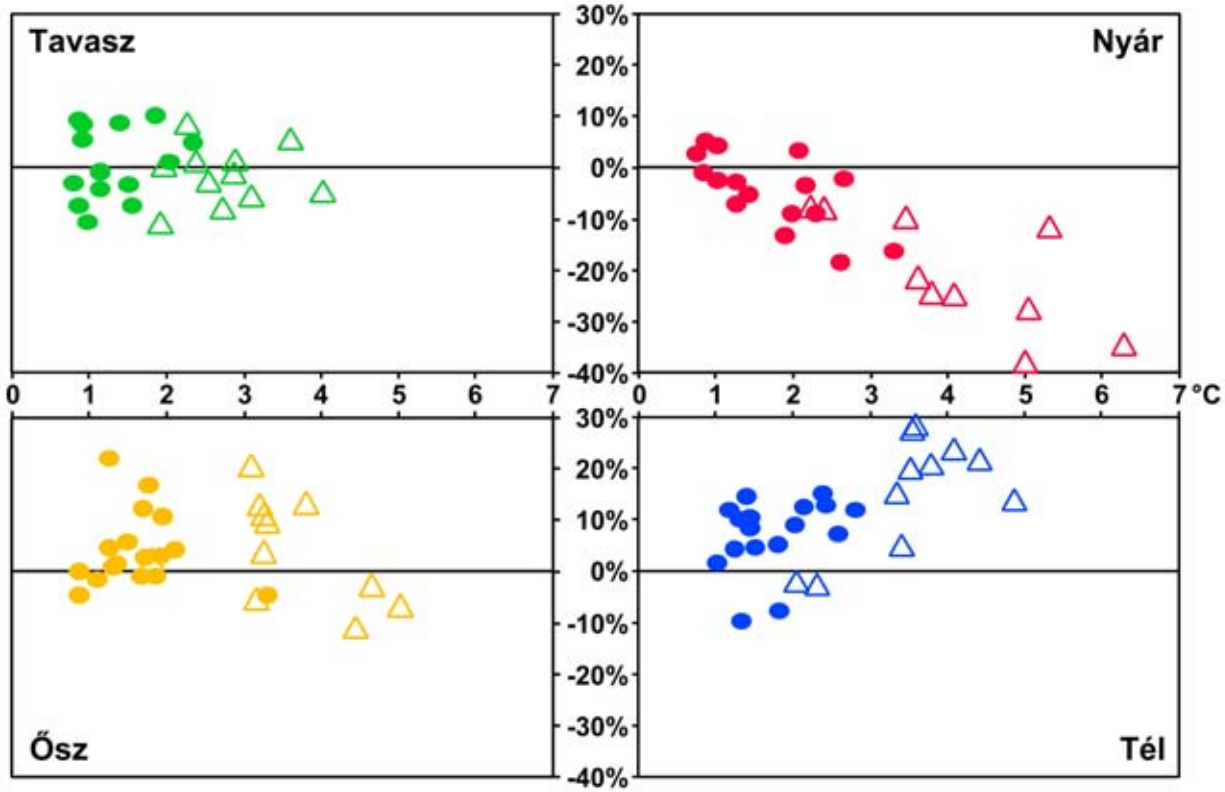
melyek napi csapadékösszege meghaladta az 1 mm-t. A RegCM-szimulációk alapján ily módon számított átlagos csapadékintenzitás hazánk területén a XXI. század közepére télen, illetve nyáron rendre várhatóan (–10%; +10%), illetve (–10%; +20%) közötti mértékben fog változni. A térképekből kitűnik, hogy nyáron várhatóan nagyobb területre terjed ki a növekedő tendencia: az Alföldre, a Kisalföldre, s a Dél-Dunántúlra. A XXI. század végére nyáron valamelyest tovább növekszik a csapadékintenzitás értéke – főképpen a Nyírségben számíthatunk akár 25%-ot is meghaladó mértékű növekedésre. Télen az ország teljes területén pozitív trend prognosztizálható 2071-2100-ra, melynek mértéke (+5%; +20%) közötti a referencia időszakhoz viszonyítva.



32. ábra: A téli és nyári átlagos 1 napi csapadékösszeg várható megváltozása 2021-2050-re és 2071-2100-re a RegCM-szimulációk alapján (csak azokat a csapadékos napokat figyelembe véve, amelyeken a napi csapadékösszeg meghaladja az 1 mm-t).

3. Összefoglalás

A hazánkra a XXI. század közepére (körök) és végére (háromszögek) várható regionális éghajlatváltozást a hőmérsékleti és csapadékbecslések együttes megjelenítésével szemléltetjük a 33. ábrán. Az 1961–1990 referencia időszak átlagos klímáját a két tengely metszéspontja jelöli ki. Ez a kétdimenziós megjelenítés lehetőséget ad az éghajlati viszonyok változásának komplexebb értékelésére: tavasszal és ősszel a melegedés dominál, a csapadékviszonyokban szignifikáns változás nem várható. Nyáron egyértelmű a melegebb és szárazabb klíma irányába történő elmozdulás. A modellszimulációk nagy része az évszázad végére szignifikáns változást jelez mind a hőmérséklet, mind a csapadék esetén. Télen a melegedés mellett csapadékosabb klíma valószínűsíthető.



33. ábra. A Magyarországra várható regionális éghajlatváltozás. A körök a 2021–2050 időszakra, a háromszögek a 2071–2100 időszakra becsült éghajlatváltozást jelzik (referencia időszak: 1961–1990). Egy-egy szimbólum az egyes modellszimulációkból meghatározott hőmérséklet- és csapadékváltozást reprezentálja.

A modellbecslések alapján a hőmérsékleti éghajlati indexek múltbeli átlagos értékeihez viszonyítva jelentős elmozdulások várhatók: a hideg eseményekhez kapcsolódó extrémumok előfordulásának csökkenésére és a meleg extrémumok gyakoribbá válására számíthatunk a jövőben. A várható változás mértéke a 2021–2050 időszakra vonatkozóan megközelítőleg a fele az évszázad végére becsült változás értékének. Az országon belüli térbeli szerkezetet a zonális elrendeződés jellemzi: a délebbi térségekben nagyobb változások valószínűsíthetők. A hegységekben, a magasabban fekvő területeken a meleg hőmérsékleti szélsőségeket jellemző éghajlat indexek sokkal kisebb mértékű növekedése várható, mint a sík vidékeken, s a fagyos napok számában várható változás még az átlagosnál is nagyobb.

Irodalomjegyzék

Bartholy, J., Pongrácz, R., 2007: Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. Global and Planetary Change, 57, 83-95.

Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P., 2008: Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. Időjárás, 112, 249-264.

Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., Torma Cs., 2011: Dynamical downscaling of projected 21st century climate for the Carpathian Basin (chapter 1). In: Climate Change – Research and Technology for Adaptation and Mitigation. (eds: Blanco, J., Kheradmand, H.) InTech, Rijeka, Slovenia. 3-22.

Bujdosó, L., Páldy, A., 2006: Az ÁNTSZ feladatai a klímaváltozás egészségi hatásainak megelőzése érdekében. AGRO-21 Füzetek, 48, 60–67.

Christensen, J.H., 2005: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects – Final Report. DMI, Copenhagen.

Déqué, M., Marquet, P., Jones, R.G., 1998: Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. Climate Dynamics, 14, 173-189.

Dickinson, R.E., Errico, R.M., Giorgi, F., Bates, G.T., 1989: A regional climate model for the western United States. Climatic Change, 15, 383-422.

Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P., 1993: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1 as coupled to the NCAR community climate model. NCAR technical note NCAR/TN-387+STR, 72p.

Formayer, H., Haas, P., 2010: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project). http://www.cecilia-eu.org/

Giorgi, F., 1989: Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires. J. Geophys. Res., 94, 1127-1144.

Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., 1993a: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer processes. Monthly Weather Review, 121, 2794-2813.

Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., Decanio, G., 1993b: Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. Monthly Weather Review, 121, 2814-2832.

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, 147-168.

Grell, G., 1993: Prognostic evaliation of assumptions used by cumulus parameterizations. Monthly Weather Review, 121, 764-787.

Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. J. Geophys. Res (Atmospheres), 113, D20119, doi:10.1029/2008 JD010201.

Holtslag, A., De Bruiin, E., Pan, H-L., 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. Monthly Weather Review, 118, 1561-1575.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J. , Noguer, M., van der Linden, P.J. , Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 881p.

IPCC, 2007: Climate Change 2007. The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [Solomon, S., Qin, D. , Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, UK. 946p.

Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A., 1999: Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators

for Climate Extremes Workshop Summary. Climatic Change, 42, 3-7.
Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G.B., Boville, B., Briegleb, B., Williamson, D., Rasch, P., 1996: Description of NCAR community climate model (CCM3). NCAR technical note NCAR/TN-420 + STR, 152p.
Le Quéré, C., Raupach, M.R., Canadell, J.G., Marland, G., Bopp, L., Ciais, P., Conway, T.J., Doney, S.C., Feely, R., Foster, P., Friedlingstein, P., Gurney, K., Houghton, R.A., House, J.I., Huntingford, C., Levy, P.E., Lomas, M.R., Majkut, J., Metzl, N., Ometto, J.P., Peters, G.P., Prentice, I.C., Randerson, J.T., Running, S.W., Sarmiento, J.L., Schuster, U., Sitch, S., Takahashi, T., Viovy, N., van der Werf, G.R., Woodward, F.I., 2009: Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geosciences, 2, 831–836.
van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., Eds., 2009: ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. UK Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 160p.
Nakicenovic, N., Swart, R., eds., 2000: Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599p.
Pal, J.S., Small, E., Eltahir, E., 2000: Simulation of regionalscale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. J. Geophys. Res., 105(29), 567-594.
Pieczka, I., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2011: Comparison of simulated trends of regional climate change in the Carpathian Basin for the 21st century using three different emission scenarios. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 7, 9-22.
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.
Pongrácz R., Bartholy J., Bartha E.B., 2013: Analysis of projected changes in the occurrence of heat waves in Hungary. Advances in Geosciences, 35, 115-122.
Roeckner, E., Bauml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, L., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part 1. MPI Report No. 349. 140p.
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, 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, 837−849.
Torma Cs., Bartholy J., Pongrácz R., Barcza Z., Coppola E., Giorgi F., 2008: Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. Időjárás, 112, 233-247.
Wilson, S., Hassell, D., Hein, D., Morrell, C., Jones, R., Taylor, R., 2010: Installing and using the Hadley Centre regional climate modelling system, PRECIS. Version 1.8. UK Met Office Hadley Centre, Exeter, 157p.