

A 21. század végén várható regionális éghajlatváltozás Magyarországon

BARTHOLY JUDIT–PONGRÁCZ RITA–GELYBÓ GYÖRGY¹

Abstract

Regional climate change expected in Hungary by the end of the 21st century

In the frame of the European Union 5th Program, the project PRUDENCE provides climate estimations for the last three decades of the 21st century for the entire European continent. The applied regional climate models used 50 km as the horizontal spatial resolution, and evaluated the A2 and B2 global emission scenario. On the basis of the results from the project PRUDENCE, expected climate change estimations are summarized for Hungary for the 2071–2100 period. Our results suggest that in case of temperature, a warming trend is evident in the Carpathian Basin both on annual and seasonal scales. The largest temperature increase is projected for summer, 4.8°C (A2) and 4.0°C (B2), while the smallest seasonal warming is expected in spring, 3.1°C (A2) and 2.5°C (B2). The expected change of annual total precipitation is slightly negative, but not significant. However, significantly large and opposite trends are expected in different seasons. Seasonal precipitation amount is very likely to increase in winter (by 23–37% in case of A2, and by 20–27% in case of B2), while it is expected to decrease in summer (by 24–33% in case of A2, and by 10–20% in case of B2). These results implies that the annual distribution of precipitation is expected to be restructured: the wettest summer season may become the driest (especially in case of A2 scenario), and the driest winter is expected to be the wettest by the end of the 21st century. It is evident that all these climate processes affect agricultural activity and disaster management strategy. In order to prepare for the changing climate conditions, results of this robust regional climate change analysis may serve as basic information until spatially (10 km resolution) and temporally (nearer future) more detailed regional climate model simulations are completed and quality-controlled results are available for further impact studies.

Bevezetés

Az elmúlt években az Európai Unió különböző testületei és az Amerikai Egyesült Államok szenátusa egyaránt nagy erőfeszítéseket tett annak érdekében, hogy a kutatók

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a. E-mail: bari@ludens.elte.hu

fejleszthessék a regionális éghajlati előrejelzések információtartalmát, minőségének és megbízhatóságának növekedését. A korábban jellemző sporadikus, nem kellően koordinált kutatások helyett az V. és VI. EU-keretprogramban megjelentek az egész kontinent átfogó programok (PRUDENCE, STARDEX, MICE), ugyanakkor az Amerikai Egyesült Államokban egy külön kormánybizottság létesült a kutatások összehangolására.

2007. febr. 2-án jelent meg az IPCC (Kormányközi Testület a Klímaváltozásról) negyedik Helyzetértékelő Jelentései között az első munkacsoport eredményeit közlő kötet (IPCC, 2007). Ez a munkacsoport foglalkozik az éghajlatváltozás tudományos elemzésével és az éghajlat várható megváltozásának becslésével. E jelentés szerint az Európa klímáját befolyásoló legfontosabb folyamatok: (1) megnövekedett vízgőzforgalom az alacsonyabb földrajzi szélességek felől a magasabb szélességek felé, (2) a légköri cirkuláció évközi, ill. hosszabb időskálán történő változása, (3) a téli hófedettség területi kiterjedésének és időtartamának csökkenése a kontinens ÉK-i részén, (4) a mediterrán és a közép-európai térségben a talaj nedvességkészletének csökkenése a nyári félévben. Például a Közép-Európát érintő 2003-as nyári hőhullámot egy olyan, hosszan elhúzódó anticiklonális helyzet következményeként is felfoghatjuk (FINK, A.H. et al. 2004), amely jelentős aszályt eredményezett a régióban (BLACK, E. et al. 2004). A jelentés szerint Európa évi átlaghőmérsékletének növekedése a 21. sz. végére várhatóan jelentősen meghaladja a globális melegedés mértékét. A legnagyobb melegedés Észak-Európa térségére télen (BENESTAD, R.E. 2005), míg a Földközi-tenger régiójában nyáron várható. Észak-Európában a téli minimum-hőmérséklet nagy valószínűséggel jobban növekedik majd, mint a téli átlaghőmérséklet (HANSSEN-BAUER, I. et al. 2005). Közép- és Dél-Európában a nyári maximumhőmérséklet várhatóan szintén jobban növekedik majd, mint a nyári átlaghőmérséklet (TEBALDI, C. et al. 2006). A csapadék éves összege Észak-Európában nagy valószínűséggel nő (HANSSEN-BAUER, I. et al. 2005), míg a mediterrán térségben csökken. A két térség határán elhelyezkedő közép-európai régióban az évi összeg várhatóan nem nagyon változik, viszont a téli csapadék növekedése és a nyári csapadék csökkenése prognosztizálható. A nyári csapadékcsökkenés és a tavaszi párolgásnövekedés következtében a nyári aszályok gyakorisága várhatóan megnövekszik Közép-Európában és a Földközi-tenger vidékén (PAL, J.S. et al. 2004; CHRISTENSEN, O.B.–CHRISTENSEN, J.H. 2004). Az európai melegedéssel szoros összefüggésben a havas napok száma és a hóvastagság az egész kontinensen nagy valószínűséggel csökken (IPCC, 2007).

Az 1990-es évek elejére egyértelművé vált, hogy a globális modellekkel technikailag lehetetlen regionális térszkálán is megfelelő pontosságú becsléseket készíteni. Ezt elfogadva, elsőként GIORGI és munkatársai (GIORGI, F. 1990) fejlesztettek ki egy áthidaló módszert, az ún. beágyazott modellel való szimulációt. A globális modellek eredményeit bemenő paraméterként felhasználó korlátos tartományú beágyazott modellek képesek a nagyskálájú változásokat lebontani területileg finomabb skálára. A regionális modellek felbontása mára akár 5–10 km is lehet, mely kisebb térségek pontosabb éghajlati leírását is lehetővé teszi.

Az Európai Unió V. keretprogramjának egyik jelentős kutatási projektje volt a PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk>), melyben 9 EU-s országból összesen 21 egyetem, nemzeti meteorológiai szolgálat és kutatóintézet vett részt. Európában ez volt az első klímaváltozással kapcsolatos nemzetközi összefogással végzett kutatás, melynél pontosan meghatározott „menetrend” szerint történt a partnerek együttműködése (előre megállapodtak a futtatandó globális és regionális modellekben, azok felbontásában, a célidőszakokban és a vizsgált régióban). A projekt futamideje 2001-től 2004-ig tartott.

A PRUDENCE projekt abból a feltevésből indult ki, hogy előreláthatóan a klímaváltozások jelentős hatással lesznek az extrém időjárási események gyakoriságára és amplitúdójára, valamint feltételezhető, hogy a magasabb hőmérsékleti értékek, az intenzívebbé váló hidrológiai ciklus, s a megélnékülű légköri mozgások a regionális éghajlat

megváltozását eredményezik. A kutatás fő célja az európai klímaváltozás kockázatának és hatásainak meghatározása volt regionális scenáriók és bizonytalansági becslések alapján. Ezen belül kiemelt feladatként vállalták a 21. sz. utolsó három évtizedére vonatkozó klímabecslések és azok bizonytalanságának számszerűsítését, éghajlati és hatáselemző modellek összekapcsolását, alkalmazkodási stratégiák kidolgozását (CHRISTENSEN, J.H. 2005). Az első értékelő és összefoglaló publikációk 2006 első félévében jelentek meg.

Számos meteorológiai paraméterre (pl.: átlagos hőmérséklet, maximum- és minimumhőmérséklet, csapadékösszeg, szél, stb.) elkészültek a PRUDENCE projekt keretében a SRES A2 és B2 scenárió (2071–2100 időszak) modellbecslései mind a négy évszakra. Mindegyik paraméterre megtörtént az 1961–1990-es időszak kontrolladataival való összevetés, melyhez a Kelet-Angliai Egyetem Éghajlatkutató Osztálya (CRU) által összeállított adatbázist (NEW, M. et al., 1999) használták fel.

Cikkünkben a Kárpát-medence térségére a 21. sz. végén várható regionális éghajlatváltozási scenáriókat összegezzük a PRUDENCE modellszimulációk felhasználásával. Az adatbázis vázlatos bemutatása után az évszakos hőmérsékleti paraméterek várható alakulását, majd az évszakos csapadék valószínűsíthető változását elemezzük.

Adatok

Finomfelbontású (10–25 km) regionális éghajlati modellek adaptálása Magyarországon jelenleg mind az ELTE Meteorológiai Tanszékén (BARTHOLY, J. et al. 2006), mind az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (HORÁNYI A. 2006) folyamatban van. Ezen klímaszimulációk eredményeire előreláthatóan még több évet várni kell, de a felhasználók számára és a különböző részterületek hatásvizsgálataihoz ennél sokkal előbb, már most szükséges az éghajlatváltozási scenáriók megadása. Ezt a sürgető igényt kívánjuk kielégíteni azzal, hogy a PRUDENCE projekt eredményeit összegezzük és értékeljük a Kárpát-medence térségére, éghajlati becsléseket adva a klímapolitikusoknak, ill. a nemzetgazdaság többi érintett szektorának a 21. sz.-ra. Az A2 scenárió tekintő futtatások közül 16 szimulációt, míg a B2 scenárió esetén 8 szimulációt vettünk figyelembe. Az 1. táblázatban bemutatjuk e szimulációkat futtató intézetek listáját, valamint a regionális és globális klímamodelleket, melyek alapján elemzéseinkben a hőmérséklet- és csapadékváltozásokat bemutató kompozittérképeket készítettük. A Kárpát-medencét reprezentáló területnek a 45,25°–49,25°É és 13,75°–26,50°K által kijelölt térséget választottuk. A PRUDENCE szimulációk a 21. sz. végére (2071–2100) állnak rendelkezésre. Az alkalmazott referencia időszak 1961–1990.

A várható hőmérsékletváltozás a Kárpát-medencében

Elsőként az évszakos átlaghőmérséklet várható alakulását vizsgáltuk a 2071–2100-es időszakra. Kompozittérképeken mutatjuk be az évszakos hőmérsékletnövekedést, míg a különböző modellek eredményeiből adódó

1. táblázat. Az elemzéshez felhasznált regionális modellek (RCM), az azokat futtató intézetek, a futtatáshoz felhasznált globális modellek, s rendelkezésre álló scenáriók

| | Intézet | Regionális modell | Globális modell | Szenárió |
|----|--|-------------------------------|-----------------|----------|
| 1 | Dán Meteorológiai Intézet | HIRHAM | HadAM3H | A2, B2 |
| 2 | | HIRHAM | ECHAM5 | A2 |
| 3 | | HIRHAM finom felbontású | HadAM3H | A2 |
| 4 | | HIRHAM extra finom felbontású | HadAM3H | A2 |
| 5 | Brit Hadley Központ | HadRM3P (ensemble/1) | HadAM3P | A2, B2 |
| 6 | | HadRM3P (ensemble/2) | HadAM3P | A2 |
| 7 | Zürichi Műszaki Főiskola | CHRM | HadAM3H | A2 |
| 8 | Kieli Atomenergiahasznosító Hajóépítési Társaság | CLM | HadAM3H | A2 |
| 9 | | CLM továbbfejlesztett | HadAM3H | A2 |
| 10 | Hamburgi Max Planck Intézet | REMO | HadAM3H | A2 |
| 11 | Svéd Hidrometeorológiai Intézet | RCAO | HadAM3H | A2, B2 |
| 12 | | RCAO | ECHAM4/OPYC | B2 |
| 13 | Madridi Egyetem | PROMES | HadAM3H | A2, B2 |
| 14 | Trieszti Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ | RegCM | HadAM3H | A2, B2 |
| 15 | Norvég Meteorológiai Intézet | HIRHAM | HadAM3H | A2 |
| 16 | Holland Meteorológiai Intézet | RACMO | HadAM3H | A2 |
| 17 | Francia Meteorológiai Szolgálat | ARPEGE | HadCM3 | A2, B2 |
| 18 | | ARPEGE | ARPEGE/OPA | B2 |

bizonytalanságot a hőmérsékletváltozás szórásértékeivel reprezentáljuk. Az A2 scenáriót alkalmazó 16 modellfuttatás alapján készült várható hőmérsékletváltozást láthatjuk az 1. ábrán, míg a 2. ábrán az évszakos szórásmezőket. A 3. és 4. ábrán, a B2 scenárióra vonatkozó (8 modellszimuláció alapján) készített hasonló évszakos mezőket mutatjuk be.

Hasonlóan a globális és európai eredményekhez, az A2 scenárió esetén a Kárpát-medencére is nagyobb melegedés várható, mint a B2 esetén. A 2. táblázatban a Magyarország területére várható melegedés mértékét összegezzük. A melegedés mindkét scenárió esetén nyáron a legnagyobb (4,5–5,1 °C ill. 3,7–4,2 °C), s tavasszal a legkisebb (2,9–3,2 °C, ill. 2,4–2,7 °C). A hőmérséklet emelkedés mértéke nyáron északról dél felé, míg télen és tavasszal nyugatról kelet felé haladva növekszik. A modellek legnagyobb szórása nyáron (0,9–1,1°C) figyelhető meg mindkét scenárió esetén (2., ill. 4. ábra).

2. táblázat. A 2071–2100-as időszakban Magyarországon várható átlaghőmérséklet-változás értékei*

| Szcenárió | Tavaszi (MAM) | Nyár (JJA) | Ősz (SON) | Tél (DJF) |
|-----------|---------------|------------|------------|------------|
| A2 | 2,9–3,2 °C | 4,5–5,1 °C | 4,1–4,3 °C | 3,7–4,3 °C |
| B2 | 2,4–2,7 °C | 3,7–4,2 °C | 3,2–3,4 °C | 2,9–3,2 °C |

*Az A2 szcenárió esetén 16 modellszimuláció eredményeit vettük figyelembe, míg a B2 szcenárió esetén 8 modell-szimuláció eredményei álltak rendelkezésre

Az 5. ábra összegezi az A2 és B2 szcenáriók esetén a Magyarországon várható évszakos hőmérsékletváltozásokat. Általánosságban elmondhatjuk, hogy a 2071–2100-es időszakban a melegedés mértéke mindkét szcenárióra és minden évszakra meghaladja a 2,5 °C-ot, de kisebb mint 4,8 °C. A legkisebb eltérés az A2 és B2 szcenárió között tavasszal várható (0,6 °C), míg legnagyobb télen (1,0 °C). A legnagyobb mértékű melegedés várhatóan nyáron lesz, 4,8 °C az A2 szcenárió esetén, és 4,0°C a B2 szcenárióra. A legkisebb hőmérséklet-növekedés tavasszal várható: 3,1 °C (A2), ill. 2,5 °C (B2).

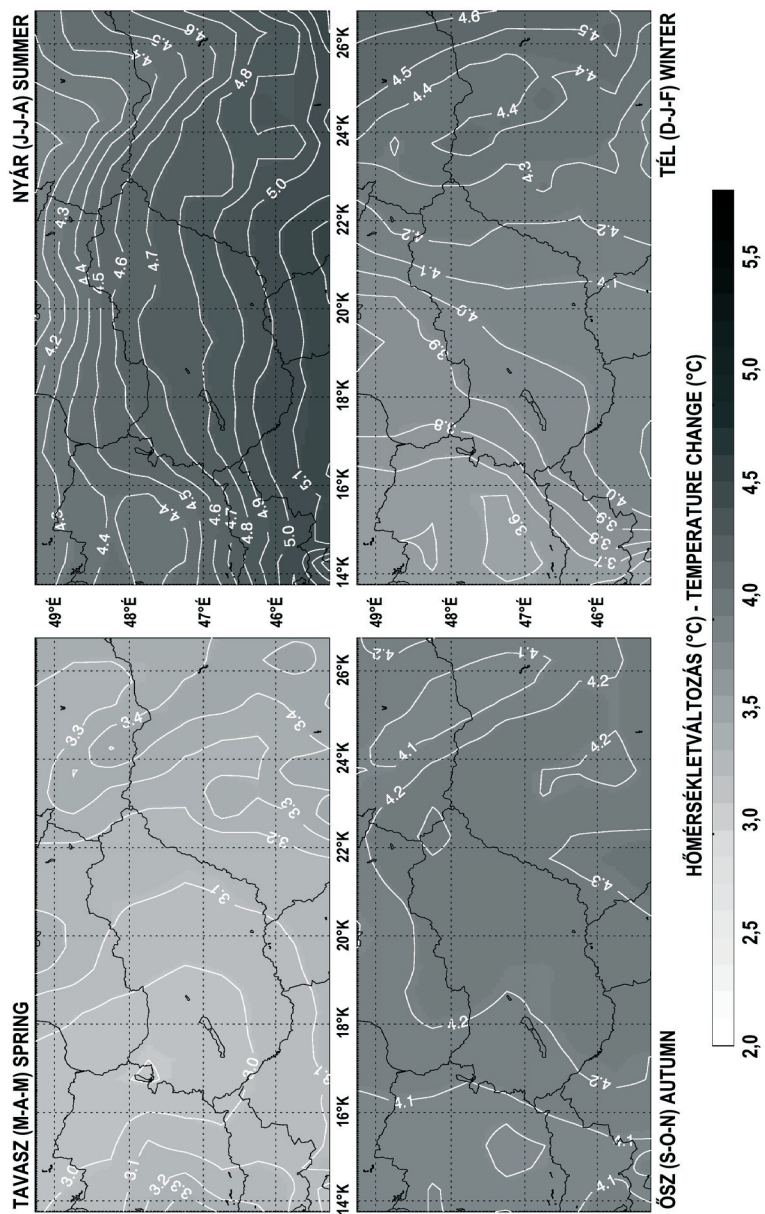
A klímamodellek tesztelésére általánosan használt módszer a jelenlegi éghajlat rekonstruálása, melyhez az 1961–1990-es időszakot szokták alkalmazni. A PRUDENCE szimulációk verifikálásához a CRU adatbázist (NEW, M. et al. 1999) használták. Általánosságban elmondhatjuk, hogy a Kárpát-medence térségében a szimulációk felülbecslik a hőmérsékletet, csak a vizsgált terület nyugati és északkeleti határán figyelhetünk meg alulbecslést (BARTHOLY, J. et al. 2007). A legnagyobb felülbecslés az ország déli részén figyelhető meg, de ennek mértéke sem haladja meg a 1,5°C-ot.

Hasonlóan az átlaghőmérséklethez, a várható évszakos melegedés mértékét a napi maximum- és minimumhőmérsékletre is ábrázoltuk a Kárpát-medence térségére. A 3. táblázatban és a 6. ábrán összegezzük a Magyarország területére várható változásokat. A legnagyobb melegedés mindkét szcenárió esetén nyáron várható: (1) a maximumhőmérséklet várható növekedése 4,9–5,3°C (A2) ill. 4,0–4,4°C (B2), (2) a minimumhőmérséklet várható növekedése 4,2–4,8°C (A2) ill. 3,5–4,0°C (B2). Amint a számértékekből kitűnik, a minimumhőmérséklet valószínűsíthető növekedése általában (tél kivételével) kisebb, mint a maximumhőmérsékleté.

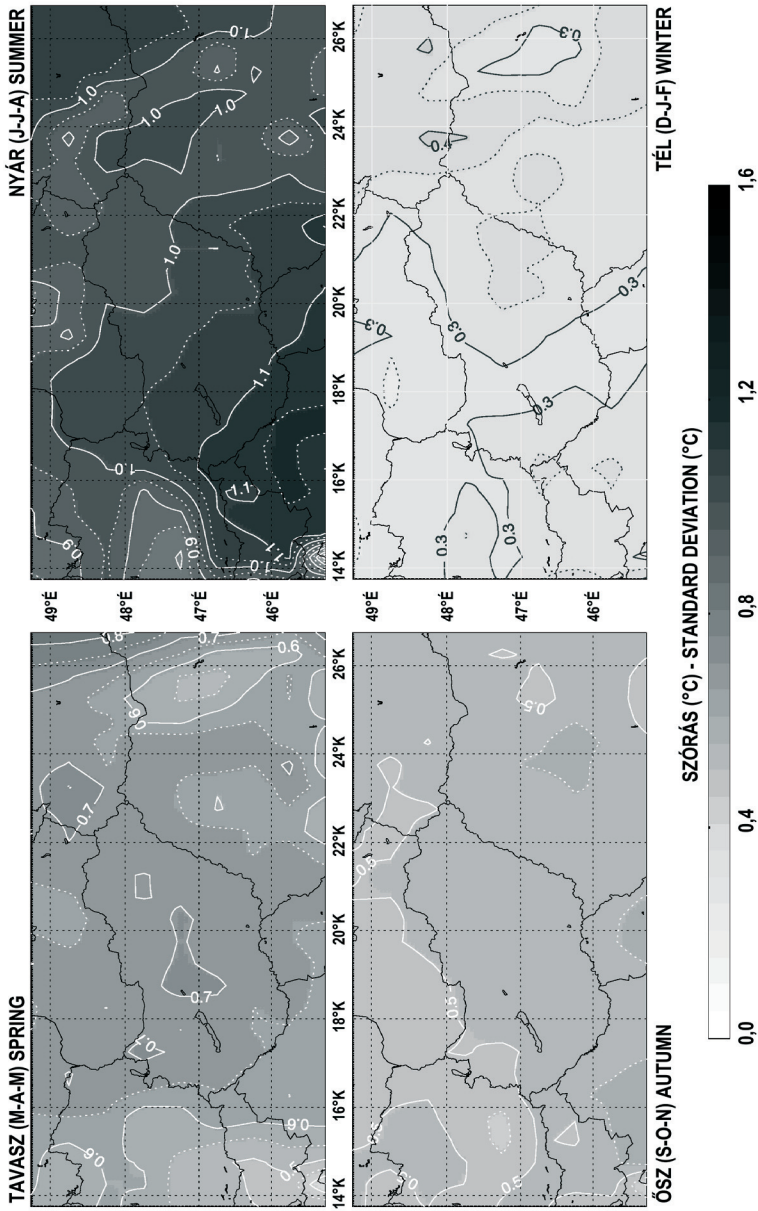
3. táblázat. A 2071–2100-as időszakban Magyarországon várható évszakos növekedés értékei a maximum és minimum hőmérséklet esetén*

| Szcenárió | | Tavaszi (MAM) | Nyár (JJA) | Ősz (SON) | Tél (DJF) |
|-----------|----|---------------|------------|-----------|-----------|
| | | °C | | | |
| Maximum | A2 | 2,8–3,3 | 4,9–5,3 | 4,3–4,6 | 3,7–4,2 |
| | B2 | 2,4–2,6 | 4,0–4,4 | 3,3–3,5 | 2,6–3,0 |
| Minimum | A2 | 3,0–3,2 | 4,2–4,8 | 4,0–4,2 | 3,8–4,6 |
| | B2 | 2,3–2,7 | 3,5–4,0 | 3,0–3,2 | 2,8–3,5 |

*A megjegyzést lásd a 2. táblázatnál.

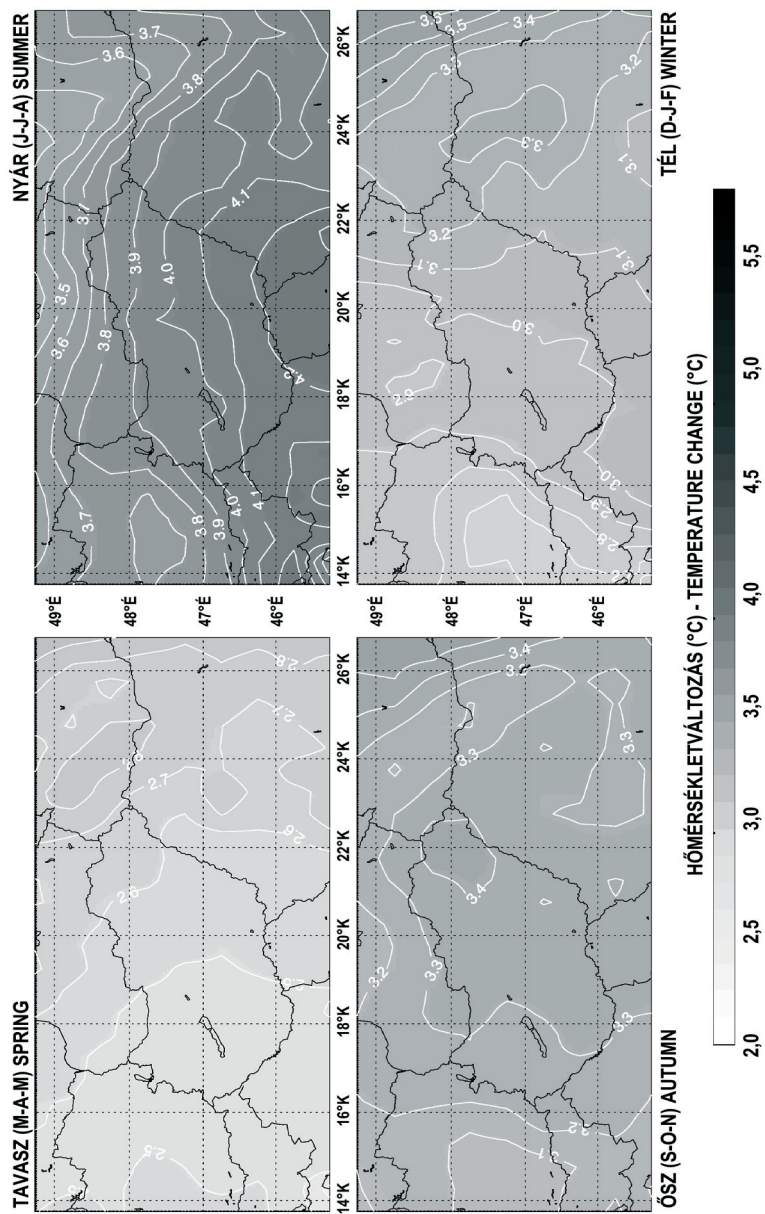


1. ábra. Évszakos hőmérsékletváltozás (°C) a Kárpát-medence térségében 16 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, A2 szcenárió esetére
 Seasonal temperature change (°C) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 16 RCM simulations, A2 scenario



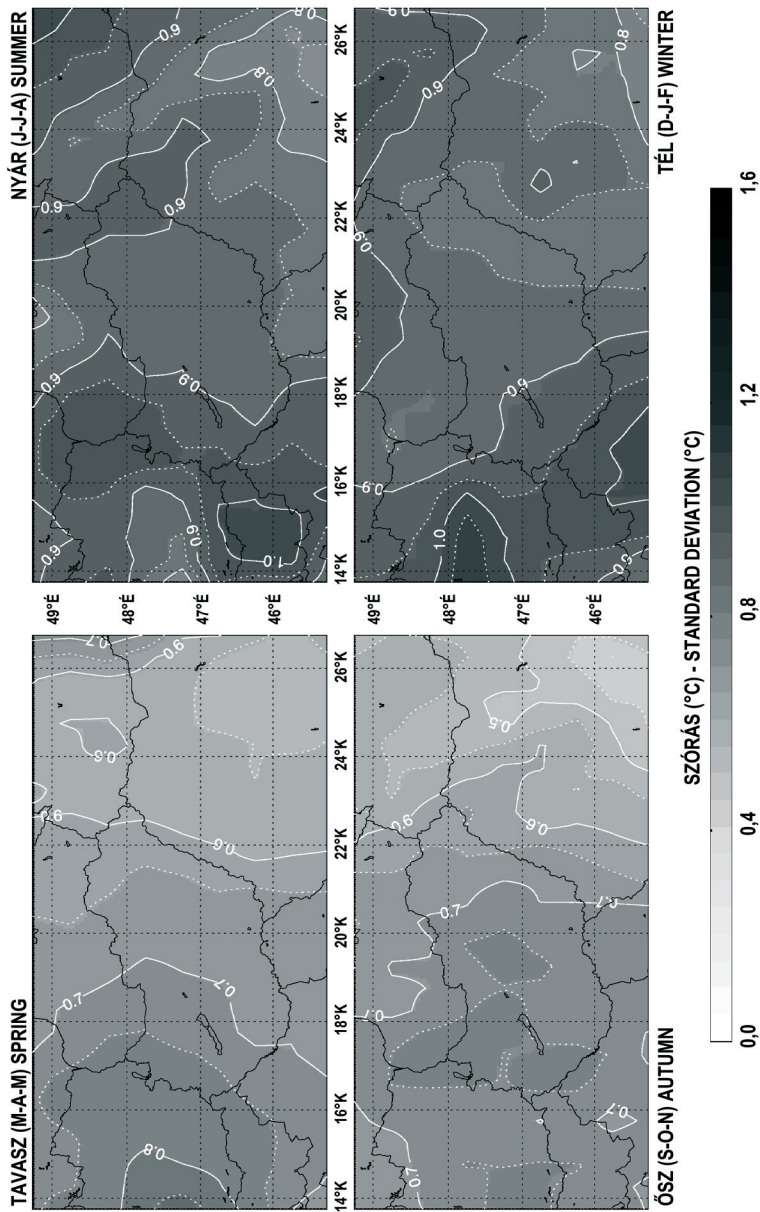
2. ábra. Az évszakos hőmérsékletváltozások szórása (°C) a Kárpát-medence térségében 16 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, A2 szcenárió esetére

Standard deviation of seasonal temperature change (°C) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 16 RCM simulations, A2 scenario

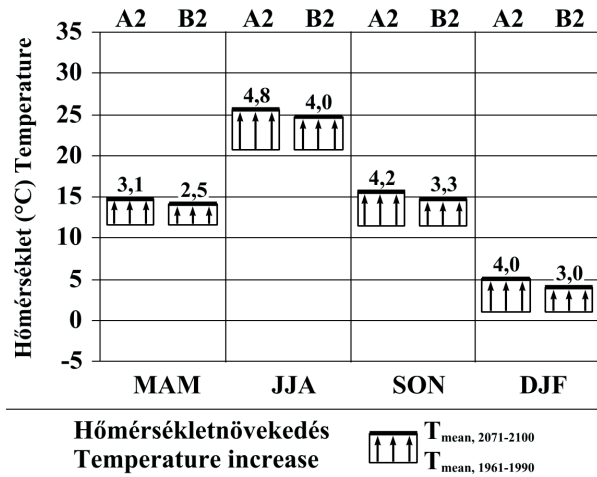


3. ábra. Évszakos hőmérsékletváltozás (°C) a Kárpát-medence térségében 8 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, B2 scenárió esetére

Seasonal temperature change (°C) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 8 RCM simulations, B2 scenario

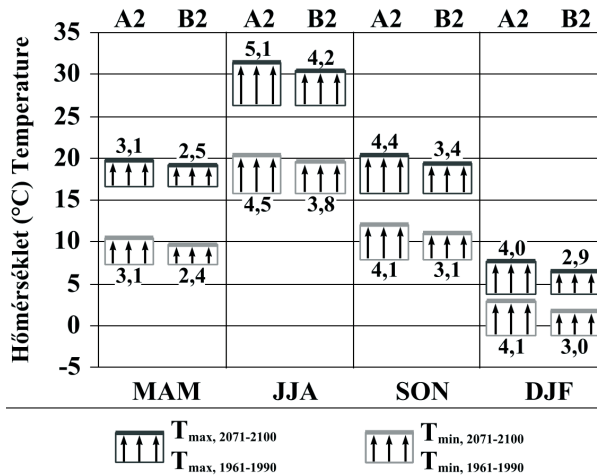


4. ábra. Az évszakos hőmérsékletváltozások szórása (°C) a Kárpát-medence térségében 8 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, A2 szcenárió esetére
 Standard deviation of seasonal temperature change (°C) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 8 RCM simulations, A2 scenario



5. ábra. A Magyarországon várható átlaghőmérséklet-változás évszakos értékei a 21. sz. végén (az 1961–1990 közötti referencia-időszak hőmérsékletei a Budapesten mért értékeket jelzik)

Expected seasonal increase of mean temperature (°C) for Hungary by the end of 21st century (temperature values of the reference period, 1961–1990, represent the seasonal mean temperature in Budapest)



6. ábra. A Magyarországon várható maximum- és minimumhőmérséklet-változás évszakos értékei a 21. sz. végére (az 1961–1990 közötti referencia-időszak hőmérsékletei a Budapesten mért értékeket jelzik)

Expected seasonal increase of daily minimum and maximum temperature (°C) for Hungary by the end of 21st century (temperature values of the reference period, 1961–1990, represent the seasonal mean temperature in Budapest)

Annak érdekében, hogy a 21. sz. végére, Magyarországon várható hőmérséklet-változások (átlag, maximum, minimum) területi eloszlását jobban áttekinthessük, a 4. táblázatban összefoglaltuk a téli és nyári melegedés területi gradiens értékeit. Nyáron zonális struktúra figyelhető meg minden paraméter esetén, azaz a várható melegedés mértéke északról dél felé növekszik. Télen általában meridionális struktúra várható, azaz nyugatról keletre haladva nő a várható melegedés – az egyedüli kivétel a maximumhőmérséklet várható növekedése a B2 scenárió esetén, mely zonális elrendeződést mutat, de ebben az esetben is, ha nagyobb térséget veszünk figyelembe, akkor már itt is megjelenik a meridionális gradiens (CHRISTENSEN, J.H. 2005). Tavasszal és ősszel sokkal kisebbek a gradiens értékek, nem haladják meg a 0,4 °C-ot.

4. táblázat. A 2071–2100-as időszakban várható nyári és téli hőmérsékletnövekedés térbeli gradiens-értékei a Kárpát-medencében*

| Hőmérséklet | Scenárió | Nyár (JJA) | Tél (DJF) |
|---------------------|----------|---------------|--------------------|
| | | °C | |
| Átlaghőmérséklet | A2 | Zonális: +0,7 | Meridionális: +0,6 |
| | B2 | Zonális: +0,5 | Meridionális: +0,5 |
| Maximum hőmérséklet | A2 | Zonális: +0,6 | Meridionális: +0,5 |
| | B2 | Zonális: +0,4 | Zonális: +0,4 |
| Minimum hőmérséklet | A2 | Zonális: +0,7 | Meridionális: +0,8 |
| | B2 | Zonális: +0,6 | Meridionális: +0,7 |

* A pozitív irány a zonális gradiens esetén É-ről D-re, a meridionális gradiens esetén Ny-ról K-re mutat.

A várható csapadékváltozás a Kárpát-medencében

A hőmérséklethez hasonlóan bemutatjuk a regionális klímamodellek által 2071–2100-ra becsült várható csapadékváltozás évszakos kompozittérképeit (7. és 9. ábra), valamint a kapott csapadékváltozásokból számított szórásértékeket (8. és 10. ábra) a Kárpát-medence térségére.

Mind az A2, mind a B2 scenárió esetén az évi csapadékösszegben nem várható jelentős mértékű változás (BARTHOLY, J. et al., 2003), de ezt nem mondhatjuk el az évszakos csapadékösszegekről. A csapadék változásának várható tendenciája nem minden évszakban azonos előjelű. Nyáron (és kisebb mértékben ősszel) a teljes vizsgált térségben a csapadék csökkenésére, míg télen (és kisebb mértékben tavasszal) a csapadék növekedésére számíthatunk. Az 5. táblázatban foglaljuk össze az évszakos csapadékváltozás Magyarországra várható értékeit a két vizsgált scenárióra. A hőmérséklethez hasonlóan az A2 scenárió esetén nagyobb mértékű csapadékváltozás valószínűsíthető, mint a

5. táblázat. A 2071–2100-ra várható évszakos csapadékváltozás értékei Magyarországon*

| Szcenárió | Tavaszi (MAM) | Nyár (JJA) | Ősz (SON) | Tél (DJF) |
|-----------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| | % | | | |
| A2 | 0 – (+10) | (-24) – (-33) | (-3) – (-10) | (+23) – (+37) |
| B2 | (+3) – (+12) | (-10) – (-20) | (-5) – 0 | (+20) – (+27) |

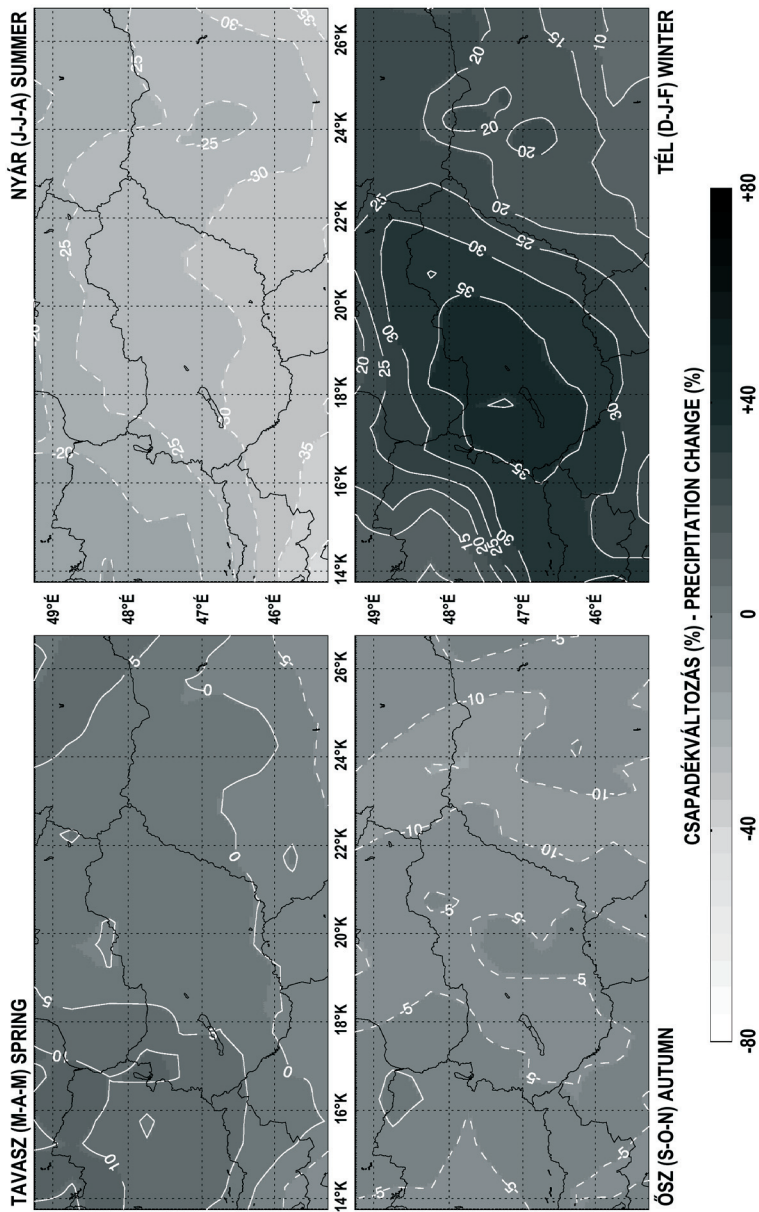
*A megjegyzést lásd a 2. táblázatnál.

B2 szcenárióra. Az előrejelzett csapadékcsökkenés mértéke nyáron 24–33% (A2 szcenárió), ill. 10–20% (B2 szcenárió), míg a téli csapadéknövekedés mértéke 23–37% (A2 szcenárió), ill. 20–27% (B2 szcenárió). A modelleredményekből adódó bizonytalanságot reprezentáló évszakos szórásértékek alapján (8. és 10. ábra) a modellek előrejelzésében a legnagyobb eltérések az A2 szcenárió esetén nyáron mutatkoznak (amikor a szórásértékek akár a 20%-ot is elérhetik), míg a B2 szcenárió esetén tavasszal (amikor a szórásértékek elérik a 16%-ot). A többi évszakban viszonylag jó egyezés mutatkozik a modelleredmények között.

A 11. ábrán bemutatjuk a magyarországi csapadék éves eloszlásában várható változást az A2 és a B2 szcenárió esetén. Az évszakonkénti csapadékcsökkenést szürke, míg a csapadéknövekedést fekete nyilak jelölik. Az 1961–1990 közötti referencia időszakban az átlagosan lehullott csapadékmennyiség alapján az évszakonkénti értékek csökkenő sorrendje: nyár, tavasz, ősz, tél. A modelleredmények e sorrend teljes átrendeződését valószínűsítik a 21. sz. végére. A modellek azt jelzik, hogy mindkét szcenárió esetén a legcsapadékosabb két évszak a tél és a tavasz lesz (ebben a sorrendben). A legszárazabb évszak pedig az A2 szcenárió szerint várhatóan a nyár, míg a B2 szcenárió esetén az ősz lesz.

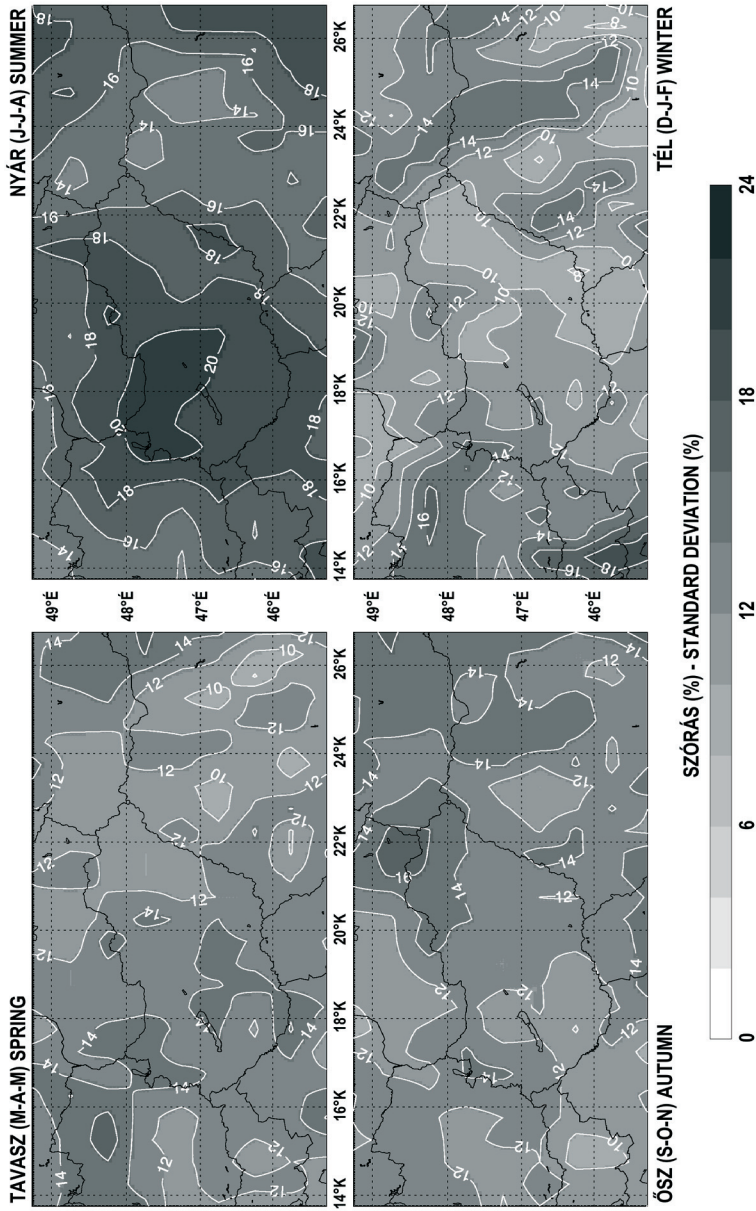
A klímaprojekciók alapján a B2 szcenárió esetén az évszakos csapadék-mennyiségek közötti különbségek szignifikáns csökkenése várható (felére csökken), mely azt eredményezi, hogy az éves csapadékeloszlás kiegyenlítettebbé válik a 21. sz. végére. Nem mondható el ugyanez az A2 szcenárió esetére, ahol várhatóan továbbra is jelentős mértékben eltér egymástól a téli és a nyári csapadékösszeg, miközben a legszárazabb és a legcsapadékosabb évszak felcserélődik.

A csapadék sokkal változékonyabb meteorológiai elem, mint a hőmérséklet, s ennek megfelelően a várható változások térbeli struktúrája is sokkal bonyolultabb. Az előrejelzett csapadékváltozások területi eloszlását a 6. táblázatban foglaljuk össze. Mind az A2, mind a B2 szcenárió esetén a legerősebb területi változékonyság télen várható, pozitív radiális gradienssel, azaz a szélektől befelé történő csapadéknövekedéssel. Nyáron az A2 szcenárió esetén zonális gradiens a jellemző, azaz É-ről D felé haladva a várható csapadék-csökkenés mértéke nő. A B2 szcenárió esetén radiális gradiens a jellemző, vagyis a szélektől befelé haladva nő a csapadék-csökkenés mértéke.



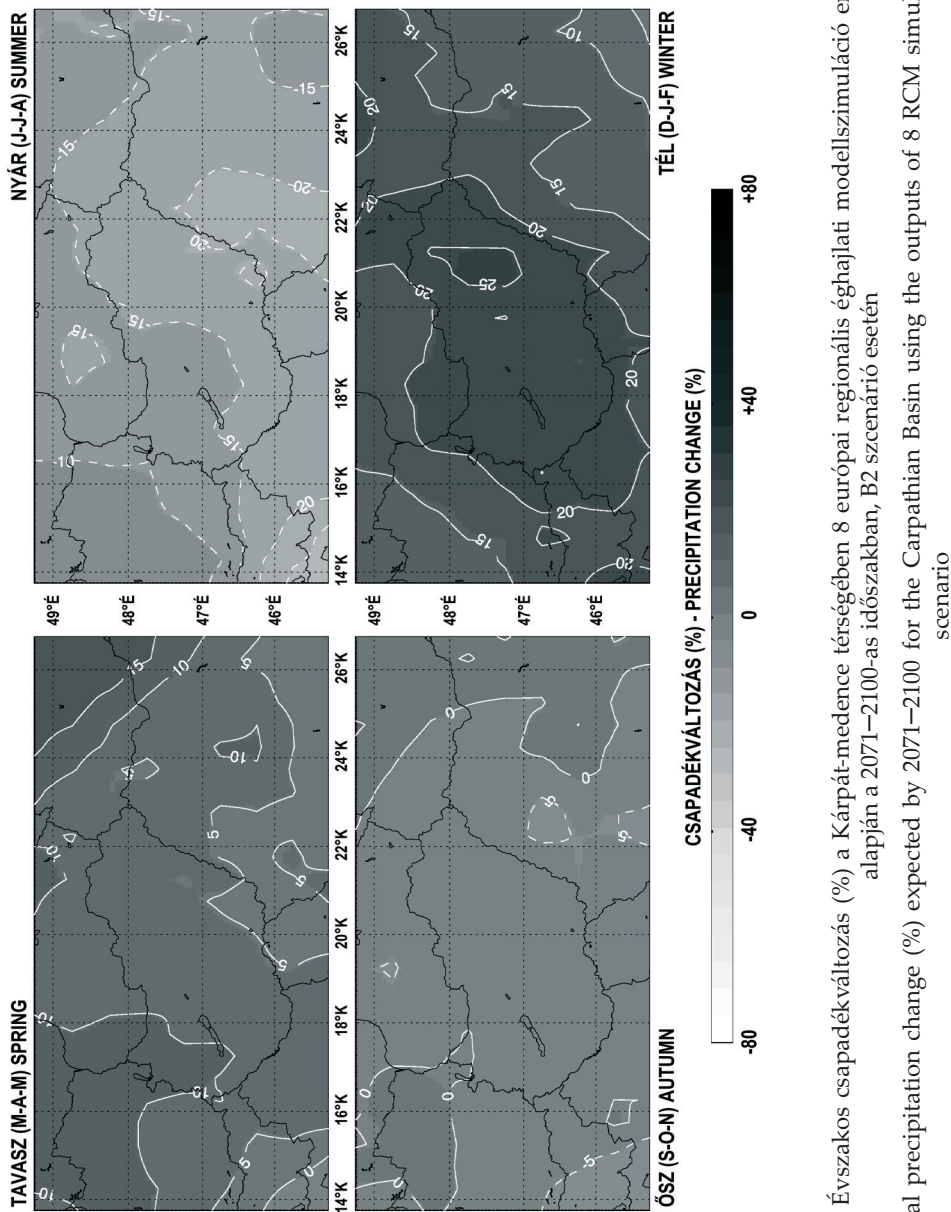
7. ábra. Évszakos csapadékváltozás (%) a Kárpát-medence térségében 16 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, A2 szcenárió esetén

Seasonal precipitation change (%) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 16 RCM simulations, A2 scenario

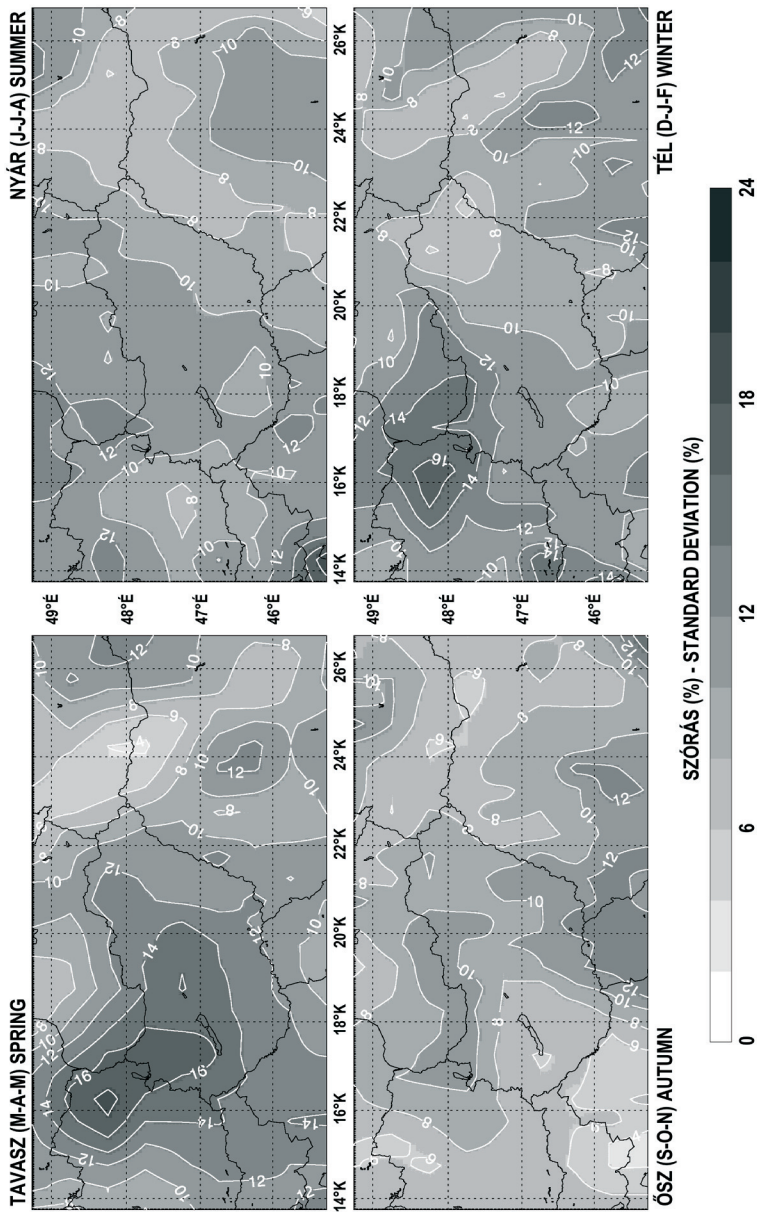


8. ábra. Az évszakos csapadékváltozások szórása (%) a Kárpát-medence térségében 16 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, A2 szcenárió esetén

Standard deviation of seasonal precipitation change (%) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 16 RCM simulations, A2 scenario

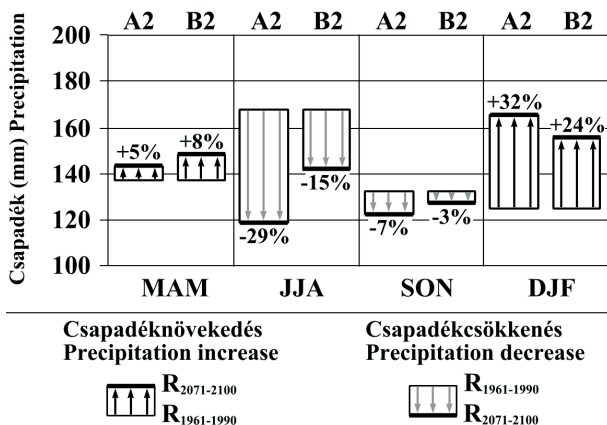


9. ábra. Évszakos csapadékváltozás (%) a Kárpát-medence térségében 8 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, B2 szcenárió esetén
 Seasonal precipitation change (%) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 8 RCM simulations, B2 scenario



10. ábra. Az évszakos csapadékváltozások szórása (%) a Kárpát-medence térségében 8 európai regionális éghajlati modellszimuláció eredményei alapján a 2071–2100-as időszakban, B2 scenárió esetén

Standard deviation of seasonal precipitation change (%) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 8 RCM simulations, B2 scenario



11. ábra. A Magyarországon várható csapadékváltozás évszakos értékei a 21. sz. végére (az 1961–1990 közötti referencia-időszak értékei a Budapesten mért csapadékösszegeket jelzik) Expected seasonal change of mean precipitation (mm) for Hungary by the end of 21st century (precipitation values of the reference period, 1961–1990, represent the seasonal mean precipitation amount in Budapest)

6. táblázat. A 2071–2100-as időszakban várható évszakos csapadékváltozás térbeli gradiens-értékei a Kárpát-medencében*

| Szcenárió | Tavaszi (MAM) | Nyár (JJA) | Ősz (SON) | Tél (DJF) |
|-----------|---------------|---------------|------------------|---------------|
| | | % | | |
| A2 | Zonális: -10 | Zonális: -8 | Meridionális: -7 | Radiális: +13 |
| B2 | Zonális: -5 | Radiális: -10 | Radiális: 0 | Radiális: +5 |

*A pozitív irány a zonális gradiens esetén É-ről D-re, a meridionális gradiens esetén Ny-ról K-re, a radiális gradiens esetén a szélektől befelé mutat

A hőmérséklethez hasonlóan, a csapadéokra is végeztünk hibaanalízist az 1961–90-es időszakra a CRU adatbázis (NEW, M. et al. 1999) felhasználásával. A csapadék esetén a modellek inkább felülbecslik a jelen éghajlati viszonyokat, s csupán a vizsgált terület DNY-i régiójában találunk alulbecslést. Szigorúan hazánk területét vizsgálva a szimulált és mért csapadékértékek közötti eltérések a -10% és +20% közötti intervallumba esnek (BARTHOLY, J. et al. 2007).

Az 1 °C-os globális melegedés esetére várható éghajlatváltozás a Kárpát-medencében

A PRUDENCE projekt keretében végzett modellfuttatások célidőszaka a 21. sz. vége (2071–2100), így a Kárpát-medencére vonatkozó elemzéseink-

ben mi is ezt az időszakot vizsgáltuk. A klímaváltozások okozta hatásvizsgálatokhoz a közelebbi jövőre vonatkozó előrejelzésekre lenne szükség, de ezek egyelőre még nem állnak rendelkezésünkre. A századvégre (2071–2100) vonatkozó modellbecslések alapján CHRISTENSEN, J.H. (2005) meghatározta az 1 °C-os globális melegedéshez tartozó regionális hőmérséklet- és csapadékváltozásokat az európai országokra (az A2, ill. a B2 szcenáriók esetén adódó globális melegedés mértékét 1 °C-ra arányosítva). Ehhez az elemzéshez 50 km x 50 km-es ráccsal fedték le egész Európát, és az adott országok területére eső rácspontri értékeket átlagolták. Majd az összes modellfuttatás (25) hőmérsékletre és csapadékra vonatkozó becsléseit összegezték. Ezután az évi és évszakos átlag-, ill. szórásértékek alapján egy normál eloszlású valószínűségi függvényt illesztettek, és ez alapján számították a 95%-os, 50%-os és 5%-os valószínűséggel várható értékeket, amelyek mindegyikéhez megadták a 95%-os konfidencia-intervallumot is. Ezeket az eredményeket foglaljuk össze Magyarországra a 7. és 8. táblázatban a hőmérsékletre, ill. a csapadékra vonatkozóan, amelyek közel 30 rácspontról veszik alapul. A számszerűsített eredmények összhangban vannak az előző két fejezetben bemutatott térképeken látható becslésekkel.

7. táblázat. Magyarországon várható hőmérsékletváltozás a 2071–2100-as időszakban 25 modellszimuláció eredményei alapján (CHRISTENSEN, J.H. 2005 *)

| Mutató | Éves | Tavaszi (MAM) | Nyár (JJA) | Ősz (SON) | Tél (DJF) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Átlag | 1,4 | 1,1 | 1,7 | 1,5 | 1,3 |
| Szórás | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,3 | 0,3 |
| 95. percentilis | 1,9 [1,8–2,1] | 1,6 [1,5–1,8] | 2,4 [2,2–2,6] | 2,0 [1,8–2,1] | 1,9 [1,7–2,1] |
| 5. percentilis | 0,9 [0,7–1,0] | 0,6 [0,5–0,8] | 1,0 [0,8–1,2] | 1,0 [0,8–1,1] | 0,8 [0,6–0,9] |

*A percentilisek esetén a zárójelben található értékek a 95%-os konfidencia-intervallumot jelölik.

8. táblázat. Magyarországon várható csapadékváltozás a 2071–2100-as időszakban 25 modellszimuláció eredményei alapján (CHRISTENSEN, J.H. 2005*)

| Mutató | Éves | Tavaszi (MAM) | Nyár (JJA) | Ősz (SON) | Tél (DJF) |
|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|------------------|
| Átlag | -0,3 | 0,9 | -8,2 | -1,9 | 9,0 |
| Szórás | 2,2 | 3,7 | 5,3 | 2,1 | 3,7 |
| 95. percentilis | 3,4 [2,2–4,6] | 7,0 [5,0–9,0] | 0,5 [(-2,3)–(3,2)] | 1,5 [0,4–2,7] | 15,0 [13,0–16,9] |
| 5. percentilis | -3,9 [(-5,1)–(-2,8)] | -5,2 [(-7,2)–(-3,3)] | -16,9 [(-19,5)–(-14,1)] | -5,3 [(-6,4)–(-4,2)] | 3,0 [1,0–5,0] |

*A megjegyzést lásd a 7 táblázatnál.

A hőmérséklet esetén egyértelműen melegedő tendencia mutatkozik (7. táblázat), ami erősebb az 1 °C-os globális átlaghőmérséklet-emelkedésnél. Az évi 1,4 °C-os hőmérséklet emelkedésnél nagyobb mértékű változásra számíthatunk nyáron és ősszel (1,7, ill. 1,5 °C), míg télen és tavasszal valamivel kisebb mértékűre (1,3, ill. 1,1 °C). A 2071–2100-ra várható évi csapadékösszeg-változás csekély mértékű negatív tendenciával jellemezhető (8. táblázat). Az évszakos csapadékösszegben hazánkban jelentős (abszolút értékben átlagosan közel 10%-os) változás a téli és nyári évszakban valószínűsíthető, előbbi esetén növekedésre, utóbbinál csökkenésre számíthatunk. Az átmeneti évszakokban a különböző modellek által adott becslések nem ennyire egyértelműek – némelyek modell csökkenést, mások növekedést valószínűsítenek Magyarország térségére.

Következtetések

Az Európai Unió V. keretprogramja által finanszírozott PRUDENCE projekt az SRES A2 és B2 scenárió esetén Európára ad becsléseket a 21. sz. utolsó három évtizedére, 50 km-es rácsfelbontással. E vizsgálatok eredményei alapján levonható az az általános következtetés, hogy a Kárpát-medencében a hőmérséklet egyértelműen melegedő tendenciát mutat – az évi átlagnál nagyobb mértékű hőmérséklet-növekedés várható nyáron és ősszel. Az évi csapadékösszeg 2071–2100-ra várható változását csekély mértékű negatív tendencia jellemzi, télen növekedő, míg nyáron csökkenő évszakos csapadékösszeg valószínűsíthető. Részletesebben az alábbiakban foglaljuk össze a jelen cikkben tárgyalt vizsgálataink eredményeit.

– Hasonlóan a globális és európai eredményekhez, a Kárpát-medencére is az A2 scenárió esetén nagyobb melegedés várható, mint a B2 esetén. A melegedés mindkét scenárió esetén nyáron a legnagyobb, s tavasszal a legkisebb.

– A 2071–2100-as időszakban a melegedés várható mértéke mindkét scenárió esetén mindegyik évszakban meghaladja a 2,5 °C-ot, de kisebb lesz, mint 4,8 °C. A legnagyobb mértékű melegedés várhatóan nyáron lesz, az A2 scenárió esetén 4,8 °C, és 4,0 °C a B2 scenárióra. A legkisebb hőmérséklet-növekedés tavasszal várható: 3,1 °C (A2), ill. 2,5 °C (B2). A legkisebb eltérés az A2 és B2 scenárió között tavasszal várható (0,6 °C), míg a legnagyobb télen (1,0 °C).

– Az 1961–1990 közötti referencia időszakban a szimulációk felülbecslik a hőmérsékletet a Kárpát-medence térségében, csak a vizsgált terület nyugati és az északkeleti határain figyelhetünk meg alulbecslést.

– A legnagyobb melegedés mindkét scenárió esetén nyáron várható. A maximumhőmérséklet várható növekedése 4,9–5,3 °C (A2), ill. 4,0–4,4 °C (B2). A minimumhőmérséklet várható növekedése 4,2–4,8 °C (A2) ill. 3,5–4,0 °C (B2). Amint a számértékekből kiténik, a minimumhőmérséklet valószínűsíthető növekedése általában (tél kivételével) kisebb, mint a maximumhőmérsékleté.

– Nyáron zonális struktúra figyelhető meg minden hőmérsékleti paraméter esetén, azaz a várható melegedés mértéke É-ról D felé növekszik. Télén általában meridionális struktúra várható, azaz Ny-ról K-re haladva nő a várható melegedés. Tavasszal és ősszel sokkal kisebbek a gradiens értékek, az ország határain belül nem haladják meg a 0,4 °C-ot.

– Mind az A2, mind a B2 scenárió esetén a csapadék évi összegében nem várható jelentős mértékű változás, viszont az évszakos csapadékösszegek változásának várható tendenciája eltérő előjelű. Nyáron (és kisebb mértékben ősszel) a Kárpát-medence térségében a csapadékmennyiség csökkenésére, míg télen (és kisebb mértékben tavasszal) annak növekedésére számíthatunk.

– Az előrejelzett csapadékcsökkenés mértéke nyáron 24–33% (A2 scenárió), ill. 10–20% (B2 scenárió), míg a téli csapadéknövekedés mértéke 23–37% (A2 scenárió), ill. 20–27% (B2 scenárió).

– Az 1961–1990 közötti referencia időszakban a legcsapadékosabb évszakunk a nyár volt, a legszárazabb pedig a tél. A modelleredmények valószínűsítik az éven belüli csapadékeloszlás átrendeződését a 21. sz. végére. A modellek azt jelzik, hogy mindkét scenárió esetén a legcsapadékosabb évszak a tél lesz, míg a legszárazabb várhatóan a nyár (A2 scenárió), ill. az ősz (B2 scenárió).

– Mind az A2, mind a B2 scenárió szerint a legnagyobb területi változékonyság télen várható, pozitív radiális gradienssel. Nyáron az A2 scenárió esetén zonális gradiens a jellemző, míg a B2 scenárió esetén radiális.

Hangsúlyozzuk, hogy az itt bemutatott modellbecslések nem pótolják az olyan dinamikus modellekkel (BARTHOLY, J. et al. 2006; HORÁNYI A. 2006) végzendő, a 21. sz. egészére kiterjedő finom felbontású (akár 10 km-es) regionális klímaanalízist, amely több globális éghajlati scenáriót vesz figyelembe, amellet számos meteorológiai paramétert és éghajlati szélsőértékeket is tartalmaz. Amíg ezek a részletes elemzések elkészülnek, addig az itt bemutatott eredmények tendencia jellegű információkat nyújthatnak a klímapolitikusok és gazdasági tervezők munkájához.

Köszönetnyilvánítás

Az éghajlatváltozási modellszimulációk adatbázisát az EU EVK2–CT2001-00132 számú szerződésében támogatott PRUDENCE projekt keretében állították elő. Kutatásainkat az MTA és a Miniszterelnöki Hivatal 10.025–MeH-IV/3.1/2006 számú pályázata, az OTKA T-049824 számú pályázata, valamint az NKFP-3A/0082/2004 és az NKFP-6/079/2005 pályázatok támogatták. További segítséget nyújtott az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005), a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, továbbá az MTA TKI Alkalmazkodás a klímaváltozáshoz című, 2006/TKI/246 számú programja.

- BARTHOLY, J.–PONGRÁCZ, R.–MATYASOVSKY, I.–SCHLANGER, V. 2003. Expected regional variations and changes of mean and extreme climatology of Eastern/Central Europe. – In: Combined Preprints CD-ROM of the 83rd AMS Annual Meeting. Paper 4.7, American Meteorological Society, 10 p.
- BARTHOLY, J.–PONGRÁCZ, R.–TORMA, Cs.–HUNYADY, A. 2006. A PRECIS regionális klímamodell és adaptálása az ELTE Meteorológiai Tanszékén. – In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok. – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (szerk: WEIDINGER T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 99–114.
- BARTHOLY, J.–PONGRÁCZ, R.–GELYBÓ, Gy. 2007. Regional climate change expected in Hungary for 2071–2100. – Applied Ecology and Environmental Research, 5. pp. 1–17.
- BENESTAD, R.E. 2005. Climate change scenarios for northern Europe from multi-model IPCC AR4 climate simulations. – Geophysical Research Letters, 32. L17704, doi:10.1029/2005GL023401.
- BLACK, E.–BLACKBURN, M.–HARRISON, G.–HOSKINS, B.J.–METHVEN, J. 2004. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. – Weather, 59. pp. 217–223.
- CHRISTENSEN, J.H. 2005. Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects – Final Report. – DMI, Copenhagen, 269 p.
- CHRISTENSEN, O.B.–CHRISTENSEN, J.H. 2004. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. – Global and Planetary Change, 44. pp. 107–117.
- FINK, A.H.–BRÜCKER, T.–KRÜGER, A.–LECKEBUSCH, G.C.–PINTO, J.G.–ULBRICH, U. 2004. The 2003 European summer heatwaves and drought – synoptic diagnostics and impacts. – Weather, 59. pp. 209–216.
- GIORGI, F. 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. – Journal of Climate, 3. pp. 941–963.
- HANSEN-BAUER, I.–ACHBERGER, C.–BENESTAD, R.E.–CHEN, D.–FØRLAND, E.J. 2005. Statistical downscaling of climate scenarios over Scandinavia: A review. – Climate Research, 29. pp. 255–268.
- HORÁNYI A. 2006. Regionális klímadinamikai kutatások: nemzetközi és hazai áttekintés. – In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok – Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (szerk: WEIDINGER T.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, pp. 62–70.
- IPCC 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. – Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York.
- NEW, M.–HULME, M.–JONES P. 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961–90 mean monthly terrestrial climatology. – Journal of Climate, 12. pp. 829–856.
- PAL, J.S.–GIORGI, F.–BI, X. 2004. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections. – Geophysical Research Letters, 31. L13202, doi:10.1029/2004GL019836.
- TEBALDI, C.–HAYHOE, K.–ARBLASTER, J.M.–MEEHL, G.E. 2006. Going to the extremes: an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. – Climatic Change, 79. pp. 185–211.