

REGCM SZIMULÁCIÓKON ALAPULÓ ÉGHAJLATI BECSLÉSEK EREDMÉNYEI

Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Pieczka Ildikó, Szabóné André Karolina

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: prita@nimbus.elte.hu, bartholy@caesar.elte.hu, pieczka@nimbus.elte.hu,
karol@nimbus.elte.hu

Bevezetés

A globális és regionális klímaváltozás jövőbeli alakulásához kapcsolódóan napjaink kulcskérdései közé tartoznak az éghajlatváltozás közvetlen következményei (melyek elsődlegesen az emberi szervezetet és/vagy a természetes környezetet érintik), valamint a gazdasági és társadalmi folyamatokban jelentkező közvetettebb hatások. Meteorológus szempontból ezek a témák rengeteg megválaszolandó kérdést vetnek fel, s az ELTE Meteorológiai Tanszékének egyik fő kutatási irányvonalát képezik. A válaszadáshoz alapvetően az éghajlati modelleket, s ezek szimulációs eredményeit tekintjük kiindulási eszköznek. A múltra vonatkozó modellfuttatások alapján értékelhetjük, hogy a modellek milyen mértékben képesek reprodukálni az elmúlt időszakok éghajlati viszonyait (pl.: Pieczka et al., 2014, Pongrácz et al., 2015). A kapott hibák alapján kijelölhetők a fő fejlesztési irányok, melyek a modell javítását célozzák. A jövőre végzett modellszimulációk különféle feltételezett jövőképeket felhasználva adnak becslést az éghajlat jövőbeli alakulására. Mivel ezek a becslések relatíve sok, változó bizonytalanságot tartalmazó feltételezést foglalnak magukba, ezért az így kapott eredmények csupán lehetséges éghajlati viszonyokat írnak le – melyek alapvetően a feltételek teljesüléséhez köthetők. Az elemzések során érdemes minél több modell, minél több szimulációját vizsgálni, így a bizonytalanság becslésére is módunk nyílhat. A modellszimulációk elvégzése még a jelenlegi, egyre fejlettebb informatikai környezetben is időigényes feladat. Így különböző kutatóintézetek, egyetemi kutatócsoportok összefogásával több modellfuttatás koordinált, párhuzamos végrehajtásával lehet a lehetséges éghajlati jövőképek előállításához szükséges időt valamelyest csökkenteni. A kapott szimulációs eredmények együttes értékelése lehetőséget ad a bizonytalanság becslésére. Kutatásaink során a Kárpát-medence térségére fókuszálva több ilyen szimuláció-együttesre alapuló jövőbeli éghajlati becslést készítettünk (pl.: Bartholy et al., 2007, 2008; Pongrácz et al., 2011a), melyek különböző jövőre vonatkozó forgatókönyveket vettek figyelembe. Az IPCC¹ legújabb Helyzetértékelő Jelentésében (IPCC, 2013) már az újabb, a sugárzási kényszer megváltozásán alapuló forgatókönyveket alkalmaztak. A jelentésben a globális klímamodellek futtatási eredményei alapján készült elemzéseket találunk. Kisebb régiókat – például Magyarország térségét – tekintve ezeket az eredményeket pontosítani szükséges, melyhez a globális modellek szimulációs eredményeinek leskálázását kell elvégezni. Erre a célra a beágyazott regionális klímamodellek (RCM²) szolgálhatnak megfelelő eszközül. Az elmúlt másfél évtizedben két klímamodellel végeztünk saját szimulációs futtatásokat: a brit fejlesztésű PRECIS-vel (Bartholy et al., 2009, 2014; Pongrácz et al., 2011b; Pieczka et al., 2011, 2012) és a trieszti ICTP³ intézeten keresztül elérhető RegCM-mel (Bartholy et al., 2010; Torma et al., 2008, 2011). Ebben a cikkben az utóbbi RCM újabb változatával, a RegCM4.3 modellverzióval (Elguindi et al., 2011) kapott eredményeinket mutatjuk be.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change: Éghajlatváltozási Kormányközi Testület

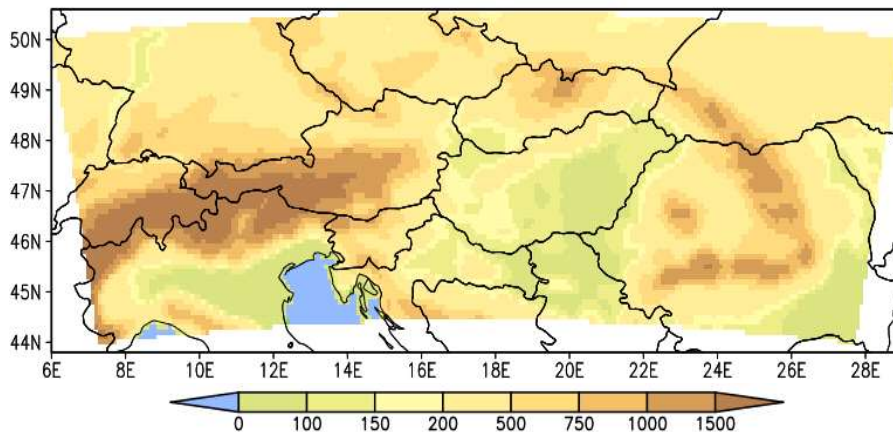
² Regional Climate Model: regionális klímamodell

³ Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics: Nemzetközi Elméleti Fizikai Központ,

Az új fejlesztések összefoglaló leírása, valamint a jövőre vonatkozó futtatást megelőzően végrehajtott, múltbeli éghajlati viszonyokat célzó szimulációk és az alkalmazandó csapadék-séma kiválasztását segítő érzékenységvizsgálat részletes elemzése korábbi publikációinkban (Pongrácz et al., 2015; Pieczka et al., 2016) található meg. Ezeket a területi korlátok miatt itt most mellőzünk, s csak a becsült klímaváltozási trendeket elemezzük.

Modellfuttatási beállítás, vizsgált scenáriók

Az érzékenységvizsgálat eredményeképpen kiválasztottuk azt a modellbeállítást, amivel a regionális éghajlati viszonyok legjobb rekonstrukcióját tudtuk elérni a múltbeli teszt-időszakban. Így a teljes XXI. századot is felölelő, 10 km horizontális felbontású RegCM-szimulációkban (1. ábra) az ún. kevert MIT-Emanuel/Grell konvektív csapadék parametrizációs séma szerepel. Ebben a kevert sémában a vizsgált térségen belül kisebb kiterjedésben megjelenő tengeri felszínek esetén az MIT-Emanuel közelítés (Emanuel, 1991; Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999) szerepel, a célterület legnagyobb részét kitevő szárazföldi felszínek felett viszont a Grell (1993) sémával számoltunk, melyben az ún. FC (Fritsch & Chappell, 1980) lezárást alkalmaztuk.



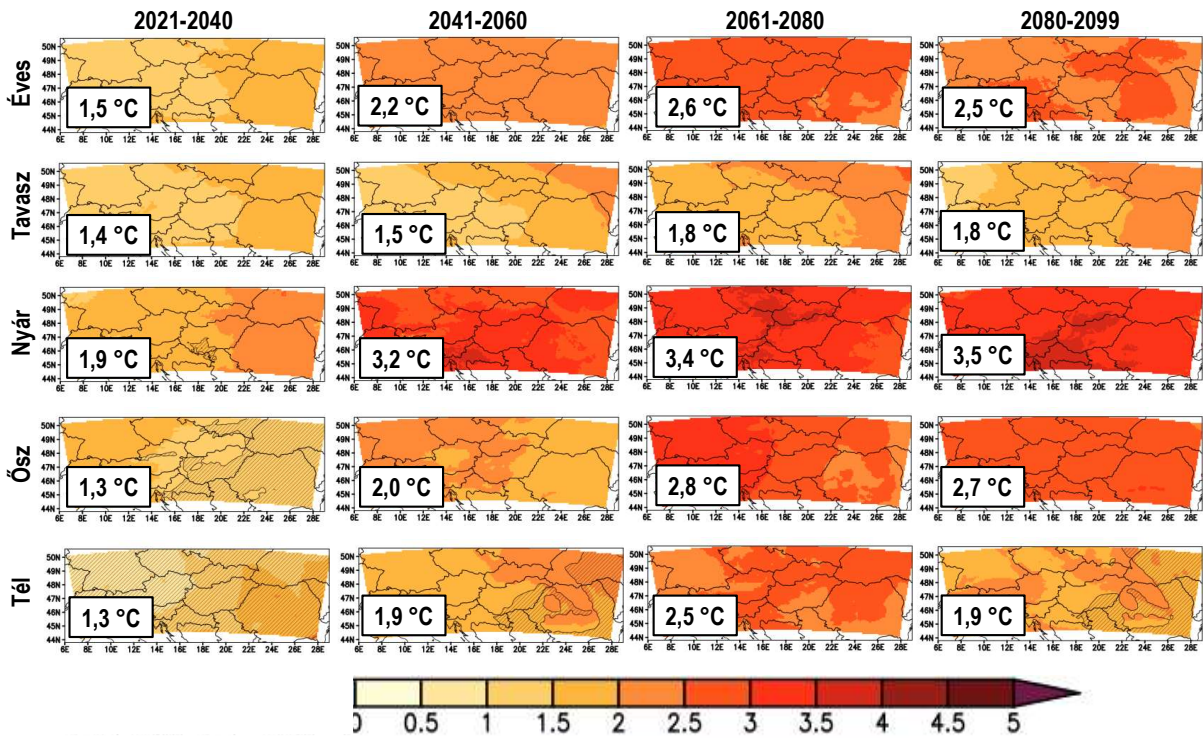
1. ábra: A 10 km-es horizontális felbontású modellszimulációkban alkalmazott 216×120 rácscellát tartalmazó tartomány domborzata.

A jövőre vonatkozó új RCP⁴ scenáriók (van Vuuren et al., 2011) közül két különbözőt vizsgáltunk: az RCP4.5-t és az RCP8.5-t. A megadott számérték azt fejezi ki, hogy az ipari forradalom előtti időszakhoz képest 2100-ra mekkora sugárzási kényszer változással számolunk W/m² egységben kifejezve (2. ábra). Tehát a nagyobb mértékű sugárzási kényszer változás az emberi tevékenységek hatásának erőteljesebb érvényesülését feltételezi.

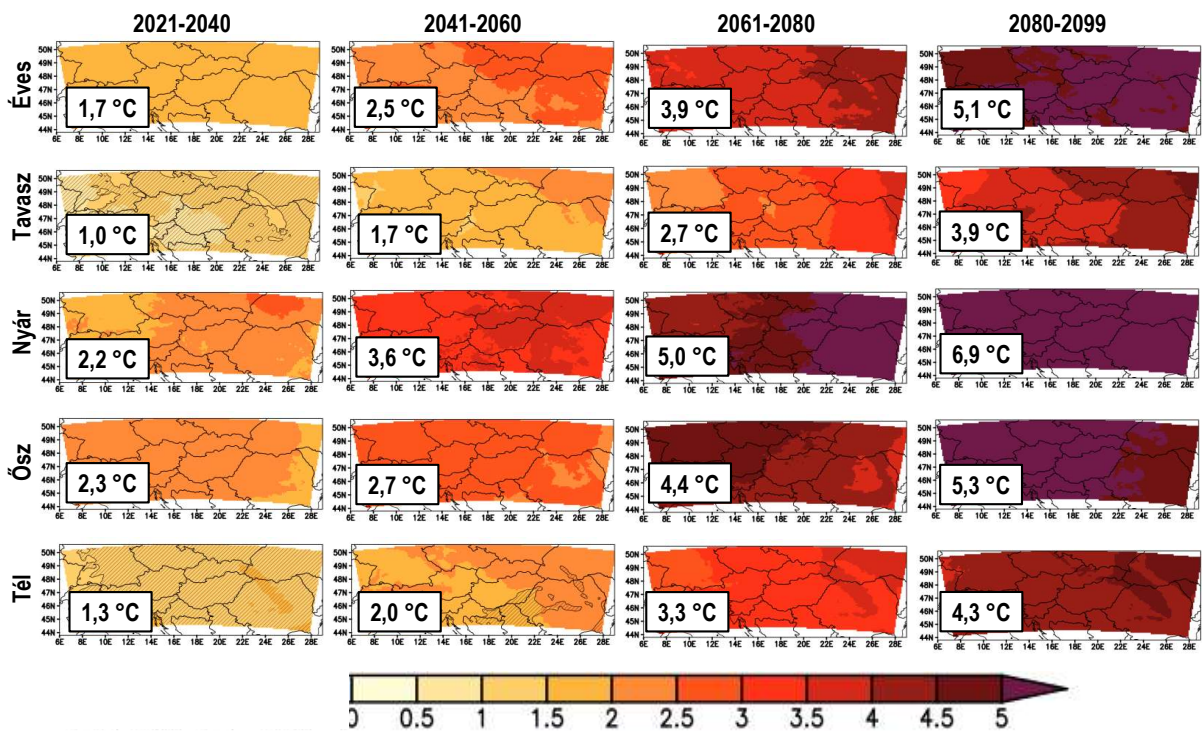
Várható hőmérsékletváltozás

A RegCM szimulációk által a Kárpát-medence térségére becsült várható évi és évszakos hőmérsékletváltozást a 3. és a 4. ábra foglalja össze térképes formában (előbbi az RCP4.5 scenáriót, utóbbi az RCP8.5 scenáriót figyelembe vevő futtatás alapján). A modellszimulációk egyértelműen melegeledést valószínűsítenek a teljes évszázadra vonatkozóan, mely mindkét forgatókönyv esetén várhatóan nyáron lesz a legnagyobb, s tavasszal a legkisebb mértékű.

⁴ Representative Concentration Pathway: reprezentatív koncentrációváltozási pálya



3. ábra: Várható hőmérsékletváltozás (°C) az RCP4.5 szcenárió figyelembe vételével, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal alsó sarkában megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik.

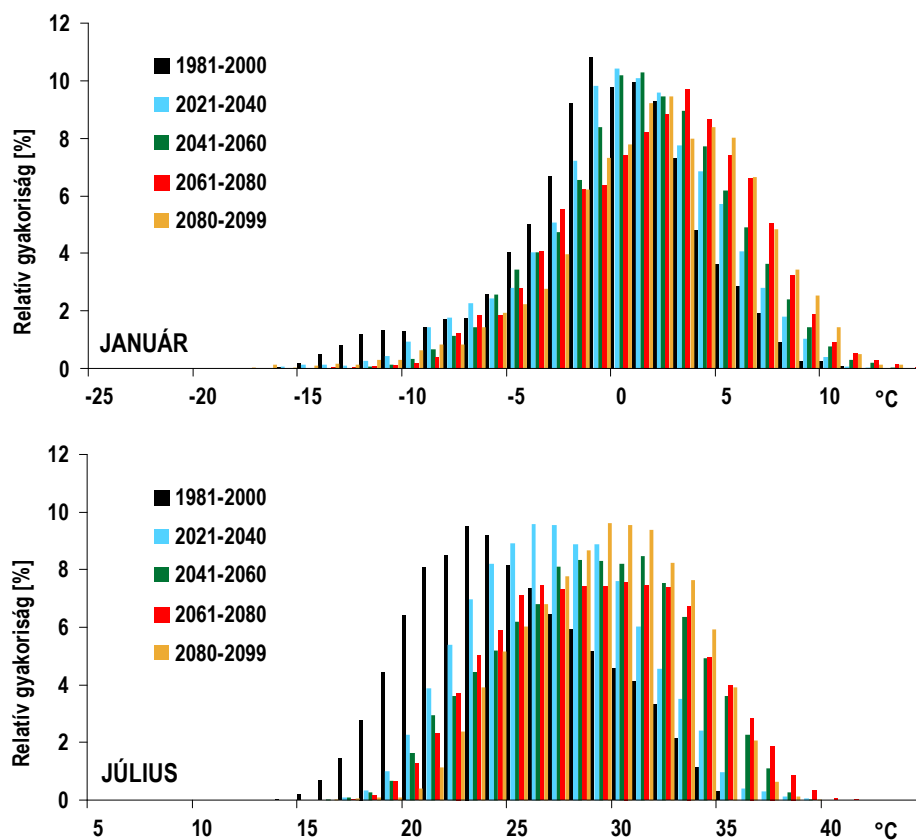


4. ábra: Várható hőmérsékletváltozás (°C) az RCP8.5 szcenárió figyelembe vételével, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal alsó sarkában megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik.

Az RCP4.5 forgatókönyv esetén a nyárra várható országos átlagos melegedés mértéke 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, illetve 2080–2099 időszakokra rendre 1,9 °C, 3,2 °C, 3,4 °C és 3,5 °C (az 1981–2000 referencia időszakhoz képest), tavasszal az évszázad közepétől a nyári melegedéshez képest mintegy 1,6–1,7 °C-kal kisebb melegedés valószínűsíthető Magyarország területén. Mivel az RCP4.5 scenárió esetén az antropogén eredetű sugárzási kényszer megváltozása a XXI. század második felében már kisebb mértékű, ezért a regionális átlaghőmérsékletekben is kisebb különbséget kaptunk a két utolsó húszéves periódus között. Tehát 2061–2080 és 2081–2100 között a korábbiakhoz képest kisebb változás várható. Ugyanakkor az évszázad vége felé közeledve jóval nagyobb mértékű változások valószínűsíthetők az RCP8.5-re az RCP4.5-höz viszonyítva. A scenáriók közötti különbség már a 2041–2060 időszakban is megjelenik: a várható melegedés nyáron 3,6 °C (tavasszal mindössze 1,7 °C, amely viszont csak kis mértékben haladja meg az RCP4.5 esetére kapott becslést). Az évszázad vége felé közeledve a becült melegedés mértékében nagyobb különbségeket kaphatunk: az RCP8.5 scenárió esetén a legnagyobb átlagos hőmérsékletemelkedés nyáron 6,9 °C, amely az RCP4.5 esetén becült melegedésnek csaknem a kétszerese. A kapott különbség oka a sugárzási kényszer változása és a melegedés között fennálló egyértelmű kapcsolatban keresendő.

A hőmérsékleti extrémumokban várható változás

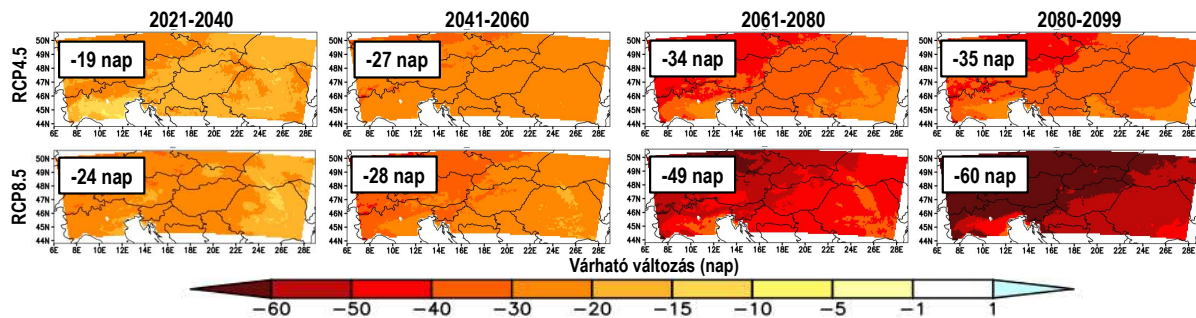
A szélsőséges hőmérsékleti viszonyok előfordulásának vizsgálatához napi hőmérsékleti értékek (napi minimum-, közép- és maximum-hőmérséklet) elemzését végeztük el a RegCM szimulációk output mezőit felhasználva.



5. ábra: A napi középhőmérsékleti értékek várható eltolódása januárban (fent) és júliusban (lent) az RCP4.5 scenárió esetén.

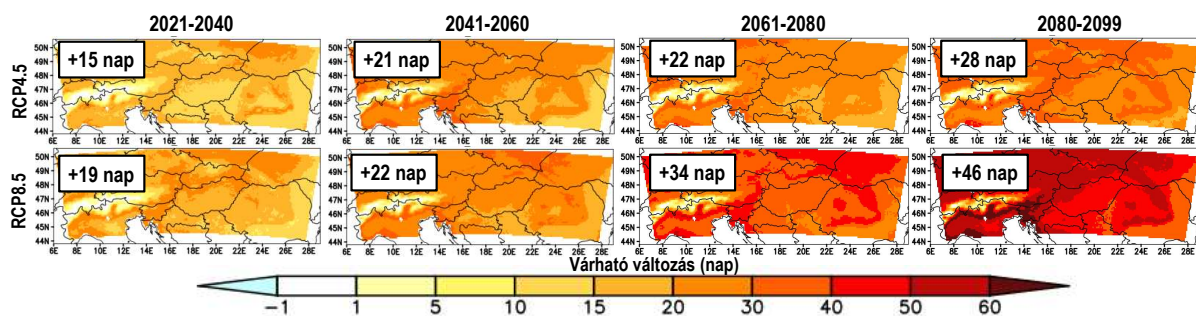
Példaként az 5. ábrán bemutatjuk, hogyan jelenik meg a melegedés hatása a hőmérsékleti eloszlásban. A grafikonokon a magyarországi rácspontokra becsült hőmérsékleti értékeket vettük figyelembe, s a 12 hónapból a legmelegebbet (júliust) és a leghidegebbet (januárt) választottuk ki illusztrációképpen. A grafikonpárról egyértelműen leolvasható, hogy a bemutatott téli hónap melegedése kisebb mértékű, mint a nyári hónapé.

A napi hőmérsékleti értékek alapján különböző hőmérsékleti extrémindexeket definiálhatunk (Bartholy & Pongrácz, 2007). Ebben a cikkben négy indexre vonatkozó eredményeket mutatunk be, melyek közül egy a hideg extrémumokat, három pedig a meleg extrémumokat jellemzi.



6. ábra: A fagyos napok ($T_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) évi számának várható változása, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal felső részén megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik. Az 1981–2000 referencia időszakban a Carpatclim adatbázis (Spinoni et al., 2015) alapján az országos átlagos érték: 96 nap/év.

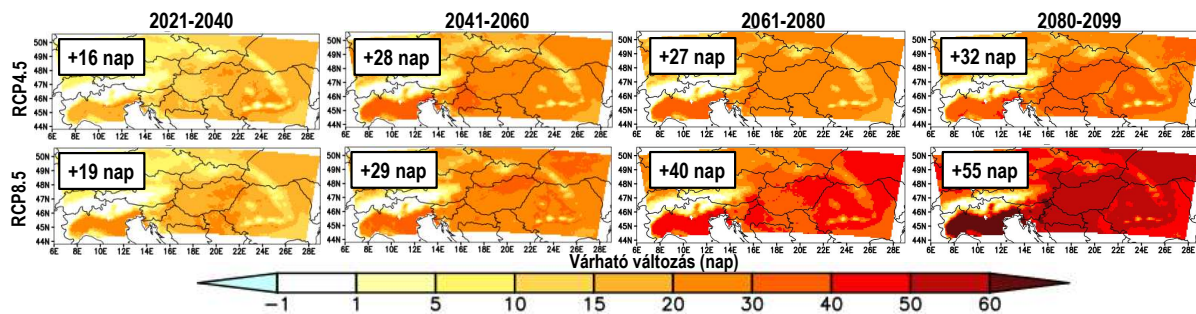
A hideg extrémumot reprezentáló fagyos napok ($T_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) évi számának várható változását foglalja össze térképes formában a 6. ábra. A napi minimumhőmérsékleteken alapuló indexben a melegedés hatására egyértelműen csökkenő tendencia valószínűsíthető a XXI. század során. Az RCP8.5 scenárió esetén – a nagyobb mértékű várható melegedés hatására – nagyobb mértékű a fagyos napok számának várható csökkenése. Az évszázad végére az RCP4.5 scenárió esetén Magyarország területén átlagosan több mint 5 héttel csökken a fagyos napok évi átlagos előfordulási gyakorisága. Tehát a XX. század utolsó két évtizedére jellemző közel 3 hónapos fagyos időszak 2 hónap alá csökken.



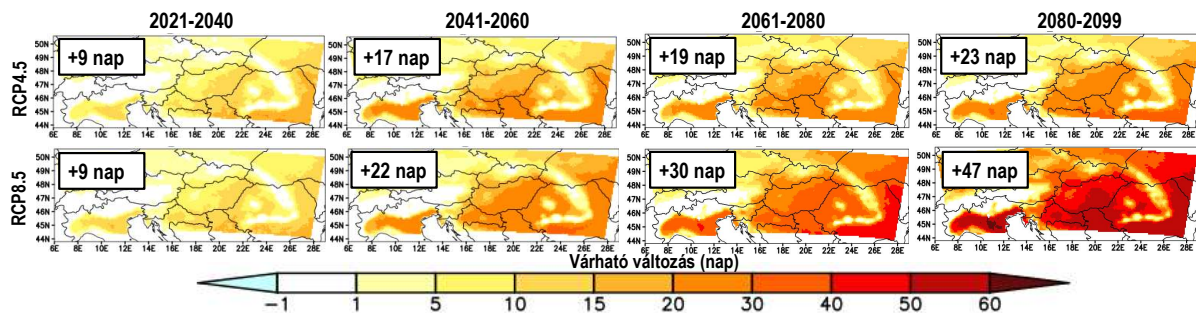
7. ábra: A nyári napok ($T_{\max} > 25 \text{ } ^\circ\text{C}$) évi számának várható változása, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal felső részén megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik. Az 1981–2000 referencia időszakban a Carpatclim adatbázis (Spinoni et al., 2015) alapján az országos átlagos érték: 75 nap/év.

A meleg extrémumok közül a 7., 8. és 9. ábra rendre a nyári napok ($T_{\max} > 25 \text{ } ^\circ\text{C}$), a hőségnapok ($T_{\max} > 30 \text{ } ^\circ\text{C}$), illetve a forró napok ($T_{\max} > 35 \text{ } ^\circ\text{C}$) évi számának XXI. század során becsült változásait összegzi. A melegedés egyértelműen ezen napi maximumhőmérsékletből származtatott szélsőségek előfordulási gyakoriságának növekedését vetíti előre,

mely az RCP8.5 scenárió esetén – az erősebb antropogén eredetű üvegházhatás miatt – várhatóan nagyobb mértékű lesz. A két scenárió közötti különbség a XXI. század végére jól láthatóan megnövekszik.



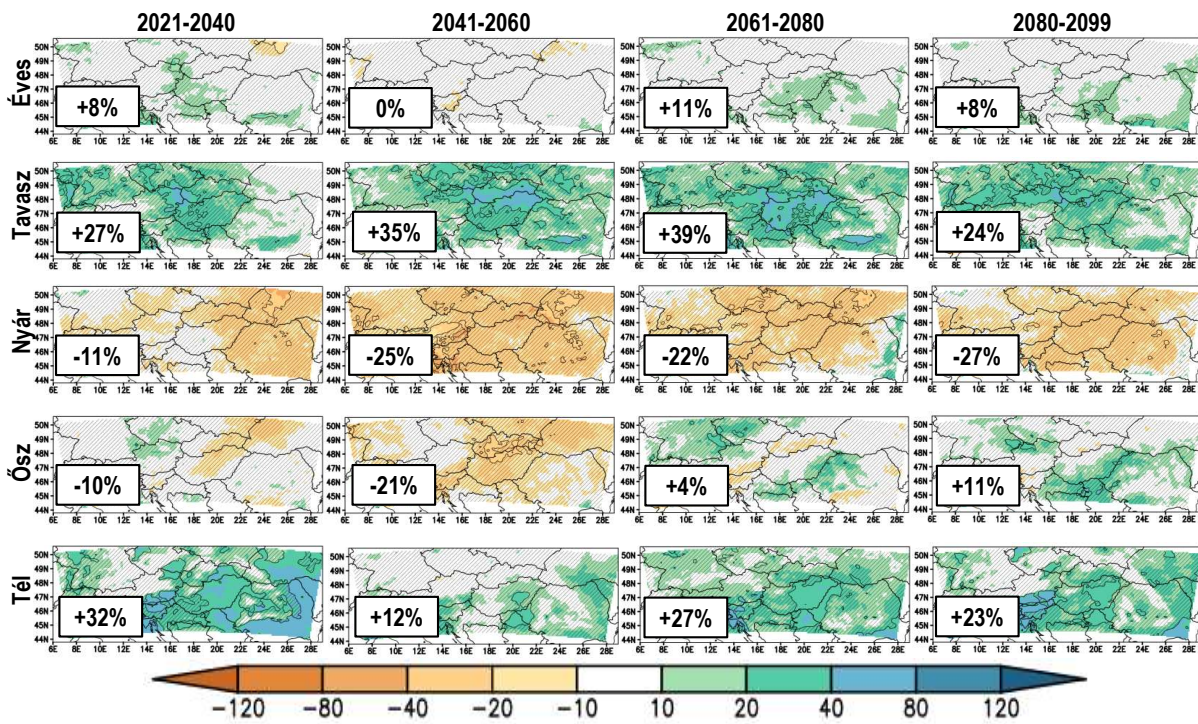
8. ábra: A hőségnapok ($T_{\max} > 30\text{ °C}$) évi számának várható változása, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal felső részén megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik. Az 1981–2000 referencia időszakban a Carpatclim adatbázis (Spinoni et al., 2015) alapján az országos átlagos érték: 20 nap/év.



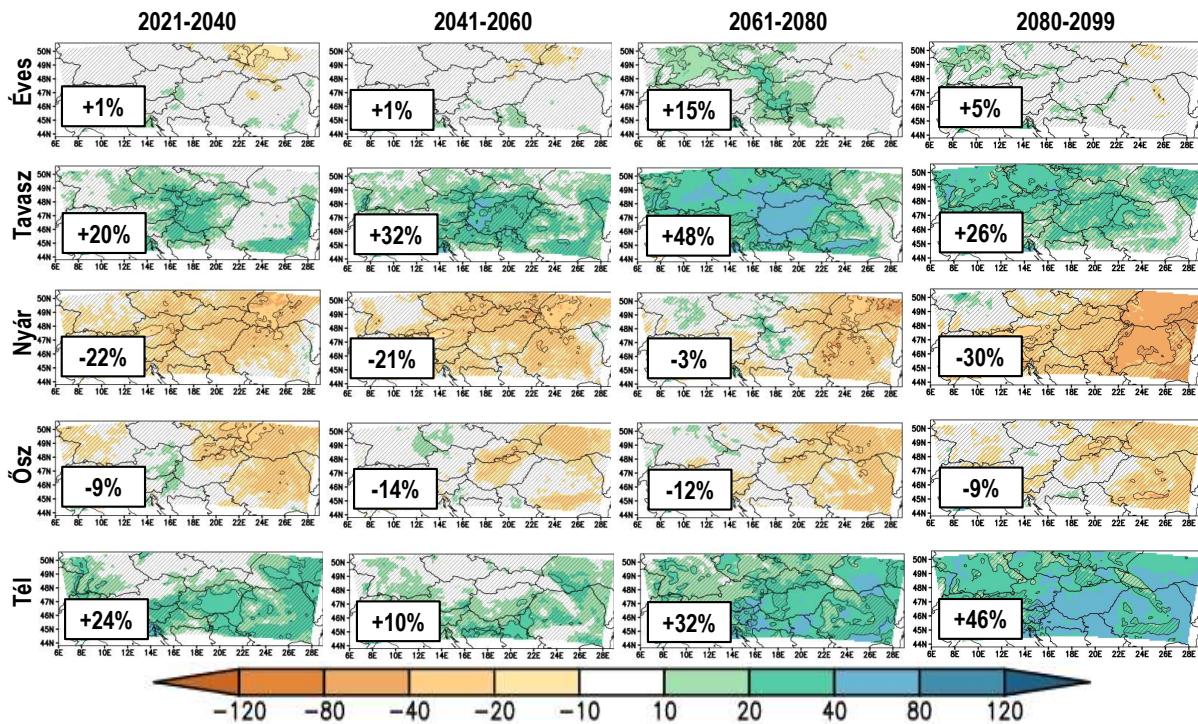
9. ábra: A forró napok ($T_{\max} > 35\text{ °C}$) évi számának várható változása, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal felső részén megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik. Az 1981–2000 referencia időszakban a Carpatclim adatbázis (Spinoni et al., 2015) alapján az országos átlagos érték: 12 nap/évtized.

Várható csapadékváltozás

A hőmérséklethez hasonlóan a várható csapadékváltozások évi és évszakai becsléseit is elkészítettük – ezeket a 10. és 11. ábra összegzi. Ez alapján mindkét scenárió esetén télen és tavasszal a csapadék növekedésére, míg nyáron szárazabbá váló éghajlati viszonyokra számíthatunk hazánk térségében. Ősszel eleinte a csapadék csökkenése, majd az RCP4.5 scenárió esetén az évszázad második felében – ezzel ellentétesen – csapadéknövekedés valószínűsíthető Magyarországon. Az évszázad első felében (a 2021–2040 és a 2041–2060 időszakban) nincs jelentősebb különbség a két scenárió között (a becsült változások jellemzően csupán néhány százalékban térnek el egymástól). Ez az évszázad második felében már egyre kevésbé igaz, melyet már a 2061–2080 időszakban észrevehetünk. Például őszi kis mértékű csapadéknövekedés valószínűsíthető az RCP4.5 esetén, míg ezzel ellentétesen az RCP8.5 esetén szárazodásra számíthatunk. A RegCM4 futtatások alapján az őszi becsült ellentétes irányú változások a XXI. század utolsó két évtizedében is megmaradnak. Ugyan a becsült változások iránya a téli időszakban megegyezik, ám az RCP8.5 esetén valószínűsíthető számottevő mértékű csapadéknövekedés (mintegy 46% az 1981–2000 referencia időszakhoz viszonyítva) jelentősen meghaladja az RCP4.5 esetén becsült mértéket (23%).



10. ábra: Várható csapadékváltozás (%) az RCP4.5 szcenárió figyelembe vételével, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal alsó sarkában megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik.



11. ábra: Várható csapadékváltozás (%) az RCP8.5 szcenárió figyelembe vételével, referencia időszak: 1981–2000. A térképek bal alsó sarkában megjelenő értékek a magyarországi rácspontokra becsült átlagos változást jelzik.

Összefoglalás

E cikkben bemutatott eredmények alapján egyértelmű, hogy a Magyarországra várható hőmérsékleti és csapadékváltozások olyan mértékűek, melyek érzékenyen érintik – többek között – a mezőgazdaságot, az erdészetet és a vízgazdálkodást. Ezért a közeljövőben el kell kezdeni a megfelelő felkészülési stratégiák részletes kidolgozását és gyakorlati megvalósítását. A nemzeti és helyi éghajlatváltozási alkalmazkodási stratégiák kiindulási információit a klímamodellek eredményei szolgáltatják. A lehető legsikeresebb tervezés érdekében minél több elérhető modellszimulációt szükséges figyelembe venni. Ezek közül egy konkrét – az ELTE Meteorológiai Tanszékén adaptált – modell kétféle forgatókönyvre vonatkozó eredményeit tekintettük át tanulmányunkban. A várható regionális melegedés mértéke egyértelműen az antropogén eredetű sugárzási kényszer változáshoz köthető: nagyobb mértékű antropogén hatás erősebb melegedő tendenciát valószínűsít, mely a szélsőséges hőmérsékleti értékekben is megjelenik.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az AGRÁRKLIMA2 projekt (VKSZ_12-1-2013-0034) és az Európai Gazdasági Térség (EGT) Támogatási Alap „Alkalmazkodás az Éghajlatváltozáshoz” Program (EEA-C13-10). A validációs adatokat a CarpatClim Adatbázis szolgáltatta, amelynek előállítását az Európai Közösség támogatta a JRC intézeten keresztül kiírt kutatási program keretében.

Hivatkozások

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., 2007: Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research*, 5: 1–17.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., 2008: Milyen mértékű éghajlatváltozás várható a Kárpát-medencében? *Légkör*, 53/2: 19–24.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., Pieczka, I., Kardos, P., Hunyady, A., 2009: Analysis of regional climate change modelling experiments for the Carpathian basin. *Int. J. Global Warming*, 1: 238–252.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Torma, Cs., 2010: A Kárpát-medencében 2021-2050-re várható regionális éghajlatváltozás RegCM-szimulációk alapján. *Klíma-21 Füzetek*, 60: 3–13.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., 2014: How the climate will change in this century? *Hungarian Geographical Bulletin*, 63: 55–67.
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zakey, A., Giuliani, G., 2011: Regional climatic model RegCM – User manual. Version 4.3. ICTP, Trieste, Italy. 32p.
- Emanuel, K.A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, 48: 2313–2335.
- Emanuel, K.A., Zivkovic-Rothman, M., 1999: Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.*, 56: 1766–1782.
- Fritsch, J.M., Chappell, C.F., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 37: 722–733.
- Grell, G.A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764–787.
- IPCC, 2013: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Stocker, T.F.,

- Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). *Cambridge University Press*, Cambridge, UK & New York, NY, USA.
- 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.
- Pieczka, I., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2012: Klímaváltozási szcenáriók a Kárpát-medence térségére a PRECIS klímamodell eredményei alapján. In: *Korszerű földtudományi oktatás – versenyképes gazdaság. HUNGEO-2012 Konferenciakötet. (Mika J., Dávid Á., Pajtókné Tari I., Fodor R., szerk.)* Eszterházy Károly Főiskola, Eger. 249–254.
- Pieczka I., Bartholy J., Pongrácz R., Kelemen F., Kis A., André K., 2014: Regionális klímamodell-becslések a Kárpát-medencére. In: *Légköri folyamatok előrejelzésének módszerei és alkalmazásai. Az ELTE Meteorológus TDK 2014. évi Nyári Iskola előadásának összefoglalói. (Pongrácz R., Mészáros R., Kis A., Leelőssy Á., Sábitz J., szerk.) Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 25: 96–101. http://nimbus.elte.hu/oktatas/metfuzet/EMF025/PDF/15-Pieczka_etal.pdf
- Pieczka I., Pongrácz R., André K., Kelemen F.D., Bartholy J., 2016: Sensitivity Analysis of Different Parameterization Schemes Using RegCM4.3 for the Carpathian Region. *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-016-1941-4
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Miklós, E., 2011a: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 9: 387–398.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Pieczka, I., Torma, Cs., 2011b: Az ELTE regionális klímamodelljei: PRECIS és RegCM. In: *36. Meteorológiai Tudományos Napok – Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében. (Lakatos M., szerk.) Országos Meteorológiai Szolgálat*, Budapest. 102–112. http://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2010/36.Meteorologiai_Tudomanyos_Napok_osszefoglalo_2010.pdf
- Pongrácz R., Bartholy J., Pieczka I., Szabóné André K., 2015: Regionális klímamodell-becslések a Kárpát-medencére. In: *Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. Jubileumi kötet - 70 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke. (Pongrácz R., Mészáros R., Kis A., szerk.) Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 26: 76–81. <http://nimbus.elte.hu/oktatas/metfuzet/EMF026/PDF/12-Pongracz-etal.pdf>
- Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., Vogt J., 2015: Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: Climatologies and trends of 10 variables. *Int. J. Climatol.*, 35: 1322–1341.
- 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.
- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2011: Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeorology*, 12: 84–100.
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J.A., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A.M., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S., 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109: 5–31.