

ALADIN-Climate modellszimulációk eredményei

Összeállította:

Szépszó Gabriella, Csorvási Anett
Országos Meteorológiai Szolgálat

A klímaváltozás vizsgálata éghajlati modellek segítségével lehetséges, s Magyarországon négy regionális klímamodellt alkalmazunk a 21. században a térségünkben várható változások feltérképezésére. Ezek közül jelen esetben az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott ALADIN-Climate eredményeit mutatjuk be (**1. táblázat**). A modellel 10 km-es térbeli felbontású modellszimuláció készült egy a Kárpát-medencét lefedő területre (Csima és Horányi, 2008). A tartományon kívül eső folyamatok leírását (azaz az oldalsó határfeltételeket) az ARPEGE-Climate globális éghajlati modell adatai szolgáltatták. A jövőbeli emberi tevékenység hatásának figyelembevételére a szimulációk során egy közepes forgatókönyvet, az A1B SRES (Special Report on Emissions Scenarios; Nakicenovic et al., 2000) kibocsátási szenáriót alkalmazták. A továbbiakban elsőként a hőmérsékletre és a csapadékra vonatkozó modelledmények mérésekkel való validációját ismertetjük az 1961–1990 időszakra, majd áttekintést adunk a 2021–2050-re és a 2071–2100-ra várható változásokról, referenciaként az 1961–1990 időszakot tekintve.

1. táblázat: Az ALADIN-Climate regionális klímamoddellel készített szimuláció jellemzői.

Regionális klímamodell	ALADIN-Climate
Modellverzió	4.5
Horizontális felbontás	10 km
Oldalsó határfeltételek	ARPEGE-Climate
Kibocsátási forgatókönyv	SRES A1B

Validáció

Múltbeli időszakokra alapvetően kétféle modellfuttatást végezhetünk. Az egyik esetben a regionális modell számára a meghajtó kezdeti- és peremfeltételeket valamilyen re-analízis adatbázis szolgáltatja, míg a másik kísérlet típusban a meghajtó mezőket csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek adják. A re-analízis mezők felhasználásával készülő modellfuttatások azt mutatják meg, hogy maga a regionális klímamodell milyen pontosan tudja becsülni a térség jelenlegi klímáját, míg a globális klímamodell kísérletek eredményeivel futtatott szimulációk a globális és a regionális modell együttes hibáira világítanak rá. A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer keretében végzendő hatásvizsgálatokhoz az utóbbi kísérlet típusból származó regionális klímamodell-eredmények biztosítanak kiindulási adatokat, ezért ezek elemzését ismertetjük.

Alapvető különbség az időjárás-előrejelzések és az éghajlati szimulációk között, hogy míg az előbbi esetben megköveteljük, hogy a modell a lényeges időjárási eseményeket mind térben, mind időben a lehető legpontosabban tükrözze vissza, addig az éghajlati modellek esetében ez nem reális elvárás. Éghajlati skálán a korlátos tartományra vonatkozó előrejelzési feladat egy határérték-problémává alakul, s mivel a peremfeltételeket globális modellek előrejelzései biztosítják a regionális modell számára a teljes időtáv során, a tökéletes regionális eredményekhez perfekt globális szimulációkra lenne szükségünk. **Így a klasszikus értelem-**

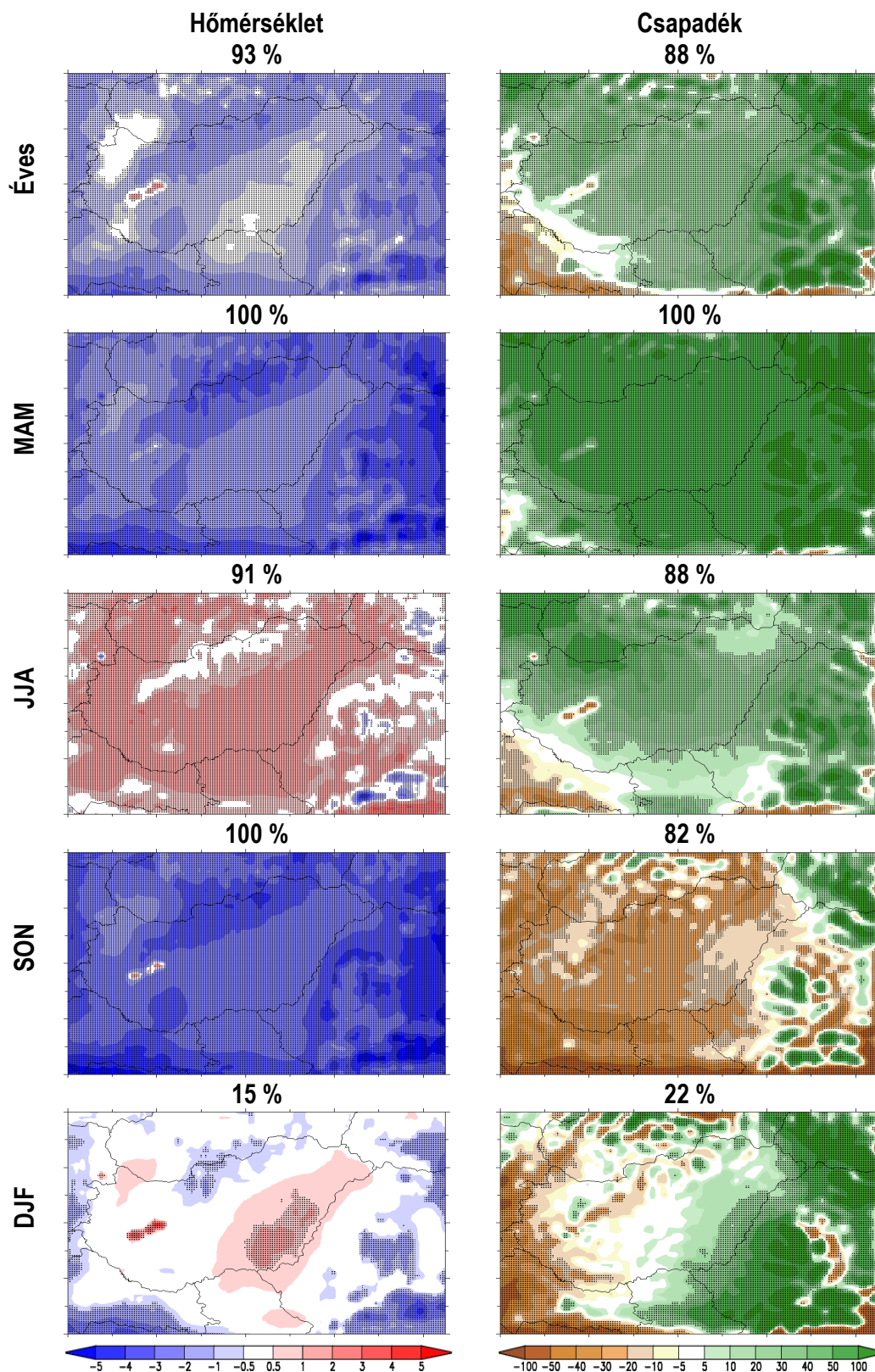
ben vett „hosszútávú előrejelezhetőség” az éghajlati modellekkel nem valósítható meg (Szépszó, 2014). A globális kapcsolt modellek az egész Föld cirkulációjára és éghajlatára lassú kényszerítő hatással bíró folyamatokat és kölcsönhatásokat képesek leírni, ezért segítségükkel az éghajlati rendszer viselkedésének aszimptotikus jellemzői határozhatók meg. Éghajlati időskálán a klímamodellek eredményeit tehát mint statisztikai sokaságot kell tekintenünk, ahol nincs prognosztikai jelentősége annak, hogy adott előrejelzés melyik konkrét időpontra vonatkozik, s a modellek megbízhatóságát aszerint osztályozzuk, hogy egy kiválasztott időszak statisztikai jellemzőit milyen pontossággal képesek vissza-tükrözni (Szépszó, 2014). A Meteorológiai Világszervezet ajánlását követve a modellek eredményeit általában 30-éves időszakokra vizsgáljuk, s az éghajlati szimulációk esetében ezekre az időszakokra számított éves vagy évszakos várható értéket, szórást, sűrűségfüggvényt és egyéb statisztikai jellemzőket vizsgálunk. A validációhoz a technikailag egyszerűbb összehasonlítás érdekében általában olyan mérési adatbázisokat alkalmazunk, melyeket a felszíni állomási adatsorok felhasználásával interpolációs eljárásokkal állítanak elő.

A jelen validáció során azt vizsgáljuk, hogy a klímamodell hazánk hőmérsékleti és csapadéokra vonatkozó éghajlati sajátosságait mekkora hibával képes becsülni az 1961–1990 referencia-időszakban. Nem térünk ki az egyéb változók (pl. szélsőségek, relatív nedvesség) kiértékelésére. A validáció során a 20 km-es felbontású CRU (Climatic Research Unit; Mitchell et al., 2004) rácsponti megfigyelési adatbázissal vetettük össze a modelladatokat. A **2. táblázatban** összegezzük a Magyarország területére eső rácspontok figyelembevételével képzett átlagos éves és évszakos hőmérsékleti hibák értékeit. Az átlagos hibák meghatározása mellett szignifikancia-vizsgálat segítségével számszerűsítettük, hogy a rácspontokban kapott átlagos hibaérték miként viszonyul a referencia időszak évszakos és éves hibaértékeinek szóráshoz. A modellszimulációk éves és évszakos átlagos hőmérsékleti és csapadékösszeg hibáinak térbeli eloszlását az **1. ábrán** mutatjuk be. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a hiba szignifikáns, továbbá a térképek felett szereplő értékek megadják, hogy Magyarország területének mekkora hányadán szignifikáns a hiba. A magyarországi rácspontokra számított országos havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg értékek éves menetét a vizsgált modellszimuláció és a mért adatok alapján a **2. ábrán** láthatjuk.

Az 1961–1990 közötti időszakra vonatkozó éves átlaghőmérséklet esetén az ALADIN kis mértékben alulbecsli a referencia értékeket (**2. táblázat**). A megfigyelésektől vett negatív eltérések az ország északi, északkeleti és délnyugati részén jellemzők és szignifikánsak (**1. ábra**), a Balaton térségében inkább némi túlbecslést láthatunk. Az átmeneti évszakokban 2 °C-ot meghaladó szignifikáns alulbecslés jellemző (különösen a magasabban fekvő északi tájakon), ennek mértéke áprilisban és októberben eléri 4 °C-ot (**2. ábra**). Nyáron és télen a hiba kisebb és országos átlagban ellentétes előjelű. Télen mindössze 0,1 °C az átlagos felülbecslés, az ország nagy részén nem is szignifikáns. Viszont a Balaton térségében kiugróan magas a hőmérséklet fölébecslése, ami a tavi mikroklíma egyszerűsített leírásából ered (pl. az ALADIN a Balaton vízhőmérsékletére az Adriai-tenger jellemző értékét tekinti). A hőmérséklet éves menetének vizsgálata arra utal, hogy az ALADIN eredményeiben a tavaszi melegedés jóval lassabban, az őszi lehűlés viszont jóval gyorsabban történik, mint a valóságban.

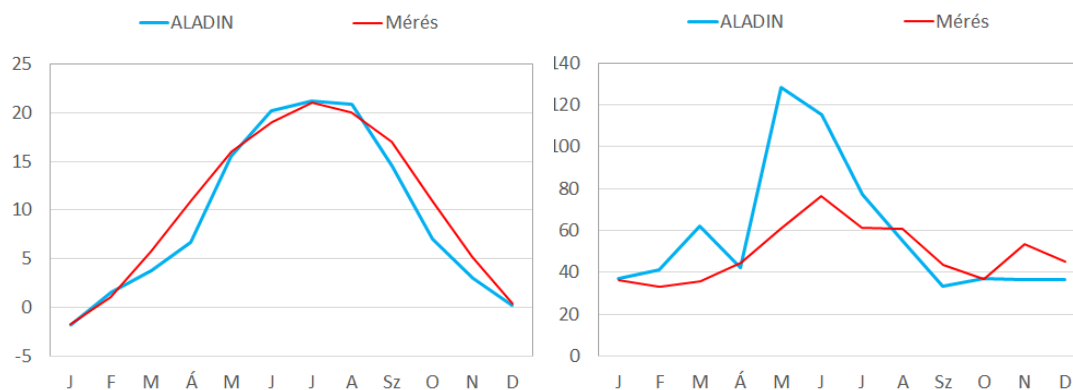
2. táblázat: Az átlagos éves és évszakos hőmérsékleti és csapadék (°C és mm/hónap) eltérés az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re.

	Éves	Tavaszi	Nyár	Ősz	Tél
Hőmérséklet	-0,8	-2,0	1,1	-2,7	0,1
Csapadék	9	32	15	-10	1



1. ábra: Az átlagos éves és évszakos hőmérsékleti valamint csapadék eltérés (°C és %) az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei és a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis értékei között 1961–1990-re. A térképek felett feltüntetett százaléktételek azon magyarországi rácspontok arányát mutatják, ahol a hiba 0,05 konfidenciaszinten szignifikáns.

Az 1961–1990 közötti átlagos havi szimulált csapadékösszegek éves menetét tekintve elmondható, hogy az ALADIN többnyire nagyobb csapadékösszegeket ad, mint a megfigyelések (2. ábra). A megfigyelt évszakos menetet a modell jól követi, ugyanakkor jelentős mértékű a május–július havi összegek felülbecslése. A tavaszi és a nyári túlbecslés nemcsak az országos átlagban jelentkezik, hanem az ország teljes területén (leszámítva a balatoni rácspontokat) és nagyrészt szignifikáns is (1. ábra). Ősszel alulbecslést figyelhetünk meg, melynek mértéke nem haladja meg a 30 %-ot. A téli átlagos csapadékösszegekre vonatkozó térkép az országon belüli rácspontok kb. 11-11 %-ában mutat szignifikáns alul-, illetve felülbecslést – előbbit a nyugati, utóbbit a keleti tájakon – országos átlagban egy kismértékű pozitív hibát eredményezve (2. táblázat).



2. ábra: A havi átlagos hőmérséklet (°C) és csapadékösszeg értékei az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei, valamint a CRU rácsponti megfigyelési adatbázis alapján 1961–1990-re.

Az éghajlati modellek jövőre vonatkozó eredményeit annak ismeretében értelmezhetjük, hogy a modellek mennyire tudják reprodukálni a múltbeli klímát jellemző értékeket. Meg kell jegyeznünk, hogy bár a validáció fontos és kikerülhetetlen lépése az éghajlati modellezésnek, ugyanakkor nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak.

Projekciók

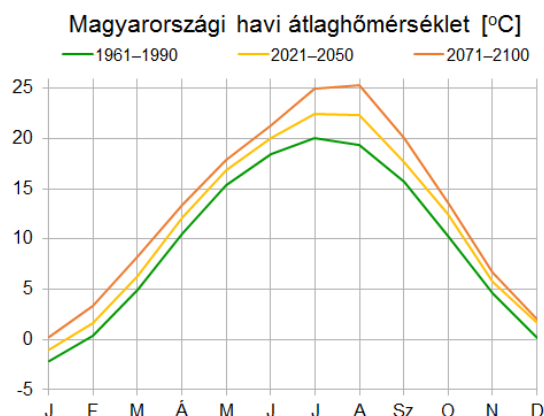
A regionális (és globális) modelleredmények szükségszerűen kisebb-nagyobb hibával terheltek, amit figyelembe kell venni a jövőre vonatkozó projekciók kiértékelése során. Ezt megtehetjük úgy, hogy **változásértékeket adunk meg: a jövőre vonatkozó modelleredményeket nem önmagukban, hanem a modellek saját referencia-időszakához viszonyítva értelmezzük, így a jövőre és a múltra vonatkozó szisztematikus modellhibák a különbségképzéssel részben eliminálják egymást; illetve a változásértékeket hozzáadjuk a referencia-időszakra a mérések alapján kiszámított értékekhez** (relatív változás esetén pedig össze-szorozzuk a mérési és a változási értéket). Ekkor az ún. *delta-módszert* (Hawkins et al., 2013) használjuk, aminek során feltételezzük, hogy a hibák az integrálás folyamán több évtized átlagában nem változnak lényegesen (ez nem feltétlenül van így). A modellhibák „eltüntetésére” sokan használnak különböző korrekciós eljárásokat (pl. Pieczka, 2012; Kis, 2013), melyek a szisztematikus hiba egyszerű kivonásán vagy a modelleredményekből előálló sűrűségfüggvény mérési adatsorokhoz való illesztésén alapulnak. A korrekciós eljárás a múltbeli megfigyelési információk segítségével állapítja meg a jövőbeli adatsorokra is alkalmazandó korrekciót, így nem tudja figyelembe venni, ha például az éghajlatváltozás következményeként mind a modellben, mind a valóságban megváltozik a sűrűségfüggvény alakja, és ezzel együtt a modellhibák jellemzői (Szépszó, 2014).

Ahogy a múltbeli modelleredmények, úgy a **jövőre vonatkozó adatok sem értelmezhetők az „éghajlatváltozás előrejelzett idősoraként”, csupán a meteorológiai változók egyik lehetséges realizációjaként. A harmincéves időszakokon belül az évenkénti adatok olyan statisztikai sokaságot alkotnak, melyek időben felcserélhetők.** Ez azt jelenti, hogy egy tetszőleges éves adatsor az időszak bármelyik évének megfeleltethető. [Egy adott éven belül ez természetesen nem tehető meg (azaz nem cserélhető fel például a januári adat a szeptemberivel), mert abban a dinamikai folyamatok révén vissza kell tükröződnie a térség klimatológiájának.] Ennélfogva az adott időszakra vonatkozó adatsor ugyanúgy várható értékek, szórások, eloszlásfüggvények stb. segítségével vizsgálható, mint a múltra vonatkozó modelleredmények. **Nem illeszthető trend az időszakon belüli adatsorra, s az adott évre vonatkozó adat nem tekinthető hosszútávú időjárás-előrejelzésnek.** Arra is fel kell hívni a figyelmet, **az éghajlati rendszer egy nem-lineárisan fejlődő rendszer, ezért egy adott időszak tendenciájából nem következtethetünk egy másik időszak jellemzőire.** Például a mérések alapján megfigyelt tendenciák nem extrapolálhatók a jövőre, és ugyanígy két jövőbeli időszak közé eső évtizedekre sem végezhető hasonló statisztikai illesztés; ezeknek az időszakoknak a viszonyait dinamikus modellszimulációk elvégzésével kell felderíteni. Jelen vizsgálatban tehát a delta-módszer alkalmazásával az ALADIN modell által jelzett változásokat közöljük 30-éves átlagok formájában, szignifikancia-teszttel elkülönítve a változási „jelet” az éghajlat természetes változékonyságától a projekciós eredményekben.

Az ALADIN regionális éghajlati modell egy átlagos ütemű légköri szén-dioxid koncentráció fejlődést feltételezve írja le a Kárpát-medence éghajlatának 21. században várható módosulását. A modelleredmények alapján a 21. században folytatódik az átlaghőmérséklet emelkedése a Kárpát-medencében, ahogy ez a **3. táblázat** és a **3–4. ábra** eredményein is látható. Ezek a változások minden időszak esetében statisztikailag szignifikánsak, így ezt a hőmérsékleti térképeken külön nem jelöltük.

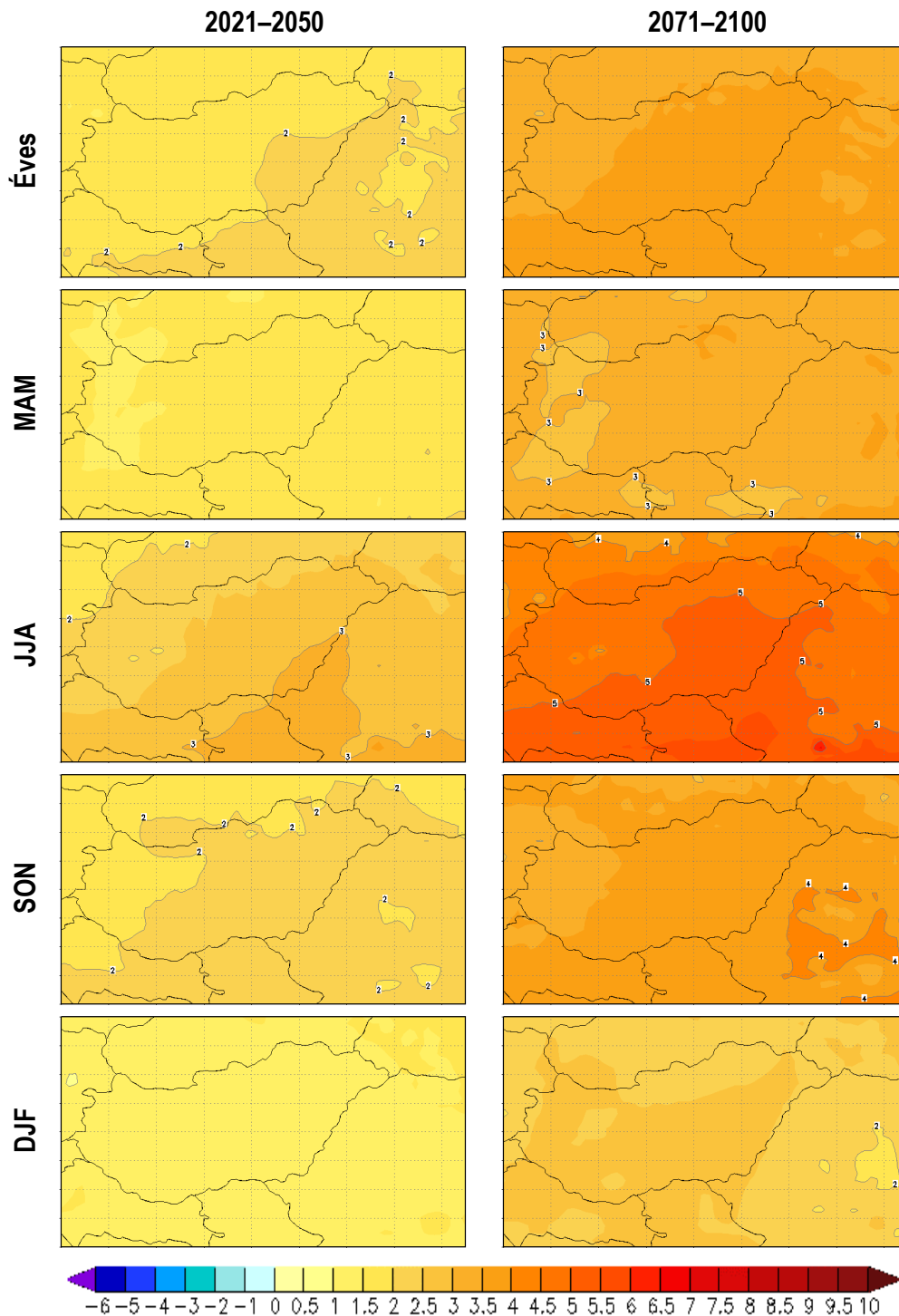
3. táblázat: A magyarországi éves és évszakai átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján.

	Éves	Tavaszi	Nyári	Őszi	Téli
2021–2050	1,1	1,6	0,7	0,8	1,1
2071–2100	3,1	2,8	3,5	3,0	2,5



3. ábra: A magyarországi havi átlaghőmérséklet (°C) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményeinek mérési adatokkal való kombinálása alapján.

A hőmérséklet éves átlagban vett növekedése (**4. ábra**) 2021–2050-re nagyjából 1–2 °C és 2071–2100-ra a melegedés mértéke hazánkban mindenütt meghaladja a 3 °C-ot, de 5 °C-nál kisebb lesz. Azaz a hőmérséklet emelkedése – némileg gyorsuló ütemmel – folyamatosnak tekinthető a 21. század során. Nyáron számíthatunk a legnagyobb növekedésre az átlaghőmérséklet alakulásában mindkét jövőbeli időszakban, ez augusztusban az évszázad végén elérheti akár a 6 °C-ot is, ahogy az a **4. ábrán** is látható. Tavasszal és télen az évszázad közepére az országban szinte mindenütt 1 °C-ot meghaladó, de 2 °C-nál nem magasabb, míg ősszel kissé nagyobb mértékű változások várhatóak, az évszázad végére pedig mindhárom évszakban hazánk teljes területén 3 és 4 °C közötti melegedés valószínű. A változások országon belüli eloszlását tekintve keleten, illetve délen várható nagyobb mértékű hőmérsékletnövekedés.



4. ábra: Az éves és évszakos átlaghőmérséklet változása (°C) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján.

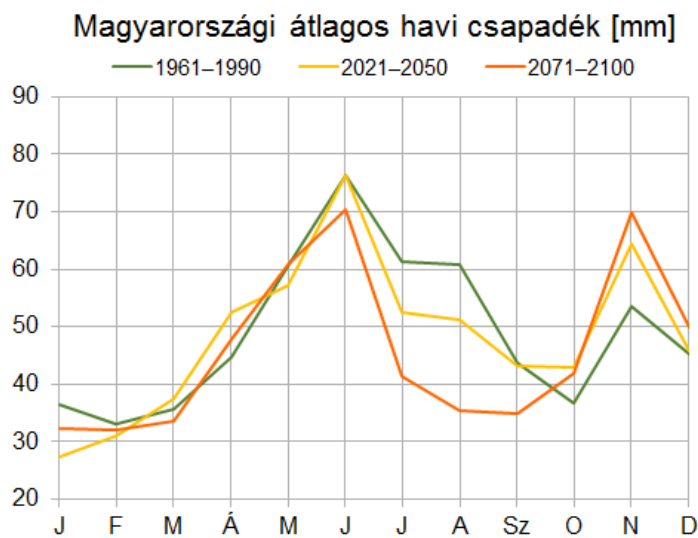
A Magyarországra várható csapadék mennyiségének megváltozása sokkal nehezebben elemezhető és értelmezhető, mint a hőmérsékleti változások. Ennek oka az, hogy a csapadék térben és időben nagyon változékony elem, aminek nemcsak az előrejelzése nehéz, de tendenciózus változásainak kimutatása is csak hosszú időszakokon lehetséges. Így a modellek által jelzett változások gyakran nem is szignifikánsak, ezért ezek interpretációjánál kellő óvatossággal kell eljárnunk.

Ha megnézzük az éves csapadékösszeg relatív megváltozását (4. táblázat), akkor látható, hogy mindkét időszakon országos átlagban kismértékű (10 % alatti) csökkenés valószí-

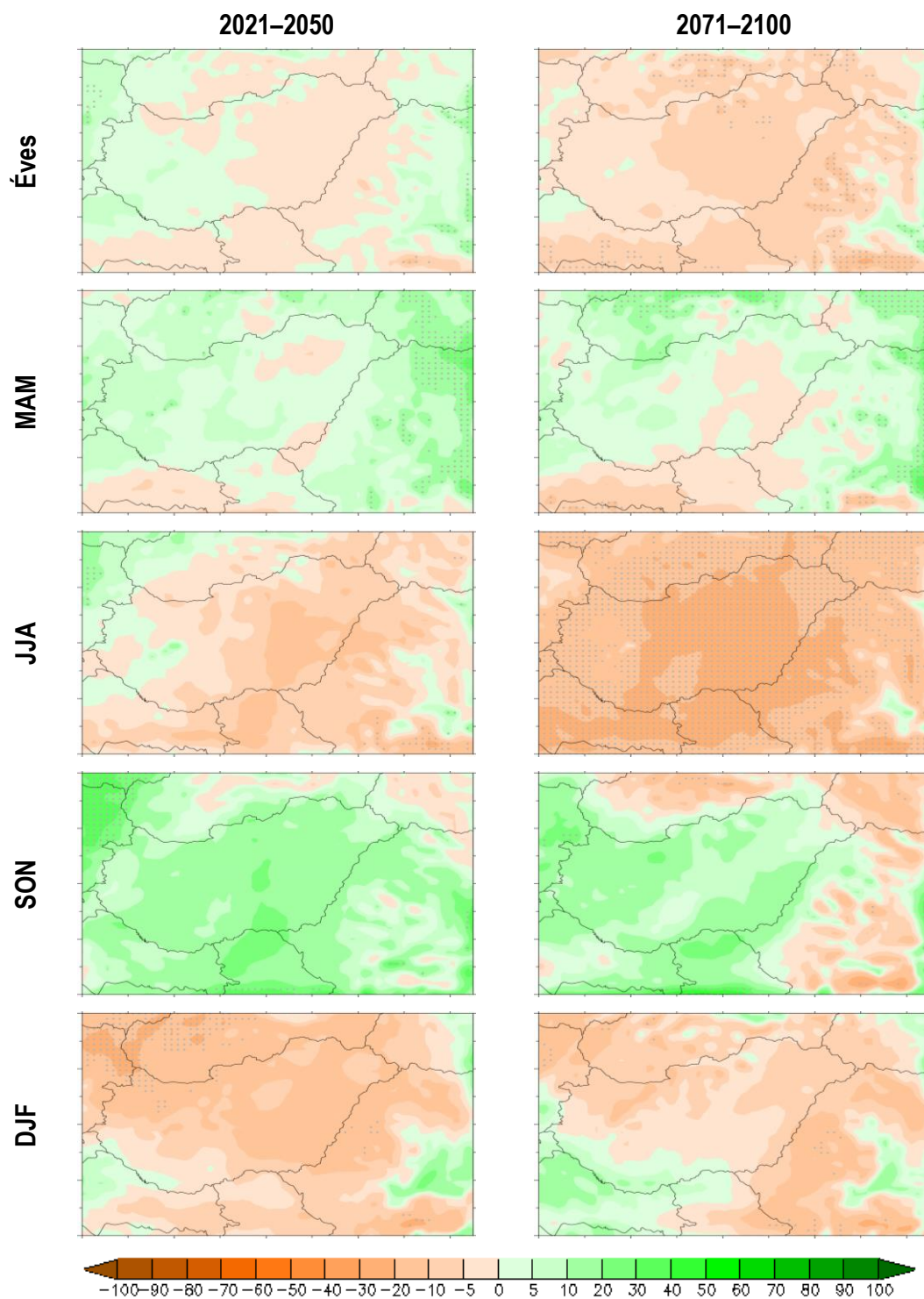
nű. A változás a következő évtizedekben azonban területileg nem egységes: az ország nyugati felén növekedésre, a keleti tájakon pedig csökkenésre számítunk (**6. ábra**). Az évi csapadékmennyiség éven belüli eloszlása a referencia-időszakhoz képest módosul (**5. ábra**). Jelenleg a nyár a legcsapadékosabb évszakunk, a jövőben a nyári csapadék csökkenni fog, míg a valamelyest szárazabb október–december időszakban némi növekedésre számíthatunk. A 2021–2050 időszakban nyáron még előfordulhatnak az országban olyan területek, ahol átlagosan több csapadék hullhat, mint a múltban. Az évszázad végére azonban a nyári csapadékcsökkenés már az ország egész területére kiterjed és jelentős részén szignifikáns (országos átlagban -20 %). Ősszel és tavasszal összességében a jelenleginél több csapadékra számíthatunk (ez alól az ország keleti tájai jelentenek kivételt), télen pedig a nyárihoz hasonlóan csökkenésre.

4. táblázat: A magyarországi átlagos éves és évszagos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján.

	Éves	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
2021–2050	-7	-10	-5	3,8	-10
2071–2100	-5	-5	-20	4,6	-3,1



5. ábra: A magyarországi havi átlagos csapadékösszeg (mm) 1961–1990-re mérések alapján, valamint 2021–2050-re és 2071–2100-ra az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményeinek mérési adatokkal való kombinálása alapján.



6. ábra: Az átlagos éves és évszakos csapadékösszeg változása (%) 2021–2050-re és 2071–2100-ra az 1961–1990 referencia-időszakhoz képest az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei alapján. A térképeken pontozás jelöli azokat a rácspontokat, ahol a változás szignifikáns.

Kitekintés

A meteorológiai előrejelzések többféle bizonytalanságot hordoznak, ami egyfelől a leírni kívánt folyamatok kaotikus jellemzőiből, másfelől az ezek szimulációjára használt modellek közelítő jellegéből (a kezdeti és határfeltételek meghatározásából, az alkalmazott numerikus és fizikai parametrizációs módszerekből, az emberi tevékenység hatásának leírásából) adódik.

A projekciók interpretációja akkor tekinthető korrektnek, ha a beválásuk valószínűségéről is tartalmaznak információt. Ennek eszköze az ún. *ensemble technika*, amikor több, beállításaiban különböző szimulációt hajtunk végre, majd ezek eredményeit együttesen értékeljük ki. Az egyes kísérletek beállításait általában úgy választjuk meg, hogy mindegyik az éghajlati rendszer egyformán valószínű leírását adja, s az ily módon előálló ensemble lehetőséget ad az eredmények valószínűségi formában való közlésére. A felhasználó ekkor nem egyetlen, ún. *kategorikus előrejelzést* kap, hanem egy valószínűségi jellegű információt, aminek birtokában jóval megalapozottabb döntést tud hozni, mint egyetlen előrejelzés alapján (Szépszó, 2014).

Hogy az elvégzendő modellkísérletek során mely beállításokat érdemes változtatni, azt a vizsgálatok célja határozza meg. Ugyanis a bemutatott bizonytalansági típusok hozzájárulása a szimulációkat jellemző teljes bizonytalansághoz az időtáv és a földrajzi tartomány függvényében, valamint a különböző meteorológiai változókra eltérő mértékű (Hawkins és Sutton, 2009, 2011). Az éghajlati projekciók esetében többnyire olyan szimulációkból állítják össze az ensemble rendszereket, melyeket különböző klímamodellekkel hajtottak végre több kibocsátási forgatókönyvet is alkalmazva a jövőbeli emberi tevékenység leírására.

Egyetlen – jelen esetben az ALADIN-Climate – **modellszimuláció eredményeinek vizsgálatával nem tehetők megalapozott kijelentések az eredmények bizonytalanságáról.** Ahogyan korábban említettük, nincs garancia arra, hogy a múltat jól leíró modellek a jövőre vonatkozóan hasonlóan sikeres éghajlati becsléseket adnak, ezért **a validációnál kiszámított hibák és a jövőre becsült változások nem „vegyíthetők össze”.** **A bizonytalanságok korrekt módon csak több modellkísérlet segítségével írhatók le.** Két modell alkalmazása már jó kiindulási alapot nyújt a bizonytalanságok alapfokú számszerűsítésére. Ezért a jövőbeli változások értelmezéséhez mindenképpen szükséges legalább még egy alkalmasan megválasztott modellkísérlet eredményeinek vizsgálata.

Hivatkozás

- Csima, G., Horányi, A., 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* 112, 3–4, 155–177.
- Hawkins, E., Osborne, T.M., Ho, C.K., Challinor, A.J., 2013: Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 170, 19–31.
- Hawkins, E., Sutton, R., 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. of Amer. Meteor. Soc.* 90, 1095–1107.
- Hawkins, E., Sutton, R., 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dynamics* 37, 407–418.
- Kis A., 2013: Csapadékindexek XXI. századra becsült trendjei Közép-Kelet-Európában korrigált csapadékmezők felhasználásával. XXXI. OTDK dolgozat. Budapest. 35 pp.
- Mitchell, T.D., Carter, T.R., Jones, Ph.D., Hulme, M., New, M., 2004: A comprehensive set of climate scenarios for Europe and the globe. Tyndall Centre Working Paper 55.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Mori-ta, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H. H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000: IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pieczka I., 2012: A Kárpát-medence térségére vonatkozó éghajlati scenáriók elemzése a PRECIS finom felbontású regionális klímamodell felhasználásával. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, 95 pp.
- Szépszó G., 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz–Meteorológia Program.