

## A MAGYARORSZÁGI ÉGHAJLATVÁLTOZÁSRÓL MODELLEZŐ SZEMMEL

### CLIMATE CHANGE OVER HUNGARY IN THE LIGHT OF TWO REGIONAL CLIMATE MODELS

Krüzselyi Ilona, Szépszó Gabriella, Szabó Péter és Horányi András

Országos Meteorológiai Szolgálat, *klimadinamika@met.hu*

**Összefoglalás.** A globális klímaváltozás hatásaira való felkészüléshez elengedhetetlenül fontos, hogy megfelelően pontos képünk legyen a jövőben várható éghajlatról, s ehhez a klímamodellezésen keresztül visz az egyetlen út. A globális éghajlati modellekkel az éghajlati rendszer elemeinek (a légkör, az óceán, a szárazföld, a jégtakaró és az élővilág) viselkedését a köztük levő kölcsönhatásokkal együtt szimulálják, és így megbecsülhető az éghajlati rendszer válasza valamilyen változó külső kényszerrel szemben. A mai globális klímamodellek már képesek megbízhatóan visszaadni a nagyskálájú folyamatokat, de regionális skálán nem hoznak kellő részletességet információkat, ezért a helyi sajátosságok meghatározására többek közt regionális klímamodelleket használnak. Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál két regionális klímamodellel (az ALADIN-Climate és REMO modellekkel) igyekszünk pontosítani a globális modellek eredményeit a Kárpát-medence térségére. Eddigi vizsgálataink alapján elmondhatjuk, hogy (1) mindkét modell szerint folyamatos melegedés várható a Kárpát-medence térségében a XXI. század további részében; (2) a meleg hőmérsékleti szélsőségek előfordulási gyakorisága szignifikánsan megemelkedhet; (3) az éves csapadékösszeg magyarországi átlaga feltehetően nem változik érdemben a jelenlegihez képest, azonban a csapadék éven belüli eloszlása jelentősen átrendeződhet; (4) a század végére az éves csapadékinzentiás és az egymást követő száraz napok száma megnövekedhet.

**Abstract.** To appropriately prepare for the impacts of the climate change it is crucial to have a complete and accurate picture of the anticipated future climate. Climate modelling is the only way to portray this, i.e. to provide a chance to understand the climate system and project its future evolution. The behaviour of the climate system components (i.e. atmosphere, hydrosphere, cryosphere, lithosphere, and biosphere) and their interactions are simulated with global climate models (GCMs), thus the climate system's response for a hypothetical forcing can be estimated. Nowadays GCMs are capable of giving fairly good estimations of the large-scale processes, but they cannot provide adequate information about the regional patterns. Therefore, the utilization of regional climate models (RCMs) is a widely used method to assess the local features. At the Hungarian Meteorological Service two RCMs (ALADIN-Climate and REMO) are applied to have a more detailed view of the GCMs results over the Carpathian Basin. Our investigations for Hungary suggest: (1) the increase of the temperature is enduring for the 21st century; (2) the frequency of hot extremes significantly raises; (3) the annual precipitation amount will not likely change, but the annual distribution will considerably be modified; (4) the annual precipitation intensity and the annual maximum number of consecutive dry days can increase at the end of the century.

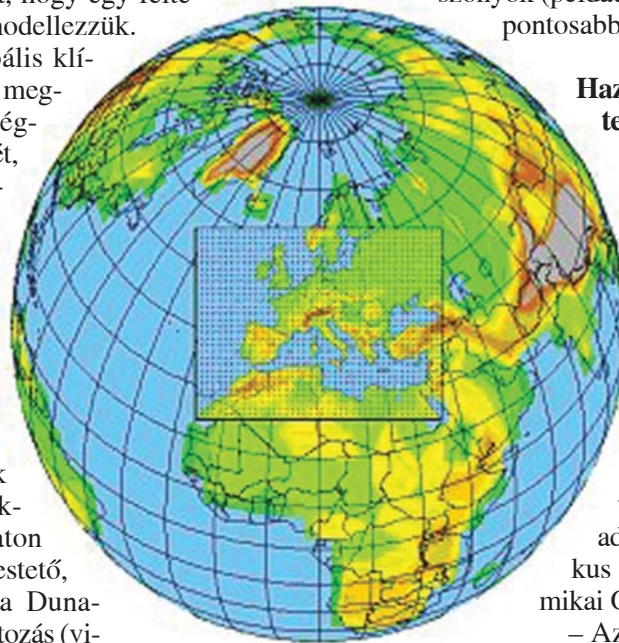
**Bevezetés.** A klímaváltozás manapság igen meghatározó problémája társadalmunknak. Sokat hallani arról, miként lehetne mérsékelni a globális melegedést, illetve arról, hogyan kellene ahhoz alkalmazkodni. De vajon tudatában vagyunk-e annak, hogy a globális melegedésként aposztrofált változásnak régióként eltérő hatásai lehetnek, s tájékozódunk-e arról, hogy Magyarországon pontosan melyek lesznek ezek? Birtokában vagyunk-e a megfelelő információknak ahhoz, hogy hosszú távon felkészülhessünk a hazai éghajlatváltozás kellemetlen vagy épp kellemes hatásaira, s ennek szellemében felelős döntéseket hozzunk szűkebb és tágabb környezetünk jövőjét illetően? Minden ilyesfajta felkészüléshez elengedhetetlen, hogy kellőképpen pontos ismeretünk legyen a jövő éghajlatáról. Az éghajlat jövőbeli viselkedésének becslésére azonban egyedüli járható út annak modellezésén keresztül számszerű eredmények előállítása és elemzése. Cikkünkben a klímamodellezés elméleti alapjait, jelentőségét és az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) regionális modelleredményeit szeretnénk röviden bemutatni.

**Az éghajlat leírása számszerű modellekkel.** Az éghajlat hosszú távú viselkedéséért az éghajlati rendszer elemeinek (a légkör, az óceán, a szárazföld, a jégtakaró és az élővilág) különböző folyamatai és a közöttük lévő kölcsönhatások a felelősek. Az éghajlati modellezés során a jelenségeket leíró fizikai törvényszerűségeket öntjük matematikai formába, majd a kapott bonyolult egyenletrendszerrel egy, a teljes Földet lefedő háromdimenziós rács rácspontjaiban értelmezzük, s számítógép segítségével oldjuk meg közelítő (numerikus) módszerek alkalmazásával. Célunk az, hogy a modell képes legyen szimulálni a komplex éghajlati rendszer viselkedését és válaszát valamilyen változó külső kényszerrel szemben. Ilyen külső kényszer például a Föld pályaelemeinek ingadozása vagy az ipari tevékenység fejlődése, melyek hatását az éghajlati rendszer energia-egyensúlyára gyakorolt sugárzási kényszernek nevezzük, és a modellek számára széndioxid-koncentráció egyenértékben számszerűsítjük. Mivel az emberi tevékenység jövőbeli alakulására csak elképzeléseink vannak, ezért a modellek különböző feltelezett jövőképekhez tartozó ún. *kibocsátási forga-*

tőkönnyeket vesznek figyelembe a projekciók elkészítésekor. Éppen ezért az éghajlati modell-szimulációkat nem előrejelzéseknek, hanem projekcióknak nevezzük, érzékeltetve azt, hogy egy feltételezett kényszer hatását modellezzük.

A ma használatos globális klímamodellek már képesek megbízhatóan visszaadni az éghajlati rendszer viselkedését, és alkalmasak a klímaváltozás globális, nagyskálájú jellemzőinek vizsgálatára. Ám a teljes éghajlati rendszert tekintő modellek számításgénye rendkívül nagy, ezért rácsfelbontásuk még ma sem haladja meg a 100 km-t, így nem szolgálhatnak olyan regionális részletekkel, mint például a Balaton vagy a Velencei-tó, a Kékestető, a Hortobágy vagy akár a Duna-kanyar vidékén várható változás (viszont számunkra éppen ezek a részletek a fontosak). Ráadásul egy-egy ilyen kisebb területen bekövetkező változás más mértékű és akár ellentétes irányú is lehet, mint az arra a területre globális modell által adott változás. A globális szimulációk pontosításának egyik módja a regionális klímamodellek alkalmazását jelentő ún. *dinamikai leskálázás*. Ennek során olyan korlátos tartományú (regionális) klímamodellt futtatunk, amely nem az egész Föld, hanem egy kisebb tartomány folyamatait jellemzi a globális modellekhez hasonló, fizikailag megalapozott (légköri egyenleteken alapuló) módon. A számunkra érdekes terület felett finomabb rácsfelbontással futtatjuk a regionális modellt, s a nagyskálájú kényszer-

reket oldalsó határfeltételként vesszük figyelembe a globális modell eredményeit felhasználva (1. ábra). A nagyobb felbontás lehetővé teszi a helyi felszíni viszonyok (például a domborzat vagy a tavak) pontosabb figyelembevételét.



1. ábra. Példa egy globális és egy regionális modell rácsfelbontására és domborzatára

### Hazai regionális modellkísérletek.

A globális információk regionális finomítására Magyarországon négy regionális éghajlati modellt használunk, kettőt az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén (Bartholy *et al*, 2008a, 2008b) és kettőt az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. A két regionális klímamodell, mely az utóbbi néhány évben került adaptálásra az OMSZ Numerikus Modellező és Éghajlat-dinamikai Osztályán, az alábbi:

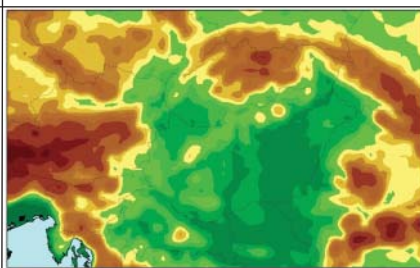
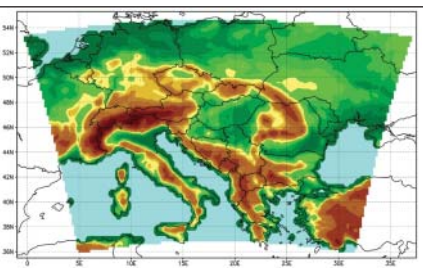
– Az ARPEGE-Climat globális általános cirkulációs modell alapján a Météo France által nemzetközi együttműködésben kifejlesztett ALADIN-Climate regionális klíma-

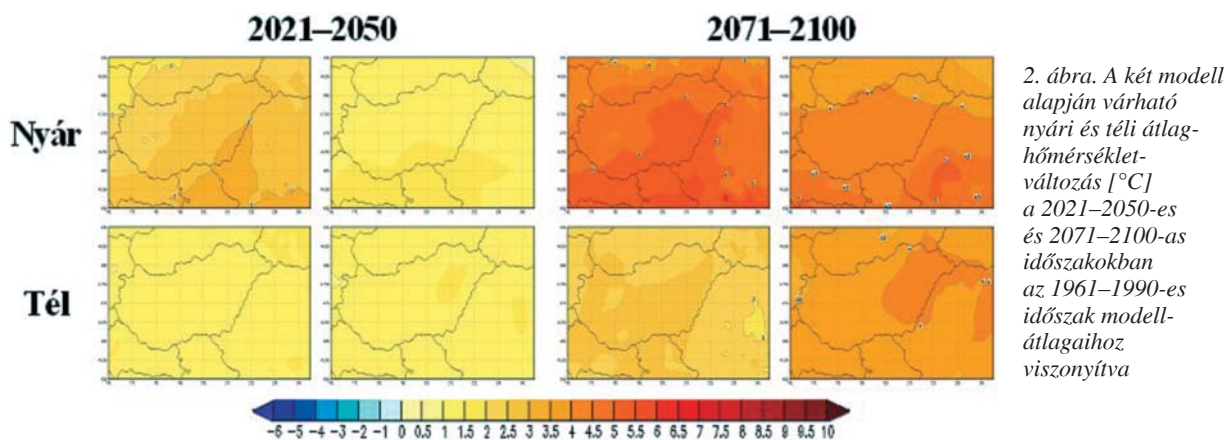
modell (Csima és Horányi, 2008);

– A Német Meteorológiai Szolgálat korábbi időjárás-modellje és az ECHAM4 globális általános cirkulációs modell ötvözésével a hamburgi Max Planck Intézet által fejlesztett REMO modell (Szépszó és Horányi, 2008).

Azért esett a választás két modell fejlesztésére, hogy az eredmények kiértékelése során némi támogatást kaphassunk azok bizonytalanságára is. A továbbiakban e két regionális klímamodell eredményeit mutatjuk be.

1. táblázat: Az ALADIN-Climate és a REMO regionális modellekkel végzett kísérletek jellemzői

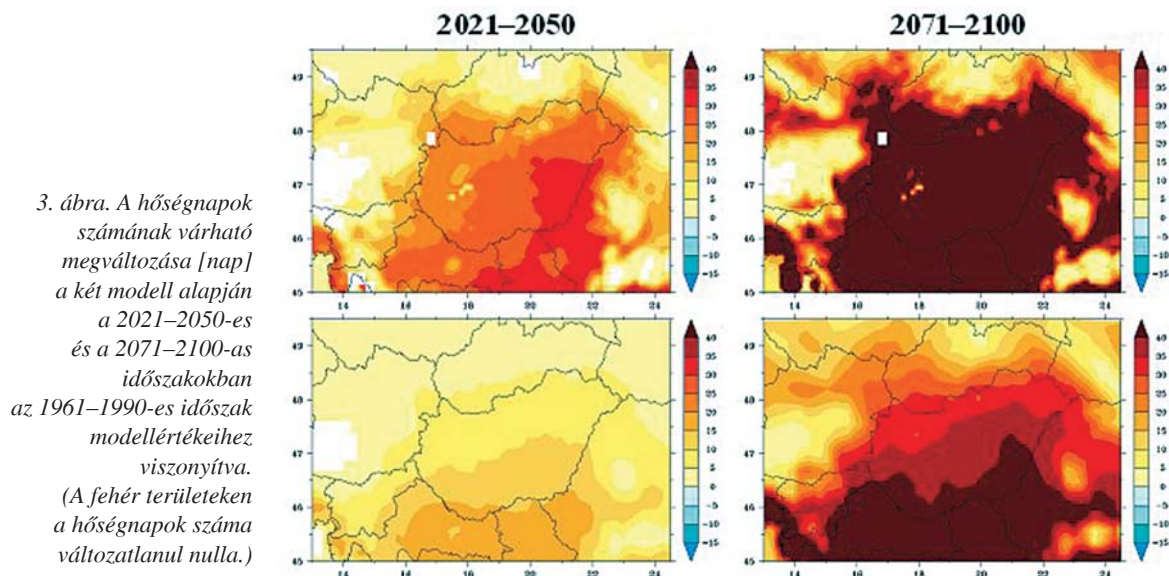
	ALADIN-Climate	REMO
<b>Időszak</b>	1961–2100	1951–2100
<b>Nagyskálájú kényszerek</b>	ARPEGE-Climat/OPA	ECHAM5/MPI-OM
<b>Térbeli horizontális rácsávolság</b>	10 km	25 km
<b>Tartomány</b>		



A jövőre vonatkozó projekciók megkezdése előtt a modelleket minden esetben tesztelik, teszteljük, miként viselkednek a modellek a múltra, hiszen ha nem képesek visszaadni a múlt klímáját, nem várhatjuk, hogy a jövőre vonatkozóan majd jól teljesítenek (bár ez utóbbit nem feltétlenül garantálja a múltbeli viszonyok tökéletes leírása). A modellek rendszeres időközönként (tipikusan 6 óránként) szolgáltatnak (hőmérséklet, csapadék, szél, vagy akár felhőborítottság, hóvastagság stb.) eredményeket. Ezekről a mezőktől azonban nem várjuk el – ellentétben a napi időjárás-előrejelzésekkel –, hogy minden időpontban visszaadják a légkör állapotát, azaz nem célunk, hogy például egy, a 2006. augusztus 20-i viharhoz hasonló helyzetet előre jelezzünk a segítségükkel. Az éghajlati modellek a légköri rendszer hosszabb időszakon belül (ami tipikusan 30 év) vett átlagos és szélsőséges viselkedésének leírására képesek, melynek jellemzésére különböző statisztikai mutatókat (pl. átlagokat, összegeket, extrém indexeket) használunk. A *validációs* tesztelés során a modelleket a globális modell-

eredmények mellett „tökéletesnek” tekintett, főleg megfigyeléseken alapuló határfeltételekkel is meg-hajtottuk, és az eredményeket összevetettük különböző megfigyelési adatbázisokkal. Modelljeink ezen tesztek alapján használhatónak bizonyultak (ami nem jelenti azért azt, hogy a múlt éghajlatát tökéletesen jellemzik, de azt igen, hogy a hibák mértékét is figyelembe véve más európai regionális klímamodellekhez hasonlóan egy reális képet adnak az elmúlt évtizedek Kárpát-medencére jellemző éghajlatáról) az éghajlat jövőbeli szimulálására.

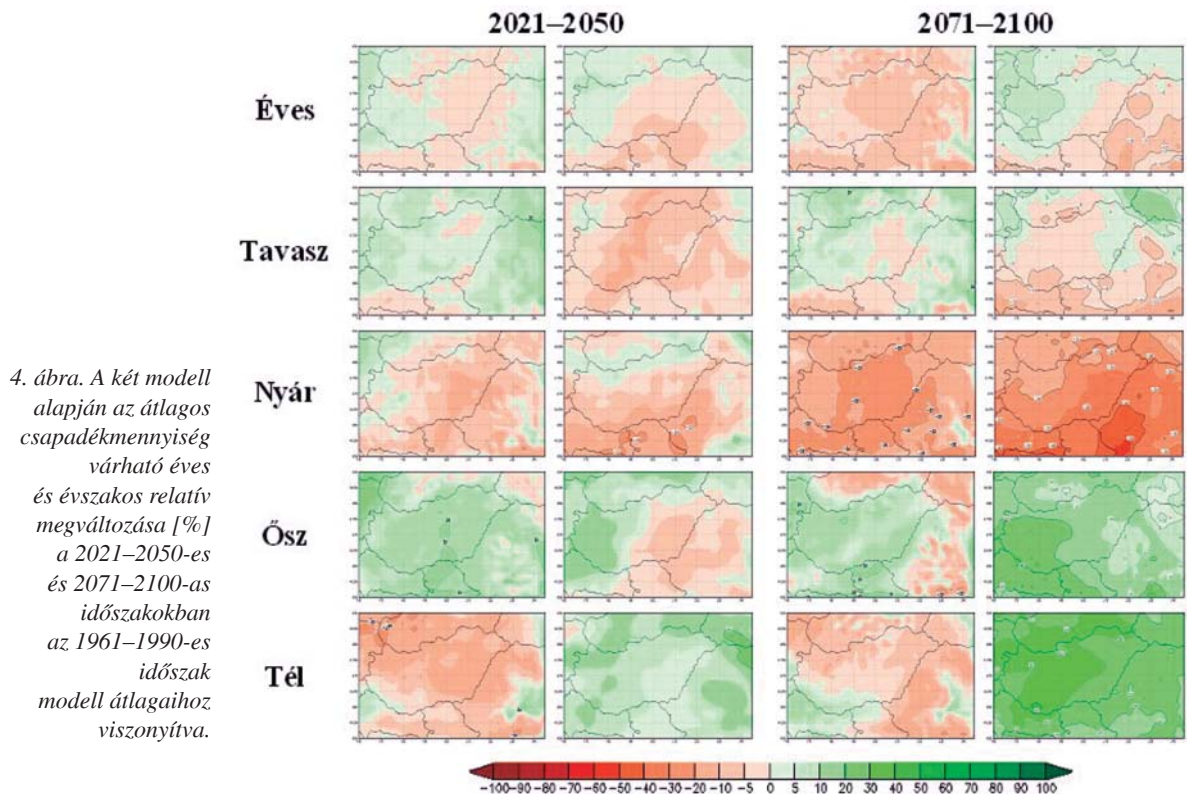
A modellkísérleteket az *ALADIN-Climate* esetében 10 km-es, a *REMO* esetében 25 km-es horizontális rácsfelbontáson végeztük. Mindkét modell futtatásánál és azok globális peremfeltételeinek előállításánál egy átlagosnak tekinthető kibocsátási forgatókönyv lett figyelembe véve (mely a gazdaság gyors fejlődését, a fejlődő világ gyors felzárkózását, illetve az új technológiák hatékony bevezetését feltételezi). A szimulációk fő jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.



**Eredmények.** A hőmérsékletre és csapadékra vonatkozó eredményeket 2021–2050-re és 2071–2100-ra koncentrálva a két modellre együttesen mutatjuk be, mivel így lehetővé válik a projekciókban levő bizonytalanságok számszerűsítése. Ugyanis ha egy adott éghajlati vonatkozásban a modellek jó egyezést mutatnak, akkor a szimulációk bizonyossága nagyobbak tekinthető, az eltérések viszont lehetőséget adnak a bizonytalan jellemzők azonosítására. A vál-

tozásokat minden esetben a meteorológiában elfogadott 1961–1990 időszak szimulált értékeihez viszonyítva fejezzük ki. A jövőbeli eredményeket tehát a referenciaidőszaktól vett eltérések formájában adjuk meg annak érdekében, hogy a szisztematikus modellhibákat kiküszöböljük (feltételezve, hogy az átlagos múltbeli és a jövőbeli hibák megegyeznek).

Mindkét modell szerint folyamatos melegedés várható a Kárpát-medence térségében a XXI. század to-

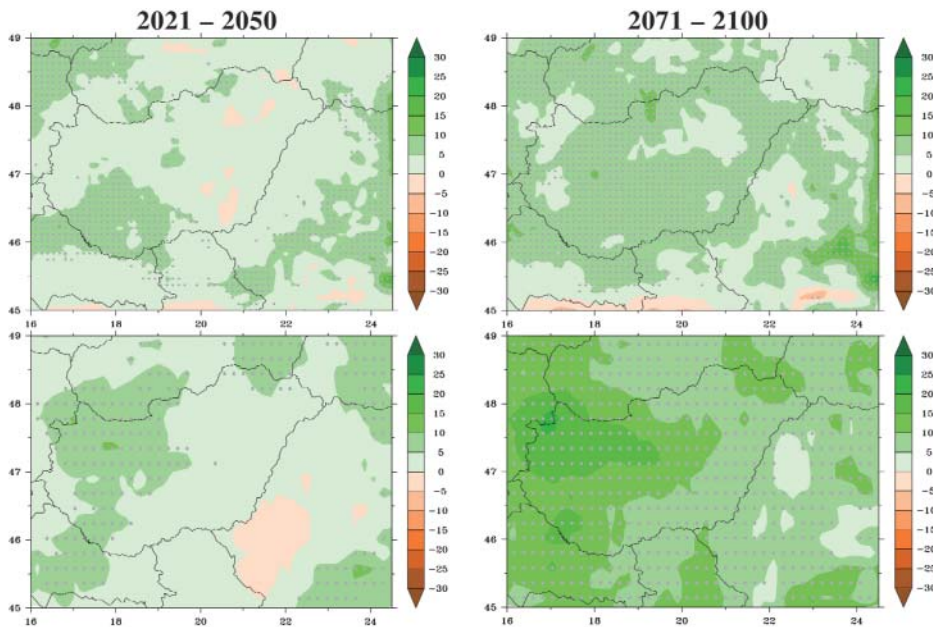


vábbi részében. Ez a melegedés mind az éves, mind az évszaks átlaghőmérséklet esetében igaz, mégpedig statisztikailag szignifikáns módon (azaz a változás nagysága meghaladja az évek közötti változékonyság mértékét). A lehetséges éves változás országos átlagban  $+1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  a század közepén és  $+3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a század végén. Legnagyobb melegedés nyáron várható mindkét időszakban (2. ábra), ami Magyarország területén átlagosan  $1,4\text{--}2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet-emelkedést jelent 2021–2050-ben és  $+4,1\text{--}4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os változást 2071–2100-ban. Nem lehet elégszer hangsúlyozni, hogy mindez nem jelenti azt, hogy ez minden évre érvényes lesz: továbbra is lehetnek az átlagosnál hűvösebb évek és évszakok. A hőmérséklet-változás területi eloszlására az ÉNy-DK-irányú változékonyság a jellemző, ami a délkeleti tájak nagyobb, míg az északnyugatiak kisebb mértékű melegedését jelenti.

Az átlaghőmérséklet emelkedése magával vonhatja a meleg szélsőséges események számának statisztikailag szignifikáns növekedését is. A modellszimulá-

ciók alapján a század közepén országos átlagban 10–25 nappal nőhet meg a hőségnapok száma (amikor a maximumhőmérséklet legalább  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3. ábra), míg a forró napoké (amikor a maximumhőmérséklet legalább  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 3–12 nappal. (Összehasonlításképpen az 1961–1990-es időszak évi átlagos hőségnapjainak száma 16, míg forró napokból évente átlagosan csak egy fordult elő.) A század végére ezek a változásértékek 37–50 nap, illetve 15–30 nap lehetnek a két modell esetében. Ugyanakkor várhatóan a hideg szélsőségek előfordulása csökken, de kisebb mértékben.

A csapadék tekintetében már nem ilyen homogén és egyértelmű a kép, mivel a modellek eredményei kevésbé hasonlítanak, és csak néhány változás szignifikáns. A szimulációk eredményei alapján az éves csapadékösszeg magyarországi átlaga nem változik a jelenlegihez képest, azonban a csapadék éven belüli eloszlása jelentősen átrendeződhet (azaz érdemi csapadékmennyiség-változás lehet egyes évszakokban, gyakorlatilag változatlanul hagyva az éves ösz-



5. ábra. Az éves csapadékintenzitás várható relatív megváltozása [%] a két modell alapján a 2021–2050-es és a 2071–2100-as időszakokban az 1961–1990-es időszak modellértékeihez viszonyítva. A satírozott területeken a változás szignifikáns.

szeget). A modelleredmények szerint a 2071–2100-as időszakban akár  $\pm 30\%$ -os is lehet az évszakos változás (4. ábra). Abban megegyezik a két modell, hogy az ország nagy részén a nyári csapadék várhatóan csökkenni (a század közepén országos átlagban 5, a végén 20–26%-kal, amely a hőmérséklet-emelkedés mellett hosszú távon komoly hatással lehet például a mezőgazdaságra), míg az őszi csapadékmennyiség inkább nőni fog. Téli és tavasszal a modellek ellentmondanak egymásnak (már előjelben is), így például a század végén a téli csapadék esetén lehetséges a 31%-os növekedés, de akár 3%-os csökkenés is területi átlagban.

A csapadékhoz köthető szélsőséges események előfordulási gyakorisága is megváltozhat a jövőben, de ez szintén csak kevés esetben szignifikáns. Az éves csapadékintenzitás (azaz az év során lehullott csapadékmennyiség és a csapadékos napok számának hányadosa; 5. ábra) várhatóan 5–10%-kal fog nőni a század közepén, míg a végén 5–20%-kal, s ez utóbbi változás már szignifikáns az országban. Érdeemes megemlíteni, hogy a modellek szerint a csapadékos események nyáron várhatóan nem lesznek hevesebbek, míg télen és főleg ősszel elég bizonyosan intenzívebb esők várnak ránk, főleg a század végére. Az egymást követő száraz napok számának megváltozása a 2021–2050-es időszakban nem egyértelmű, de a század végén várhatóan statisztikailag szignifikánsan emelkedni fog az ország egyes területein, így akkor megnő a szárazság és az aszály lehetősége is.

**Összefoglalás.** Mint láthattuk, a regionális klíma-modellek alkalmasak arra, hogy globális klíma-modellek eredményeit finomfelbontású (10–25 km-es)

rácsra pontosítva megbecsülhetővé tegyék az éghajlat jövőbeli fejlődését regionális skálán is. Jelen dolgozatban az Országos Meteorológiai Szolgálatnál alkalmazott két regionális éghajlati modell eredményeit mutattuk be, de hangsúlyozzuk, hogy a valószínűségi projekciók készítéséhez célszerű ennél sokkal több modellkísérlet eredményét együttesen értékelni (a Magyarországon rendelkezésre álló négy regionális klíma-modellel már jobb alapot biztosít erre, de ez még mindig nem elegendő a teljes bizonytalansági tartomány reprezentálásához). Tisztában kell lenni azzal, hogy ezek a modellek távolról sem tökéletesek, szükséges a fejlesztésük, de mégis képet adnak egy-egy régió eljövendő klímájáról (a modellek együttes használatával pedig a szimulációk bizonytalanságai is számszerűsíthetők), s így eredményeik nélkülözhetetlen kiindulási alapot szolgáltathatnak a különböző megelőzési és alkalmazkodási elősegítő hatásvizsgálatok készítéséhez, illetve magas szintű stratégiai döntések meghozatalához.

### Irodalom

- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., 2008a: Milyen mértékű éghajlatváltozás várható a Kárpát-medencében. *Léggör* 53 (2), 19–23.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Szabó P., 2008b: Milyen mértékű változás várható a Kárpát-medence éghajlati szélsőségeiben a XXI. század végére? *Léggör*, *Léggör* 53 (3), 19–24.
- Csima, G. and Horányi, A. 2008: Validation of the ALADIN-Climate regional climate model at the Hungarian Meteorological Service, *Időjárás* 112, 155–177.
- Szépszó, G. and Horányi, A. 2008: Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás* 112, 203–231.