

EXTRÉM ÉGHAJLATI INDEXEK VÁRHATÓ TENDENCIÁI MODELLSZIMULÁCIÓK EREDMÉNYEI ALAPJÁN

PROJECTED TRENDS OF EXTREME CLIMATE INDICES ON THE BASIS OF REGIONAL CLIMATE MODEL SIMULATIONS

Pongrácz Rita, Bartholy Judit, Kis Anna, Miklós Erika, Török Orsolya

ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
prita@elte.hu, bartholy@elte.hu, kisanna0610@gmail.com, mikloserika.elte@gmail.com, orsitorek@gmail.com

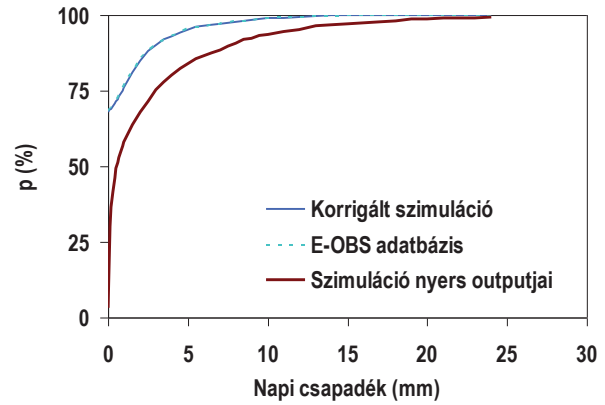
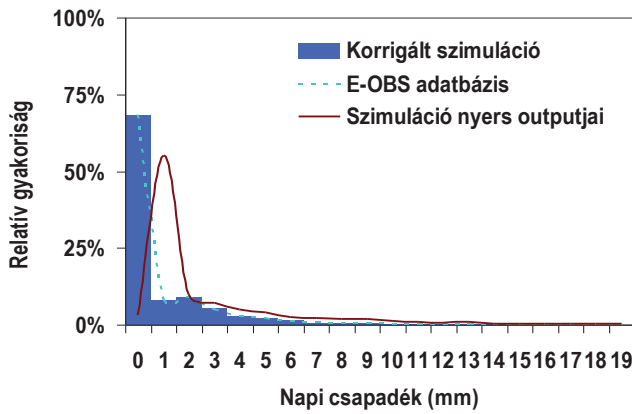
Összefoglalás: A regionális klímamodellek napi hőmérséklet- és csapadékmezője alapján definiálható éghajlati indexek XXI. századra becsült változásai közül az egymást követő száraz napok maximális évi és évszakos számára vonatkozó kvantitatív elemzést mutatjuk be részletesebben. Ez alapján levonható legfontosabb következtetés, hogy 2071–2100-ra a nyári időszakban egyértelműen növekvő indexértékekre számíthatunk hazánk térségében, mely éghajlatunk szárazabbá válását valószínűsíti.

Abstract: Several climate indices may be defined using daily temperature and precipitation outputs of regional climate model simulations. Among them annual and seasonal numbers of consecutive dry days (CDD) are selected, and detailed analysis of their projected changes for the 21st century is discussed here. The main conclusion of the paper is that significant summer increase is very likely by 2071–2100 in Hungary, which highlights the projected summer drying trend of the region.

Az 1990-es évek végén nemzetközi összefogással alakult WMO-CCI/CLIVAR munkacsoport ajánlásai alapján definiált extrém éghajlati indexeket (Karl *et al.*, 1999) használtuk a hazai szélsőségek tendenciáinak elemzéséhez. Vizsgálataink során meghatároztuk számos extrém hőmérsékleti és csapadékindex XX. század második felére vonatkozó tendenciáit a Kárpát-medence térségére (Bartholy és Pongrácz, 2005; 2007). E számításokhoz a hazai és szomszédos országokbeli meteorológiai állomások mért adatait használtuk fel. Ugyanezen indexek idősorait előállítottuk számos regionális klímamodell szimulációit felhasználva is, például a PRUDENCE és az ENSEMBLES projekt keretében kapott szimulációknak a Kárpát-medence kivágatára vonatkozó mezősorai alapján (Bartholy *et al.*, 2008a; 2008b; Pongrácz *et al.*, 2009). E cikkben az ENSEMBLES-szimulációk (Van der Linden és Mitchell, 2009) alapján kapott eredményeket mutatjuk be.

A klímamodellek validációja során a szimulációkból származó éghajlati változók (pl. a hőmérséklet és a csapadék) outputmezőire meghatároztuk az évi, évszakos és havi átlagos értékeket az 1951–2000 időszakra. Ezeket az átlagmezőket összevetettük a mérések alapján összeállított E-OBS adatbázis (Haylock *et al.*, 2008) alapján számított átlagos mezőkkel. Az így kapott hibák azt jelzik, hogy mind a hőmérséklet, mind a csapadék esetén általában felülbecslés jellemző. A szimulált hőmérsékleti mezők térségünkben elsősorban a nyári félévben haladják meg a mérésekből származtatott átlaghőmérsékletet. Ezzel ellentétben a szimulált csapadékmezők nyáron jellemzően alulbecslik az E-OBS adatbázisból meghatározott havi átlagos csapadékot (Pongrácz *et al.*, 2011).

Tehát a különféle küszöbértékeket felhasználó éghajlati indexek számításához mindenképpen szükséges a szimulált idősorok statisztikai módszeren alapuló korrigálása. A hibakorrekciós eljárással megfelelő mértékben csökkentjük a meteorológiai mezősor hibáit. Erre a célra például egy olyan módszert alkalmazhatunk, mely a meteorológiai változók percentilis értékeinek kiszámításán és a szimulációból meghatározott eloszlásnak a megfigyelt eloszláshoz való illesztésén alapul (Formayer és Haas, 2009). A módszer lényege, hogy két adathalmaz statisztikai szempontból közel egyezőnek tekinthető, amennyiben eloszlásuk megegyezik (Déqué, 2007). Az eloszlásfüggvény alakjára nézve a módszer semmilyen előzetes feltételezést nem követel meg. Az eloszlások illesztéséhez használt függvényt többféle módon definiálhatjuk – jelen vizsgálataink során a hőmérséklet esetén additív, a csapadék esetén pedig multiplikatív összefüggést alkalmaztunk. A korrekciós faktorokat minden rácspontra, az év 12 hónapjára külön-külön meghatároztuk. Példaként az 1. ábrán mutatjuk be egy kiválasztott rácspont (47,625 É; 19,625 K) januári napi csapadék adataira vonatkozó hibakorrekció eredményességét. A bal oldali grafikonon az empirikus sűrűségfüggvényeket hasonlítjuk össze, a jobb oldalin pedig az ezekből származtatott empirikus eloszlásfüggvényeket. Jól látható, hogy a megfigyeléseken alapuló adatsor és a modell által szimulált eredeti idősor eloszlása jelentősen eltér egymástól. A hibakorrekció során a modell-szimuláció nyers outputjai alapján meghatározott empirikus eloszlásfüggvényt rásimítjuk az E-OBS-adatok empirikus eloszlásfüggvényére. Így az alkalmazott eljárást követően kapott korrigált szimulációs időorból származtatott eloszlás már jó egyezést mutat a megfigyelt értékek



1. ábra: A megfigyelt (E-OBS), a szimulált és a korrigált adatsorok empirikus sűrűség- és eloszlásfüggvényei a (47,625 É; 19,625 K) földrajzi koordinátájú rácspont esetén, 1951–2000. januári napi csapadékmennyiségek alapján.

alapján megadható eloszlással, s az empirikus eloszlásfüggvények tökéletesen fedik egymást.

A korrigált hőmérsékleti idősorok alapján lehetőség van több hőmérsékleti éghajlati indexben valószínűsíthető változás becslésére. A hazánk térségében a jövőben várható egyértelmű melegebb tendencia az alacsonyabb hőmérséklettel kapcsolatos indexek (például a fagyos vagy a zord napok száma, azaz amikor $T_{min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, illetve $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) esetén csökkenő trendet prognosztizál. A melegebb éghajlati viszonyokat jellemző hőmérsékleti indexek (például a nyári vagy a hőség napok száma, azaz amikor $T_{max} \geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, illetve $30\text{ }^{\circ}\text{C}$) esetén pedig jelentős növekedésre számíthatunk (Pieczka et al., 2011).

A korrigált napi csapadék idősorokból meghatározhatjuk az extrém csapadék indexek évi és évszakos idősorát, s ez alapján becsülhetjük a várható jövőbeli változások tendenciáját. Az 1. táblázatban foglaljuk össze a magyarországi rácspontok átlagára vonatkozó szignifikáns trendeket, melyeket 11 regionális klímamodell-szimuláció elemzésével kaptunk öt éghajlati indexre. A felfelé, illetve lefelé mutató nyilak

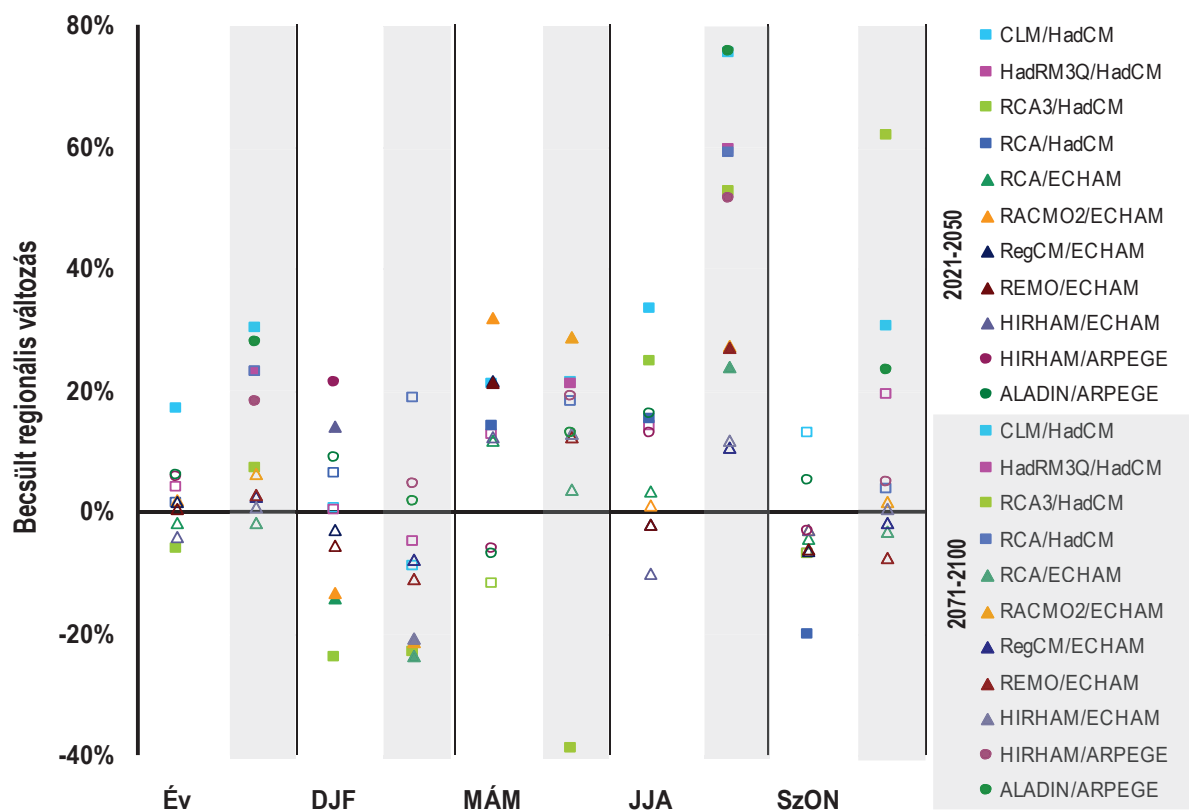
rendre a szignifikáns növekedést, illetve a szignifikáns csökkenést jelzik. A zöld nyilak az éghajlat nedvesebbé, a barnák pedig az éghajlat szárazabbá válására utalnak.

Az eredmények arra a következtetésre vezetnek, hogy hazánkban a XXI. század végére nyáron (továbbá kisebb mértékben ősszel és tavasszal) jellemzően szárazodásra számíthatunk, ugyanakkor a csapadékesemények valószínűsíthetően nagyobb intenzitásúak lesznek (főként ősszel). Télén szintén várhatóan intenzívebb lesz a csapadék hullás, de ebben az időszakban összességében is a csapadék növekedése prognosztizálható

A csapadékkal kapcsolatos vizsgált éghajlati indexek közül a csapadékmentes időszak hosszát jellemző CDD-re, vagyis az egymást követő száraz napok (amikor a napi csapadékösszeg nem éri el az 1 mm-t) maximális évi, évszakos számára vonatkozó kvantitatív elemzést mutatjuk be részletesebben. A 2. ábrán a magyarországi rácspontok értékei alapján az egyes szimulációkból meghatározott átlagos várható változások láthatók a XXI. század közepére és végére az 1961–1990 referencia időszakhoz viszonyítva. A 2071–2100

1. táblázat: Néhány csapadék index várható változása 2071–2100 időszakra 11 regionális klímamodell szimulációi alapján (a nyilak a szignifikáns változást adó modelleket jelzik, a referenciaidőszak: 1961–1990).

Index	Tavasz	Nyár	Ősz	Tél
CDD: Az egymást követő száraz napok maximális száma (amikor $R_{nap} < 1\text{ mm}$)	↑↑↑↓	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑	↑↑↑	↓↓↓↓↓
RR1: Csapadékos napok száma (amikor $R_{nap} \geq 1\text{ mm}$)	↓↓↓↓↓ ↓↓↑	↓↓↓↓↓ ↓↓↓↓↓ ↓	↓↓↓↓↓	↑↑↑↑
RR10: Nagy csapadéku napok száma (amikor $R_{nap} \geq 10\text{ mm}$)	↑	↓↓↓↓↓ ↓↓	↑↑↑↑↑ ↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑
RX1: 1 nap alatt lehullott max. csapadékösszeg ($R_{max,1nap}$)	↑↑↑	↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑
SDII: Csapadékintenzitás, a csapadékos napok átlagos csapadéka ($R_{sim}/RR1$)	↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↓	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑ ↑↑↑↑↑



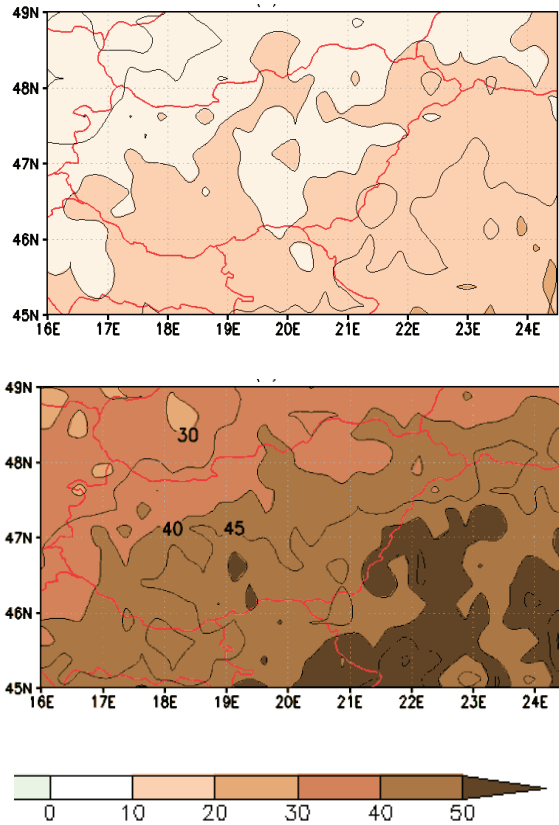
2. ábra: A maximális száraz időszak hossza (CDD) index évi és évszakos értékeinek várható átlagos változása Magyarország területén 2021–2050 és 2071–2100 közötti időszakokra (referenciaidőszak: 1961–1990).

időszakra vonatkozó eredményeket szürke háttér emeli ki. A t-próba alapján a 95%-os szinten szignifikáns becslült változásokra a beszínezett szimbólumok utalnak.

A regionális klímamodellek kezdeti- és oldalsó peremfeltételeit három különböző globális klímamodell szolgáltatja: a hamburgi ECHAM, a brit HadCM és a francia ARPEGE. A grafikonon ezeket rendre háromszög, négyzet, illetve kör jelöli. A jelmagyarázatban a meghajtó globális modelleket is jelezzük a regionális klímamodell megnevezése után; ebből jól látható, hogy az általunk vizsgált 11 modellszimuláció közül két-két esetben ugyanazt a regionális klímamodellt (az RCA-t és a HIRHAM-ot) más-más globális meghajtó modellel is futtatták.

Az eredmények alapján Magyarországon évi átlagban nagyrészt a CDD növekedésére számíthatunk: a távolabbi jövőben öt modellszimuláció (az ARPEGE és a HadCM által meghajtott regionális klímamodellek többsége) szerint lesz ez a változás szignifikáns, mintegy 10–30%-os. A becslült évszakos változásokat sorra véve, télen a modellszimulációk többsége csökkenő trendet valószínűsít 2071–2100-ra. A HIRHAM/ECHAM, a RACMO2 és az RCA/ECHAM is szignifikáns csökkenést prognosztizál, amelynek mértéke meghaladja a 20%-ot. A 2021–2050-re becslült változás nagyobb bi-

zonytalanságú, a szignifikáns változást jelző modellek eredményei ellentétes előjelűek. Ennek oka az, hogy a csapadék mind térben, mind időben rendkívül változékony meteorológiai elem, ezért nagy a szórás és az éghajlati becslések bizonytalansága. Tavasszal feltehetőleg mindkét időszakban meg fog növekedni az egymást követő száraz napok maximális száma, a statisztikailag szignifikáns becslések szerint mintegy 20–35%-kal. Ősszel csupán három modellszimuláció feltételez szignifikáns változást: a CLM és az ALADIN 20–25%-os, az RCA3 pedig kb. 60%-os növekedést jelez a XXI. század végére. Nyáron 2021–2050-re még nem szignifikáns a modellek által becslült növekedések többsége, de 2071–2100-ra minden modellszimuláció egyértelműen a CDD értékének növekedését valószínűsíti, s ezek nagy többsége 95%-os szinten szignifikáns. A legnagyobb mértékű (70–80%) növekedést a CLM és az ALADIN szimulációi jelzik. A 11 modellszimuláció alapján a két célidőszakra vonatkozó, nyárra számított átlagos várható változás térbeli szerkezetét hasonlíthatjuk össze a 3. ábra kompozitáráképein. Az évszázad közepére 10%-os a hazánk területére becslült átlagos növekedés, mely az évszázad végére mintegy 43%-ká fokozódik. Láthatjuk, hogy az index értékeiben prognosztizált változások mértéke északnyugatról délkeletre haladva nő.



3. ábra: A maximális száraz időszak hossza (CDD) index várható átlagos változása (%) nyáron 2021–2050 (fent) és 2071–2100 (lent) időszakra 11 regionális modellszimuláció alapján (referencia-időszak: 1961–1990).

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat támogatta az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával az „Európai Léptékel a Tudásért, ELTE-TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003. A felsőoktatás minőségének javítása a kutatás-fejlesztés-innováció-oktatás fejlesztésén keresztül” pályázat, az OTKA K-78125 számú pályázata, az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott CCWATERS projekt (SEE/A/022/2.1/X), az SH/2/1 számú svájci-magyar közös kutatási program keretében megvalósuló Felső-Tisza árvízmedgelőzési rendszer fejlesztési projektje, a FuturICT.hu TÁMOP 4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0013, a KMR_12-1-2012-0206 és a GOP-1.1.1.1.-11-2012-0164 kutatási pályázatok valamint az EU VI. keretprogram CECILIA projektje (GOCE-037005).

Irodalom

- Bartholy, J. és Pongrácz, R., 2005: Néhány extrém éghajlati paraméter globális és a Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. *AGRO-21 Füzetek* 40, 70–93.
- Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2007: Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change* 57, 83–95
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy. and Szabó, P., 2008a: Analysis of expected climate change in the Carpathian basin using the PRUDENCE results. *Időjárás* 112, 249–264.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy. és Szabó, P., 2008b: Milyen mértékű változás várható a Kárpát-medence éghajlati szélsőségeiben a XXI. század végére? *Léggör* 53/3, 19–23.
- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* 57, 16–26.
- Formayer, H. and Haas, P., 2009: Correction of RegCM3 model output data using a rank matching approach applied on various meteorological parameters. In: Deliverable D3.2 RCM output localization methods (BOKU-contribution of the FP 6 CECILIA project). <http://www.cecilia-eu.org/>
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. and New, M., 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)* 113, D20119, DOI:10.1029/2008JD10201
- Karl, T.R., Nicholls, N. and Ghazi, A., 1999: Cli-var/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change* 42, 3–7.
- Van der Linden, P. and Mitchell, J.F.B., 2009: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 164p.
- Pieczka, I., Pongrácz, R., Bartholy, J., Kis A. és Miklós, E., 2011: A szélsőségek várható alakulása a Kárpát-medence térségében az ENSEMBLES projekt eredményei alapján. In: *36. Meteorológiai Tudományos Napok - Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében*. (Szerk.: Lakatos M.) Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest. 77–87. CD ROM <http://www.met.hu/pages/seminars/metnap36/MetNapok2010.pdf>
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Szabó, P. and Gelybó, Gy., 2009: A comparison of observed trends and simulated changes in extreme climate indices in the Carpathian basin by the end of this century. *International Journal of Global Warming* 1, 336–355.
- Pongrácz, R., Bartholy, J. and Miklós, E., 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research* 9, 387–398.

2021–2050

2071–2100