

NÉHÁNY HAZAI ÉGHAJLATI INDIKÁTOR MEGFIGYELT ÉS VÁRHATÓ VÁLTOZÁSÁNAK ATTRIBÚCIÓJA

Szabó Péter , Bartholy Judit , Pongrácz Rita 

ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: szabo.p.elte@gmail.com, bartholy.judit@ttk.elte.hu, pongracz.rita@ttk.elte.hu

Bevezetés

Az antropogén tevékenység okozta globális felmelegedés egyre több időjárási esemény okozója, és ennek következményeként a korábban ritkábban vagy soha nem látott értékek is előfordulnak (vagy éppen fordítva, a korábban gyakrabban, hosszabban és magasabb értékkel jelentkező események módosulnak). Mindeközben továbbra is vannak és lesznek olyan meteorológiai jelenségekhez kötődő értékek, amelyek éghajlatunk természetes változékonyságának részei. A doktori kutatás részeként arra keressük a választ, hogy a hazánkban nagyobb jelentőséggel bíró, évszakfüggő éghajlati indikátorokban megfigyelt, detektált változás mennyire kapcsolódik az emberiség által előidézett éghajlatváltozáshoz, illetve mire számíthatunk a jövőben többféle üvegházgáz-kibocsátási forgatókönyv követése esetén. Ehhez a télhez kötődően a fagyos napokat, az extrém hidegeket és a havazásokat, a tavaszi vegetációs időszak kezdeteit és az utolsó fagyokat, valamint a nyárhoz kapcsolódó tartós hóhullámokat és extrém melegeket elemezzük ebben a tanulmányban.

Adatok és módszertan

Elemzésünk egyik fontos alapját a megfigyelések képezik, melyekhez napi felbontású, rácsponti adatbázisokat használtunk. Az 1971-től elérhető napi minimum-, maximum- és középhőmérsékleti adatokat a HUCLIM adatbázisból vettük, melyet az Országos Meteorológiai Szolgálat állított elő a lehető legtöbb hazai meteorológiai állomás homogenizálásával és 0,1°-os rácstra interpolálásával [1 – met.hu]. A napi hóesés változót az 1981-től 0,25°-on elérhető ERA5-reanalízis (Hersbach et al., 2020) adatbázisból vettük, mely megfelelő egyezést mutat az állomási megfigyelésekkel. A napi adatokból számított indikátorokat és azok definícióit az *1. táblázat* foglalja össze. Első lépésként a mérések alapján trendvizsgálatot végeztünk, illetve meghatároztuk a teljes időszak elejéről egy korábbi és a végéről pedig egy közelmúltbeli szakasz közötti változást, majd ehhez viszonyítottuk a klímamodellek múltbeli és jövőbeli eredményeit is. Megvizsgáltuk, hogy a kapott eredmények statisztikailag szignifikánsnak tekinthetők-e, melyhez a legtöbb esetben 0,9-es konfidencia-intervallumot alkalmaztunk. A változásoknál a Welch-tesztet (Welch, 1951), míg a trendvizsgálatnál a klasszikus t-próbát (Student, 1908) használtuk.

A teljes földi éghajlati rendszert és az azokat meghatározó fizikai folyamatokat globális klímamodellek tudják megfelelő módon leírni. Az IPCC legújabb jelentéséhez (IPCC, 2021) olyan modellszimulációkat is végeztek a múltra a CMIP6 együttműködés keretén belül, amelyek csak a természetes éghajlatalakító kényszereket (pl. naptevékenység, vulkánok) vették figyelembe (Eyring et al., 2016). Emellett az ún. historikus, az emberi tevékenység hatását is figyelembe vevő szimulációk is rendelkezésünkre állnak ugyanezekkel a modellekkel az iparosodástól napjainkig, egészen 2014-ig. Ha adott CMIP6-beli modellre ezen kétféle szimuláció trendjének iránya és nagysága egymástól szignifikánsan különbözik (Mann-Kendall-tesztel (Kendall, 1975) vagy t-próbával vizsgálva a legtöbb esetben 0,9 megbízhatóság mellett), és a historikus trend megegyezik a megfigyelt trenddel, akkor a

változás ezen modell szerint az emberi tevékenység miatt következett be, és nem tekinthető a természetes változékonyság részének. Ennek pontosabb meghatározására jelen tanulmányban 11 különböző globális klímamodell imént említett kétféle szimulációt használtuk fel a megfigyelések kezdetétől, azaz 1971-től 2014-ig. Ugyanakkor a mérési adatbázis publikusan elérhető kezdete előtt, a XX. század leírásához a historikus szimulációkat már 1901-től, vagy a hó esetében 1961-től tekintettük.

1. táblázat: Az elemzéshez kiválasztott indikátorok definíciói és egységei.

Név	Definíció	Egység
Fagyos napok száma	$T_{\min} < 0\text{ °C}$	nap
Extrém hideg hőmérsékletek	éves $\min(T_{\min})$	°C
Havas napok száma	hóesés $> 1\text{ mm}$	nap
Nagy-havas napok száma	hóesés $> 10\text{ mm}$	nap
Hidegtűrő vegetációs periódus kezdete	$T_{\text{közép}} > 5\text{ °C}$ 5 napon át először	év napja
Melegigényes vegetációs periódus kezdete	$T_{\text{közép}} > 10\text{ °C}$ 5 napon át először	év napja
Utolsó késői fagy időpontja	$T_{\min} < 0\text{ °C}$ utolsó tavaszi napja	év napja
Tartós hóhullámos napok száma	$T_{\text{közép}} > 27\text{ °C}$ legalább 3 napig	nap
Extrém meleg hőmérsékletek	éves $\max(T_{\max})$	°C

Egy térség, pl. hazánk éghajlatának részletesebb vizsgálatához regionális klímamodellekre van szükség, hiszen azok a légköri folyamatokat pontosabban és finomabb térbeli felbontással írják le, mint a globális modellek. A regionális modellek historikus szimulációi nagy számban továbbra is csak 2005-ig állnak rendelkezésünkre. A jövőre vonatkozóan, 2006-tól indítva 2100-ig jelen tanulmányban két feltételes üvegházgáz-kibocsátási forgatókönyvet tekintettünk az RCP scenárió-családból (van Vuuren et al., 2011): a 2040 utáni kibocsátás-csökkentéssel számoló RCP4.5-öt, illetve a kibocsátás-csökkentés nélküli, pesszimista RCP8.5-öt.

2. táblázat: Az elemzéshez felhasznált globális modellek listája, és a regionális szimulációk a meghajtó modellükkel együtt.

Globális modellek (CMIP6)	Regionális modell (EURO-CORDEX)	Meghajtó globális modell (EURO-CORDEX)
ACCESS-ESM1-5	RCA4	CNRM-CM5
BCC-CSM2-MR		EC-EARTH
CanESM5		IPSL-CM5A-MR
CNRM-CM6-1		NorESM1-M
FGOALS-g3	RACMO22	CNRM-CM5
GFDL-ESM4		EC-EARTH
HadGEM3-GC31-LL		
IPSL-CM6A-LR		
MIROC6		
MRI-ESM2-0		
NorESM2-LM		

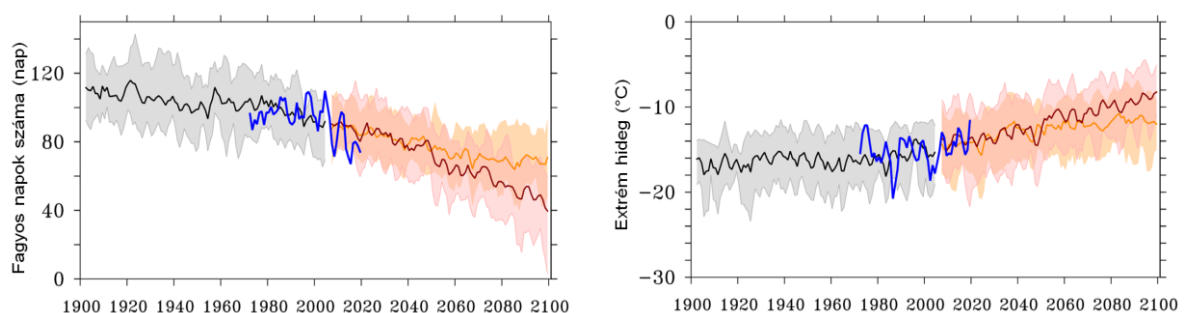
Az elemzésben használt forgatókönyvekre az Európa egészét 10 km-es rácsfelbontással lefedő, Euro-CORDEX (Kotlarski et al., 2014) együttműködés keretében futtatott különböző, de ugyanazon hat-hat regionális klímamodell-szimulációt tekintettünk (2. táblázat). Ezen hattergú együttes már megfelelően tudja reprezentálni a modellek különbözőségéből eredő

bizonytalanságot, illetve ezeket kétféle forgatókönyvvel meghajtva az emberi tevékenység jövőbeli alakulásából származó nagyfokú bizonytalanságot is, mely hazánk térségében jelentős (Szabó & Szépszó, 2016).

Az elmúlt évtizedek folyamatos fejlesztései ellenére az éghajlati szimulációk még ma sem tökéletesek, a meteorológiai változóktól függően kisebb-nagyobb hibával terheltek a megfigyelésekkel szemben. Egyáltalán nem mindegy, hogy milyen megfigyeléshez hasonlítjuk a szimulációinkat (Kotlarski et al., 2019), ezért a hibák javításához a legjobb minőségű megfigyeléseken túl hibakorrekciós módszerre is szükségünk van. A szimulációs eredmények bemutatásakor a standardizálás módszerét (Wilby et al., 2004) vagy az egyszerűbb delta módszert (Räty et al., 2014) használtuk. Előbbi az eloszlások szórását és átlagát is figyelembe véve végzi a hibák javítását, azonban ahol elégséges volt, ott csak az átlagot tekintő delta módszert vettük figyelembe. A korrekciós referencia-időszak egy megfigyelésekkel közös múltbeli időszakot kell, hogy tekintsen, így a globális szimulációknál mindig az 1971–2014-et, míg a regionális modellek esetén leginkább a forgatókönyvek előtti, 1971–2005 időszakot vettük (kivéve a hóesést, ahol 1981-től kezdődtek ezen időszakok). Előfordult azonban, hogy a jövőre vonatkozó szimulációkban (2006-tól) a megfigyelésekben detektálnál kisebb változást láttunk, ezért ott a 2001–2020 időszakot tekintettük korrekciós időszakknak.

Eredmények

A következő, azonos felépítésű, a XX. és XXI. századot is lefedő ábrákon a méréseket a havas napok kivételével az 1971–2020 időszakra mutatjuk be, amihez hozzávettük a klíma modellek korrigált múltbeli és jövőbeli eredményeit is. A globális modelleket 1901-től 2005-ig a teljes XX. századot lefedve ábrázoljuk, míg a regionális szimulációk forgatókönyveit 2006-tól mutatjuk a grafikonokon. A két havas index esetében 1981-től mutatjuk a megfigyeléseket, a globális modelleket pedig 1961-től. Az évek közötti nagy változékonyság miatt minden esetben 3 éves simítást tettünk az eredményekre (a tartós hóhullámos napoknál és az extrém melegeknél 5 éveset). Mivel a modelleredmények bizonytalansággal terheltek, ezért az ábrákon a teljes, ritkán az alsó és felső szélső modelleredmények nélküli bizonytalansági sávot is jelöltük a szimulációk átlaga/mediánja mellett.

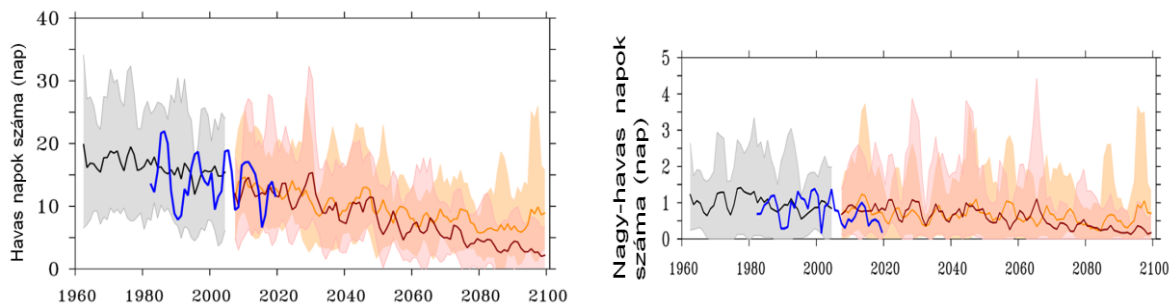


1. ábra: A fagyos napok számának és az extrém hideg hőmérsékletek 1971–2020 időszakban megfigyelt (kékkel), az 1901–2005 időszakban, historikus kényszerekkel szimulált (feketével), illetve kétféle jövőbeli kibocsátási forgatókönyvet (pirossal az RCP8.5-öt, narancssárgával az RCP4.5-öt jelöltük) 2006–2100 időszakban követő szimulációk idősorai hazánkra.

A fagyos napok országos éves száma a megfigyelések szerint jelentős csökkenésnek indult, mely a CMIP6-modellfuttatások alapján 80%-os valószínűséggel antropogén hatásra történt. Az RCP8.5 forgatókönyv esetén a XXI. század végére a jelenlegi, 80 nap körüli érték a felére csökkenhet (1. ábra, balra). Ezzel szemben az éves legalacsonyabb hőmérsékletekben a megfigyelések szerint nem mutatható ki szignifikáns trend, azaz nagy belső változékonyság

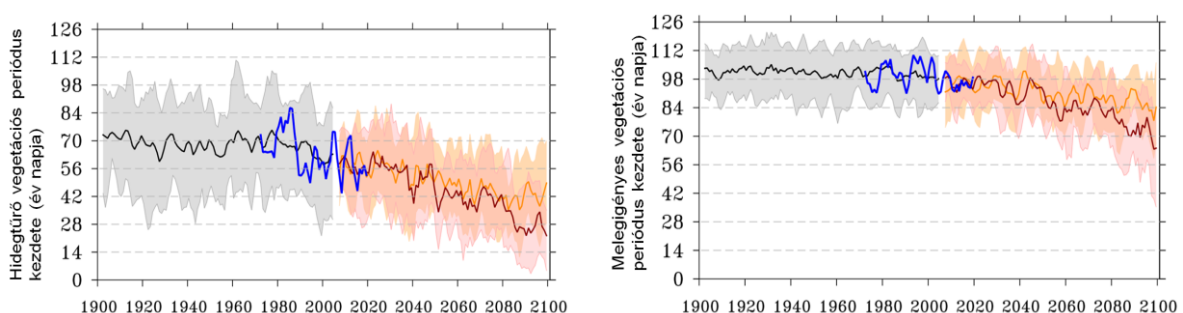
jellemzi továbbra is, és nem is tekinthetjük antropogén hatásnak a grafikonon megjelenő kisebb változást. Ha viszont az RCP8.5-et követjük, akkor a jelenlegi -15°C körüli várható értékről a XXI. század végére ez akár -8°C -ra is nőhet (1. ábra, jobbra).

A havas napok országos átlagban vett számában a megfigyelések szerint csak gyenge, nem szignifikáns csökkenést mutathatunk ki, így ez nem is tekinthető az emberi tevékenység hatásának. A 2040 körül induló kibocsátás-csökkentéssel számoló RCP4.5 esetén van esélyünk arra, hogy a jelenlegitől csak kevésbé eltérő mértékben legyenek havazások a XXI. század végén is (2. ábra, balra). A nagy havazásokról ugyanezeket mondhatjuk el, de ott a kis előfordulási szám miatt az RCP8.5 forgatókönyv szerint ezek teljesen eltűnhetnek a század végére (2. ábra, jobbra).



2. ábra: A havas napok és a nagy-havas napok számának 1981–2020 időszakban megfigyelt (kékkel), az 1961–2005 időszakban, historikus kényszerekkel szimulált (feketével), illetve kétféle jövőbeli kibocsátási forgatókönyvet (pirossal az RCP8.5-öt, narancssárgával az RCP4.5-öt jelöltük) 2006–2100 időszakban követő szimulációk idősorai hazánkra.

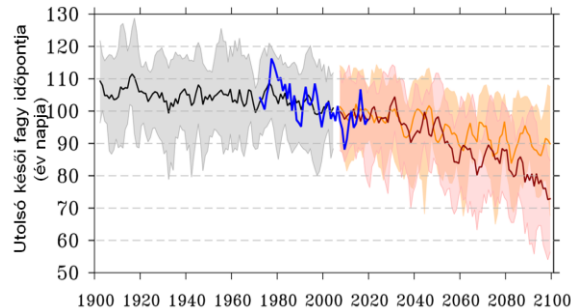
A hidegtűrő növények vegetációs periódusának kezdete hazánkban a megfigyelések szerint jelentősen, átlagosan közel két héttel előbbre tolódott az elmúlt 50 évben, mely 67%-os valószínűséggel az emberi tevékenység miatt következett be. A kibocsátás-csökkentés nélküli, RCP8.5 forgatókönyvet követve a XXI. század végére már akár januárban is lehet ennek az átlagos napja (3. ábra, balra). Ugyanakkor az évben később kezdődő, melegigényes vegetációs periódus elindulásában nem detektálhatunk semmilyen változást, így ebben az esetben nem beszélhetünk antropogén hatásról. A jövőben azonban ez is változhat, ugyanis az RCP8.5 esetén a jelenlegi április közepéről a XXI. század végére március közepére tolódhat (3. ábra, jobbra).



3. ábra: A hidegtűrő és a melegigényes vegetációs periódus kezdetének 1971–2020 időszakban megfigyelt (kékkel), az 1901–2005 időszakban, historikus kényszerekkel szimulált (feketével), illetve kétféle jövőbeli kibocsátási forgatókönyvet (pirossal az RCP8.5-öt, narancssárgával az RCP4.5-öt jelöltük) 2006–2100 időszakban követő szimulációk idősorai hazánkra.

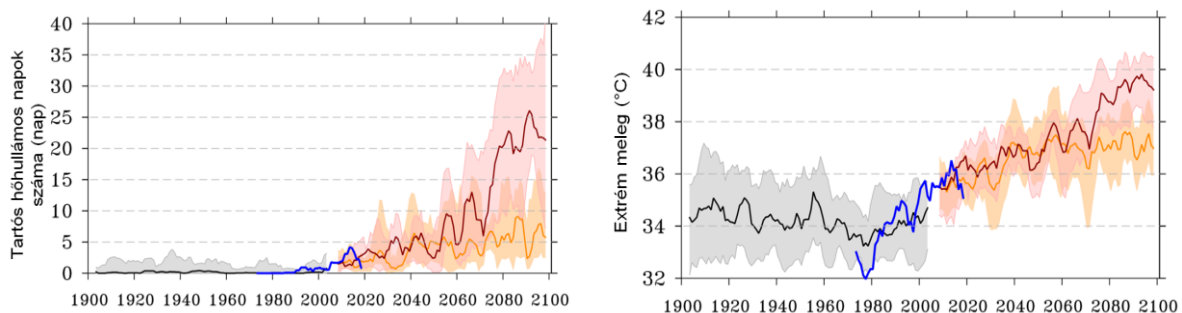
Az utolsó késői fagy dátumában is megfigyelhetünk az elmúlt 50 év alatt egy 7-10 napos előbbre tolódást az évben, mely 71%-os valószínűséggel az emberi tevékenység

következménye (4. ábra). Ez kisebb változás, mint amit a hidegtűrő vegetációban mérhattunk. A pesszimista forgatókönyvet jelentő RCP8.5 esetén a vegetációs periódus kezdete sokkal erőteljesebben tolódik előbbre az évben, mint a késői fagy dátuma, amely egyértelműen növelheti a fagyveszélyes időszak hosszát a jövőben. Ugyanezt a mérsékelt optimista RCP4.5 szerint nem várjuk.



4. ábra: Az utolsó késői fagy időpontjának 1971–2020 időszakban megfigyelt (késsel), az 1901–2005 időszakban, historikus kényszerekkel szimulált (feketével), illetve kétféle jövőbeli kibocsátási forgatókönyvet (pirossal az RCP8.5-öt, narancssárgával az RCP4.5-öt jelöltük) 2006–2100 időszakban követő szimulációk idősorai hazánkra.

Végül nézzük a két nyári indexet! A tartós hőhullámos napok megfigyelt számában 1971-től a lineárist meghaladó mértékű növekedést detektálhattunk hazánkban, ez 89%-os bizonyossággal az emberi tevékenység hatása miatt következett be. Az RCP8.5 esetén a jelenlegi éghajlati érték átlagosan 12-szerese várható a XXI. század végén, míg az RCP4.5-öt követve ez a jelenlegi 3-szorosa lehet csak (5. ábra, balra). Az évi legmagasabb, extrém meleg hőmérsékletekben (amely jelenleg kevéssel 36 °C alatti) is megfigyelhetünk egy erőteljesebb növekedést az 1970-es évek végétől, és 63%-os valószínűséggel állíthatjuk, hogy ez antropogén hatás miatt változott, ám az évek közötti változékonyság viszonylag nagy a globális klímaszimulációkban. A jövőben az RCP8.5 esetén a jelenlegi trend folytatódhat, és a XXI. század végére az országos átlag minden évben megközelítheti a 40 °C-ot (5. ábra, jobbra).



5. ábra: A tartós hőhullámos napok számának és az extrém meleg hőmérsékletek 1971–2020 időszakban megfigyelt (késsel), az 1901–2005 időszakban, historikus kényszerekkel szimulált (feketével), illetve kétféle jövőbeli kibocsátási forgatókönyvet (pirossal az RCP8.5-öt, narancssárgával az RCP4.5-öt jelöltük) 2006–2100 időszakban követő szimulációk idősorai hazánkra.

Összefoglalás

Jelen tanulmányunkban összesen 9 különböző, évszakokhoz kapcsolódó éghajlati indikátort elemeztünk Magyarországra. Összefoglalásként elmondhatjuk, hogy az országos átlagokat vizsgálva nem minden eredmény mutat statisztikailag szignifikáns, azaz a megfigyelésekben

egyértelműen detektálható változást. A globális modellek kétféle szimulációs eredményeit elemezve nem minden indikátorban mutatható ki az emberi tevékenység hatása hazánkra, azaz néhol még jelentős az éghajlatunk részének tekinthető természetes, belső változékonyság szerepe. A jövőben ez azonban változni fog, és kibocsátás-csökkentés nélkül jelentősebb és további változások várhatók: a legtöbb indikátorban gyakorlatilag a jelenlegi trendek folytatását várhatjuk a XXI. század végéig a kibocsátás-csökkentés nélküli RCP8.5 forgatókönyv szerint, és általában csak jóval kisebb mértékű változásra számíthatunk, ha a kissé optimistább, 2040-től meginduló kibocsátás-csökkentéssel számoló RCP4.5 forgatókönyvet követjük. A bemutatott eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: A vizsgált indikátorok megfigyelt trendje, az antropogén hatás valószínűsége, illetve a két jövőbeli forgatókönyv által jelzett további várható változás iránya és becsült intenzitása.

Indikátor	Megfigyelt trend	Antropogén hatás?	Jövő RCP4.5	Jövő RCP8.5
Fagyos napok száma	---	Igen, 80%	-	---
Extrém hideg hőmérsékletek	nincs	Nem	-	--
Havas napok száma	-0	Nem	-	--
Nagy-havas napok száma	-0	Nem	0	-
Hidegtűrő vegetációs periódus kezdete	--	Igen, 67%	-	--
Melegigényes vegetációs periódus kezdete	nincs	Nem	-	--
Utolsó késői fagy időpontja	-	Igen, 71%	-	--
Tartós hóhullámos napok száma	+++	Igen, 89%	+	+++
Extrém meleg hőmérsékletek	+++	63%	+	+++

Köszönetnyilvánítás

A kutatás megvalósításához hozzájárult a European Climate Foundation G-2108-62486 és G-2208-64555 számú projektje, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap K-129162 és K-120605 számú projektje, valamint az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium (RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt). Az elemzések technikai háttérét az IS-ENES 3 Analysis Platforms bk1088 tette lehetővé.

Hivatkozások

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9: 1937–1958.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146: 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)] <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Kendall, M.G., 1975: Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.
- Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., 2014: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci. Model Dev.*, 7: 1297–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- Kotlarski, S., Szabó, P., Herrera, S., Rätty, O., Keuler, K., Soares, P.M., Cardoso, R.M., Bosshard, T., Pagé, C., Boberg, F., Gutiérrez, J.M., Isotta, F.A., Jaczewski, A., Kreienkamp, F., Liniger, M.A., Lussana, C., Pianko-Kluczynska, K., 2019: Observational uncertainty and regional climate model evaluation: A pan-European perspective. *Int. J. Climatol.*, 39: 3730–3749. <https://doi.org/10.1002/joc.5249>
- Rätty, O., Räisänen, J., Ylhäisi, J.S., 2014: Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate Dynamics*, 42: 2287–2303. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2130-8>
- „Student” Gosset, W., 1908: The probable error of a mean. *Biometrika*, 6 (1): 1–25. <https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1>
- Szabó, P., Szépszó, G., 2016: Quantifying Sources of Uncertainty in Temperature and Precipitation Projections over Different Parts of Europe. In: Mathematical Problems in Meteorological Modelling. Mathematics in Industry (eds.: Bátkai, A., Csomós, P., Faragó, I., Horányi, A., Szépszó, G.), Springer International Publishing, 207–237. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40157-7_12
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Thomson, A., Riahi, K., Kainuma, M., Matsui, T., Hurtt, G.C., Lamarque, J.-F., Meinshausen, M., Smith, S., Granier, C., Rose, S.K., Hibbard, K.A., 2011: Representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109: 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Welch, B. L., 1951: On the Comparison of Several Mean Values: An Alternative Approach. *Biometrika*, 38(3/4): 330–336. <https://doi.org/10.2307/2332579>
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L.O., 2004: Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. IPCC Task Group on Scenarios for Climate Impact Assess., Geneva, Switzerland, 27p.

Internetes hivatkozások

[1 – met.hu] <https://odp.met.hu>

ORCID

Szabó P.  <https://orcid.org/0000-0002-5921-5036>
Bartholy J.  <https://orcid.org/0000-0002-3911-7981>
Pongrácz R.  <https://orcid.org/0000-0001-7591-7989>