

A KALIBRÁCIÓS IDŐSZAK ÉS A REFERENCIA ADATBÁZIS MEGVÁLASZTÁSÁNAK HATÁSA A HIBAKORREKCIÓ PONTOSSÁGÁRA

Simon Csilla ^(1,2) , Torma Csaba Zsolt ⁽¹⁾ , Kis Anna ⁽¹⁾ 

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.

⁽²⁾ HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.,
1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1.

e-mail: csilluss58@student.elte.hu, csaba.zsolt.torma@ttk.elte.hu, kиаqagt@staff.elte.hu

Bevezetés

Napjaink egyik legnagyobb globális problémáját jelenti az éghajlatváltozás, amelynek kapcsán a jövőben várhatóan egyre többször fordulnak elő időjárási és éghajlati szélsőségek (IPCC, 2021), például extrém magas hőmérsékletek és tartós szárazság. A klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás és a felkészülési stratégiák kidolgozása tehát elengedhetetlen, amihez alapvető fontosságú a már bekövetkezett, valamint a jövőben valószínűsíthető változások minél pontosabb ismerete. Korunk egyik legfontosabb tudományterületévé lépett elő az éghajlatkutatás, amelynek – az informatika fejlődésének köszönhetően – alapvető eszközeivé váltak a klímamodellek. Ezek segítségével képesek vagyunk egyre nagyobb részletességgel leírni az éghajlati rendszer folyamatait (Giorgi, 2019), és a múlt, valamint a jelen éghajlatának szimulálása mellett számszerű becslések adhatók a jövőben várható változásokra is. Térbeli felbontás és területi lefedettség alapján, eltérő célok eléréséhez globális és regionális éghajlati modellek használatosak. A globális modellek a teljes Földet lefedik, és durvább (100-200 km) horizontális felbontással rendelkeznek, amellyel képesek szimulálni a nagy méretskálán lejátszódó folyamatokat (például a felszín és az óceán közötti kölcsönhatást), azonban nem teszik lehetővé a kisebb méretskálán zajló változások részletesebb leírását. A regionális modellek egy kisebb területre korlátozódnak, amelyen finomabb (10-50 km-es) horizontális rácsfelbontással rendelkeznek. Segítségükkel olyan folyamatok is szimulálhatók, amelyeket a globális modellek nem képesek leírni, ezáltal hozzáadott értéket képviselnek, kiemelten a komplex domborzattal rendelkező területeken (Bilbao-Barrenetxea et al., 2024).

Fontos figyelembe venni, hogy az éghajlati projekciók többféle bizonytalansággal terheltek (Giorgi et al., 2009), amelynek fő forrásai közé tartozik az éghajlat természetes belső változékonysága, az adott modell dinamikája és az alkalmazott parametrizáció, valamint az emberi tevékenység jövőbeli alakulásának kiszámíthatatlansága, amit különböző kibocsátási scenáriókkal érzékeltetünk. Ezen bizonytalanságok miatt a modellszimulációk hibával terheltek, eltérést mutatnak a mérésekhez képest, így a nyers outputok használatával irreális eredményeket kaphatunk. A klímamodell-szimulációk megfigyelésektől vett eltéréseinek csökkentése hibakorrekciós eljárás alkalmazásával lehetséges (Ngai et al., 2016), amelynek során a szimulált értékeket egy kijelölt kalibrációs időszak méréseihez (a valós éghajlati viszonyokhoz) igazítjuk, ezáltal a szisztematikus hiba eltávolításra kerül az adatsorokból. A sikeres hibakorrekcióhoz tehát jó minőségű, méréseken alapuló referencia adatbázis használatára van szükség (Casanueva et al., 2020), és fontos a megfelelő körültekintéssel kiválasztott kalibrációs időszak is.

Kutatásunkban azt vizsgáljuk, hogy a kalibrációs időszak megválasztása hogyan befolyásolja a hibakorrekció pontosságát, és ez összefüggésbe hozható-e a domborzati viszonyokkal. Ebben a tanulmányban különböző kalibrációs időszakok és referencia

adatbázisok felhasználásával hibakorrigált modellszimulációk validációját mutatjuk be Magyarországi települések térségeire.

Felhasznált adatok és módszertan

Munkánkhoz az EURO-CORDEX program (Jacob et al., 2014) keretében elérhető regionális éghajlati modellek közül választottunk ki néhányat (1. táblázat), amelyek nyers és hibakorrigált szimulációit vizsgáltuk 0,11°-os (kb. 12,5 km) horizontális felbontás mellett. Az EURO-CORDEX által hibakorrigált szimulációk a MESAN reanalízis adatbázis (Häggmark et al., 2000) felhasználásával készültek az eloszlás alapú skálázás módszerével (Yang et al., 2010). A nyers szimulációk hibakorrekcióját mi is elvégeztük, amihez a quantile mapping módszert alkalmaztuk, és referenciaként a HungaroMet által előállított jó minőségű, méréseken alapuló HuClim rácsponti adatbázist (Izsák et al., 2022) használtuk fel¹. Két, eltérő klimatikus jellemzőkkel rendelkező (Simon et al., 2024a) 30-éves kalibrációs időszakot választottunk a hibakorrekcióhoz, ezzel létrehozva két új adatbázist. A modellszimulációkat és a validációhoz is alkalmazott HuClim adatbázist a hibakorrekció elvégzését megelőzően bilineáris átrácsozással közös rácsra képeztük. Jelen tanulmányban elvégeztük az így előállított négy adatbázisba (2. táblázat) tartozó modellszimulációk validációját a historikus adatsorok részét képező 1993–2005 időszakra, amelyre azért esett a választásunk, mert ez jelenti az egyes kalibrációs időszakok közös részét. Ezzel igyekeztünk elkerülni, hogy a kalibrációs és a validációs időszak megegyezzen, ami befolyásolná az eredményt (Simon et al., 2024b). A validációt három hőmérsékleti változóra (napi minimum- és maximum-hőmérséklet, napi középhőmérséklet) és a következő éghajlati indexekre mutatjuk be: trópusi éjszaka (amikor a napi minimum-hőmérséklet nem csökken 20 °C alá), nyári nap (amikor a napi maximum-hőmérséklet 25 °C fölé emelkedik), valamint hóhullámos nap (amikor a napi középhőmérséklet eléri a 25 °C-ot).

1. táblázat: Az elemzéshez felhasznált regionális klímamodellek és az azokat meghajtó globális éghajlati modellek.

Regionális klímamodell	Globális éghajlati modell
CCLM4-8-17	MPI-M-MPI-ESM-LR
HIRHAM5	ICHEC-EC-EARTH
RACMO22E	MOHC-HadGEM2-ES
RCA4	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5
REMO2009	MPI-M-MPI-ESM-LR

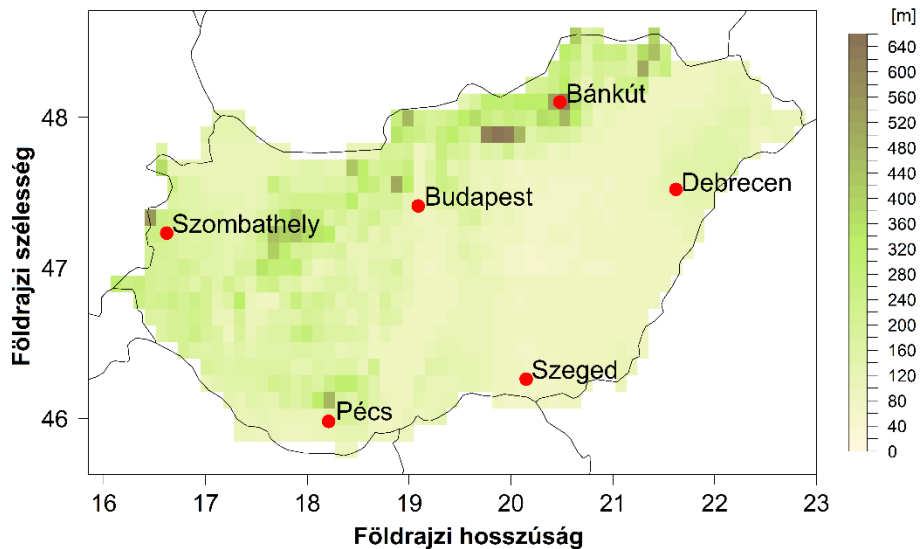
2. táblázat: Az elemzéshez felhasznált adatbázisok áttekintése. *-gal jelöltük az általunk létrehozott hibakorrigált adatbázisokat.

Jelölés	Típus	Hibakorrekciós eljárás	Referencia adatbázis	Kalibrációs időszak
RAW	nyers	-	-	-
BC-MESAN	hibakorrigált	eloszlás alapú skálázás	MESAN	1989–2010
BC-HUCLIM-1*	hibakorrigált	kvantilis leképezés	HuClim	1976–2005
BC-HUCLIM-2*	hibakorrigált	kvantilis leképezés	HuClim	1993–2022

Az országos átlagokra, valamint a térbeli mintázatokra vonatkozó eredményeket Simon et al. (2025) munkája tartalmazza, így ebben a tanulmányban hat, eltérő domborzati jellemzőkkel rendelkező magyarországi település (1. ábra) térségére végezzük el az elemzést.

¹ Letöltés ideje: 2023. július

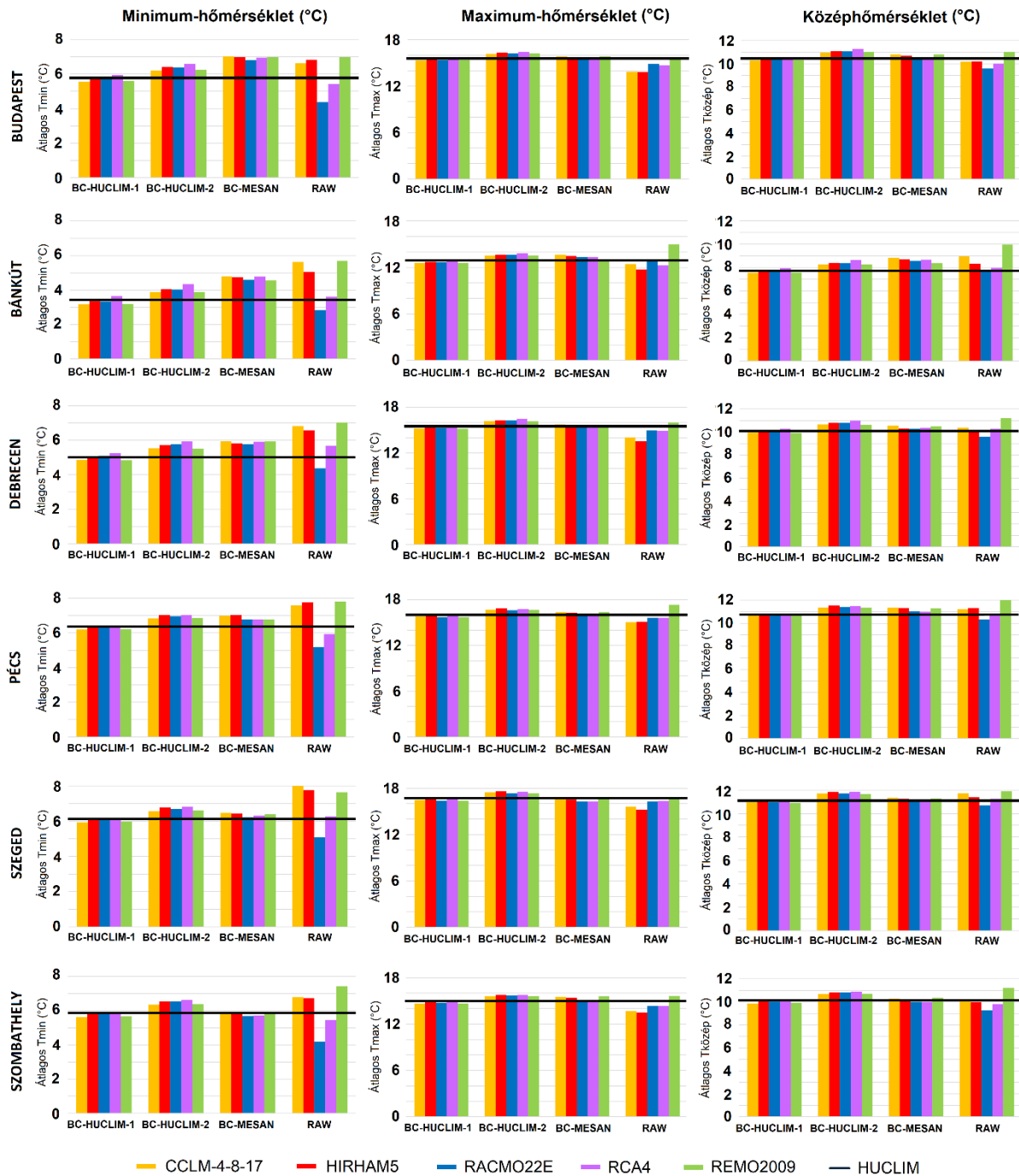
Minden település esetében azok méretének megfelelő számú rácsponti érték átlagával számoltunk. Fontos kiemelni, hogy bár ezeket a térségeket az adott területen fekvő települések alapján nevezzük meg, a városi hatásokat nem vesszük figyelembe a vizsgálat során.



1. ábra: Magyarország domborzata 0,11°-os horizontális rácsebontás mellett a GTOPO adatbázis alapján, valamint az összehasonlításhoz kiválasztott települések elhelyezkedése.

Eredmények

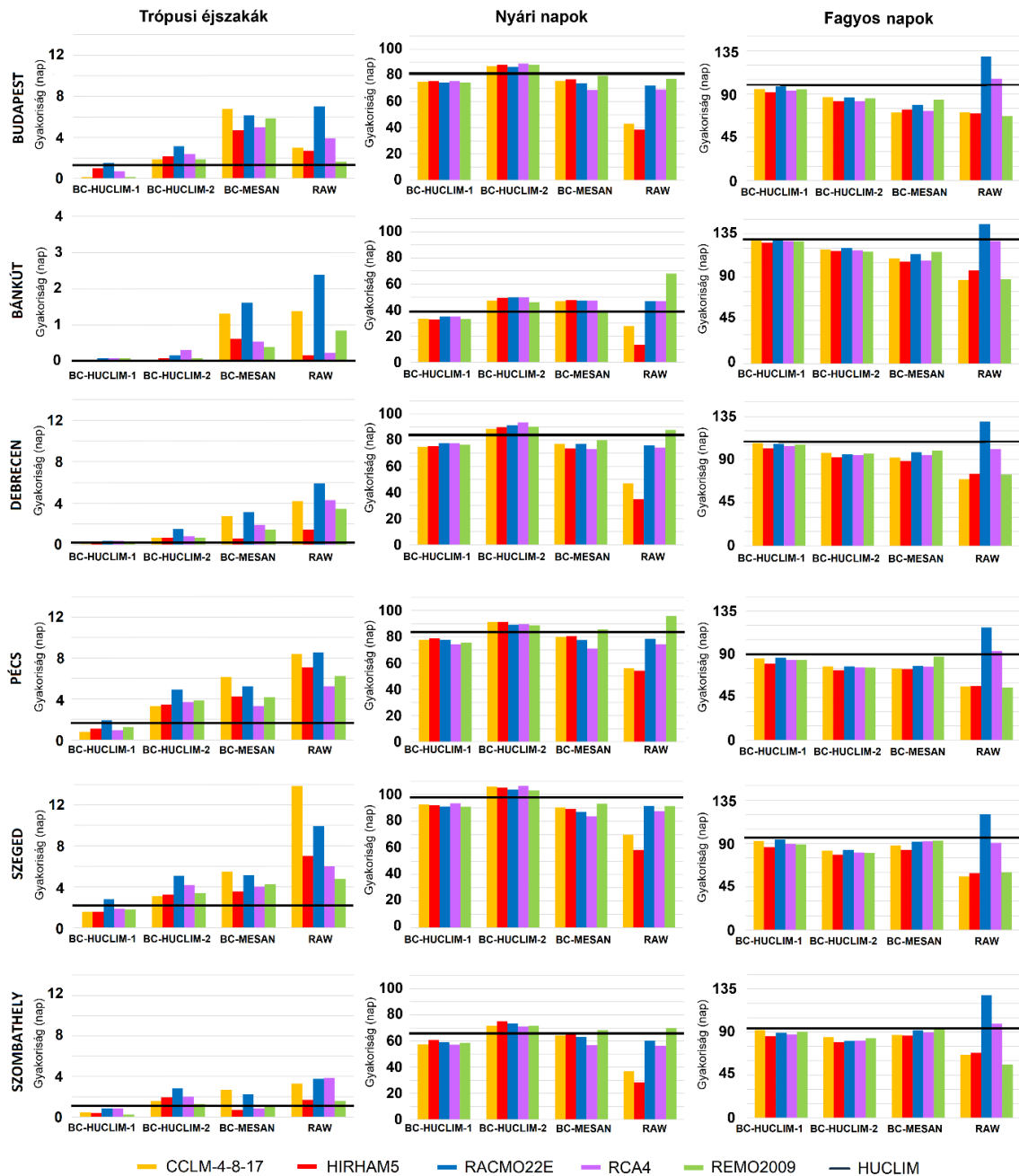
A 2. ábrán látható a hőmérsékleti változók 1993–2005 időszakra vonatkozó átlagos éves értéke az egyes adatbázisokba tartozó modellszimulációk alapján a kiválasztott települések térségében. A diagramokon vízszintes vonallal jelöltük a méréseken alapuló referencia értéket. A legnagyobb bizonytalanság a minimum-hőmérséklet nyers szimulációi között figyelhető meg: a RACMO22E esetén szisztematikus, 1–1,5 °C-os alulbecslés jelenik meg, míg a CCLM4-8-17, a HIRHAM5 és a REMO2009 mindegyik térségben 0,5–2 °C-kal felülbecsülte a méréseket. A MESAN felhasználásával hibakorrigált modellszimulációk az ország nyugati, valamint déli területein fekvő településeken (Szombathely, Pécs, Szeged) jól közelítették a referencia értékeket, míg észak felé haladva 0,8–1,5 °C-kal felülbecsülték azokat. A HuClim adatbázissal hibakorrigált eredmények közül a BC-HUCLIM-2 adatbázisba tartozók szisztematikus felülbecslést mutattak, míg a BC-HUCLIM-1 szimulációi 0,2 °C-os pontossággal közelítették az egyes térségek átlagos minimum-hőmérsékletét. A maximum-hőmérséklet esetén a nyers modellszimulációkra alulbecslés jellemző, kivéve a REMO2009 modellt. A BC-MESAN és a BC-HUCLIM-1 szimulációk teljesítménye összemérhetőnek mutatkozott ezt a változót illetően, a BC-HUCLIM-2 pedig egységesen 0,1–0,2 °C-kal felülbecsülte a méréseket. A középhőmérsékletet vizsgálva a legkisebb hiba az előzőekhez hasonlóan a BC-HUCLIM-1 eredményeinél jelent meg, a BC-HUCLIM-re pedig ebben az esetben is egységes, 0,2–0,3 °C-os felülbecslés körvonalazódott. A BC-MESAN-t tekintve szembetűnő (0,5 °C-ot elérő) felülbecslés a legnagyobb tengerszint feletti magassággal rendelkező Bánkút térségében adódott.



2. ábra: Az átlagos évi minimum- és maximum-hőmérséklet, valamint középhőmérséklet az 1993–2005 időszakban Magyarország nagyobb városainak térségében az egyes adatbázisokba tartozó modellszimulációk alapján. A méréseken alapuló referencia értékeket fekete, vízszintes vonallal jelöltük.

A 3. ábrán jelenítettük meg a vizsgált éghajlati indexek átlagos éves számára vonatkozó eredményeket a kiválasztott magyarországi területekre vonatkozóan. A trópusi éjszakák számát tekintve nagy bizonytalanság mutatkozott meg az egyes modellszimulációk között, főként a nyers eredmények és a BC-MESAN esetében. Budapesten a BC-MESAN (a RACMO22E kivételével) nagyobb felülbecslést eredményezett, mint a hibakorrekció előtti, nyers szimulációk alapján kapott értékek esetén. Ugyanez igaz a legmagasabban fekvő Bánkúton a HIRHAM5 és az RCA4 modelleknél. A BC-HUCLIM-2 modellek szintén több

trópusi éjszakát szimuláltak a mérésekhez képest, ami a legnagyobb mértékben a déli részeken (Pécsen és Szegeden) mutatkozott meg. A legcsekélyebb hibát a BC-HUCLIM-1 adatbázis szimulációi mutatták, a területek közül pedig Debrecen térségében bizonyultak a legpontosabbnak. Érdekes kiemelni a CCLM-4-8-17 modellt, amely a referencia értékkel összhangban nem szimulált trópusi éjszakát Bánkúton. A nyári napok gyakoriságát a BC-HUCLIM-1 alulbecsülte, míg a BC-HUCLIM-2-re szisztematikus felülbecslés volt jellemző. A legkisebb alulbecslés és a legnagyobb felülbecslés egyaránt Bánkút térségére adódott, mely szoros összefüggésre utal a domborzattal. A nagy kezdeti bizonytalanság a hibakorrekció hatására mindegyik adatbázis esetében csökkent a nyers szimulációkhoz képest.



3. ábra: Az elemzésben bemutatott éghajlati indexek átlagos éves gyakorisága az 1993–2005 időszakban Magyarország nagyobb városainak térségében az egyes adatbázisokba tartozó modellszimulációk alapján. A méréseken alapuló referencia értékeket fekete, vízszintes vonallal jelöltük.

A fagyos napok gyakoriságát illetően a nyers szimulációk közül a CCLM4-8-17, a HIRHAM5 és a REMO2009 szisztematikusan alulbecsülte a referencia értékeket, míg az RACMO22E esetén felülbecslés mutatkozott meg. A legkisebb (< 10 napos) eltérés az RCA4 modellre jellemző. A hibakorrigált szimulációk mindegyike kevesebb fagyos napot szimulált a mérésekhez képest, amelyek közül a legkisebb (5 nap alatt maradó) hiba a BC-HUCLIM-1 adatbázisba tartozóknál (leginkább a RACMO22E modellenél) adódott; a legpontosabbnak Bánkút térségében bizonyult.

Összefoglalás

Ebben a tanulmányban azt vizsgáltuk, hogy a kalibrációs időszak és a referencia adatbázis megválasztása hogyan befolyásolja a hibakorrekción pontosságát, és ez összefüggésbe hozható-e a domborzati viszonyokkal. Kutatásunkban az EURO-CORDEX keretében elérhető öt regionális éghajlati modell szimulációinak hibakorrekciónját végeztük el a quantile mapping módszer alkalmazásával, amelyhez a Magyarországra elérhető legjobb minőségű, méréseken alapuló rácsponti HuClim adatbázist használtuk fel. Két, eltérő klimatikus jellemzőkkel rendelkező 30 éves időszakot (1976–2005, 1993–2022) jelöltünk ki a kalibrációhoz, ezzel létrehozva két különböző hibakorrigált modellszimuláció-együttest. Emellett az EURO-CORDEX által hibakorrigált adatsorokat is elemeztük, amelyekhez a MESAN reanalízis adatbázist használták referenciaként egy rövidebb (1989–2010) kalibrációs időszakokkal. Elemzésünkben a hibakorrigált modellszimulációk pontosságát az 1993–2005 időszak validációja által vizsgáltuk meg az átlagos minimum- és maximum-hőmérsékletre, az átlagos középhőmérsékletre, valamint három éghajlati index átlagos éves gyakoriságára vonatkozóan hat, különböző domborzati jellemzőkkel rendelkező magyarországi település térségére.

A legpontosabbnak a korábbi, 1976–2005 időszak alapján hibakorrigált szimulációk bizonyultak a hőmérsékleti változókat és az éghajlati indexeket tekintve egyaránt, de a meleghez köthető indexek esetében gyenge alulbecslés jelent meg. Az 1993–2022 időszak – amely már a gyorsuló felmelegedés időszakába esik – felhasználásával előállított adatokra a változókat tekintve domborzattól függetlenül általános felülbecslés jellemző, amely a minimum-hőmérsékletnél a legnagyobb mértékű (0,3-1 °C). Az éghajlati indexek közül a meleghez kapcsolódókat felülbecsülték, míg a hideghez kötődő alulbecsülték ezek a szimulációk. A MESAN alapján korrigált adatsorok a minimum-hőmérsékletet felülbecsülték az északi részekben (Bánkút, Budapest, Debrecen), ezzel összhangban a fagyos napok számában alulbecslés jelent meg.

Az eredmények jól tükrözik, hogy célszerű a nyers szimulációk hibakorrekciónját az adott térségre elérhető legjobb minőségű referencia adatbázis használatával elvégezni, így a magasabb térszíneken is pontosabb eredményt kapunk. Habár a korábbi kalibrációs időszak (1976–2005) felhasználásával előállított modelledmények pontosabbnak bizonyultak, célszerű a jelenhez minél közelebbi kalibrációs időszakot választani, mivel a klímamodellek a jelenlegi éghajlati viszonyokból kiindulva nagyobb valószínűséggel írják le pontosabban a jövőben várható változásokat. A kutatás következő lépéseként az itt bemutatott modellszimulációk szcenárió időszakokra (2006–2099) vonatkozó elemzését és összehasonlítását végezzük el.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH, támogatta (OTKA FK-142349). Köszönettel tartozunk a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.-nek a szabadon hozzáférhető HuClim adatbázisért (<https://odp.met.hu/climate/>).

Hivatkozások

- Bilbao-Barrenetxea, N., Santolaria-Otín, M., Teichmann, C., Faria, S. H., Mánez-Costa, M.,* 2024: Added value of EURO-CORDEX downscaling over the complex orography region of the Pyrenees. *Climate Dynamics*, 62: 7981–7996. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07318-8>
- Casanueva, A., Herrera, S., Iturbide, M., Lange, S., Jury, M., Dosio, A., ... & Gutierrez, J. M.,* 2020: Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters*, 21: e978. <https://doi.org/10.1002/asl.978>
- Giorgi, F., Jones, C., Asrar, G.,* 2009: Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58: 175–183.
- Giorgi, F.,* 2019: Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 5696–5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Häggmark, L., Ivarsson, K.-I., Gollvik, S., Olofsson, P.-O.,* 2000: Mesan, an operational mesoscale analysis system. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 52(1): 2–20. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v52i1.12250>
- IPCC,* 2021: 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.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 254 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R., Szentés, O.,* 2022: Creation of a representative climatological database for Hungary from 1870 to 2020. *Időjárás*, 126(1): 1–26. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.1.1>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... & Yiou, P.,* 2014: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14: 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Ngai, S. T., Tangang, F., Juneng, L.,* 2016: Bias correction of global and regional simulated daily precipitation and surface mean temperature over Southeast Asia using quantile mapping method. *Global and Planetary Change*, 149: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.009>
- Simon, Cs., Torma, Cs. Zs., Kis, A.,* 2024a: Az 1976–2005 és az 1993–2022 időszakok éghajlati jellemzőinek összehasonlítása Magyarországon. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 36: 58–64. <https://doi.org/10.31852/EMF.36.2024.058.064>
- Simon, Cs., Torma, Cs. Zs., Kis, A.,* 2024b: Az éghajlat modellezése nyers és hibakorrigált szimulációk felhasználásával. XXVII. Tavasz Szél Konferencia Tanulmánykötet (Szerk.: Molnár, D., Molnár, D., Dr. Nagy, A. Sz.) I. kötet, 277–291. Doktoranduszok Országos Szövetsége, Budapest, 2024.

Simon, Cs, Torma, Cs. Zs., Kis, A., 2025: On the choice of reference database and calibration period of bias-corrected simulations: a case study for Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin*, 74(1): 3–21. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.74.1.1>

Yang, W., Andréasson, J., Graham, L. P., Olsson, J., Rosberg, J., Wetterhall, F., 2010: Distribution based scaling to improve usability of RCM regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. *Hydrology Research*, 41(3-4): 211–229. <https://doi.org/10.2166/nh.2010.004>

ORCID

Simon Cs.  <https://orcid.org/0000-0001-7406-0784>

Torma Cs. Zs.  <https://orcid.org/0000-0002-4240-0788>

Kis A.  <https://orcid.org/0000-0002-3227-1230>