



# Hőhullámok detektálása és a hőhullám-karakterisztikák jövőben várható változásai hibakorrigált regionális klímamodell-szimulációk felhasználásával, Magyarországon

**Simon Csilla, Torma Csaba Zsolt, Kis Anna, Lakatos Mónika**

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt, simon.cs@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.4.2

Az éghajlatváltozás egyértelmű jele régióinkban bizonyos időjárási és éghajlati szélsőségek gyakoribb bekövetkezése. Ide tartoznak a nyári hőhullámok is, amelyek a jövőben még intenzívebbé és hosszabbá válhatnak térségünkben. Kutatásunk során elvégeztük a hőhullámos periódusok detektálását és azok különböző karakterisztikáinak jellemzését két nagyobb város (Budapest, Szeged) állomási adatai alapján. Emellett a CORDEX program keretében elérhető regionális éghajlati modellek adatait alapul véve megvizsgáltuk a hőhullámos napok átlagos éves számában és az átlagos hőhullám-karakterisztikákban várható változást is a 21. század végéig Magyarországon (referencia időszak: 1976–2005). A hőhullám-definíciók közül egy összetettebb feltételrendszert alkalmazó módszert vettünk alapul, aminek kritériumait a hazai éghajlati viszonyokhoz optimalizáltuk. Eredményeink szerint a hőhullámok átlagos időtartama 3–9 nappal hosszabbá válhat a 21. század végére.

## Heatwave detection and future changes in heatwave characteristics based on bias-corrected regional climate model simulations in Hungary

A clear sign of climate change in our region is the increasing frequency of weather and climate extremes, such as summer heatwaves, which may become longer and more intense in the future. In this paper the detection of heatwave periods and the analysis of different characteristics are carried out for two major cities of Hungary (Budapest, Szeged) based on station data series. In addition, based on data from the regional climate models available in the CORDEX programme, expected changes in the annual number of heatwave days over Hungary and mean characteristics of heatwaves are investigated until the end of the 21st century (reference period: 1976–2005). In our study, a more complex set of criteria, optimised for the climatic conditions of Hungary, is used to define heatwaves. According to our results, the average duration of heatwave periods could become 3–9 days longer by the end of the 21st century.

A klímaváltozás és a globális felmelegedés hatásai a Kárpát-medencét is érintik, amely többek között a különböző időjárási és éghajlati szélsőségek gyakoriságának növekedésében mutatkozik meg. Ilyen jelenség a komoly egészségügyi kockázatot jelentő nyári hőhullámok egyre intenzívebbé, hosszabbá válása is (Molina et al., 2020), amely időszakok a gazdaság szektorait komoly kihívás elé állítják, és az ökoszisztémákra is veszélyesek. A hőhullámos periódusok meghatározására többféle definíció létezik, amelyek közül a legtöbb egy-egy relatív (percentilis-alapú) vagy abszolút hőmérsékleti küszöbhez köthető, és ehhez általában időtartamra vonatkozó kritérium is társul. Az alkalmazott kritériumok régióként eltérhetnek az adott térség földrajzi helyzetének, éghajlati jellemzőinek, valamint szociális és demográfiai tulajdonságainak figyelembevételével. Kutatásunkban egy Magyarországra optimalizált definíciót alapul véve elvégezzük a hőhullámok detektálását két magyarországi város állomási adatai alapján, emellett azt vizsgáljuk, hogy a jövőben milyen változás várható a hőhullámok különböző karakterisztikáit tekintve.

### Felhasznált adatok és módszerek

A hőhullámok detektálásához homogenizált napi középhőmérsékleti állomási adatsorokat használtunk fel Budapestre és Szegedre vonatkozóan az 1901–2024 időszakra, emellett a szabadon hozzáférhető HuClim adatbázist vettük alapul, amelyet az 1976–2005 időszakra töltöttünk le (odp.met.hu). A HuClim térben és időben egyaránt reprezentatívnak tekinthető, amelynek előállítása és évenkénti frissítése a HungaroMet Éghajlatkutatási Osztályán történik. A meteorológiai adatok ellenőrzése, homogenizálása a MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenized Database; Szentimrey, 2008) rendszerrel valósul meg, míg a szabályos, 0,1°-os (10 km-es) horizontális felbontású

rácsra történő interpolálást a MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Database; Szentimrey és Bihari, 2007) szoftverrel végzik el. A jövőre vonatkozó elemzéshez az EURO-CORDEX program (Jacob et al., 2014) keretében elérhető modelleredmények közül kiválasztott öt regionális éghajlati modell nyers napi középhőmérsékleti szimulációit használtuk fel (1. táblázat). A szimulációk 0,11°-os (kb. 12,5 km-nek megfelelő) horizontális felbontással rendelkeznek, és a pesszimistának tekintett RCP8.5 kibocsátási szcenárió (van Vuuren et al., 2011) feltételezése mellett készültek. A nyers adatsorokat a nemzetközileg elismert percentilis-alapú kvantilis leképezés módszerével hibakorrigáltuk Mezghani et al. (2017) munkája alapján, amelyhez a HuClim adatbázisból az 1976–2005-ös időszakot jelöltük ki kalibrációs időszakként. A hibakorrekciót az egyes hónapokra külön-külön végeztük el, az egységes, 0,11°-os rácsra történő leképezés bilineáris átrácsolással történt. A Budapestre vonatkozó számításokhoz 4×4, Szegedre vonatkozóan 2×2 rácspont átlagát vettük alapul.

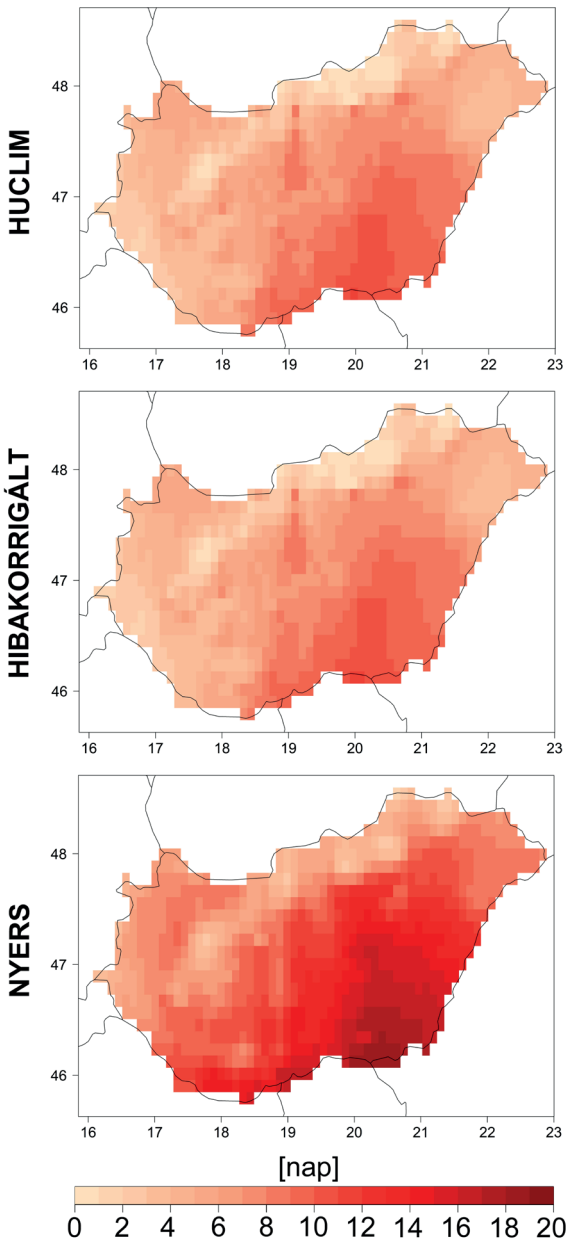
A hőhullám fogalmának meghatározásához és a hőhullámos periódusok detektálásához Ouzeau et al. (2016) cikkét vettük alapul, és az abban megjelenő küszöbértékeket Magyarország éghajlati viszonyaihoz optimalizáltuk. Ehhez a hőhullámos nap definícióját használtuk fel, amiről akkor beszélünk, ha a napi középhőmérséklet eléri vagy meghaladja a 25 °C-ot. Hőhullámnak tekintettük azt az időszakot, amikor legalább 3 egymást követő napon teljesül a hőhullámos napra vonatkozó középhőmérsékleti kritérium. Definíciónk szerint két egymást követő hőhullámos periódus akkor számít különbözőnek, ha a kettő között a napi középhőmérséklet visszaesik 21 °C alá, vagy legalább 3 napig 25 °C alatt marad – egyéb esetben ezeket egyetlen hőhullámnak tekintettük. A hőhullámokat három karakterisztikájuk alapján vizsgáltuk, ezek az időtartam, az előforduló legmagasabb napi középhőmérsékleti érték, valamint az intenzitás, amit a 25 °C feletti hőösszeggel fejeztünk ki.

### Hőhullámos napok

Első lépésként elvégeztük a nyers és a hibakorrigált regionális éghajlati modellszimulációk validációját az 1976–2005 közötti időszakra, amihez megvizsgáltuk, hogy mennyire közelítik pontosan a hőhullámos napok átlagos éves előfordulását a modellek. Az 1. ábrán látható, hogy a HuClim adatok alapján évente átlagosan 1–13 közötti hőhullámos nap fordult elő országszerte, a legkevesebb a hegyvidéki

Regionális klímamodell	Meghajtó 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

1. táblázat. A kutatáshoz felhasznált regionális klímamodell és az azokat meghajtó globális éghajlati modellek.



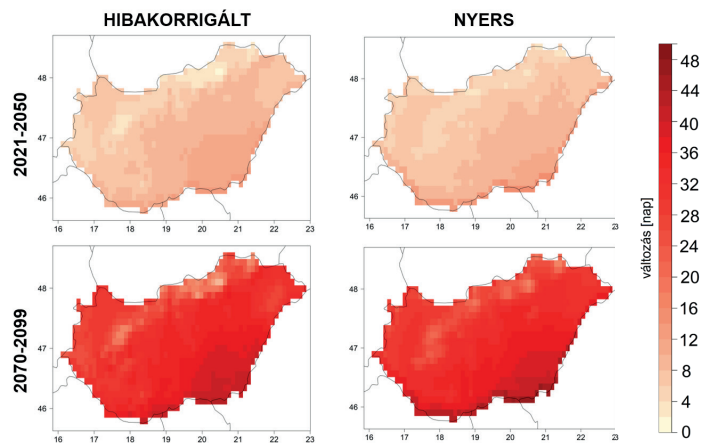
1. ábra. A hóhullámos napok átlagos éves száma Magyarországon az 1976–2005 közötti időszakban a HuClim adatbázis (fent), valamint a hibakorrigált (középen) és a nyers (lent) szimuláció-együttes átlagai alapján.

területeken, a legtöbb pedig a DK-i régióban. A nyers modellszimuláció-együttes az Alföldön és a Kisalföldön ezeket az értékeket 5–9 nappal felülbecsülte, míg a HuClim adatbázis felhasználásával hibakorrigált szimulációk  $\pm 1$  napos pontossággal közelítették a méréseken alapuló eredményeket.

Ezt követően megvizsgáltuk, hogy a regionális klímamodellek milyen mértékű változást valószínűsítene a hóhullámos napok átlagos éves számában Magyarországon a 21. század végéig. Ennek vizsgálatához két időszakot jelöltünk ki: a 2021–2050 és a 2070–2099 közötti 30 éves periódusokat. A 2. ábra összegzi a kiválasztott jövőbeli időszakokban várható változást a referenciának kijelölt 1976–2005 időszakhoz viszonyítva a nyers és a hibakorrigált szimulációk multi-modell átlagai alapján. A hibakorrigált eredmények szerint a hegyvidékeken 1–4 nappal, az alföldi területeken 6–14 nappal növekedhet a hóhullámos napok éves gyakorisága a 21. század közepére. A 2070–2099 közötti időszakban is hasonló a változás mértékének területi eloszlása, és a referencia időszakhoz képest megháromszorozódhat azoknak a napoknak a száma, amikor a napi középhőmérséklet eléri vagy meghaladja a 25 °C-ot – vagyis a hegyvidékeken átlagosan 10–14 nappal, síkvidékeken 30–42 nappal több hóhullámos nap következhet be évente. A nyers projekciók a nagyobb tengerszint feletti magasságokon átlagosan 1–3-mal több hóhullámos napot szimulálnak évente a hibakorrigált eredményekhez viszonyítva.

### Átlagos hóhullám-karakterisztikák

A 2. táblázatban összefoglaltuk, hogy az 1976–2005 időszakban a hóhullámok vizsgált karakterisztikái milyen átlagos értékekkel rendelkeztek az egyes regionális klímamodellek szimulációi, valamint a méréseken alapuló HuClim adatok alapján. Mivel a hibakorrigált szimulációk pontosabban közelítették a hóhullámos



2. ábra. A hóhullámos napok átlagos éves számában valószínűsített változás a hibakorrigált (bal oldal) és a nyers (jobb oldal) regionális klímamodellek szimuláció-együttese alapján a 2021–2050 és a 2070–2099 közötti időszakokban Magyarországon (referencia időszak: 1976–2005).

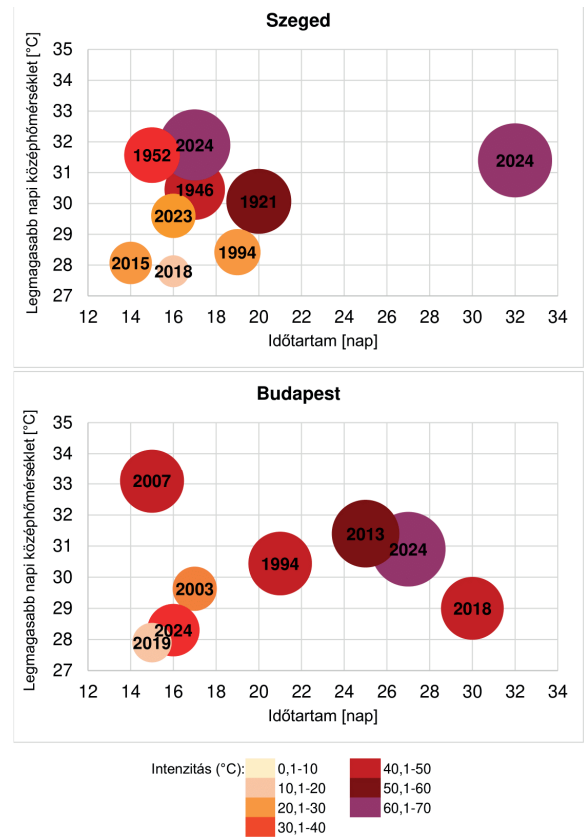
	ÁTLAGOS		
	időtartam [nap]	intenzitás [°C]	legmagasabb napi középhőmérséklet [°C]
<b>SZEGED</b>			
CCLM4-8-17	5,37	7,72	27,41
HIRHAM5	6,02	8,63	27,26
RACMO22E	7,28	10,66	27,33
RCA4	6,64	9,18	27,46
REMO2009	5,46	7,60	27,33
MULTI-MODELL ÁTLAG	6,15	8,76	27,36
HUCLIM	5,28	7,36	27,43
<b>BUDAPEST</b>			
CCLM4-8-17	4,77	6,44	27,08
HIRHAM5	5,76	6,64	26,93
RACMO22E	7,29	9,56	27,02
RCA4	6,07	7,11	26,93
REMO2009	6,23	7,85	27,00
MULTI-MODELL ÁTLAG	6,02	7,52	26,99
HUCLIM	5,11	6,12	26,98

2. táblázat. Az átlagos hőhullám-karakteristikák az 1976–2005 időszakban Budapesten és Szegeden a hibakorrigált regionális klímamodel-szimulációk, valamint a HuClim adatok szerint.

napok számát (2. ábra), ezért a hőhullám-karakteristikákra vonatkozóan most csak ezeket az eredményeket mutatjuk be. Az átlagos időtartamot és az intenzitást a CCLM4-8-17 (valamint Szeged térségében a REMO2009) közelítette legpontosabban, a legnagyobb felülbecslés pedig a RACMO22E esetében adódott Szeged és Budapest térségében egyaránt. A multi-modell átlag az időtartamot 1 nappal, az intenzitást pedig 1,4 °C-kal felülbecsülte, a hőhullámok alatt előforduló átlagos legmagasabb napi középhőmérsékletet viszont 0,1 °C-os pontossággal közelítette. Szegeden a referencia időszakban átlagosan 1 °C-kal magasabb intenzitás jellemezte a hőhullámokat, mint Budapesten, az átlagos időtartamuk azonban hasonlóan adódott (5 nap).

### Detektált hőhullámok

Korábbi munkánkban már foglalkoztunk a hőhullámos időszakok detektálásával (Simon, 2021), valamint Bokros és Lakatos (2022) is végzett magas hőmérsékletekhez kapcsolódó szélsőségekre és különböző hőségindexekre irányuló elemzést Budapestre vonatkozóan. Ebben a tanulmányban az 1901–2024 közötti időszakra jelenítettük meg a 14 napnál hosszabb hőhullámos periódusokat Budapest belterület és Szeged külterület állomásokra buborékdiagramok formájában (3. ábra). A



3. ábra. A 14 napnál hosszabb hőhullámok Budapesten és Szegeden 1901–2024 között állomási adatok alapján.

vízszintes tengelyen látható a hőhullám időtartama napokban kifejezve, a függőleges tengelyen az adott hőhullám alatt előforduló legmagasabb napi középhőmérsékleti érték jelenik meg, a buborékok mérete pedig arányos a hőhullám intenzitásával, amelynek nagyságát színskála segítségével is érzékeltettük. Az ábráról leolvashatjuk, hogy Szegeden a leghosszabb hőhullámok 14–20 napig tartottak, míg Budapesten több, ennél hosszabb hőségperiódus is bekövetkezett, amelyek közül a 2018-as 30 napig állt fenn. A legjelentősebb budapesti hőhullámok

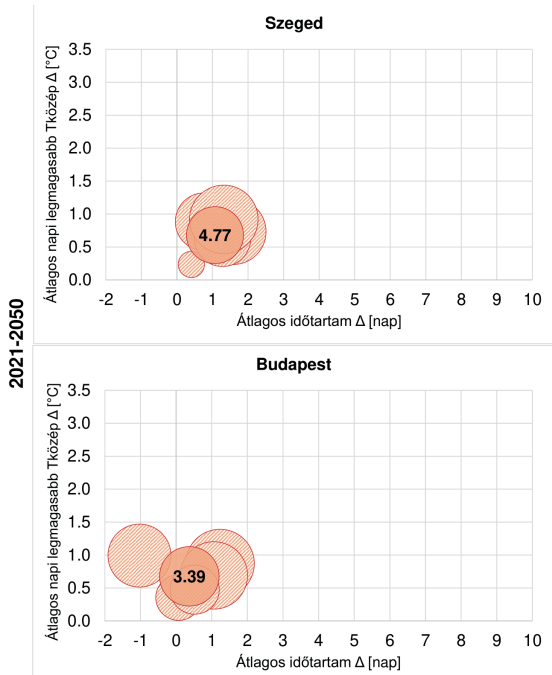
egy kivételével (1994) a 2000-es években alakultak ki, Szegeden viszont már a 20. századból is detektáltunk hosszan tartó hőségi periódusokat, amelyek közül az 1921-es volt a legintenzívebb és a leghosszabb, egészen 2024-ig. A 2024-es, rekordmeleg nyáron több hóhullám is kialakult, amelyek közül kettő is tovább tartott két hétnél, ezáltal mindkét állomáson felkerült az ábrára. Szegeden az augusztus 8. és szeptember 8. között bekövetkezett hőségi periódus időtartamát és intenzitását tekintve is rekordot döntött: 32 napig tartott, és 68,5 °C-os intenzitás értékkel rendelkezett. Budapesten a július 6-tól augusztus 1-ig tartó hóhullám – habár csak a második leghosszabbnak bizonyult 27 napos időtartamával, – szintén rekordot jelentett a 25 °C feletti hőmérséklet-összeget tekintve, ami 68,0 °C-nak adódott (ezzel megelőzve a 2013-asat, aminek intenzitás-értéke 55,8 °C volt).

### A hóhullám-karakterisztikák várható változásai

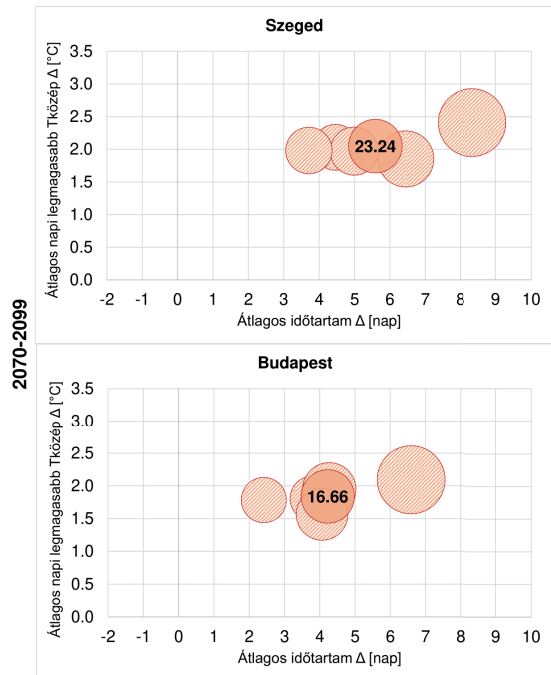
Utolsó lépésként elemeztük, hogy az egyes hóhullámokat jellemző karakterisztikák milyen mértékű változása várható a 21. század folyamán a modellmúlthoz

viszonyítva. A változásokat szintén buborékdiagram formájában jelenítettük meg, ahol a vízszintes tengelyen látható az adott jövőbeli időszakban szimulált átlagos időtartam változása napokban kifejezve, a függőleges tengelyen az átlagos legmagasabb napi középhőmérsékletben valószínűsített változás jelenik meg, a buborékok mérete pedig az átlagos intenzitás értékében várt változást fejezi ki. A 2021–2050 időszakra a regionális klíma-modellek átlagosan 1–2 nappal hosszabb hóhullámokat szimulálnak 2–7 °C-os intenzitás-növekedés mellett (4. ábra). Utóbbi paraméterre vonatkozóan a legnyilvánvalóbb mértékű emelkedést a RACMO22E, a CCLM4-8-17, valamint a REMO2009 modellek szimulálják.

A 21. század végére átlagosan 3–8 nappal hosszabb hőségi periódusokra kell készülnünk a klíma-modellek eredményei alapján, amelyek intenzitása a múlta szimulált átlagos értéknek akár a négyszerese is lehet: Budapesten átlagosan 17 °C-kal, Szegeden pedig 23 °C-kal növekedhet a 25 °C feletti hőmérséklet-összeg (5. ábra). Az átlagos előforduló legmagasabb napi középhőmérséklet változását tekintve mindkét jövőbeli időszakban kicsi a szórás az egyes szimulációk között (0,18–0,25 °C), a modellek



4. ábra. Az átlagos hóhullám-karakterisztikák értékében valószínűsített változás ( $\Delta$ ) a 2021–2050 időszakban az egyes regionális klíma-modellek hibakorrigált szimulációi szerint (referencia időszak: 1976–2005). A multi-modell átlagot jelölő buborék sötétebb színnel jelenik meg, a hozzá tartozó számérték az átlagos intenzitás változására vonatkozik.



5. ábra. Az átlagos hóhullám-karakterisztikák értékében valószínűsített változás ( $\Delta$ ) a 2070–2099 időszakban az egyes regionális klíma-modellek hibakorrigált szimulációi szerint (referencia időszak: 1976–2005). A multi-modell átlagot jelölő buborék sötétebb színnel jelenik meg, a hozzá tartozó számérték az átlagos intenzitás változására vonatkozik.

egyértelműen tehát abban, hogy a 21. század közepére nagyjából 0,5 °C-kal, a 21. század végére átlagosan körülbelül 2 °C-kal emelkedhet a napi középhőmérséklet a hőhullámok legmelegebb napjain.

### Összefoglalás

A nyári hőhullámos periódusok leírására nem létezik kizárólagos definíció, a kritériumok országonként, régióként eltérhetnek az adott térség klimatikus viszonyaitól, földrajzi helyzetétől függően. Tanulmányunkban hőhullámnak tekintettük azt az időszakot, amikor legalább három egymást követő napon keresztül a középhőmérséklet eléri vagy meghaladja a 25 °C-ot (ez megegyezik a tisztifőorvosi másodfokú hőségriasztáshoz alkalmazott definícióval). *Ouzeau et al.* (2016) munkáját alapul véve a hőhullámok három karakterisztikáját vizsgáltuk: az időtartamát, az intenzitását – a 25 °C feletti középhőmérséklet-összeget –, valamint a hőhullám során előforduló legmagasabb napi középhőmérsékletet. Ezek alapján elvégeztük a hőhullámos periódusok detektálását Budapest belterület és Szeged külterület állomási napi adatsorai alapján. Regionális éghajlati modellek nyers és hibakorrigált szimulációit felhasználva elemeztük a hőhullámos napok átlagos éves gyakoriságában, valamint a hőhullámokat jellemző karakterisztikák 30 éves átlagos értékeiben valószínűsített változásokat két jövőbeli időszakra (2021–2050, 2070–2099). Az eredmények szerint Magyarországon 20–40 nappal több hőhullámos nap következhet be évente a 21. század végén, ennél valamivel kisebb mértékű növekedés csak a hegyvidéki területeken valószínű. A hőhullámos periódusok átlagosan 3–9 nappal hosszabbodhatnak meg az 1976–2005 közötti időszakban tapasztaltakhoz képest, az intenzitásuk pedig akár a három-négyszeresére is emelkedhet. A jövőben tehát fel kell készülnünk az idejéhez hasonló, vagy annál jelentősebb hőhullámok bekövetkezésének gyakoribbá válására, amelyek komoly egészségügyi kockázatot jelentenek, fontos tehát az ezekre való felkészülés és alkalmazkodási stratégiák kidolgozása.

### Irodalomjegyzék

*Bokros, K., Lakatos, M., 2022: Hőségperiódusok vizsgálata Budapesten a XX. század elejétől napjainkig. Légkör, 67(4), 208–218. <https://doi.org/10.56474/legkor.2022.4.4>*

*Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones,*

*C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana J-F, Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., 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>*

*Mezghani, A., Dobler, A., Haugen, J.E., Benestad, R.E., Parding, K. M., Piniewski, M., Kardel, I., Kundzewicz, Z.W., 2017: CHASE-PL Climate Projection dataset over Poland - bias adjustment of EURO-CORDEX simulations. *Earth System Science Data, 9(2)*, 905–925. <https://doi.org/10.5194/essd-9-905-2017>*

*Molina, M.O., Sánchez, E., Gutiérrez, C., 2020: Future heat waves over the Mediterranean from an Euro-CORDEX regional climate model ensemble. *Scientific Reports, 10*, 8801. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65663-0>*

*Ouzeau, G., Soubeyroux, J-M., Schneider, M., Vautard, R., Planton, S., 2016: Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services, 4*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>*

*Simon, Cs., 2021: Hőhullám kategóriák és trendek Magyarországon. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Budapest (témavezető: Lakatos Mónika, Kis Anna), [https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2021\\_2/Simon\\_Csilla\\_2021.pdf](https://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2021_2/Simon_Csilla_2021.pdf)*

*Szentimrey, T., Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). In: Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 17–27.*

*Szentimrey, T., 2008: Development of MASH homogenization procedure for daily data, Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, 2006; WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO. 1493, 123–130.*

*van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F, Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change, 109(5)*, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>*