

NYILATKOZAT

Név: Simon Csilla

ELTE Természettudományi Kar, szak: Meteorológus MSc

NEPTUN azonosító: HG0LES

Diplomamunka címe: *Hővezetés kategóriák és trendek Magyarországon*

A **diplomamunka** szerzőjeként fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy a dolgozatom önálló szellemi alkotásom, abban a hivatkozások és idézések standard szabályait következetesen alkalmaztam, mások által írt részeket a megfelelő idézés nélkül nem használtam fel.

Budapest, 2021.05.11.

Simon Csilla

a hallgató aláírása

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Hőhullám kategóriák és trendek Magyarországon

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Simon Csilla

Meteorológus mesterszak,
Időjárás-előrejelző specializáció

Témavezető:

Dr. Lakatos Mónika

Országos Meteorológiai Szolgálat, Éghajlati Osztály

Belső konzulens:

Dr. Kis Anna

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2021

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. A hóhullám meghatározása, jellemzésére használt indexek.....	5
3. Európai hóhullám-tendenciák a múltban	10
4. Esettanulmányok	13
4.1. A 2003. nyári hóhullám.....	13
4.2. A 2017. júniusi hóhullám	15
4.3. A 2019-es hóhullámok	17
5. Várható hóhullám-tendenciák Európában	19
6. A Magyarországon előforduló hóhullámos periódusok vizsgálata	24
6.1. Adatok és módszertan	24
6.1.1. A vizsgált állomások rövid éghajlati jellemzése.....	26
7. Eredmények	29
7.1. Hóhullámos napok.....	29
7.2. Figyelmeztetési fokozatok gyakorisága	32
7.3. Hóhullámok az 1901–2019 időszakban	34
7.4. Az 1971–2000 időszak validációja.....	37
7.5. Hóhullámos napok és hóhullámok a jövőben.....	40
8. Összefoglalás	45
Köszönetnyilvánítás.....	47
Irodalomjegyzék	48

1. Bevezetés

Az utóbbi években világszerte és hazánkban egyaránt gyakran hallunk különböző extrém időjárási jelenségekről, hőmérsékleti értékekhez köthető szélsőségekről. Ide tartoznak többek között a nyári hőhullámok is, amelyek az éghajlatváltozás hatására egyre gyakoribbá, hosszabbá és intenzívebbé válhatnak a közeljövőben (*Ouzeau et al.*, 2016, IPCC, 2019). Ilyenkor az átlagosnál magasabb a napi középhőmérséklet, és napi maximum-hőmérsékleti rekordok is megdőlhethetnek. Ezek az időszakok megviselik az emberi szervezetet, emellett hatással vannak az érintett térség ökoszisztémájára, gazdaságára is (*Páldy et al.*, 2004).

Pontos, kizárólagos definíció nem létezik a hőhullámos periódusok leírására, de jellemzésükre többféle mutatót alkottak már (pl. *Robinson*, 2001; *Perkins és Alexander*, 2013). Fontos megjegyezni, hogy egy-egy index megfogalmazása függ attól, hogy az adott kutatást milyen éghajlati régióban végezték – hiszen előfordulhat, hogy ami egy területen alkalmazható, az eltérő klimatikus viszonyok mellett már nem lenne releváns. A hőhullámok hatása több paramétertől függ (például időtartam, intenzitás), melyek alapján kategorizálhatjuk azokat.

Diplomamunkám célja a nyári hőhullámok múltbeli, valamint jövőbeli előfordulásának és tendenciájának vizsgálata a fentebb említett paraméterek alapján. Elsőként elkészítettem az 1901–2019 időszakra vonatkozóan a hőhullámos napok éves gyakoriságának tendenciaelemzését, illetve előre meghatározott kritériumok alapján a hőhullámok detektálását öt nagyobb hazai város (Budapest, Debrecen, Pécs, Szeged, Szombathely) esetében. Következő lépésként megvizsgáltam, hogy a hőhullámok különböző karakterisztikái hogyan változnak a 21. század végéig. Elvégeztem a jövőben várható tendenciák esetén több, rövidebb időszak összehasonlító elemzését (a 20. század vége, valamint a 21. század közepe és vége között). A múltra vonatkozó vizsgálathoz homogenizált napi középhőmérsékleti adatsorokat használtam, a jövőre vonatkozó számításokhoz pedig az EURO-CORDEX¹ program (*Jacob et al.*, 2014) keretében futtatott regionális klímamodell-szimulációkból használtam fel kettőt Budapestre vonatkozóan, az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvek (*Moss et al.*, 2010) mellett.

¹ Coordinated Downscaling Experiment – European domain; Európára vonatkozó Koordinált Regionális Klímamodellezési Kezdeményezés

A dolgozatot szakirodalom-áttekintéssel kezdem, amelyben ismertetem a hőhullámok különböző régiókban alkalmazott definícióját, valamint összefoglalom különböző kutatások eredményeit a múltban jellemző és a jövőre valószínűsíthető hőhullám-tendenciákra vonatkozóan. Ezután következik néhány jelentősebb európai hőhullám bemutatása esettanulmányok alapján, majd a saját kutatások és eredmények leírására kerül sor a 6. és a 7. fejezetben. Végül egy rövid összefoglalással zárom a dolgozatot.

2. A hőhullám meghatározása, jellemzésére használt indexek

Régiókban az éghajlatváltozás egyértelmű jele, hogy gyakoribbá válnak a magas hőmérséklethez kapcsolódó szélsőségek (*Lakatos et al.*, 2012). Ezek a jelenségek többféle klímaindexszel számszerűsíthetők, ilyen például a forró nap (amikor a napi maximum-hőmérséklet eléri vagy meghaladja a 35 °C-ot), a trópusi éjszaka (a napi minimum-hőmérséklet nem csökken 20 °C alá), a hőhullámos nap (a napi középhőmérséklet legalább 25 °C) és a tartós hőhullámos nap (a napi középhőmérséklet legalább 3 napon keresztül eléri a 27 °C-ot) [1 – met.hu]. A globális felmelegedés következtében az elmúlt évtizedekben folyamatosan nőtt a hőhullámos napok évi száma (*Seneviratne et al.*, 2014). Arra vonatkozóan, hogy mit nevezünk hőhullámnak, nincs egyetlen, univerzális meghatározás, de általában olyan periódusra gondolunk ez alatt, amikor a hőmérséklet több, egymást követő napon jóval magasabb az átlagosnál, ami megterheli az emberi szervezetet és a vegetációt egyaránt (*Hunt*, 2007). Fizikai szempontból a hőhullámok két alapvető típusát különböztethetjük meg: a száraz és a nedves hőhullámokat. A száraz hőhullámok idején a felhőtlen égbolt következtében nagy a beeső napsugárzás, és a forróság mellé esetenként szél is társul, ami növeli a hő okozta stresszt. Ezek leggyakrabban a kontinentális és a mediterrán éghajlattal rendelkező térségekben fordulnak elő. A nedves hőhullámokat meleg, párás időjárási körülmények jellemzik, a levegő éjszakánként sem tud felfrissülni a nagy felhőborítottságnak köszönhetően. Gyakori előfordulási területe a közepes földrajzi szélességek nedves éghajlata (*McGregor et al.*, 2015). Ebben a fejezetben a hőhullám fogalmának néhány meghatározását, és annak jellemzésére használt indexeket mutatok be.

A WMO² meghatározása szerint a hőhullám az a periódus, amíg a napi maximum-hőmérséklet több, mint 5 °C-kal meghaladja az adott napra jellemző, 1961–1990 időszakból számított átlagos értéket, legalább 5 egymást követő napon keresztül (*Pongrácz et al.*, 2013). A STARDEX³ hőhullám időtartam indexe is ezen alapszik, melynek segítségével megbecsülhető az évente előforduló hőhullámos napok száma egy-egy rácspontban, valamint lehetővé teszi a hőmérsékleti szélsőségek térbeli eloszlásának vizsgálatát – ez a meghatározás inkább az utóbbi kiemelésére alkalmas (*Ouzeau et al.*, 2016).

² World Meteorological Organisation; Meteorológiai Világszervezet

³ Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions; A szélsőségek statisztikai és regionális dinamikus leskalázása az európai régiókra

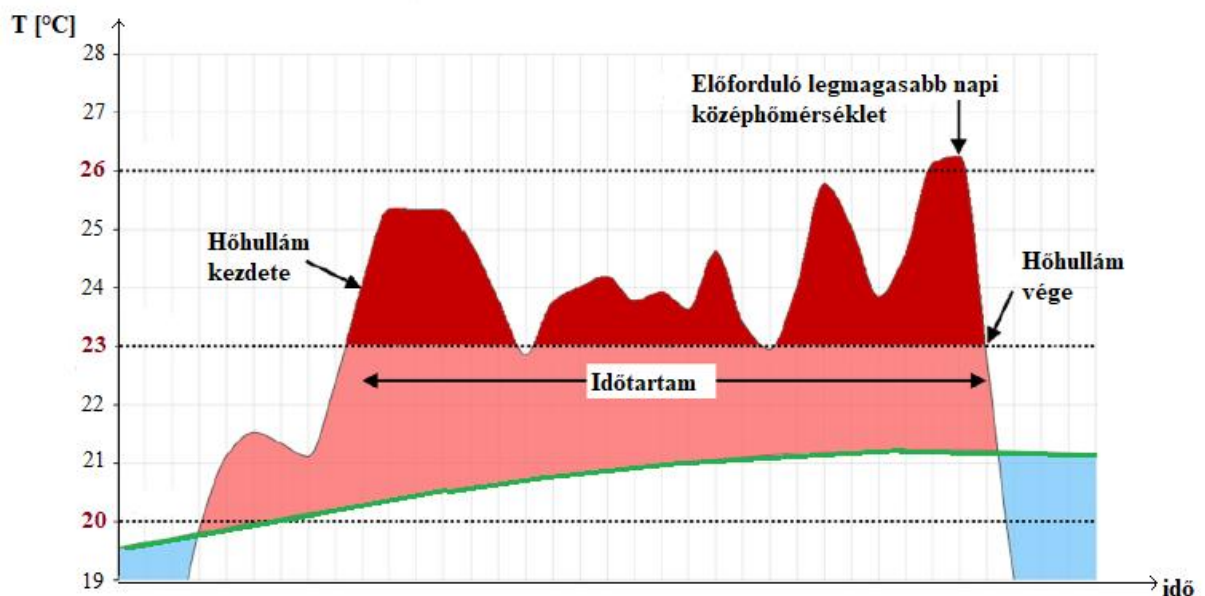
A hőhullám definiálásához szükséges kritériumok országonként, régióként vagy akár városonként is eltérhetnek. Máltán 40 °C vagy afölötti maximum-hőmérséklet esetén; Törökországban legalább 27 °C-os maximum-hőmérséklet és 40%-nál magasabb relatív páratartalom esetén beszélnek hőhullámról, míg Szerbiában a minimum- és a maximum-hőmérsékletre is szabnak meg küszöbértéket (*García-Herrera et al., 2005*). Belgiumban a szövetségi egészségügyi közszolgálat úgy fogalmazta meg a hőhullám definícióját, hogy a nyári félévben (áprilistól szeptemberig) legalább három egymást követő napon a minimum-hőmérséklet meghaladja a 18,2 °C-ot, a maximum-hőmérséklet pedig 29,6 °C fölé emelkedik (*Hooyberghs et al., 2019*). Madridban *Díaz et al. (2002)* halálozási ráták vizsgálata alapján bármely olyan napot hőhullámosnak nevez, amikor a hőmérséklet eléri a 36,5 °C-ot. A Holland Királyi Meteorológiai Intézet abban az esetben definiál hőségperiódusnak egy időszakot, ha a maximum-hőmérséklet eléri a 25 °C-ot legalább 5 napon keresztül, vagy a 30 °C-ot legalább 3 egymást követő napon (*Huynen et al., 2001*). Utóbbi meghatározást alkalmazzák például Lengyelországban (*Krzyżewska et al., 2016*), Csehországban és Németországban is (*Tomczyk és Bednorz, 2019*). Az Egyesült Királyságban régiókra bontva szabták meg a hőhullámos nap teljesüléséhez szükséges minimum- és maximum-hőmérsékleti értékeket (például a londoni régióban ez 18 °C, illetve 32 °C). Olaszországban a nagyobb városok esetén eltérő a hőhullámos naphoz meghatározott küszöbérték, és ez különbözik az egyes (nyári) hónapokra vonatkozóan (*Hooyberghs et al., 2019*).

Az emberi szervezetre gyakorolt hatását előtérbe helyezve, az Amerikai Egyesült Államokban *Robinson (2001)* a hőhullámot a következőképpen definiálta: legalább 48 órán át tartó időszak, amelynek során az éjjeli legalacsonyabb és a nappali legmagasabb hőindex érték az NWS⁴ által meghatározott hőstressz küszöbérték (26,7 °C, illetve 40,6 °C) felett marad. Ezt a hőindexet a környezet hőmérsékletének és a páratartalomnak a figyelembevételével határozzák meg, amelynek segítségével becsülhető a hőérzet. Ez alapján alakították ki a figyelmeztető rendszert is.

Ouzeau et al. (2016) kidolgozott egy új módszert a hőhullámok detektálására, amelyben összetettebb feltételrendszert alkalmaz, és a hőhullámok három fő karakterisztikáját veszi figyelembe: az időtartamát, az időszakban előforduló legmagasabb napi középhőmérsékletet és az intenzitást. A hőhullám teljes intenzitását a 23 °C feletti hőmérséklet összegnek a 26 °C-os és a 23 °C-os érték különbségével vett hányadosaként

⁴ National Weather Service; Nemzeti Időjárési Szolgálat

kapták meg. A hőhullámok azonosításának folyamata (1. ábra) ezek alapján a következő: abban az esetben detektáltak hőhullámot, ha a napi középhőmérséklet eléri a 26 °C-ot. A jelenség akkor veszi kezdetét, és addig tart, amíg a középhőmérséklet eléri a 23 °C-os értéket. Két hőhullámos időszakot akkor tekintettek különbözőnek, ha a kettő között a középhőmérséklet 23 °C alatt maradt legalább három napon keresztül, vagy egy napig visszaesett 20 °C alá. Miután megállapították, hogy hőhullámról van szó, a jelenség jellemezhetővé vált a fent említett karakterisztikák alapján. Kiegészítésképp az időtartamra vonatkozóan is megszabtak egy feltételt: csak abban az esetben számoltak hőhullámmal, amennyiben az legalább 5 napig tartott. Az így kapott eredményeket háromdimenziós formában, buborékdiagramon ábrázolták, melynek x-tengelyén szerepel a hőhullám időtartama napokban kifejezve, az y-tengelyről az előfordult legmagasabb napi középhőmérséklet olvasható le, a buborék nagysága pedig a hőhullám intenzitásával arányos.



1. ábra: A hőhullámos időszak meghatározása. A bemutatott példán az 1983. június 30. – augusztus 5. (x-tengely) közötti időszak, és a júliusi hőségperiódus látható. Az y-tengelyen a napi középhőmérséklet van feltüntetve, amelyről leolvasható a hőhullám kezdete és vége, valamint az előforduló legmagasabb napi középhőmérsékleti érték. A globális intenzitást a bordóval jelölt terület nagysága fejezi ki. A zöld vonal az 1981–2010 közötti referencia időszak alapján számított klimatológiai átlagot jelöli (Forrás: Ouzeau et al., 2016).

A hőhullámok detektálásához általában az a feltétel tehát, hogy a hőmérséklet több, egymást követő napon magasabb legyen egy megadott küszöbértéknél, amit a vizsgált térség

földrajzi helyzetének és éghajlati jellemzőinek figyelembevételével jelölnek ki. Ezekkel a definíciókkal kapcsolatban felmerül az a probléma, hogy eltérő adottságokkal rendelkező területeket nem tudunk összehasonlítani (*Ouzeau et al.*, 2016).

Léteznek objektívebb definíciók is a hőhullám meghatározására, amihez különböző statisztikai mutatókat vesznek figyelembe. Például *Russo et al.* (2015) szerint a hőhullám olyan, legalább 3 egymást követő nap, amikor a maximum-hőmérséklet a referencia időszak (1981–2010) átlagos napi maximum-hőmérsékletének 90. percentilis értéke fölé emelkedik. Kidolgoztak egy, a hőhullámok leírására alkalmas indexet is, a HWMId⁵-t, ami a hőhullámok maximális erőssége egy év alatt. Ez a mutató nem az egyes hőségperiódusokat, hanem a teljes nyári évszakot jellemzi. Felhasználásával elvégezték az 1950–2014 közötti időintervallum nyarainak rangsorolását is.

Ehhez hasonló *Perkins-Kirkpatrick és Lewis* (2020) munkája, amiben a hőhullámok megfigyelt globális és regionális trendjeit különböző mutatók segítségével vizsgálták. Az egyik a kumulált hőösszeg, ami tulajdonképpen egy metrika: a hőhullámos nap maximum-hőmérsékletének és az adott napra vonatkozó átlagos maximum-hőmérséklet 90. percentilisének különbsége, összegezve az évszakban előforduló minden hőhullámos napra. Referenciának az 1961–1990 közötti időszakot tekintették. Ezt az anomáliaszámítást csak a hőhullámos időszakra koncentrálnak végezték el (az északi hemiszférán májustól szeptemberig). A tanulmányban hőhullám akkor következett be, ha legalább három egymást követő napon keresztül a napi maximum-hőmérséklet az adott napra vonatkozó, előbb említett 90. percentilis érték fölé emelkedett. Meghatározták az évszakban előforduló hőhullámos napok átlagos anomáliáját is, amit úgy kaptak meg, hogy a fentebb definiált kumulált hőösszeg értékét elosztották az évszakban bekövetkezett hőhullámos napok számával.

Ausztráliában olyan, legalább 3 egymást követő napot neveznek hőhullámoknak, amikor a napi maximum-hőmérséklet eléri vagy meghaladja az adott hónapra jellemző éghajlati átlag maximum-hőmérsékleti értékének 90. percentilisét. További feltétel, hogy a hőhullám második és harmadik napján a minimum-hőmérséklet ne csökkenjen az adott hónap átlagos minimum-hőmérsékletének 90. percentilis értéke alá (*Pezza et al.*, 2012).

A Magyarországon alkalmazott hőhullám-definíciót az ÁNTSZ⁶ fogalmazta meg: a május 16. – szeptember 15. közötti időintervallumban legalább három, egymást követő napon a középhőmérséklet meghaladja az adott napra jellemző, 1981–1990 referencia

⁵ Heat-wave Magnitude Index daily; napi hőhullám erősség index

⁶ Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat

időszakból számított átlagos napi középhőmérséklet 90. percentilis értékét (*Hooyberghs et al.*, 2019).

Láthatjuk, hogy a hóhullám sokféleképpen definiálható és jellemezhető. A következő fejezetben Európa különböző régióira vonatkozó, a hóhullámok előfordulásához és gyakoriságához kapcsolódó kutatások eredményeit összegzem.

3. Európai hóhullám-tendenciák a múltban

Della-Marta et al. (2007) szerint 1880 és 2005 között Nyugat-Európában a nyári hóhullámok hossza megduplázódott, a forró napok (amikor a napi maximum-hőmérséklet meghaladja az 1906–1990 időszak adatai alapján számított átlagos érték 95. percentilisét) gyakorisága pedig háromszorosára emelkedett. Hóhullámokkal kapcsolatos vizsgálatok egy-egy országra vonatkozóan is történtek.

Az Egyesült Királyságban 29 meteorológiai állomás 1961–2016 időintervallumból származó adatsorának felhasználásával végzett kutatást *Sanderson et al.* (2017), amelyhez a forró napok meghatározását vették alapul. Minden állomásra megadták a szükséges küszöbértéket, amit az 1971–2000 időszakban mért napi maximum-hőmérsékletek percentilisei jelöltek ki. Több percentilis értéket (93., 95., 98.) is figyelembe vettek, és legalább 3 egymást követő forró napot tekintettek hóhullámnak. Ilyen feltételek mellett a 93. és a 95. percentilis által meghatározott hóhullámok mérsékeltek, a 98. percentiliszhez tartozó hóhullámok extrémnek számítottak. Utóbbi Délkelet-Angliában 28 °C-os, míg a Shetland-szigeteken található Lerwick esetében 16 °C-os napi maximum-hőmérsékleti küszöbértéknek adódott. A vizsgált időszak során a mérsékelt hóhullámok száma és hossza egyaránt pozitív tendenciát mutatott. A 11 napnál tovább tartó hőségperiódusok az 1970-es évek közepéig nagyon ritkán fordultak elő, majd ezt követően gyakoribbá váltak, viszont a hosszuk átlagosan 20 napról 12 napra csökkent. A legtöbb hóhullám május és szeptember között alakult ki, de áprilisban és októberben is detektáltak eseteket néhány állomáson. Az Egyesült Királyság délkeleti régióiban az utolsó évtizedekben pozitív trend jellemző a hóhullámok előfordulására adott éven belül.

Franciaországban az 1959 és 2009 közötti időszakban évtizedenként 0,3 °C-os melegedést figyeltek meg, amely elsősorban a tavaszi és nyári időszakban bekövetkező hőmérséklet-emelkedésnek köszönhető (*Gibelin et al.*, 2014). A SAFRAN⁷ reanalízis adatbázis felhasználásával *Ouzeau et al.* (2016) a franciaországi hőségperiódusokat szimulálta az 1959 és 2015 közötti időszakra vonatkozóan. A napi minimum- és maximum-hőmérséklet összegének a felével közelítették a napi középhőmérsékletet, és ezeket az átlagokat kiszámolták egész Franciaország területére. Ennek segítségével a vizsgált időszakban 25 hóhullámot detektáltak, amelyek hossza 5 és 23 nap között változott; a

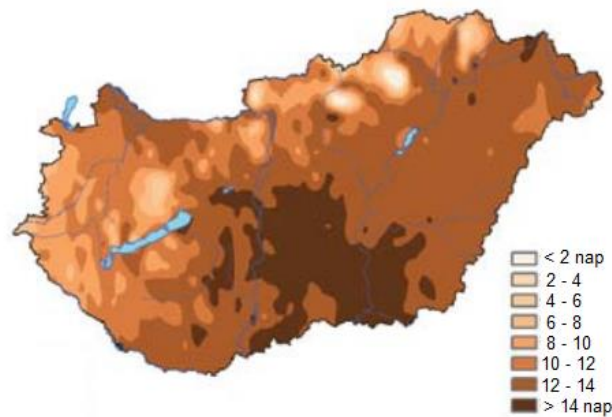
⁷ Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige; A óról légköri információt szolgáltató, elemző rendszer

leghosszabb 1983 júliusában következett be. A hőségperiódusok alatt előfordult legmagasabb napi középhőmérséklet 23,7 °C és 28,1 °C között alakult, utóbbit 2003 augusztusában mérték.

A melegedő tendencia Európa hegyvidékein is kimutatható: az Alpok déli régiójára vonatkozó kutatás szerint 1874 és 2015 között az átlaghőmérséklet 1,4 °C-kal emelkedett évszázadonként, a forró napok száma és a hőhullámok hossza pedig megháromszorozódott az időszak során (*Brugnara et al.*, 2016).

Bartoszek és Krzyżewska (2017) szerint a lengyelországi Lublin térségében az 1951–2015 időintervallumban 36 hőhullám fordult elő – amikor a napi maximum-hőmérséklet 3 egymást követő napon 30 °C fölé emelkedett (*Krzyżewska et al.*, 2016). A hőségperiódusok leggyakrabban 3–4 napig tartottak, a két leghosszabb 11, illetve 10 napos volt. Az év során a legkorábban június közepén (1972. június 14–16.) következett be, a legkésőbbi pedig 2015. augusztus 30.–szeptember 1. között alakult ki (*Bartoszek és Krzyżewska*, 2017).

A Kárpát-medencében *Spinoni et al.* (2015) 1961–2010 között a hőhullámok gyakoriságának, időtartamának és intenzitásának szignifikáns emelkedését figyelte meg; ez alól csak Románia északi része bizonyult kivételnek. Magyarország területére a szélsőséges hőmérsékletekben bekövetkezett változásokra vonatkozó vizsgálatot végzett *Lakatos és Zsebeházi* (2018). Eredményeik szerint a 20. század kezdetétől 2016-ig átlagosan hat nappal nőtt azon napok éves száma, amikor a napi középhőmérséklet 25 °C fölé emelkedett. 1981–2016 között a Dél-Alföldön adódott a legnagyobb ez a változás (itt több, mint 14 nappal emelkedett a hőhullámos napok száma), az ország északi, valamint hegyvidéki területein emelkedett a legkisebb mértékben (2. ábra).



2. ábra: A hőhullámos napok ($T_{közép} > 25\text{ °C}$) éves számának változása Magyarországon az 1981–2016 közötti időszakban (Forrás: Lakatos és Zsebeházi, 2018).

Ezen kívül *Ouzeau et al.* (2016) nyomán az Országos Meteorológiai Szolgálat homogenizált, interpolált országos napi átlaghőmérsékletek alapján az 1981–2016 időszakra elvégezte a hőhullámok kategorizálását, amely a következő kritériumok alapján történt: a hőhullám tartama, ameddig a napi középhőmérséklet 25 °C fölé emelkedett (legalább 3 egymást követő napon keresztül). Két hőségperiódust abban az esetben tekintettek összefüggőnek, ha a középhőmérséklet legalább három napig nem csökkent 23 °C alá, vagy egy napig 20 °C alá. Kiszámították a hőhullámok intenzitását is, amit a 25 °C feletti hőmérsékletösszeg adott meg – a diagramon ezt a körök méretével szemléltették. A buborékdiagramon a legalább 10 napig tartó hőhullámokat tüntették fel, amelyeket az időszak során előfordult legmagasabb napi középhőmérséklet alapján helyeztek el az y-tengely mentén. A vizsgált időszakban először 1987-ben alakult ki a kritériumrendszernek megfelelő paraméterekkel rendelkező hőhullám Budapesten. A leghosszabb, 15 napig tartó hőségperiódus 1994-ben, a legintenzívebb pedig 2007 nyarán következett be. Utóbbi időszak során regisztrálták Magyarországon a máig érvényes országos melegrekord értéket is: Kiskunhalason 2007. július 20-án $41,9\text{ °C}$ -ig emelkedett a hőmérséklet [2 – met.hu].

4. Esettanulmányok

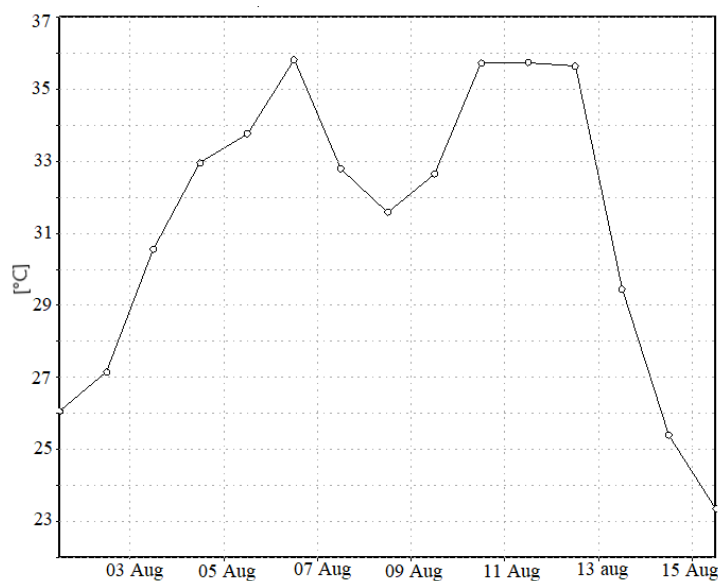
Az ezredforduló után több erős hőhullám fordult elő Európában, nevezetesen 2003, 2006, 2010, 2015, 2017, 2018 és 2019 nyarán (Tomczyk és Bednorz, 2019), [3 – met.hu]. Tomczyk és Bednorz (2019) Közép-Európára fókuszáló eredményei szerint a hőhullámok kétféle szinoptikus helyzetben alakulnak ki. (1) Amikor egy, az azori maximumhoz kapcsolódó, kiterjedt magasnyomású képződmény épül ki a kontinens felett; (2) Norvégia és a Norvég-tenger feletti nyomásközpontról rendelkező anticiklon esetén. Wolf *et al.* (2018) kapcsolatot fedezett fel a hőmérsékleti értékekhez köthető szélsőségek és a kvázistacionárius légköri hullámok között, amiből arra következtettek, hogy a hőhullámos periódusok kialakulása a blokkoló anticiklonok mellett a nagyskálájú, perzisztens planetáris hullámokkal is összefüggésben van. Ezekben a nagytérségi helyzetekben délnyugat felől melegadvekción zajlik, és forró levegő áramlik a kontinens felé (Tomczyk és Bednorz, 2019). A hőhullámok erősségét, intenzitását a talaj nedvességtartalma is befolyásolja, mivel ez szabályozza a szenzibilis és a látens hőáramokat a felszínen (Berg *et al.*, 2014); a csökkent talajnedvesség és a levegő magasabb hőmérséklete közötti kapcsolatot például Jaeger és Seneviratne (2011) is kimutatta. Stéfanon *et al.* (2013) vizsgálta a talajnedvesség és a hőhullámok közötti összefüggéseket különböző felszínek esetében. Eredményeik szerint az alföldi tájakon a talajnedvesség-tartalom csökkenésének következtében kisebb az evapotranszpiráció és nagyobb a szenzibilis hőáram, ezáltal szárazabb a légkör, kevesebb felhő képződik – becslések alapján ez a folyamat mintegy 20%-ban hozzájárul a pozitív hőmérsékleti anomáliákhoz pl. Franciaországban vagy Németországban.

Az előbb említett években bekövetkezett hőhullámok a kontinens különböző régióit érintették erősebben, eltérő karakterisztikákkal rendelkeztek, és különböző okokból számítottak jelentősnek. Ebben a fejezetben a 2003-ban, a 2017-ben és a 2019-ben bekövetkezett európai hőhullámok jellemzőit és hatásait mutatom be.

4.1. A 2003. nyári hőhullám

2003. augusztus 1–15. között rendkívül erős hőhullám sújtotta Európát, a napi középhőmérséklet magasabbra emelkedett, mint az azt megelőző 500 évben bármikor (Trigo *et al.*, 2005). Schär *et al.* (2004) számításai alapján az esemény bekövetkezésének valószínűsége a megfigyelhető globális felmelegedés ellenére is nagyon kicsi volt. Fouillet

et al. (2006) szerint a maximum-hőmérséklet 10–12 °C-kal haladta meg az évnek ebben az időszakában jellemző átlagos értéket: Franciaország 61 tartományában kilenc egymást követő napon 35–37 °C-ot mértek. Az ERA5 reanalízis adatbázis (*Hersbach et al.*, 2020) alapján elkészítettem egy Párizsra vonatkozó meteogramot, amelyen a felszíni hőmérséklet menetét jelenítettem meg az említett időszakban (3. ábra). Látható, hogy az augusztus 1–15. közötti időszakban a levegő több napon is 35 °C fölé melegedett. A két maximum között egy kisebb visszaesés figyelhető meg, de ez nem volt jelentős, a hőmérséklet még ekkor is 31 °C fölé maradt.

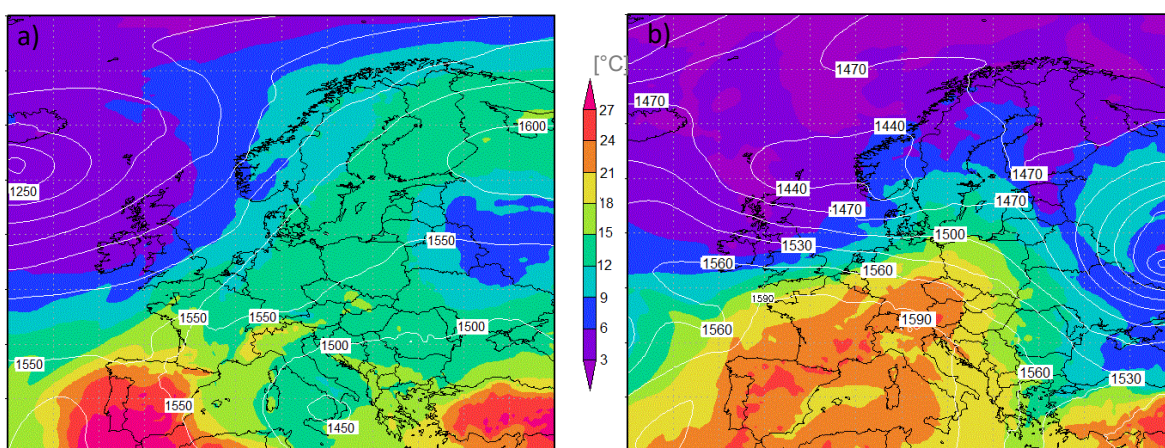


3. ábra: A felszíni hőmérséklet [°C] Párizs térségében a 2003. augusztus 1–15. időszakban, minden nap 12:00 UTC-re vonatkozóan, ERA5 reanalízis adatok alapján.

A nagytérségi helyzetet tekintve a tartós hőhullámot egy blocking helyzet okozta, amely megakadályozta az alacsony nyomású rendszerek keleti irányba történő áthelyeződését, meridionális áramlást kialakítva. Ennek következtében dél felől erőteljes melegadvekciónak zajlott. A 4. ábrán látható a 850 hPa-os nyomási szint hőmérséklete és geopotenciális magassága (a) a hőhullám kezdetén, valamint (b) a tetőzés idején. A felhőtlen égboltnak köszönhetően az erős besugárzás is fokozta a felszínközeli légrétegek felmelegedését (*Trigo et al.*, 2005). *De Bono et al.* (2004) kimutatta, hogy az Alpok gleccserein 3 m vízgyenértéknek megfelelő mennyiségű jég olvadása következett be 2003 nyarán, ami az 1980–2000 időszak átlagának (0,65 m) mintegy ötszöröse volt. A hőhullám következtében a gazdaság nagy veszteséget szenvedett (gabonanövények mennyisége és

minősége, áramszünet, fennakadás a közlekedésben), melynek értéke meghaladta a 13 milliárd eurót.

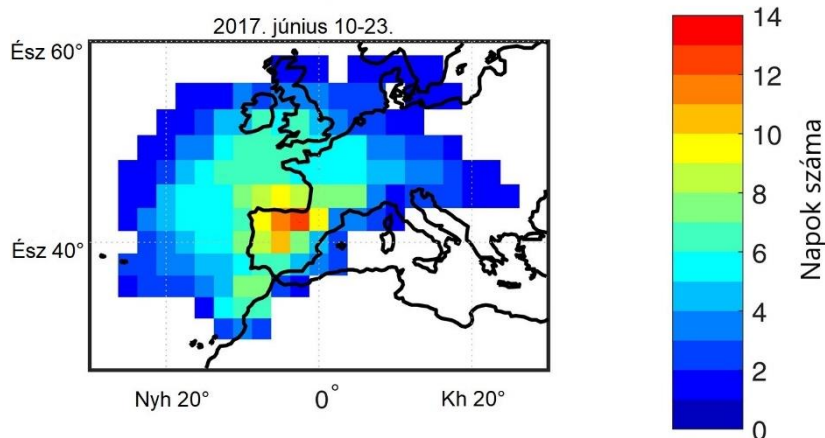
A 2003-as hőhullám jelentősége a rendkívüli halálozási számban rejlik, amelyre *Valleron és Boumendil* (2004) szerint a magas éjszakai minimum-hőmérsékleti értékek nagy hatással voltak. A hőség következtében a legtöbb (mintegy 15 000) haláleset Franciaországban fordult elő (*Pirard et al.*, 2005), ahol a megnövekedett halálozási arány és a felszíni, valamint az alsó troposzférabeli hőmérsékleti anomáliák közötti kapcsolat is jól kimutatható. Emellett Olaszországban, Németországban, Spanyolországban, Portugáliában és az Egyesült Királyságban is több ezer ember életét követelte a nagy forróság (*Trigo et al.*, 2005).



4. ábra: A 850 hPa-os nyomási szintre kirajzoltatott hőmérséklet és geopotenciális magasság (a) 2003. augusztus 1. 12:00 UTC időpontban, (b) 2003. augusztus 13. 12:00 UTC időpontban, az ERA5 reanalízis adatbázisa alapján.

4.2. A 2017. júniusi hőhullám

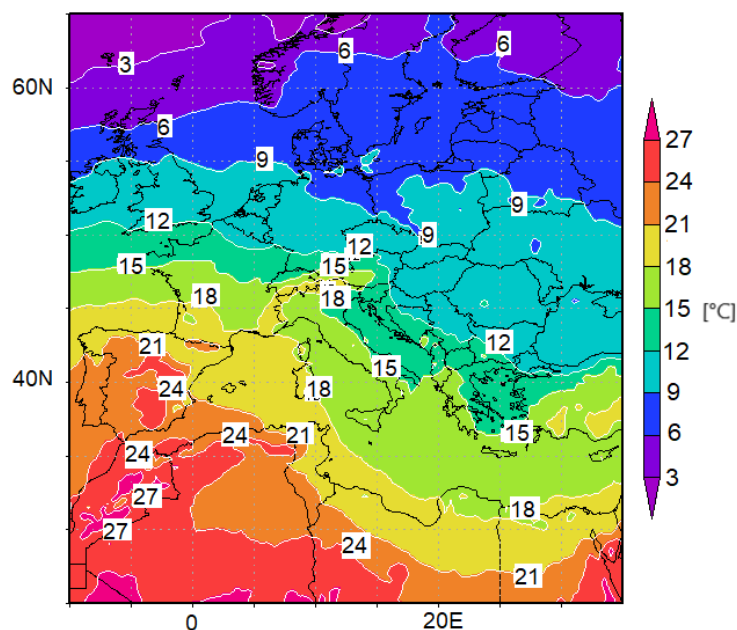
Nyugat- és Közép-Európát a 2003-ashoz és a 2010-eshez hasonló mega-hőhullám (*Barriopedro et al.*, 2011) érte el 2017-ben, ami két hétig (június 10-től 23-ig) tartott. A tetőzés június 16–18. között következett be, és az Atlanti-óceán keleti medencéjét, valamint Európa nyugati partvidékét érintette. A hőhullám gyengülő szakaszában északkelet felé, a kontinens belseje felé mozdult el. Az esemény által érintett terület teljes nagysága mintegy 8 000 000 km² volt, és leginkább az Ibériai-félszigetet sújtotta (5. ábra).



5. ábra: A 2017. június 10–23. között tartó hőhullám által érintett terület nagysága. A színek az időszakban bekövetkezett hőhullámos napok számát mutatják (Forrás: Sánchez-Benítez et al., 2018).

Az 500 hPa-os nyomási szinten az időszakban pozitív anomália volt megfigyelhető a geopotenciál-mezőben, amelynek középpontja Franciaország és az Ibériai-félsziget felett helyezkedett el, ezáltal szubtrópusi meleg levegő áramlott Európába. A 850 hPa-os szint június 14–20. közötti átlagos hőmérséklete látható kirajzolva a 6. ábrán. A 18–22 °C-os izotermák – amelyek az évnek ebben az időszakában Észak-Afrika térségében szoktak előfordulni – a hőhullám ideje alatt Ibéria fölé húzódtak (Sánchez-Benítez et al., 2018).

Az előzőekhez képest ez a hőhullám a nyár folyamán korábban alakult ki, ezáltal több hőmérsékleti rekord is született. A napi maximum-hőmérséklet az Ibériai-félszigeten több állomáson is meghaladta a 45 °C-ot. Svájcban 1981 óta a legmelegebb júniusi éjszakát jegyezhetők fel: sok helyen 25 °C fölött maradt a minimum-hőmérséklet (Sánchez-Benítez et al., 2018). A nagy hőség Nyugat-Európában erős szárazsággal járt együtt (García-Herrera et al., 2018), Portugáliában hatalmas erdőtüz pusztított (Moreira et al., 2020).



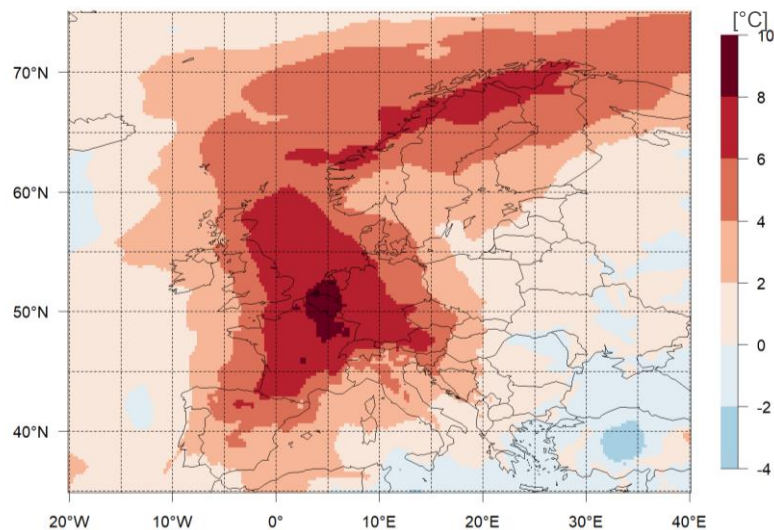
6. ábra: A 850 hPa-os nyomási szintre kirajzoltatott átlaghőmérséklet a 2017. június 14–20. időszakban, ERA5 reanalízis adatok alapján.

4.3. A 2019-es hőhullámok

2019 nyarán két hőhullám is sújtotta Nyugat- és Közép-Európát. Az első június utolsó hetén következett be, melynek során több hőmérsékleti rekord dőlt meg; például június 28-án a franciaországi Nîmes közelében 46,0 °C-ot mértek (a korábbi maximum-hőmérsékleti rekord 44,1 °C). Európa nagy részén 2019 júniusa volt a valaha mért legmelegebb június. Ennek a hőhullámnak a jelentősége, hogy a nyár folyamán korábban alakult ki – ilyen erősségű hőhullámok előfordulása az év (nyár) későbbi időszakában jellemző. Egy 3–4 napos hőhullám sújtotta Nyugat-Európát és Skandinávia térségét július végén is, amely több országban új melegrekordokat eredményezett: Németországban 14 állomáson haladta meg a régi, 40,3 °C-os értéket a maximum-hőmérséklet, az új rekord 42,6 °C, amit Lingenben regisztráltak. Az Egyesült Királyságban a hőhullám kevésbé volt intenzív, mégis született új abszolút maximum-hőmérsékleti rekord (Cambridge, 38,7 °C). Belgiumban és Hollandiában a mérések kezdete óta először emelkedett 40 °C fölé a hőmérséklet (Vautard *et al.*, 2020). A Mont Blanc hegycsúcson 7 °C-ot regisztráltak, ami szintén rekordnak számít (van Oldenborgh *et al.*, 2019). Ebben az európai régióban a 2019 június-júliusában előfordult, három napra vonatkozó, a térségre átlagolt középhőmérséklet 25,6 °C volt, ami 4,7 °C-kal haladta meg az 1951–1980 referencia időszakra jellemző

átlagos értéket. Ilyen esemény az 1950–2014 közötti időintervallum klimatikus viszonyai mellett 283 évente egyszer fordulna elő (Feng *et al.*, 2020).

Mindkét hőségperiódus hasonló szinoptikus helyzetben következett be, amikor egy alacsony nyomású képződmény alakult ki az Ibériai-félsziget nyugati partjánál, miközben Nyugat-Európa fölött egy gerinc húzódott. Ennek köszönhetően Észak-Afrika térségéből intenzív melegadvekción zajlott. A július végi hóhullám súlyos aszályjal járt együtt, ami egyes régiókban (például Franciaország, Hollandia, Németország egyes részein) további hőmérséklet-emelkedést okozott a felszín-légkör kölcsönhatásnak köszönhetően. Ezen a ponton kapcsolat állhat fenn a két esemény között, ugyanis a június végi hóhullám nagyban hozzájárult a szárazság kialakulásához, ami elősegítette a hőmérséklet emelkedését a második hőségperiódus idején (Vautard *et al.*, 2020). A 2019. július 20–26. közötti időszakra kirajzoltatott térképen a 850 hPa-os nyomási szinten 4–10 °C-os hőmérsékleti anomáliát figyelhetünk meg (az 1981–2010-es átlaghoz képest) Nyugat-Európa térségében és Skandináviában (7. ábra). A nagy hőség a sínek felhevüléséhez és deformálódásához vezetett, ami Svájcban több vonat késését okozta, a spanyolországi Katalóniában pedig több ezer hektárnyi területen erdőtüzek pusztítottak (van Oldenborgh *et al.*, 2019).



7. ábra: A 850 hPa-os nyomási szint átlagos hőmérsékleti anomáliája 2019. július 20–26. között, az 1981–2010-es referencia időszakhoz viszonyítva, ERA5 reanalízis adatok alapján.

5. Várható hőhullám-tendenciák Európában

Globális skálán nézve a következő évtizedekben az extrém hőséggel sújtott területek nagyságának növekedése várható, amelynek sebessége eltérő a különböző kibocsátási forgatókönyvek esetén (Russo *et al.*, 2015). Európában a jövőre vonatkozó projekciók szerint a század végéig folytatódni fog a múltban megfigyelt trend: évtizedenként $\sim 0,2$ °C-os melegedés várható. A nyári hőhullámok gyakoribbá és intenzívebbé fognak válni – ez a globális és a regionális modellekben egyaránt megjelenik (IPCC, 2019) –, emellett korábban jelennek meg az év folyamán (Sánchez-Benítez *et al.*, 2018). A 2003-ashoz hasonló esemény legalább 30 évente egyszer elő fog fordulni mind az RCP4.5, mind az RCP8.5 scenárió (Moss *et al.*, 2010) szerint; de az elkövetkezendő évtizedekben egy nagyobb hőhullám kialakulása az RCP8.5 scenárió mellett valószínűbb. Junk *et al.* (2019) is végzett hasonló kutatást Európa három fővárosára (Róma, Luxembourg, London) vonatkozóan multi-modell ensemble felhasználásával, az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriók alapján. Az 1. táblázatban összefoglaltam az évi átlaghőmérséklet változására kapott eredményeiket. Az 1979–2000 referencia időszakhoz viszonyítva a három város közül a legnagyobb emelkedés Róma esetében figyelhető meg a 21. század végére, mindkét RCP scenárió szerint. A változás mindegyik városra vonatkozóan statisztikailag szignifikánsnak bizonyult. Megvizsgálták a hőhullámos periódusok alatt jellemző átlaghőmérsékletet is, amiről elmondható, hogy ennek értéke a három fővárosban mindkét forgatókönyv esetében növekedést mutat a 2031–2060, illetve a 2061–2090 közötti időszakokban egyaránt.

1. táblázat: Az évi középhőmérséklet emelkedésének várható értéke a 21. század végéig három európai főváros esetében, az 1979–2000 referencia időszakhoz viszonyítva az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriók szerint (Forrás: Junk *et al.*, 2019).

	Referencia érték	T _{átlag} emelkedése 2061-2090-re	
		RCP4.5	RCP8.5
London	9,3 °C	1,5 °C	2,5 °C
Luxembourg	8,1 °C	1,6 °C	2,8 °C
Róma	14,3 °C	1,8 °C	4,5 °C

Ouzeau *et al.* (2016) a 2. fejezetben már bemutatott definíciójukat alapul véve, Franciaország területére elvégezte a hőhullámok tendenciaelemzését a jövőre vonatkozóan. Ehhez az EURO-CORDEX (Jacob *et al.*, 2014) ensemble szimulációt használták fel az

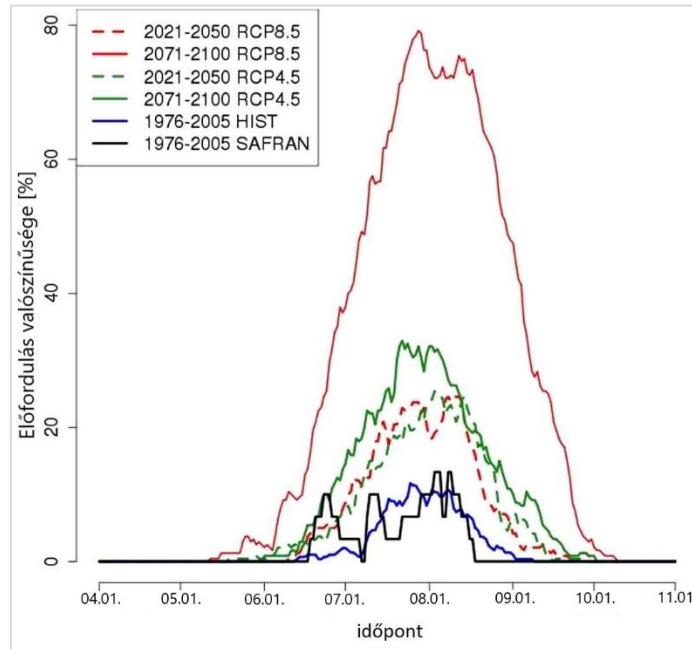
RCP4.5, valamint az RCP8.5 szcenáriók mellett. A hőhullámok gyakoriságát tekintve a 2021–2050 időszakra mindkét szcenárió hasonló számú eseményt valószínűsít (RCP4.5: 28–48 hőhullám, RCP8.5: 21–40 hőhullám; a medián érték mindkét esetben 34), míg az évszázad végére már nagyobb az eltérés: a 2071–2100 közötti időintervallumban 29–60 (RCP4.5), illetve 61–99 (RCP8.5) hőhullám bekövetkezését vetítik előre a modellek. A különböző karakterisztikákra kapott eredményeket a 2. táblázatban láthatjuk összefoglalva.

2. táblázat: A hőhullámok karakterisztikáira vonatkozó medián és 90. percentilis (zárójelben) értékek az EURO-CORDEX modell ensemble szimulációk szerint, az RCP4.5 és az RCP8.5 szcenáriók mellett, a 21. század közepére (2021–2050) valamint a 21. század végére (2071–2100) vonatkozóan Franciaországban (Ouzeau et al., 2016 alapján).

Karakterisztika	Időszak			
	2021 - 2050		2071 - 2100	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Tartam [nap]	7-10 (14-23)	7-11 (12-27)	8-13 (15-30)	11-17 (23-76)
Intenzitás	5,8-10,6 (13-33)	5,8-9,8 (9,8-39,5)	6-13,4 (15,9-35,3)	11,2-16,2 (40,9-136,1)

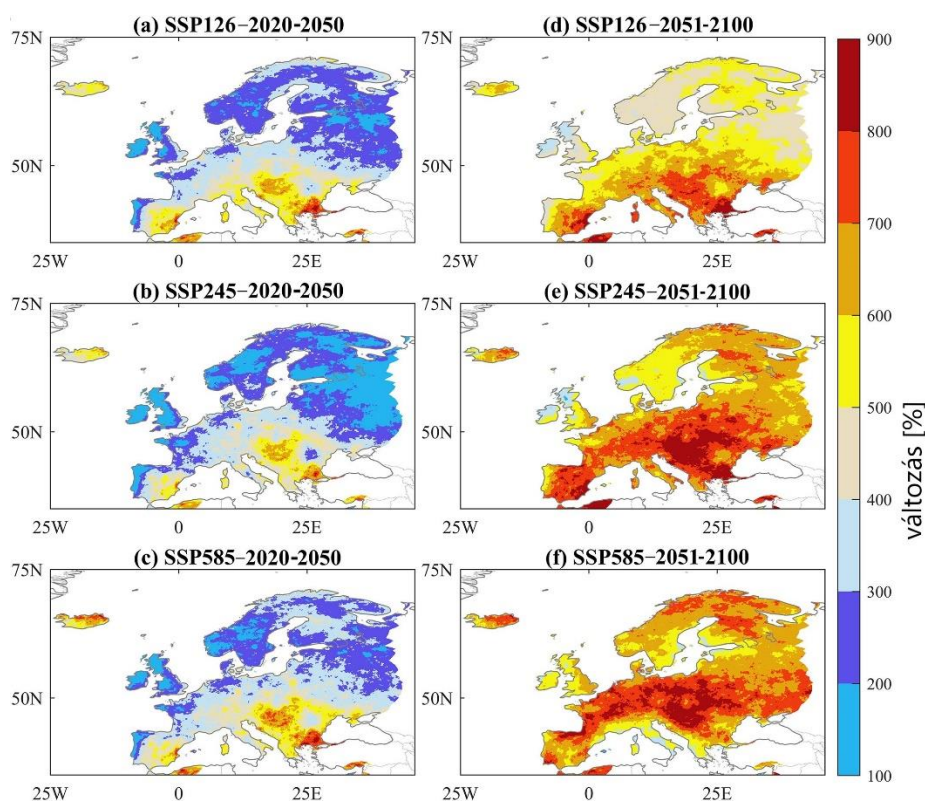
Ouzeau et al. (2016) a jövőre vonatkozó kutatásának részeként megvizsgálta a hőhullámok éven belüli előfordulási gyakoriságának alakulását is (8. ábra). A modellszimulációk szerint a 21. század végére az év nagyobb részében fognak bekövetkezni a referencia időszakhoz (1976–2005) képest ezek az események, így a hőhullámok detektálását nem lesz elég csak a nyári hónapok adatai alapján végezni; azt szükséges lehet kiterjeszteni az évnél egy nagyobb hányadára. Az RCP4.5 szcenárió szerint legnagyobb (33%) valószínűséggel július 22. környékén fognak előfordulni, míg az RCP8.5 mellett július 28. körül lesz a legnagyobb a hőhullámok bekövetkezésének valószínűsége (79%) a 21. század végén. Bador et al. (2017) klaszterezési algoritmus segítségével öt olyan régiót azonosított be Franciaországban, ahol jól vizsgálhatók a nyári hőhullámok: Délnyugat-Franciaország, Kelet-Franciaország, Észak-Franciaország, Bretagne és a mediterrán térség. A 21. század második felében az ALADIN modell az RCP8.5 forgatókönyv mellett három jelentős, a 2003-ashoz hasonló hőhullám bekövetkezését vetíti előre ezeken a területeken: 2075-ben, 2097-ben és 2099-ben. A 2075 nyarára szimulált hőségperiódust alaposabban is elemezték, és eredményeik szerint ez nagyobb amplitúdójú, viszont kisebb térbeli kiterjedésű lenne (elsősorban Kelet- és Észak-Franciaországot érintené), mint a 2003-as hőhullám volt, és ennek során a maximum-hőmérséklet akár 1–6 °C-kal emelkedhet

magasabbra a jelenlegi rekordnál. *Bador et al. (2017)* szerint Franciaországban a maximum-hőmérsékleti rekord a 21. század végén elérheti az 50 °C-ot is.



8. ábra: A hőhullámok éven belüli előfordulásának valószínűsége az EURO-CORDEX ensemble modellszimulációk alapján az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriók mellett, a 2021–2050 (szaggatott vonalak), illetve a 2071–2100 (folytonos vonalak) közötti időszakban. Folytonos kék vonallal látható az 1976–2005 referencia időszak, a fekete vonal pedig ugyanerre az időintervallumra mutatja a SAFRAN reanalízis adatbázis alapján kapott eredményt (Forrás: Ouzeau et al., 2016).

Közép-Európában az 1970–1999-es időszakhoz képest a hőhullámok száma megduplázódhat a 21. század közepére, és ez a növekedés minden RCP forgatókönyv mellett kimutatható (*Lhotka et al., 2018*). *Feng et al. (2020)* szerint a 2019-ben Európában bekövetkezett hőhullámhoz hasonló hőségperiódus a jövőben nagyjából 2–7 évente is előfordulhat. Az 1951–1980 referencia időszakhoz képest 2020–2100 között több, mint 100%-kal fog növekedni a hőhullámok gyakorisága (*9. ábra*), időtartama és intenzitása minden általuk vizsgált forgatókönyv alapján egész Európában.



9. ábra: A hőhullámos időszakok előfordulásának százalékos változása Európában (a–c) 2020–2050, illetve (d–f) 2050–2100 között, a három vizsgált SSP⁸ scenárió (O’Neill et al., 2016) szerint, az 1951–1980 referencia időszakhoz képest (Forrás: Feng et al., 2020).

Ahogy azt *Junk et al.* (2019) korábban ismertetett eredményei is mutatták, a felmelegedés különösen nyilvánvaló a mediterrán térségben és az Ibériai-félszigeten (*Sánchez-Benítez et al.*, 2019). Amíg ebben a régióban az 1961–1990 időszakban átlagosan 2 hőhullámos nap fordult elő nyaranta, addig ez az érték 2021–2050 között 13 nap, a 21. század végére pedig évi 40 nap köré emelkedhet (*Fischer és Schär*, 2010). Portugáliában *Cardoso et al.* (2019) kutatása során azt az eredményt kapta, hogy a 21. század végére évente átlagosan 7–9-szer több hőhullám fog bekövetkezni az 1971–2000 referencia időszakhoz képest, tartamuk 5 napról 22 napra emelkedhet, és a leghosszabb hőségperiódusok 5%-a több, mint 1 hónapig is tarthat majd. A Párizsi-medencében *Lemonsu et al.* (2014) szerint a 2020–2049-es időszakban átlagosan 2 évente egy hőhullám fog előfordulni, a század végére (2070–2099) pedig a jelenség még gyakoribbá válhat, akár évente 1–2-re is számítani lehet.

Magyarországon is az éghajlati szélsőségek előfordulásának növekedése várható, például a nyári, a forró, az extrém forró (*Szépszó*, 2008), vagy a hőhullámos (25 °C-ot meghaladó napi középhőmérsékletű) napok számában is. Az 1961–1990 referencia

⁸ Shared Socioeconomic Pathways; Közös társadalmi-gazdasági utak

időszakhoz viszonyítva a valószínű változás mértéke a 2021–2050 időintervallumban átlagosan 3–26 nap, 2071–2100 között pedig átlagosan 21–49 nap. A növekedés mértéke azonban az országon belül eltérő: leginkább a déli-délkeleti régiókat érinti, ezzel szemben a hűvösebb északnyugati tájakon kevésbé fog emelkedni a hóhullámos napok száma évente a szimulációk szerint (*Lakatos et al.*, 2012). A magasabban fekvő területeken és a hegységeken is sokkal kisebb mértékű növekedés várható (*Bartholy et al.*, 2013a); a változás szempontjából tehát az észak-déli megosztottság lesz jellemző az országban (*Torma*, 2011). A korábban említett referencia időszakhoz képest a 21. század végére akár két hónappal is meghosszabbodhat a hóhullámok lehetséges előfordulási időszaka (*Pongrácz et al.*, 2013), és 5–7-szer gyakrabban fordulhat elő első- és másodfokú hőségiadó (*Bartholy et al.*, 2013b). *Bihari et al.* (2015) a KRITÉR projekt keretében végzett vizsgálatainak eredményei szerint az 1990–2020-as időszakhoz képest a hóhullámos napok számának és intenzitásának növekedése mellett a hóhullámos napokhoz köthető többlethalálozás is emelkedni fog, a 21. század végére (2071–2100) várhatóan 531%–668%-kal.

A jövőben tehát jóval gyakoribbá válhatnak az olyan hóhullámok, mint amelyek idáig felléptek Európában. Mivel ezek az extrém forró időszakok a kontinensen bárhol jelentkezhetnek, ezért Európa minden országának fel kell készülnie egy esetleges komolyabb hóhullámra (*Russo et al.*, 2015). Ezek a jelenségek megterhelik az emberi szervezetet, veszélyesek az ökoszisztéma számára, gyorsítják a sarki jégtakaró és a gleccserek olvadását (*De Bono et al.*, 2004), erdőtüzet okozhatnak. Számos más káros hatásuk is van: fennakadásokat okozhatnak a közlekedésben, az infrastruktúrában [3 – met.hu], csökkenhet az erdők termőképessége (*Torma*, 2011). Emellett negatív hatásuk van az élelmiszerbiztonságra és az ivóvízellátottságra is (*Junk et al.*, 2019). Nagyon fontos tehát a felkészülés és az alkalmazkodás, valamint a klímaváltozás és a globális felmelegedés megfékezésére vonatkozó törekvés.

6. A hőhullámos periódusok vizsgálata Magyarországon

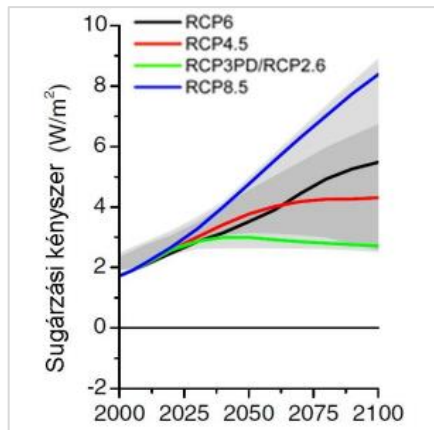
6.1. Adatok és módszertan

A hőhullámok múltra vonatkozó vizsgálatát öt nagyobb hazai város (Budapest, Debrecen, Pécs, Szeged, Szombathely) esetében végezzük el az 1901–2019 közötti időszak homogenizált napi középhőmérsékleti adatsorai alapján. A napi középhőmérséklet az adott napon 00, 06, 12 és 18 UTC időpontokban mért adatok átlagaként áll elő. A homogenitás fontossága abban rejlik, hogy klimatológiai vizsgálatokat kizárólag hosszú, jó minőségű, inhomogenitásoktól mentes adatsorokkal célszerű végezni, hogy megbízható eredményeket kapjunk. A legjelentősebb inhomogenitást az állomások áthelyezése, a mérési módszer, vagy a mérés időpontjának megváltozása okozhatja az adatokban [4 – met.hu]. Ezt az elemzést az Országos Meteorológiai Szolgálat által kidolgozott MASH⁹ (Szentimrey, 1999) homogenizálási eljárással korrigált, 119 évet lefedő, napi adatsorok segítségével végeztük el. A hőhullámok napi középhőmérsékleti adatsorok alapján történő detektálására, valamint karakterisztikáinak számítására kifejlesztettünk egy számítógépes programot, amelynek célja, hogy a munka kevesebb manuális lépést igényeljen, és bizonyos hőhullám-karakterisztikák ennek futtatásával rövid idő alatt előálljanak. A programot úgy alkottuk meg, hogy az tetszőleges, hasonló struktúrájú adatsorra is futtatható legyen, így alkalmazni tudtuk további, a jövőre vonatkozó kutatásokhoz is.

A hőhullámok vizsgálatának jövőre vonatkozó részét Budapestre végeztük el. Ehhez két regionális klímamodell szimulációt használtunk az RCP4.5, illetve az RCP8.5 forgatókönyvek feltételezése mellett. Az RCP-típusú forgatókönyvek a sugárzási kényszer változására utalnak. A számérték azt jelzi, hogy W/m^2 -ben kifejezve ez a változás (az ipari forradalom előtti értékhez képest) 2100 végére várhatóan milyen mértékű lesz. Az RCP4.5 a SRES¹⁰ (Nakicenovic et al., 2000) B1 scenárióhoz hasonló mértékű változást becsül, az RCP8.5 pedig a SRES A2 scenárióval közelíthető (Barcza et al., 2013). A két felhasznált forgatókönyv jól elkülönül egymástól, erről látható egy diagram a 10. ábrán a sugárzási kényszer változására vonatkozóan.

⁹ Multiple Analysis of Series for Homogenization

¹⁰ Special Report on Emissions Scenarios; Kibocsátási Forgatókönyvek Tematikus Jelentése



10. ábra: A különböző RCP forgatókönyvek alapján becsült sugárzási kényszer változása a 21. század végéig. Látható, hogy az RCP4.5 (piros) és az RCP8.5 (kék) jól elkülönül egymástól (van Vuuren et al., 2011).

A választott regionális éghajlati modellek az EC-EARTH¹¹ [5 – ec-earth.org] globális klímamoddellel meghajtott CCLM¹² (Rockel et al., 2008), valamint a HadGEM (Collins et al., 2011) globális modellel meghajtott RACMO¹³ (van Meijgaard et al., 2008). Mindkettőt az EURO-CORDEX program keretében futtatták, és 0,11°-os horizontális felbontással rendelkeznek. Meg kell jegyeznünk, hogy a RACMO szimulációiban minden hónap 30 napos a meghajtó globális klímamodell tulajdonságából eredően, ezzel szemben a CCLM figyelembe veszi a hónapok valós hosszát és a szökőéveket. Ez a két regionális klímamodell-szimuláció hibakorrekción nem esett át, és a bizonytalanság érzékeltetése miatt került kiválasztásra, mivel a két különböző forgatókönyvvel meghajtott két regionális modell alkotta négytagú szimulációegyüttes kielégítően megjeleníti a klímamodellek és a forgatókönyvek különbségeiből származó bizonytalanságokat (Coppola et al., 2020). A klímamodell-szimulációkat két időszakra bonthatjuk: az ún. historical (1970–2005) és a scenárió (2006–2099) időszakra. A múltira vonatkozó szimulációk a megfigyelt üvegházhatású gázok és aeroszolkoncentrációk adatai alapján készültek, a scenáriók pedig az előbb említett RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyvek alapján. Az Országos Meteorológiai Szolgálat Modellezési Osztálya bocsátotta rendelkezésünkre az elemzéshez szükséges fájlokat, amik Kelvinben kifejezett napi középhőmérsékleti adatokat tartalmaznak 1970-től 2099-ig, és a Budapestre eső rácspontok értékeinek térbeli átlagát tartalmazzák (a Budapestre kivágott téglalap koordinátái a következők: k.h. 18,9375°, k.h. 19,0625°,

¹¹ European community Earth-System Model; Európai közösség Föld-rendszer modellje

¹² COSMO CLM

¹³ Regional Atmospheric Climate Model; Regionális Léggöri Éghajlati Modell

é.sz. 47,4375°, é.sz. 47,5625°). A jövőre vonatkozó számításokat a delta módszer alkalmazva végeztük el: mindkét modell szimulációi esetén kiszámítottuk a paramétereket a 2021–2050, illetve a 2070–2099 időszakra, valamint egy múltbeli referencia időszakra (1971–2000), és a dolgozatban a paraméterekben bekövetkező változásokat mutatjuk be a modellszámhoz (a továbbiakban CCLM_hist, illetve RACMO_hist) viszonyítva.

Az 1971–2000 közötti időintervallumra elvégeztük a klímamodellek által kapott eredmények validációját is. Az erre vonatkozó statisztikai számításokat az RStudio programmal végeztük, az adatsorok közötti hasonlóság mértékének reprezentálására szolgáló Taylor-diagramot (*Taylor, 2001*) készítettünk. Referenciának a múltra vonatkozó elemzéshez is felhasznált homogenizált napi középhőmérsékleti adatsort választottuk, és ehhez hasonlítottuk a CCLM_hist, valamint a RACMO_hist által szimulált értékeket. A hóhullámos napok éves gyakoriságára vonatkozó statisztikát Box-whiskers diagram segítségével jelenítettük meg.

Az adatsorok rendszerezéséhez, a kritériumoknak megfelelő napok kigyűjtéséhez és a hóhullámok detektálásához a Fortran programnyelvet használtuk, az eredmények grafikus megjelenítését pedig a Microsoft Excel szoftver segítségével végeztük. A munka első lépéseként a szimulált hőmérsékleti adatsor értékeket átváltottuk °C-ra, valamint dátumot rendeltünk melléjük a megfelelő formátumban, a fájlok ezáltal alkalmassá váltak arra, hogy a mérésekre megírt hóhullám-detektáló program segítségével feldolgozhatóvá váljanak. A vizsgálatban hóhullámnak tekintettük azt a legalább 3 napig tartó időszakot, amelynek során a napi középhőmérséklet elérte vagy meghaladta a 25 °C-ot. Két hóhullámot abban az esetben tekintettünk különbözőnek, ha a középhőmérséklet legalább három napig 25 °C alatt maradt, vagy egy napig visszaesett 21 °C alá. Az intenzitás értékét a 25 °C feletti hőmérsékletösszeggel fejeztük ki.

6.1.1. A vizsgált állomások rövid éghajlati jellemzése

A hóhullámok elemzése előtt ebben az alfejezetben [6 – met.hu] alapján röviden jellemzem a vizsgálatban szereplő állomásokat éghajlati szempontból. Budapest átlagos évi középhőmérséklete 11,3 °C [6 – met.hu], amely 1901 óta több, mint 1 °C-ot emelkedett (*Tatai et al., 2021*). Átlagos évi csapadékösszege 516 mm, nyár eleji és késő őszi csapadékmaximummal. A szélirány gyakoriságának évi átlagát tekintve az ÉNY-i szél dominál.

Debrecen a legkeletibb fekvésű az öt kiválasztott város közül, itt az átlagos évi középhőmérséklet 10 °C, az átlagos évi csapadékösszeg pedig 540 mm, amelynek nagyobb része a nyári félévben hullik. Leggyakoribb a D-i és az ÉK-i szélirány.

Pécs esetében az átlagos évi középhőmérséklet 10,7 °C. 672 mm átlagos évi csapadékösszeg jellemzi, amely a legszárazabb január-márciusi időszakot kivéve egyenletesen oszlik el az év során. A napsütéses órák évi összege az országban itt az egyik legtöbb, 2080 óra. Mivel a város egy kelet-nyugati irányú völgyben fekszik – északon a Mecsek, délen a Villányi-hegység határolja –, ezért főleg a nyugatias, illetve a keleties szélirány a leggyakoribb.

A Dél-Alföldön fekvő Szeged 10,6 °C-os átlagos évi középhőmérséklettel és 513 mm éves csapadékösszeggel rendelkezik; júniusban majdnem háromszor több hull, mint az év első három hónapjában. Itt is magas a napsütéses órák száma: 2000 óra körül mozog az értéke egy évben. Budapesthez hasonlóan az ÉNY-i szélirány dominál.

Az általunk vizsgált állomások közül Szombathely található a legnyugatabbra, ahol 9,7 °C-os átlagos évi középhőmérséklet jellemző; ehhez 596 mm évi csapadékösszeg társul. Szélirányt tekintve az É-i és a D-i a meghatározó; a nyugatias szél kisebb gyakoriságának oka az Alpok hatása ([6 – met.hu], *Simon*, 2019).

Fontos megjegyezni, hogy a nagyvárosok és a kisebb települések jelentős mértékben módosítják a levegőkörnyezetük jellemzőit, kialakítva egy helyi éghajlatot, a városklímát. Az állapothatározók közül a hőmérséklet az, amely esetében leginkább észrevehető az eltérés (növekedés), amit városi hősziget-jelenségnek nevezünk (*Unger*, 2010). A városi hősziget (UHI¹⁴) jellemzése az intenzitásával történhet (*Bartholy et al.*, 2013c), ezt tanulmányozta például *Dezső et al.* (2005) tíz nagyobb hazai településen, köztük az általunk is vizsgált öt városban. Eredményeik szerint alapvetően a több lakossal rendelkező városokban erősebb ez a hatás, amit az orográfikus környezet befolyásolhat, csökkentve a hősziget intenzitását. Ebből következik, hogy többek között Szombathely, valamint Pécs esetében (amelyek legalább részben hegyvidéki területek) gyengébb az átlagos UHI intenzitás, de hasonló okokból Budapesten is a vártnál gyengébbnek adódott. Azt is megállapították, hogy a legintenzívebb hősziget-hatás minden vizsgált városban a nyári hónapokban (májustól augusztusig) következett be – ebben az időszakban a havi átlagos UHI intenzitás elérte az 5 °C-os értéket. Budapesten a városklíma hatások közül elsősorban a hősziget-hatás súlyosbítja a nyári hőhullámokat – a városkörnyéki zöldövezetekéhez képest

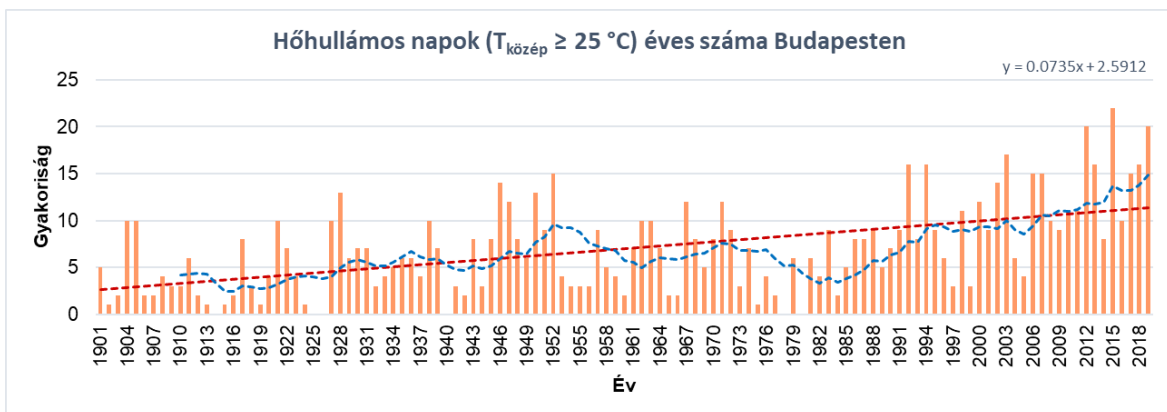
¹⁴ Urban Heat Island; városi hősziget

a belvárosi területek átlagos felszíni hőmérséklete akár 7 °C-kal magasabb lehet (*Tatai et al.*, 2021).

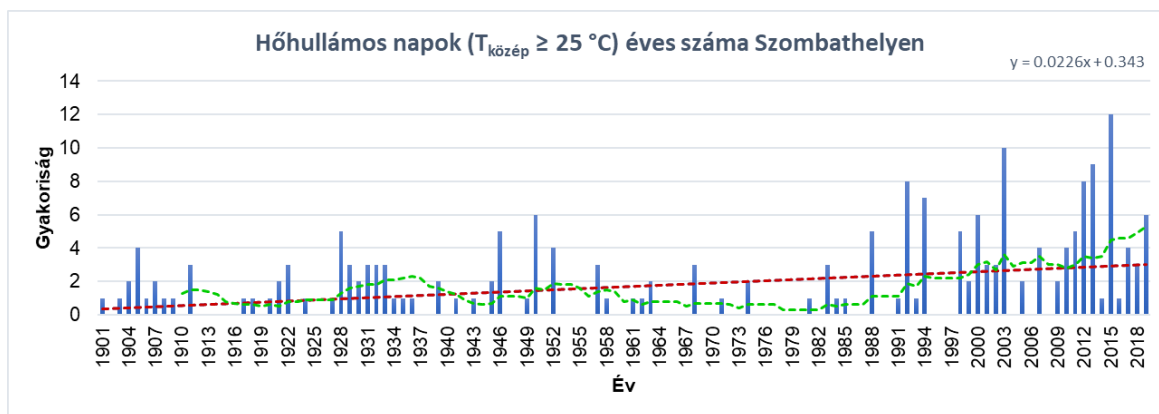
7. Eredmények

7.1. Hőhullámos napok

Első lépésként az 1901–2019 időszakban előforduló hőhullámos napok gyakoriságának vizsgálatát végeztük el. Hőhullámosnak tekintettük azokat a napokat, amikor a középhőmérséklet elérte vagy meghaladta a 25 °C-ot. Ezek éves száma egyértelműen emelkedett az időszak során mindegyik általunk vizsgált hazai városban. A jelenség leginkább Budapesten figyelhető meg, ahol a legnagyobb a lineáris trendfüggvény meredeksége (11. ábra). A változás mértéke Szombathely esetében a legcsekélyebb, ez látható a 12. ábrán; emellett itt fordult elő a legtöbb olyan év, amikor egyszer sem érte el a megszabott értéket a napi középhőmérséklet – ezt alátámasztja az is, hogy az öt város közül itt jellemző a legalacsonyabb átlagos évi középhőmérséklet (9,7 °C).



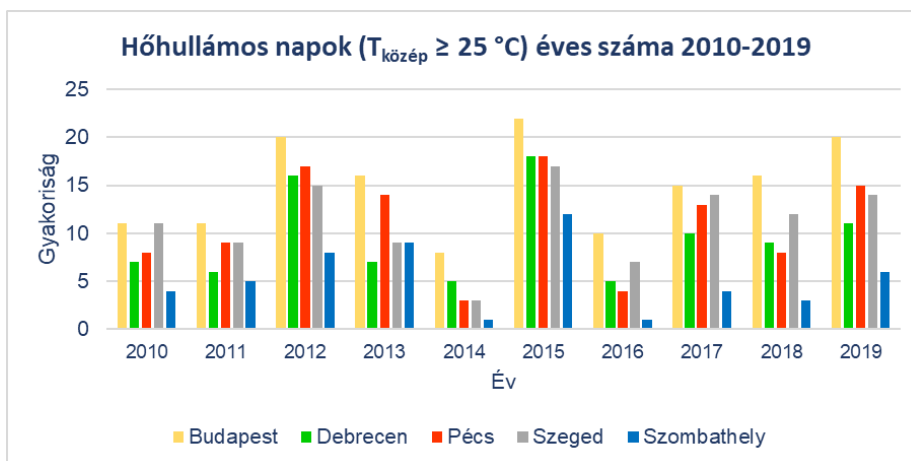
11. ábra: A 25 °C-ot elérő középhőmérsékletű napok évi száma Budapesten az 1901–2019 közötti időszakban. Bordó színnel látható az adatsorra illesztett lineáris trend, késsel pedig a 10 éves mozgóátlag van feltüntetve.



12. ábra: A 25 °C-ot elérő középhőmérsékletű napok évi száma Szombathelyen az 1901–2019 közötti időszakban. Piros színnel látható az adatsorra illesztett lineáris trend, zölddel pedig a 10 éves mozgóátlag van feltüntetve.

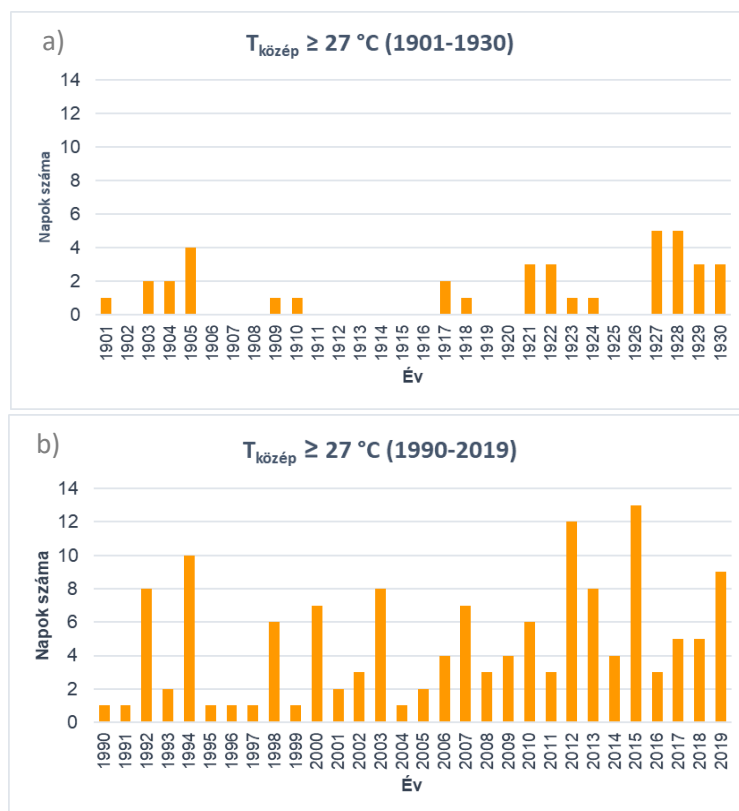
A 13. ábrán egy összesített diagramon külön jelenítettük meg az utolsó 10 évet (2010–2019), mivel a mérések kezdete óta ez a legmelegebb évtized. Megfigyelhető, hogy minden esetben Budapesten fordult elő a legtöbb hőhullámos nap – ehhez hozzájárul az előző fejezetben említett városi hősziget hatása is (pl. *Bottyán, 2009; Dezső et al., 2018*). Kiemelkedő a 2015-ös év (*Vincze, 2015*), amikor minden városban 10 fölé emelkedett azon napok száma, amikor a középhőmérséklet elérte vagy meghaladta a 25 °C-ot.

A hőhullámos napok átlagos éves számát tekintve elmondhatjuk, hogy a 20. század elején (1901–1930) az öt város közül Szegeden volt a legmagasabb (12 nap), de a változás mértéke az időszak végére itt volt a legkisebb: az 1990–2019 időszakra átlagosan 4 nappal több hőhullámos nap fordult elő. Ez a növekedés Budapesten bizonyult a legnagyobbknak, ahol átlagosan több, mint két héttel emelkedett azon napok éves száma, amikor a középhőmérséklet elérte a 25 °C-ot – ez összhangban áll az előbb bemutatott, lineáris trendre vonatkozó eredményekkel.



13. ábra: A hőhullámos napok ($T_{\text{közép}} \geq 25 \text{ °C}$) évi száma 2010–2019 között öt nagyobb hazai város adatai alapján.

Következő lépésként megvizsgáltuk a 27 °C -ot elérő középhőmérsékletű napok éves gyakoriságát is. Budapest példáján látható, hogy amíg a vizsgált időszak elején (1901–1930) ez ritkább volt, addig a vizsgált időszak végén (1990–2019) már minden évben előfordult, és a számuk is növekedett egy éven belül (14. ábra). A tendencia hasonló a többi város esetében is.



14. ábra: A 27 °C -ot elérő napi középhőmérsékletű napok éves gyakorisága az a) 1901–1930, illetve a b) 1990–2019 közötti időszakokban Budapesten.

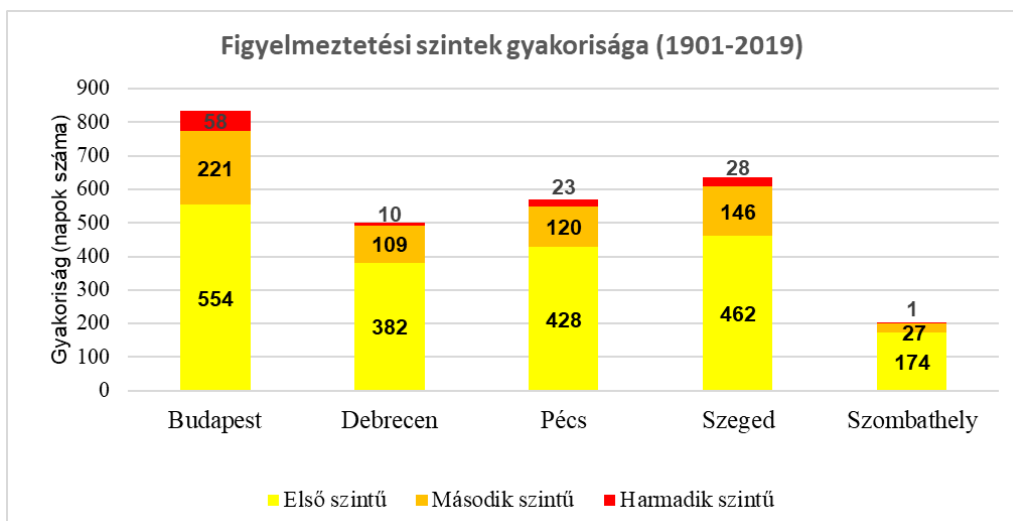
7.2. Figyelmeztetési fokozatok gyakorisága

Az Országos Meteorológiai Szolgálat által működtetett veszélyjelző rendszer fő célja az általános élet- és vagyónvédelem, a kritikus időjárási események bekövetkezésekor információ nyújtása a lakosság és a média számára egyaránt. Ennek részeként a hőségre ún. speciális figyelmeztetés keretében hívják fel a figyelmet, amelynek három veszélyességi szintjét különböztetik meg. A fokozatokhoz tartozó kritériumokat a 4. táblázat foglalja össze [7 – met.hu].

4. táblázat: A figyelmeztetés különböző szintjei és az azokhoz tartozó kritériumok hőség esetén (Forrás: [7 – met.hu]).

Veszélyességi szint	Leírás
Első szint	A napi középhőmérséklet elérheti vagy meghaladhatja a 25 °C-ot.
Második szint	A napi középhőmérséklet elérheti vagy meghaladhatja a 27 °C-ot.
Harmadik szint	A napi középhőmérséklet 29 °C fölé emelkedhet.

Kigyűjtöttük és megvizsgáltuk, hogy az 1901–2019 közötti időszakban milyen gyakran fordultak elő a különböző figyelmeztetési fokozatok a hőségre vonatkozóan az egyes városokban; erről látható egy összesítés a 15. ábrán. Legtöbbször Budapesten következett be mindhárom szintű figyelmeztetésnek megfelelő napi középhőmérsékleti érték, ezt Szeged, majd Pécs követi. A legritkábban Szombathelyen fordult elő harmadik veszélyességi szintű hőhullámos nap – itt mindössze egyszer emelkedett 29 °C fölé a napi középhőmérséklet a vizsgált időszak során.



15. ábra: A hőségre vonatkozó figyelmeztetés három veszélyességi szintjének gyakorisága 1901–2019 között az általunk vizsgált városokban.

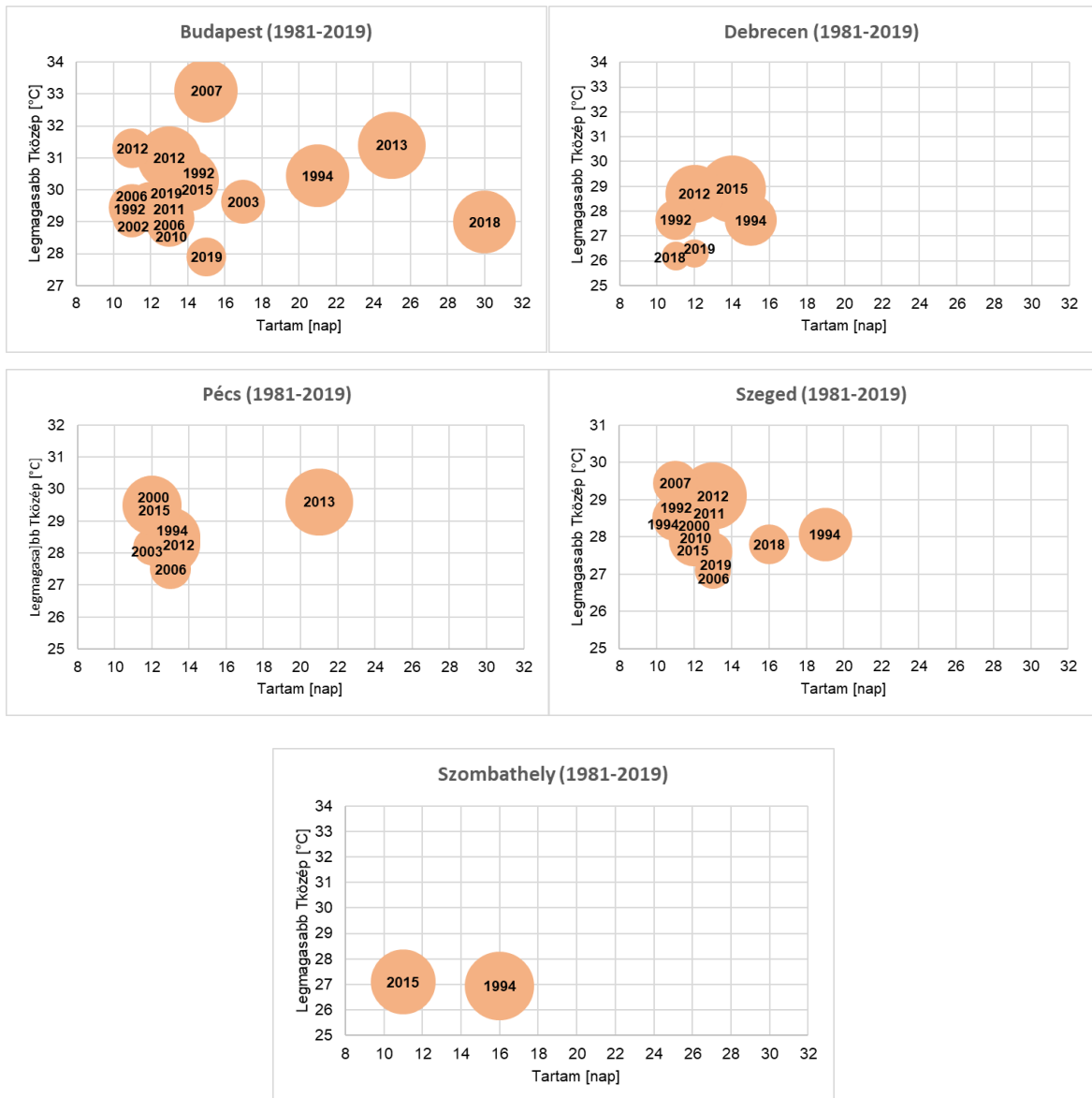
A hőségriasztást az országos tisztifőorvos adja ki az Országos Meteorológiai Szolgálat előrejelzései alapján, melynek szintén három fokozata van, ezeket az 1971–2000 időszakra vonatkozó budapesti halálozási, valamint meteorológiai adatainak elemzése által határozták meg (Bartholy *et al.*, 2013c). A szükséges kritériumok eltérnek az előbb bemutatott veszélyességi szintekhez képest, mivel itt azt is számításba veszik, hogy hány napig áll fenn a hőség. Emiatt előfordulhat, hogy a két figyelmeztetési rendszerben eltérő fokozat lép életbe az adott időjárási helyzetben. Az ÁNTSZ által alkalmazott hőségriasztás fokozatait az 5. táblázatban foglaltuk össze [8 – ec.europa.eu], [9 – antsz.hu].

5. táblázat: Az ÁNTSZ által alkalmazott hőségriasztás fokozatai és a hozzá tartozó kritériumok (Forrás: [9 – antsz.hu]).

Hőségriasztás fokozata	Leírás
1. fokozat	Az előrejelzés szerint a napi középhőmérséklet 1 napig meghaladja a 25 °C-ot.
2. fokozat	Az előrejelzés szerint a napi középhőmérséklet legalább 3 napig meghaladja a 25 °C-ot.
3. fokozat	Az előrejelzés szerint a napi középhőmérséklet legalább 3 napig meghaladja a 27 °C-ot.

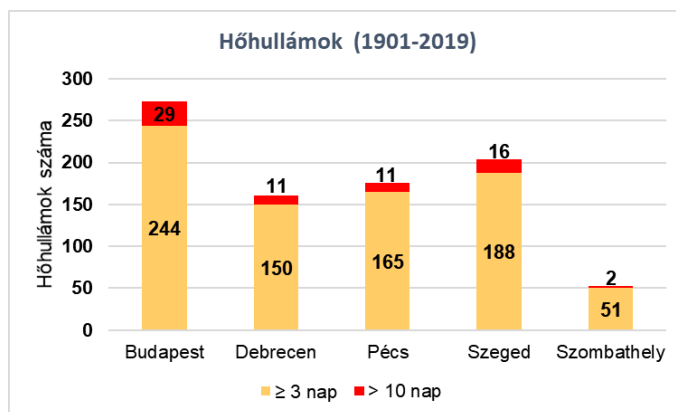
7.3. Hőhullámok az 1901–2019 időszakban

Hőhullámnak tekintettük azt az időszakot, amikor a napi középhőmérséklet legalább 3 napon keresztül elérte vagy meghaladta a 25 °C-ot. Két hőhullámot akkor számítottunk különbözőnek, ha a kettő között a napi középhőmérséklet visszaesett 21 °C alá, vagy legalább három napig 25 °C alatt maradt. Az intenzitást a 25 °C fölötti hőmérséklet-összeg adja meg. Az 1981–2019 közötti időszakra, homogenizált adatok alapján elkészített buborékdiagramokon (16. ábra) a 10 napnál hosszabb ideig tartó hőhullámokat jelenítettük meg. A legtöbb ilyen esemény Budapesten következett be, és az ábráról leolvasható, hogy a leghosszabb, 2018-as hőségperiódus 30 napig tartott (megdöntve a fővárosban a korábbi, 1994-es rekordot). A legintenzívebb hőségperiódus azonban 2013-ban alakult ki, amelyhez 55,8 °C hőösszeg kapcsolódik. Érdeemes megemlíteni még a 2007-es hőhullámot is – ennek során regisztrálták a legmagasabb napi középhőmérsékleti értéket (33,1 °C). Szegeden 12, Pécsen 7, Debrecenben pedig 6 alkalommal alakult ki olyan hőhullám a vizsgált időszakban, amely 10 napnál tovább tartott. Ez a legkevesebb alkalommal Szombathelyen következett be, csupán kétszer. 2018-ban a budapesti rekordhoz képest rövidebb, 16 napig tartó hőségperiódust regisztrálhattak Szegeden, itt viszont nem ez számít a leghosszabb hőhullámnak, hanem az 1994-es, aminek időtartama 19 nap volt. Debrecenben szintén 1994-ben következett be a legtovább tartó hőségperiódus, amikor 15 napig teljesültek a korábban megadott kritériumok. Pécs és Szombathely esetében nem tudott egyetlen hosszabb hőhullám kialakulni: időtartama nem érte el a 10 napot, így a 2018-as év nem került fel a két városra vonatkozó diagramra.



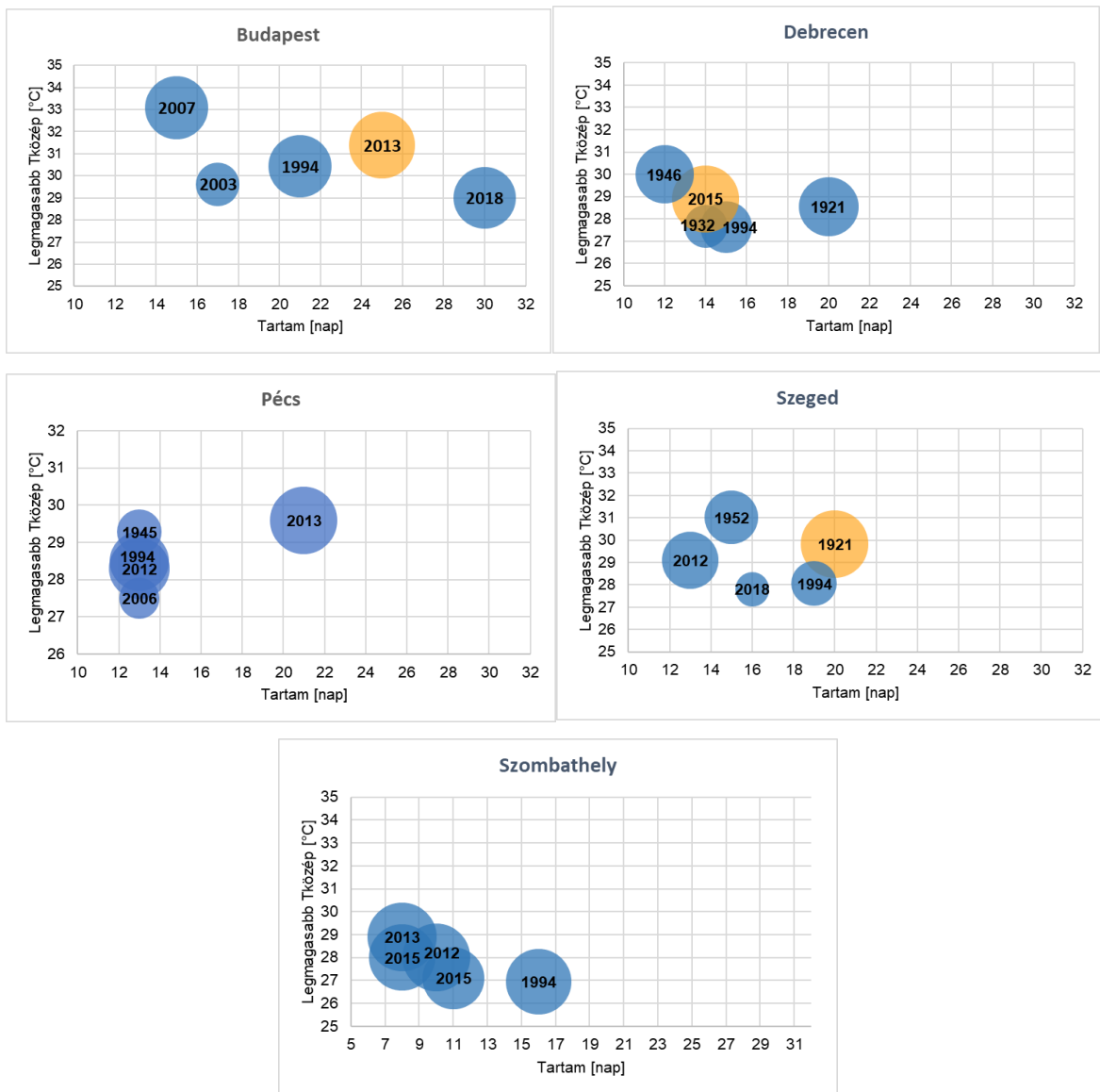
16. ábra: A Magyarországon előforduló, 10 napnál hosszabb ideig tartó hőhullámok az 1981–2019 közötti időszakban. Az x-tengelyről leolvasható a hőhullám időtartama napokban kifejezve, az y-tengelyen az előforduló legmagasabb napi középhőmérséklet szerepel, a buborékok nagysága pedig arányos az intenzitással (a 25 °C feletti hőösszeggel). A jobb átláthatóság miatt az egyes városok esetében eltérő az y-tengelyek beosztása.

A módszertani fejezetben bemutatott Fortran program lehetővé tette a teljes, 1901-től 2019-ig rendelkezésre álló adatsor elemzését. A 17. ábrán látható összegezve, hogy mennyi hőhullám következett be az időszak alatt az egyes városokban, külön színnel kiemelve a 10 napnál hosszabb hőségperiódusok számát. A legtöbb Budapesten és Szegeden fordult elő, ezzel szemben Szombathelyen csupán kettő olyan hőhullámot detektáltunk, ami 10 napnál tovább tartott: az egyik 1994-ben (16 nap), a másik 2015-ben (11 nap) alakult ki.



17. ábra: Az 1901–2019 között bekövetkezett, legalább 3 napig tartó hőhullámok száma az általunk vizsgált városokban. Ezek közül piros színnel kiemeltük a 10 napnál hosszabb hőségperiódusok számát.

Buborékdiagramon megjelenítettük a vizsgált időszakban előforduló öt leghosszabb hőhullámot minden városra vonatkozóan (18. ábra). Budapesten 2013-ban következett be a legintenzívebb hőségperiódus, ami 25 napig tartott. Meg kell jegyezni, hogy a szombathelyi és a pécsi állomáson a legintenzívebb hőhullám 2007-ben alakult ki, aminek időtartama 7 nap, illetve 10 nap volt, ezért nem került be a leghosszabb hőhullámok közé, így a diagramokon sem jelenik meg. Debrecenben az öt leghosszabb hőhullám közül három az időszak elején következett be (1921, 1932, 1946). Szegeden a legintenzívebb és egyben a leghosszabb hőségperiódus 1921-ben alakult ki.

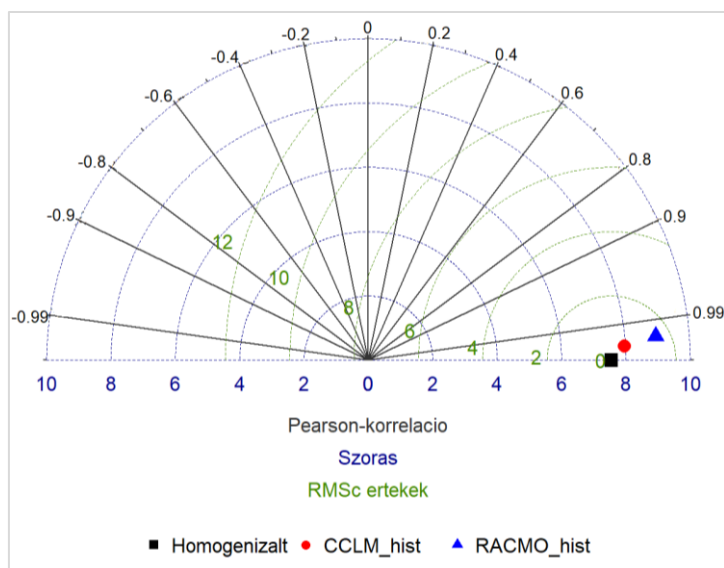


18. ábra: Az 1901–2019 időszakban előfordult öt leghosszabb hóhullám az egyes városokban. Narancssárgával látszik kijelölve az időszakban bekövetkezett legintenzívebb (legnagyobb 25 °C feletti hőösszeggel rendelkező) hőségperiódus. Láthatjuk, hogy Szombathelyen és Pécsen a legintenzívebbnek bizonyult hóhullám nem került be az öt leghosszabb közé. (Pécs esetében a többihez képest eltérő az y-tengely beosztása, Szombathely esetében pedig az x-tengely beosztása az eredmények jobb átláthatósága miatt.)

7.4. Az 1971–2000 időszak validációja

A 21. század közepére, illetve végére irányuló vizsgálatokhoz referenciaként kijelölt 1971–2000 időszakra elvégeztem a modellezett és a mért 30-éves átlagos havi középhőmérsékletnek, valamint a hóhullámos napok 30-éves átlagos éves gyakoriságának validációját. A CCLM és a RACMO regionális klímamodellek Budapestre vonatkozó napi

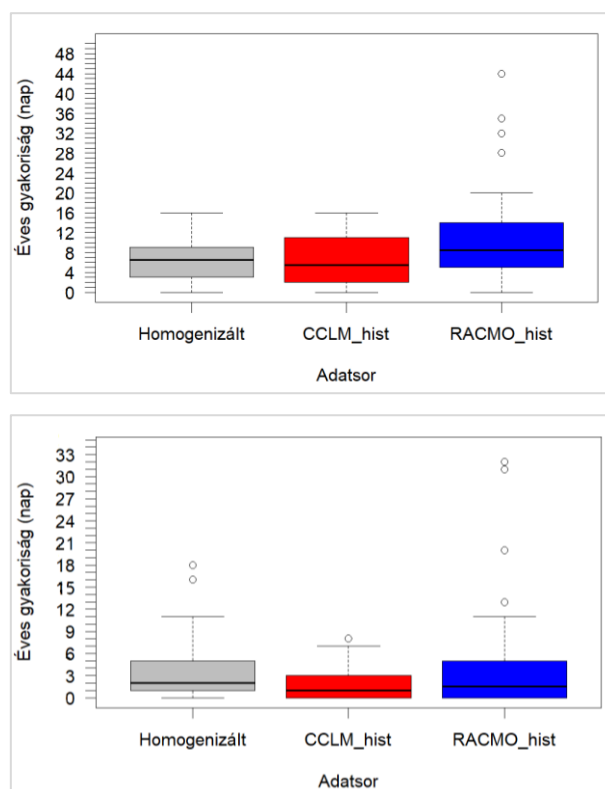
középhőmérsékleti eredményeit vettem össze a homogenizált adatsorral, amelyek között a hasonlóság mértékének megállapítására Taylor-diagramot készítettem. A diagramon három alapstatisztika jelenik meg: a Pearson-féle korrelációs együttható, az átlagos négyzetes hiba centrált értéke, és a korrigálatlan empirikus szórás. Fekete négyzet jelöli a mérésekből álló adatsort, ezzel hasonlítjuk össze a két modellszimulációt – minél közelebb helyezkedik el a jelölő a referenciának választott négyzethez, az adott klímamodell annál jobban közelítette a valóságot. A 19. ábrán látható a 30-éves átlagos havi középhőmérsékleti adatsorok között számított statisztika. Leolvashatjuk, hogy a szimuláció és a mérés között a Pearson-féle korrelációs együttható mindkét klímamodell esetén 0,99 fölötti értéket vesz fel, a két klímamodell teljesítménye hasonlóan jónak bizonyult. A centralizált átlagos négyzetes hiba értéke rendre 0,59 (CCLM_hist) illetve 1,56 (RACMO_hist). Az átlagos nyári középhőmérséklet a vizsgált időszakban a homogenizált adatok alapján 21,1 °C volt, míg a CCLM_hist esetében 19,5 °C-nak, a RACMO_hist esetében pedig 20,8 °C-nak adódott.



19. ábra: A CCLM és a RACMO regionális éghajlati modellek Budapestre számított, 30-éves átlagos havi középhőmérsékletére vonatkozó modellszimulációknak a homogenizált adatsorral történő összehasonlítására szolgáló Taylor-diagram. A validáció az 1971–2000 időszakra történt.

A hóhullámos napok éves számának 30-éves átlagára vonatkozóan megvizsgáltuk a méréshez viszonyított átlagos hibát, ami a CCLM_hist esetén kisebbnek bizonyult (0,5 nap), míg a RACMO_hist átlagos hibájára nagyobb értéket kaptunk (5,7 nap). A legalább 27 °C-os középhőmérsékletű napok 30-éves átlagos éves gyakoriságára számított átlagos hiba

abszolútértéke hasonlóan adódott a CCLM_hist és a RACMO_hist esetén (1,87 nap, illetve 1,23 nap). A 25 °C-ot, illetve a 27 °C-ot elérő napok éves összegére jellemző statisztikát Box-whiskers diagramon jelenítettük meg (20. ábra). A téglalap alsó és felső lapja jelöli a 25. illetve a 75. percentilis értéket (minél inkább elnyúlt ez a téglalap, annál nagyobb az adatsor változékonysága), a mediánt pedig a téglalapban lévő vízszintes vonal adja meg. A téglalapon kívül eső vízszintes vonalak mutatják az adatsor minimumát és a maximumát, a körök kiugró (outlier) értékeket jelölnék. A 25 °C-ot elérő középhőmérsékletű napokat tekintve a két modell változékonysága hasonló, és a CCLM_hist rendelkezik az alacsonyabb medián értékkel. A legalább 27 °C-os középhőmérsékletű napok éves gyakoriságára vonatkozóan szintén a CCLM_hist esetén a legkisebb a medián, és ez bizonyult a legkevésbé változékonynak is. A RACMO_hist adatai között több kiugró értéket is detektáltunk. Látszik, hogy a két éghajlati modell szimulációja eltér a mért, homogenizált adatoktól, emiatt a jövőre vonatkozó eredményeket nem a valós értékekkel, hanem az adott modellmúlttal hasonlítom össze a következő fejezetben.

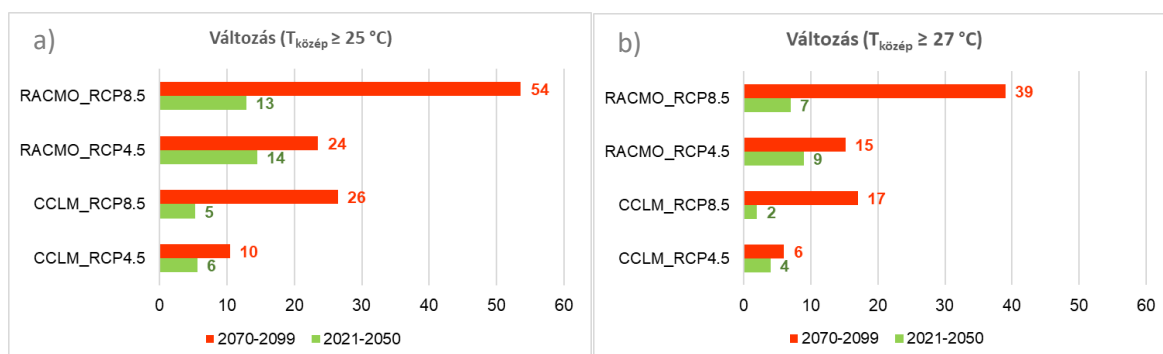


20. ábra: A CCLM és a RACMO regionális éghajlati modellek, valamint a homogenizált adatok alapján Budapestre számított, legalább 25 °C középhőmérsékletű napok (fent), illetve legalább 27 °C középhőmérsékletű napok (lent) éves gyakoriságára vonatkozó Box-whiskers-diagramok. A validáció az 1971–2000 időszakra történt.

7.5. Hőhullámos napok és hőhullámok előfordulása a jövőben

Elsőként a hőhullámos napok ($T_{\text{közép}} \geq 25 \text{ °C}$) és a legalább 27 °C -os középhőmérsékletű napok jövőbeli előfordulási gyakoriságának a modellsimulációkhoz viszonyított változását vizsgáltuk – az eredményeket összesítve a 21. ábrán jelenítettük meg. A CCLM_hist szerint évente átlagosan 7 alkalommal, a RACMO_hist szerint évente átlagosan 12 alkalommal érte el a napi középhőmérséklet a 25 °C -ot az 1971–2000-es időszakban, ehhez képest a 21. század közepére ennek kétszerese következhet be az optimista és a pesszimista forgatókönyv mellett egyaránt. Az időszak végén nagyobb az eltérés a scenáriók között: az RCP4.5 szerint 10–24-gyel, az RCP8.5 szerint 26–54-gyel több hőhullámos nap várható évente. A RACMO a múltbeli időszakban és a jövőben egyaránt több hőhullámos nappal számol a másik klímamodellhez viszonyítva.

A legalább 27 °C -os középhőmérsékletű napok átlagos éves száma a 2021–2050-es időszakra 4–9 nappal növekedhet az RCP4.5 forgatókönyv feltételezése mellett, míg a pesszimista scenárió ennél valamivel kisebb, 2–7 napos növekedést valószínűsít a referencia időszakban jellemző 2–5 naphoz képest. A 21. század végén már ebben az esetben is jobban elkülönül a két forgatókönyv: az optimista scenárió mellett 6–15 nappal, míg az RCP8.5 szerint évente 17–39 alkalommal több olyan napot szimulálnak a modellek, amikor a középhőmérséklet eléri a 27 °C -ot.



21. ábra: Azon napok átlagos éves számának növekedése a CCLM és a RACMO modellsimulációk szerint, amikor a) a napi középhőmérséklet eléri vagy meghaladja a 25 °C -ot, b) a napi középhőmérséklet eléri vagy meghaladja a 27 °C -ot. Összehasonlítottuk a modellsimulációk (1971–2000) eredményeit a 21. század közepével (2021–2050), illetve végével (2070–2099). Mindkét klímamodell két-két scenárió (RCP4.5, RCP8.5) feltételezése mellett lett lefuttatva.

A hóhullámok előfordulásának gyakorisága a jövőben mindkét modell szerint növekedni fog a referencia időszakhoz viszonyítva: a CCLM szerint ez kisebb mértékben fog bekövetkezni, míg a RACMO több hőségperiódust valószínűsít a modellmúltban és a vizsgált jövőbeli időintervallumokban egyaránt. A különböző hóhullám-karakteristikákra is hasonló tendencia jellemző. A 21. század közepére az RCP8.5 forgatókönyv mindkét regionális klímamodell mellett kevesebb, illetve átlagosan kisebb intenzitású hóhullám kialakulásával számol, mint az RCP4.5, de a 2070–2099 időszakban már az RCP8.5 szerint futtatott modellszimulációk adnak magasabb értékeket eredményül a CCLM és a RACMO esetén egyaránt. A 21. század utolsó harminc évében a CCLM-RCP4.5 szimulációján kívül mindegyik modellfutás alapján 60–81 hóhullámmal több fog kialakulni az 1971–2000-es időszakhoz viszonyítva, melyek tartama átlagosan 4–9 nappal hosszabb lehet (a referencia időszakban jellemző 5–7 naphoz képest).

Az egy éven belül előforduló hőségperiódusok átlagos hossza növekedni fog a jövőben: a CCLM szerint a modellmúlthoz képest a 21. század közepén 1–2 nappal, a 21. század végén pedig 2–5 nappal tarthatnak majd tovább átlagosan a hóhullámok. A RACMO ettől nagyobb mértékű növekedést vár a jövőben: míg a referencia időszakban egy éven belül átlagosan 5 napos időtartam volt jellemző a klímamodell szerint, addig a 2021–2050 időszakban ez az érték a duplája lehet. A 2070 és 2099 közötti időintervallumra jelentősebb az eltérés a két forgatókönyv esetén: a RACMO-RCP4.5 alapján a hóhullámok átlagosan 5 nappal, a RACMO-RCP8.5 alapján átlagosan 13–14 nappal tarthatnak majd tovább. A hóhullámos periódusok jellemző paramétereire vonatkozó főbb statisztikai értékeket láthatjuk az *6. táblázat*ban a CCLM modellszimulációi alapján, a RACMO által kapott eredményeket pedig a *7. táblázat* foglalja össze. A CCLM-RCP4.5 több, kisebb intenzitású hóhullám bekövetkezésével számol a 21. század közepén, mint a CCLM-RCP8.5, utóbbi esetében viszont nagyobb a szórás az időtartamot tekintve. A referencia időszakhoz képest mindkét CCLM modellszimuláció szerint egyértelműen nagyobb számú, intenzívebb hóhullám előfordulása várható. A RACMO modell már 1971–2000 között az esemény gyakoribb bekövetkezését jelezte, melyek paramétereit magasabb szórás értékekkel rendelkeznek a CCLM_hist-hez képest.

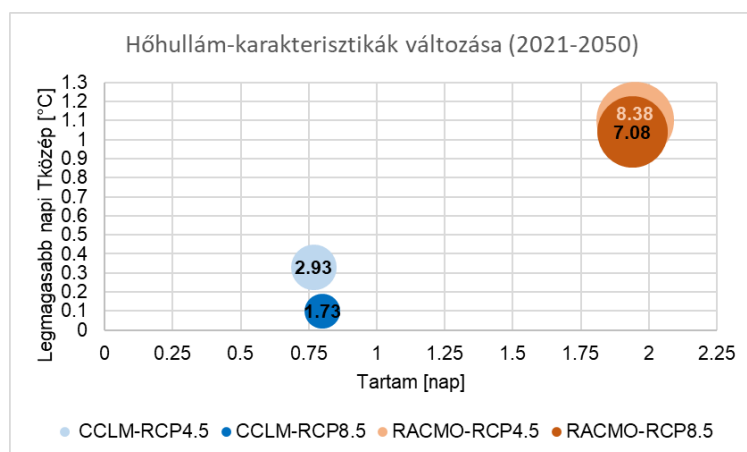
6. táblázat: A hóhullámos periódusokat jellemző paraméterek (tartam, intenzitás, a hóhullám során bekövetkező legmagasabb napi középhőmérséklet) átlagos értékének és statisztikai mutatóinak változása a CCLM regionális klímamodell szimulációi alapján a 21. század közepére, valamint végére (referencia időszak: 1971–2000).

	2021-2050				2070-2099			
		Hóhullám hossza				Hóhullám hossza		
	Darab	Átlag	Medián	Szórás	Darab	Átlag	Medián	Szórás
CCLM-RCP4.5	55	6,35	5	4,48	77	6,38	5	5,23
CCLM-RCP8.5	50	6,38	5	5,02	112	9	7	7,45
CCLM-hist	38	5,58	5	2,33	38	5,58	5	2,33
		Hóhullám intenzitása				Hóhullám intenzitása		
		Átlag	Medián	Szórás		Átlag	Medián	Szórás
	CCLM-RCP4.5	13,86	8,03	15,19		14,68	8,13	18,34
CCLM-RCP8.5	12,66	6,45	18,63		24,45	13,45	29,28	
CCLM-hist	10,93	8,49	7,93		10,93	8,49	7,93	
	Legmagasabb napi középhőmérséklet							
		Átlag	Medián	Szórás		Átlag	Medián	Szórás
	CCLM-RCP4.5	28,60	28,12	1,81		28,61	28,30	2,15
CCLM-RCP8.5	28,37	27,83	2,16		29,68	29,31	2,59	
CCLM-hist	28,27	27,82	1,67		28,27	27,82	1,67	

7. táblázat: A hóhullámos periódusokat jellemző paraméterek (tartam, intenzitás, a hóhullám során bekövetkező legmagasabb napi középhőmérséklet) átlagos értékének és statisztikai mutatóinak változása a RACMO regionális klímamodell szimulációi alapján a 21. század közepére, valamint végére (referencia időszak: 1971–2000).

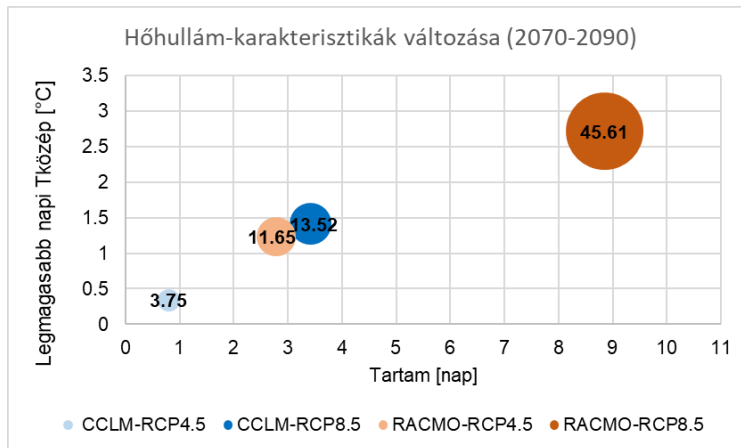
	2021-2050				2070-2099			
		Hóhullám hossza				Hóhullám hossza		
	Darab	Átlag	Medián	Szórás	Darab	Átlag	Medián	Szórás
RACMO-RCP4.5	88	9,33	7	8,79	107	10,16	6	8,94
RACMO-RCP8.5	77	9,32	7	6,53	128	16,23	9,5	15,66
RACMO-hist	47	7,38	5	6,22	47	7,38	5	6,22
		Hóhullám intenzitása				Hóhullám intenzitása		
		Átlag	Medián	Szórás		Átlag	Medián	Szórás
	RACMO-RCP4.5	22,73	10,97	32,33		26	11,60	32,36
RACMO-RCP8.5	21,43	10,89	24,94		59,96	25,76	86,20	
RACMO-hist		14,35	6,17	22,90		14,35	6,17	22,90
	Legmagasabb napi középhőmérséklet							
		Átlag	Medián	Szórás		Átlag	Medián	Szórás
	RACMO-RCP4.5	29	28,50	2,23		29,13	28,82	2,23
RACMO-RCP8.5	28,94	28,55	1,92		30,61	29,93	3,43	
RACMO-hist		27,90	27,66	1,70		27,90	27,66	1,70

A hőhullámok különböző karakterisztikáira vonatkozó, a modellmúlthoz viszonyított változásokat szintén buborékdiagram formájában jelenítettük meg a 2021–2050-es időszakra (22. ábra), valamint a 2070–2099-es időintervallumra (23. ábra). Az x-tengelyen a hőhullám átlagos hosszának növekedése látható napokban kifejezve, az y-tengelyen szerepel a hőhullám során előforduló átlagos legmagasabb napi középhőmérséklet változása, a buborékok mérete pedig arányos a hőségperiódusok intenzitásának átlagos növekedésével. A 21. század közepére az egyes modellek szimulációja kevésbé különül el egymástól a két forgatókönyv feltételezése mellett; ebben az esetben jól látszik a két klímamodell közötti különbség. A CCLM a hőhullámok intenzitásának 2–3 °C-os növekedését valószínűsíti, míg a RACMO esetén ez az érték 7–8 °C. Az előforduló átlagos legmagasabb napi középhőmérséklet 0,1–1,1 °C-kal emelkedhet a 21. század közepére.



22. ábra: A hőhullámok karakterisztikáinak változása a 2021–2050-es időszakra az adott modellmúlthoz viszonyítva (referencia időszak: 1971–2000). A buborékok mérete az intenzitás változásának nagyságát jelöli.

A 21. század végére a két scenárió már jól elkülönül az egyes modellek esetében. Az RCP4.5 forgatókönyv 3,75–11,65 °C-os intenzitás-növekedést valószínűsít, ezzel szemben az RCP8.5 szerint a hőhullámok intenzitása 13,5–45,6 °C-kal lehet nagyobb. Az előforduló legmagasabb napi középhőmérséklet emelkedésének mértékében kisebb az eltérés: az optimista scenárió feltételezése mellett 0,34–1,23 °C-kal, a pesszimista forgatókönyv szerint 1,4–2,7 °C-kal magasabb napi középhőmérséklet fordulhat elő az 1971–2000 időszak átlagához képest.



23. ábra: A hőhullámok karakterisztikáinak változása a 2070–2099-es időszakra az adott modellműlthoz viszonyítva (referencia időszak: 1971–2000). A buborékok mérete az intenzitás változásának nagyságát jelöli.

8. Összefoglalás

Az utóbbi években gyakran hallunk különböző hőmérsékleti szélsőségekről – ide tartoznak a nyári hőhullámok is, amelyek az éghajlatváltozás hatására a közeljövőben egyre gyakoribbá válhatnak világszerte és Magyarországon egyaránt. Az elmúlt évtizedekben folyamatosan nőtt a hőhullámos napok évi száma (*Seneviratne et al., 2014*). Kizárólagos definíció nem létezik a hőhullámos periódusok leírására, de általában olyan időszakra asszociálunk, amikor a hőmérséklet több, egymást követő napon magasabb az átlagosnál. A WMO meghatározása szerint hőhullám esetén a napi maximum-hőmérséklet több, mint 5 °C-kal meghaladja az adott napra jellemző, 1961–1990 referencia időszakból számított átlagos értéket, legalább 5 egymást követő napon keresztül (*Pongrácz et al., 2013*). A definiálásához szükséges kritériumok régióként eltérhetnek, hiszen előfordulhat, hogy ami egy területen alkalmazható, az eltérő körülmények között már nem lenne releváns. Ezeket a küszöbértékeket a vizsgált térség földrajzi helyzetének és éghajlati jellemzőinek figyelembevételével jelölik ki. *Ouzeau et al. (2016)* kidolgozott egy új eljárást a hőhullámok detektálására, amely más módszerekhez képest összetettebb – a hőhullámos periódusok meghatározásához több kritériumot használ, azokat különböző karakterisztikákkal (időtartam, intenzitás, előforduló legmagasabb napi középhőmérséklet) jellemzi. A módszert alapul véve az Országos Meteorológiai Szolgálat is végzett már hőhullám-detektálást egy rövidebb időszakra. Ebben a dolgozatban is ezt a módszert vettük alapul a hőhullám meghatározásához, a kritériumokat Magyarországra optimalizálva.

Diplomamunkám első részében öt nagyobb hazai város (Budapest, Debrecen, Pécs, Szeged, Szombathely) állomásainak homogenizált napi középhőmérsékleti adatsorait elemeztük az 1901–2019 közötti időszakra vonatkozóan. A 25 °C-ot elérő vagy meghaladó középhőmérsékletű napok évi számának változására a vizsgált városok mindegyikében pozitív trend jellemző – Budapesten nőtt a legnagyobb mértékben. Microsoft Excel segítségével kiszűrtük a hőhullámos periódusokat 1981-től kezdődően minden városra vonatkozóan, és a 10 napnál hosszabbakat buborékdiagramon jelenítettük meg. A hőhullámok napi adatsorokból történő detektálására, karakterisztikáinak számítására elkészítettünk egy számítógépes programot, melynek segítségével a munka gyorsabban elvégezhetővé vált; ez lehetővé tette a hőhullámok kiszűrését a teljes (1901–2019) időszakból. Eredményeink szerint Magyarországon az eddigi leghosszabb hőségperiódus 2018-ban következett be, amely Budapesten 30 napig, Szegeden 16 napig tartott. A

legmagasabb középhőmérséklet (33,1 °C) a fővárosban azonban a 2007-es hőhullám idején következett be – ennek során mérték a máig érvényes országos melegrekord értékét is (41,9 °C, Kiskunhalas, 2007. július 20.).

Diplomamunkám második részében a hőhullámos napok éves gyakoriságára, valamint a hőhullámos periódusokra jellemző karakterisztikák jövőbeli változására irányuló vizsgálatot végeztünk a CCLM és a RACMO regionális klímamodellek Budapestre vonatkozó szimulációi alapján, az RCP4.5 és az RCP8.5 scenáriók feltételezése mellett. A számításhoz felhasználtuk az előbb említett számítógépes programot is. A dolgozat első felében elemzett homogenizált napi adatok segítségével elvégeztük a modellszimulációk validációját az 1971–2000 közötti időszakra. Mivel a hőhullámos napok éves számát tekintve a két éghajlati modell szimulációja eltért a mért, homogenizált adatokhoz képest, emiatt a jövőre vonatkozó eredményeket nem a valós értékekkel, hanem az adott modellmúlttal hasonlítottuk össze – a delta módszert alkalmazva meghatároztuk a különböző paraméterekben bekövetkezett változás mértékét. A hőhullámok előfordulásának gyakorisága az 1971–2000 referencia időszakhoz képest a jövőben mindkét modell szerint növekedni fog, de eredményeik az optimista (RCP4.5) és a pesszimista (RCP8.5) forgatókönyvek feltételezése mellett jól elkülönülnek: a CCLM szerint ez kisebb mértékben fog bekövetkezni, míg a RACMO több hőségperiódust valószínűsít a modellmúltban és a vizsgált jövőbeli időintervallumokban egyaránt. A különböző hőhullám-karakterisztikákra is hasonló tendencia jellemző.

A jövőben tehát jóval gyakoribbá válhatnak az olyan hőhullámok, mint amelyek idáig felléptek Európában. Ezeknek a jelenségeknek számos káros hatása van: megterhelik az emberi szervezetet, veszélyesek az ökoszisztéma és a gazdaság számára. Nagyon fontos tehát a felkészülés és az alkalmazkodás, valamint a klímaváltozás és a globális felmelegedés megfékezésére vonatkozó törekvés.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Lakatos Mónikának, és belső konzulensemnek, Dr. Kis Annának a konzultációs alkalmakért, a szakmai tanácsokért és az észrevételekért, amelyekkel segítették munkámat a dolgozat megírása során.

Köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálatnak, hogy rendelkezésemre bocsátotta a homogenizált napi adatsorokat. Zsebeházi Gabriellának és Dr. Szépszó Gabriellának külön köszönöm a regionális modellszimulációk eredményeit, valamint a jövőre vonatkozó vizsgálat elvégzéséhez nyújtott tanácsaikat és javaslataikat.

Végül, de nem utolsósorban szeretném megköszönni a páromnak, Bencének, a barátaimnak és édesanyámnak, hogy végig mellettem álltak és biztattak ebben az időszakban.

Irodalomjegyzék

- Bador, M., Terray, L., Boé, J., Somot, S., Alias, A., Gibelin, A-L., Dubuisson, B., 2017: Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074025
- Barcza, Z., Bartholy, J., Bihari, Z., Lakatos, M., Mészáros, R., Pieczka, I., Pongrácz, R., Práger, T., Radics, K., 2013: Jövöbeli forgatókönyvek. In: Klímaváltozás (Szerk.: Bartholy, J., Pongrácz, R.). Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 180 p.
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., García-Herrera, R., 2011: The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. *Science*, 332(6026), 220–224.
- Bartholy, J., Pongrácz, R., Bartha, E. B., Pieczka, I., 2013a: Past and future heat waves in Central/Eastern Europe – case study for Hungary using PRECIS simulations. 93rd Annual Meeting of the American Meteorological Soc./25th Conf. on Climate variability and change. Austin, TX. Paper 130, 6p.
- Bartholy, J., Barcza, Z., Kern, A., Mészáros, R., Pieczka, I., Pongrácz, R., Torma, Cs. Zs., 2013b: Extrém események várható változása regionális klímamodell-eredmények alapján. K-78125 számú OTKA pályázat, Kutatási zárójelentés 2009–2013. <https://www.otkapalyazat.hu/download.php?type=zarobeszamolo&projektid=78125>
- Bartholy, J., Dezső, Zs., Gelybó, Gy., Kern, A., Pongrácz, R., Radics, K., 2013c: A városi hősziget. In: Alkalmazott és városklimatológia (Szerk.: Bartholy, J., Pongrácz, R.). Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 174 p.
- Bartoszek, K., Krzyżewska, A., 2017: The atmospheric circulation conditions of the occurrence of heatwaves in Lublin, southeast Poland. *Weather*, 72(6), 176–180. DOI:10.1002/wea.2975
- Berg, A., Lintner, B. R., Findell, K. L., Malyshev, S., Loikith, P. C., Gentine, P., 2014: Impact of Soil-Moisture – Atmosphere Interactions on Surface Temperature Distribution. *Journal of Climate*, 27(21), 7976–7993. DOI:10.1175/JCLI-D-13-00591.1
- Bihari, Z., Hoffmann, L., Lakatos, M., Marton, A., Németh, Á., Sábitz J., Szépszó, G., Zsebeházi, G., Vincze, E., Wantuchné, D. I., Páldy, A., Bobvos, J., Málnási, T., Rudnai, T., Bódi-Koós, N., Czikoráné, B. E., Dr. Bognár, B., Dr. Sági, G., Horváth, A., Kovács, A., Unger, J., 2015: A klímaváltozás okozta sérülékenység vizsgálata, különös tekintettel a turizmusra és a kritikus infrastruktúrákra (KRITÉR). Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 36 p.
- Bottyán, Zs., 2009: A városi hősziget, mint a települések lokális klímájának markáns sajátossága. *Hadmérnök*, 4(2), 144–156.
- Brugnara, Y., Auchmann, R., Brönnimann, S., Bozzo, A., Berro, D. C., Mercuri, L., 2016: Trends of mean and extreme temperature indices since 1874 at low-elevation sites in the southern Alps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(7), 3304–3325. DOI:10.1002/2015JD024582
- Cardoso, R. M., Soares, P. M. M., Lima, D. C. A., Miranda, P. M. A., 2019: Mean and extreme temperatures in a warming climate: EURO CORDEX and WRF regional climate high-resolution projections for Portugal. *Climate Dynamics*, 52, 129–157.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., Woodward, S., 2011: Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4, 1051–1075. DOI:10.5194/gmd-4-1051-2011
- Coppola, E., Nogherotto, R., Ciarlo, J. M., Giorgi, F., van Meijgaard, E., Kadyrov, N., Iles, C., Corre, L., Sandstad, M., Somot, S., Nabat, P., Vautard, R., Levavasseur, G., Schwingshackl, C., Sillmann, J., Kjellström, E., Nikulin, G., Aalbers, E., Lenderink, G., Christensen, O. B., Boberg, F., Sorland, S. L., Demory, M-E., Bülow, K., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V.,

- 2020: Assessment of the European Climate Projection as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4). DOI:10.1029/2019JD032344.
- De Bono, A., Peduzzi, P., Kluser, S., Giuilani, G., 2004: Impacts of Summer 2003 Heat Wave in Europe. *UNEP/DEWA/GRID-Europe Environmental Alert Bulletin*, 2, 1–4.
- Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J., Wanner, H., 2007: Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical research*, 112, D15103, DOI:10.1029/2007JD008510
- Dezső, Zs., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás*, 109(4), 217–232.
- Dezső, Zs., Rumpler, D., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2018: Felszínhőmérsékleti mérések Budapest XI. kerületében. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 30, 43–50. DOI:10.31852/EMF.30.2018.043.050
- Díaz, J., Jordán, A., García, R., López, C., Alberdi, J. C., Hernández, E., Otero, A., 2002: Heat waves in Madrid 1986–1997: effects on the health of the elderly. *Int Arch Occup Environ Health*, 75, 163–170. DOI:10.1007/s00420-001-0290-4
- Feng, M., Xing, Y., Yang, J., Peng, J., 2020: Unprecedented Europe heat in June–July 2019: Risk in the historical and future context. *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087809. DOI:10.1029/2020GL087809
- Fischer, E. M., Schär, C., 2010: Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3, 398–403.
- Fouillet, A., Rey, G., Laurent, F., Pavillon, G., Bellec, S., Ghihenneuc-Jouyau, C., Clavel, J., Jouglu, E., Hémon, D., 2006: Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *International archives of occupational and environmental health*, 80(1), 16–24. DOI:10.1007/s00420-006-0089-4
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., Hernández, E., 2005: Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions. *Annales Geophysicae*, 23, 239–251.
- García-Herrera, R., Garrido-Perez, J. M., Barriopedro, D., Ordóñez, C., Vicente-Serrano, S. M., Nieto, R., Gimeno, L., Yiou, P., 2018: The severe drought of 2016–2017 in Western Europe. Presented at European Geosciences Union General Assembly 2018, Vienna, Austria.
- Gibelin, A-L., Dubuisson, B., Corre, L., Deaux, N., Jourdain, S., Laval, L., Piquemal, J-M., Mestre, O., Dennetière, D., Desmidt, S., Tamburini, A., 2014: Évolution de la température en France depuis les années 1950. *La Météorologie*, 87, 45–53. DOI:10.4267/2042/54336.
- 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. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1–51. DOI:10.1002/qj.3803
- Hooyberghs, H., Berckmans, J., Lefebvre, F., De Ridder, K., 2019: Spells extra documentation. *Copernicus Climate Change Service*, 15 p. Official reference number service contract: 2017/C3S_422_Lot2_VITO/SC2
- Hunt, B. G., 2007: A Climatology of Heat Waves from a Multimillennial Simulation. *Journal of Climate*, 20(15), 3802–3821. DOI:10.1175/JCLI4224.1
- Huynen, Maud M. T. E., Martens, P., Schram, D., Weijenberg, M. P., Kunst A. E., 2001: The Impact of Heat Waves and Cold Spells on Mortality Rates in the Dutch Population. *Environmental Health Perspectives*, 109(5), 463–470.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 2019: Special Report on Climate change and Land (SRCCL). 864 p.
- 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, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rousevell, M., Saamuelsson, P., Somot, S., Soussan, 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(2), 563–578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2
- Jaeger, E. B., Seneviratne, S. I., 2011: Impact of soil moisture–atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Climate Dynamics*, 36, 1919–1939.
- Junk, J., Goergen, K., Krein, A., 2019: Future Heat Waves in Different European Capitals Based on Climate Change Indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(20), 3959. DOI:10.3390/ijerph16203959
- Krzyżewska, A., Bartoszek, K., Wereski, S., 2016: The Meteorological Conditions During Particularly Severe Heatwave in Lublin in August 2015. *Przegląd Geofizyczny*, 3–4, 239–249.
- Lakatos, M., Szépszó, G., Bihari, Z., Krüzselyi I., Szabó, P., Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I., Torma, Cs., 2012: Éghajlati szélsőségek változásai Magyarországon: közelmúlt és jövő. 11 p.
- Lakatos, M., Zsebeházi, G., 2018: Az éghajlat megfigyelt tendenciái és várható alakulása Magyarországon. In: Mérsékelt öv? Felelős cselekvési irányok a hatékony klímavédelemért (Szerk.: Sági, Zs.). Klímabarát Települések Szövetsége, Budapest. 31–49.
- Lemonsu, A., Beaulant, A. L., Somot, S., Masson, V., 2014: Evolution of heat wave occurrence over the Paris basin (France) in the 21st century. *Climate Research*, 61, 75–91. DOI:10.3354/cr01235
- Lhotka, O., Kyselý, J., Plachová, E., 2018: Evaluation of major heat waves' mechanisms in EURO-CORDEX RCMs over Central Europe. *Climate Dynamics*, 50, 4249–4262.
- McGregor, G. R., Bessemoulin, P., Ebi, K., Menne, B., 2015: Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development. *World Meteorological Organisation and World Health Organisation*, 1142, 114 p.
- van Meijgaard, E., van Ulft, L.H., van de Berg, W.J., Bosveld, F.C., van den Hurk, B.J.J.M., Lenderink, G., Siebesma, A.P., 2008: The KNMI regional atmospheric climate model RACMO version 2.1. Technical Report 302, 50p.
- Moreira, F., Ascoli, D., Safford, D., Adams, M. A., Moreno, J. M., Pereira, J. M. C., Catry, F. X., Armesto, J., Bond, W., González, M. E., Curt, T., Koutsias, N., McCaw, L., Price, O., Pausas, J. G., Rigolot, E., Stephens, S., Tavsanoglu, C., Vallejo, V. R., Wilgen, B. W., Xanthopoulos G., Fernandes, P. M., 2020: Wildfire management in Mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environmental Research Letters*, 15(1), 011001
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., Wilbanks, T. J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. DOI:10.1038/nature08823
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000: Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Cambridge University Press, Cambridge. 570 p.

- van Oldenborgh, G. J., Philip, S., Kew, S., Vautard, R., Boucher, O., Otto, F., Haustein, K., Soubeyroux, J-M., Ribes, A., Robin, Y., Seneviratne, S. I., Vogel, M. M., Stott, P., van aalst, M., 2019: Human Contribution to the Record-Breaking June 2019 Heat Wave in France. *World Weather Attribution (WWA)*: Amsterdam, Netherlands, 32 p.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B. M., 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461–3482.
- 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.
- Páldy, A., Erdei, E., Bobvos, J., Ferenczi, E., Nádor, G., Szabó, J., 2004: A klímaváltozás egészségi hatásai. *Egészségtudomány*, 48(2–3), 220–236.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V., 2013: On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. DOI:10.1175/JCLI-D-12-00383.1
- Perkins-Kirkpatrick, S.E., Lewis, S. C., 2020: Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11:3357. DOI:10.1038/s41467-020-16970-7
- Pezza, A. B., van Rensch, P., Cai, W., 2012: Severe heat waves in Southern Australia: synoptic climatology and large scale connections. *Climate Dynamics*, 38, 209–224.
- Pirard, P., Vandentorren, S., Pascal, M., Laaidi, K., Le Tertre, A., Cassadou, S., Ledrans, M., 2005: Summary of the mortality impact assessment of the 2003 heat wave in France. *Eurosurveillance*, 10(7), DOI:10.2807/esm.10.07.00554-en
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Bartha, E. B., 2013: Analysis of projected changes in the occurrence of heat waves in Hungary. *Advances in Geosciences*, 35, 115–122. DOI:10.5194/adgeo-35-115-2013
- Robinson, P. J., 2001: On the Definition of a Heat Wave. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(4), 762–775. DOI:10.1175/15200450(2001)040<0762:OTDOAH>2.0.CO;2
- Rockel, B., Will, A., Hense, A., 2008: The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347–348. DOI:10.1127/0941-2948/2008/0309
- Russo, S., Sillmann, J., Fischer, E. M., 2015: Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124003. DOI:10.1088/1748-9326/10/12/124003
- Sánchez-Benítez, A., García-Herrera, R., Barriopedro, D., Sousa, P. M., Trigo, R. M., 2018: June 2017: The Earliest European Summer Mega-heatwave of Reanalysis Period. *Advancing Earth and Space Science*, 45(4), 1955–1962. DOI:10.1002/2018GL077253
- Sánchez-Benítez, A., Barriopedro, D., García-Herrera, R., 2019: Tracking Iberian heatwaves from a new perspective. *Weather and Climate Extremes*, 28, 100238. DOI:10.1016/j.wace.2019.100238
- Sanderson, M. G., Economou, T., Salmon, K. H., Jones, S. E. O., 2017: Historical Trends and Variability in Heat Waves in the United Kingdom. *Atmosphere*, 8, 191. DOI:10.3390/atmos8100191
- Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., Appenzeller, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332–336.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Mueller, B., Alexander, L. V., 2014: No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, 4, 161–163.
- Simon, Cs., 2019: A fehér karácsonyok előfordulásának éghajlati elemzése. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezetők: Dr. Pongrácz Rita, Kis Anna). 46 p.

- Spinoni, J., Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., Vogt, J., Antofie, T., 2015: Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4197–4209. DOI:10.1002/joc.4279
- Stéfanon, M., Drobinski, P., D'Andrea, F., Lebeauqin-Brossier, C., Sophie B., 2013: Soil moisture-temperature feedbacks at meso-scale during summer heat waves over Western Europe. *Climate Dynamics*, 42(5-6). DOI:10.1007/s00382-013-1794-9
- Szentimrey, T., 1999: Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH), Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data, Budapest, Hungary; WMO, WCDMP, 41, pp. 27-46.
- Szépszó, G., 2008: Regional change of climate extremes over Hungary based on different regional climate models of the PRUDENCE project. *Időjárás*, 112(3–4), 265–284.
- Tatai, Zs., Bódi-Nagy, A., Orosz, I., Becsák, P., Pető, Z., Szabó, K., 2021: Egyeztetési anyag. Budapest Fenntartható Energia- és Klíma Akcióterve, Megbízó: Budapest Főváros Önkormányzata. 78 p.
- Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106, 7183–7192.
- Tomczyk, A. M., Bednorz, E., 2019: Heat waves in Central Europe and tropospheric anomalies of temperature and geopotential heights. *International Journal of Climatology*, 39, 4189–4205. DOI:10.1002/joc.6067
- Torma, Cs. Zs., 2011: Átlagos és szélsőséges hőmérsékleti és csapadék viszonyok modellezése a Kárpát-medencére a XXI. századra a RegCM regionális klímamodell alkalmazásával. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (Témavezető: Dr. Bartholy Judit). 125 p.
- Trigo, R. M., García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, I. F., Valente, M. A., 2005: How exceptional was the early August 2003 heatwave in France? *Geophysical Research Letters*, 32, L10701, DOI:10.1029/2005GL022410
- Unger, J., 2010: A városi hősziget-jelenség néhány aspektusa. MTA Doktori Értekezés, Szeged. 107 p.
- Valleron, A.-J., Boumentil, A., 2004: Epidemiology and heat waves: analysis of the 2003 episode in France. *Comptes Rendus Biologies*, 327(12), 1125–1141. DOI:10.1016/j.crvi.2004.09.009
- Vautard, R., van Aalst, M., Boucher, O., Drouin, A., Hausteijn, K., Kreienkamp, F., van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E. L., Ribes, A., Robin, Y., Schneider, M., Soubeyrou, J.-M., Stott, P., Seneviratne, S. I., Vogel, M. M., Wehner, M., 2020: Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe. *Environmental Research Letters*, 15, 094077. DOI:10.1088/1748-9326/aba3d4
- Vincze, E., 2015: 2015 nyarának időjárása. *Légekör*, 60(3), 149–150.
- 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. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z
- Wolf, G., Brayshaw, D. J., Klingaman, N. P., Czaja, A., 2018: Quasi-stationary waves and their impact on European weather and extreme events. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(717), 2431–2448. DOI:10.1002/qj.3310

Internetes források

[1 – met.hu]

https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1969

[2 – met.hu]

https://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=1951&hir=Hohullam_letar

[3 – met.hu]

https://www.met.hu/ismerettar/meteorologiai_hirek/index.php?id=2630&hir=2019_juliusa_a_legmielegebb_honap_a_meresek_kezdetekor_ota_globalisan_az_elozetes_adatok_szerint

[4 – met.hu]

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/150_eves_eghajlati_adatsorok/

[5 – ec-earth.org]

<http://www.ec-earth.org/>

[6 – met.hu]

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/varosok_jellemzoi/

[7 – met.hu]

https://www.met.hu/idojaras/veszelyjelzes/omsz_veszelyjelzo_rendszere/index.php?friss=19:28:50

[8 – ec.europa.eu]

https://ec.europa.eu/health/archive/ph_information/dissemination/unexpected/docs/hungary_heatwave.pdf

[9 – antsz.hu]

https://www.antsz.hu/felso_menu/temaink/veszelyhelyzetek/hosegriasztas/fokozat.html