

A hűtési és fűtési időszakot jellemző éghajlati klímaindexek változása Magyarországon

Lakatos Mónika*^{ID}, Bokros Kinga

HungaroMet Nonprofit Zrt., Budapest, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: lakatos.m@met.hu

Beérkezett: 2023. október 31.; elfogadva: 2024. február 6.

Összefoglalás

Az elmúlt évtizedekben a globális felmelegedés hatásai Európában, azon belül a Kárpát-medencében is nyilvánvalóvá váltak, s ez a hatás jelentős mértékű az energiaszektorra is. A kizárólag az időjárás által befolyásolt függő fűtési és hűtési energiaigényt leíró technikai klímaindexek alakulását mutatjuk be Magyarországon, nevezetesen a fűtési foknap (Heating Degree Days) és a hűtési foknap (Cooling Degree Days) paramétereket vizsgáljuk. A jelen klímát leginkább jellemző éves és havi normálértékek mellett a változásokat is elemezzük. A múlt század elejétől a fűtési foknapok egyértelmű csökkenése, míg a hűtési foknapok egyértelmű emelkedése figyelhető meg. Országos átlagban 314,6 foknappal [$^{\circ}\text{C}$ nap] csökkent a fűtési foknapok éves összege a lineáris trendmodell szerint 1901-től, míg ugyanerre az időszakra 79,4 $^{\circ}\text{C}$ nappal nőtt a hűtési foknap értéke. A legutóbbi három évtizedben, a legintenzívebb melegedés időszakában igen markánsak a változások, s ez a folyamat minden bizonnyal folytatódik a század végéig és azon túl is.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás okozta biztonsági kockázatok, magyarországi éghajlati trendek, fűtési foknap (HDD) klímaindex, hűtési foknap (CDD) klímaindex

Observed changes in weather-dependent heating and cooling energy demand in Hungary

Mónika Lakatos, Kinga Bokros

HungaroMet Hungarian Meteorological Service, Budapest, Hungary

Summary

In recent decades, the effects of global warming have become evident in Europe, including the Carpathian Basin, and this impact is significant for the energy sector. The most obvious impact of climate change in Hungary is the increase in extremes associated with high temperatures. Not only summer, but also winter and transition seasons show a warming trend, affecting all productive and service sectors. Rising temperatures could lead to shorter heating seasons and milder cold months, potentially reducing heating energy demand. However the heat waves have become more frequent and intense due to warming, leading to an increase in cooling energy demand. In the first part of this article, we present the evolution of heating degree-days from the beginning of the last century to the present day for the whole area of Hungary. The heating degree day is an indicator of the energy consumption for heating of buildings, which depends only on the weather. That is a temperature value, expressed in $^{\circ}\text{Cday}$, which is proportional to the amount of energy required to heat the indoor environment to a given temperature on a given day, taking into account the daily minimum, maximum and mean temperature for a specific base temperature (15.5°Cday). Importantly, its value does not depend on the insulation of the buildings, economic indicators or the type of energy sources. Essentially, the colder the weather, the more the air temperature deviates from the base temperature of 15.5 degrees Celsius, the more energy is needed to heat the indoor environment and the higher the heating degree day value will be. In addition, we present the analysis of cooling degree days. The cooling degree day is derived in a similar way, following the logic of the heating degree day derivation. Therefore, the warmer the weather and the higher the air temperature is above the base temperature of 22°C , the more energy is needed to cool the indoor environment.

Based on the results presented in the article, we can conclude that the annual as well as the monthly amounts of heating degree-days have decreased since the beginning of the last century, with the greatest decrease in mountainous areas and in Western Hungary. One of the few benefits of climate change is that less energy is needed to heat interiors, and this is particularly true for the last decades, when annual heating degree-day amounts were usually lower than normal. At the same time, as heating degree-days have decreased, as the heat waves have become more frequent and intense with warming, resulting in an increase in cooling degree-days. In Hungary, on average, the last 30 years have been characterised by the highest cooling degree-day values over the last century's climate normal periods. On a national average, the annual amount of heating degree-days has decreased by 314.6°Cday according to the linear trend model since 1901, while the cooling degree-day value has increased by 79.4°Cday over the same period. During the period of most intense warming, the August weather-dependent cooling energy demand increased the most. Due to the urban heat island effect in the inner-city environment, cooling of buildings requires additional energy. The recent trends is likely to continue until the end of the century and beyond. Therefore important to monitor changes in climate parameters affecting energy security and to develop an effective strategy and action plans to address the climate risks for the energy sector.

Keywords: climate change security risks, climate trends in Hungary, heating degree day, cooling degree day

Bevezetés

Globálisan mind az ipari, mind a lakossági szektorban növekedett az energiaigény, miközben az energiaforrások végesek, ezen kívül az éghajlatváltozás is egyre több kihívás elé állítja az energiaellátást. Mindezek mellett a háborús konfliktusok miatt is kiemelt szerepet kap az energiabiztonság kérdése. A Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (*NÉS-2 2018*) energiagazdálkodással foglalkozó fejezete is kiemeli, hogy az erőművek számára a legfontosabb kihívást az energiaigény változásai jelentik. A globális éghajlati trendekkel összhangban Magyarországon is csökken télen a fűtési energiaszükséglet (főként a földgázfogyasztás), míg nyáron jelentősen megnő a hűtéshez szükséges villamosenergia-igény. Lehetséges, hogy a távhűtés iránti igény is megjelenik hazánkban a jövőben. Az erőművek működtetéséhez a rendelkezésre álló hűtővíz (vagy hűtőlevegő) hőmérséklete fontos technológiai tényező, például a gázturbinás erőművek teljesítménye a külső levegő hőmérsékletének növekedésével csökken. A folyók, különösen a Duna, emelkedő hőmérséklete és változó vízhozama szintén problémákat okozhat a megfelelő hőmérsékletű és mennyiségű hűtővíz elérhetősége szempontjából. A dokumentum arra is kitér, hogy a szilárd energiahordozók (például lignit, tőzifa, szalma) közúti és vasúti szállítását is befolyásolhatják az éghajlati tényezők, ami ellátásbiztonsági kockázatot jelenthet. Az éghajlatváltozás hatással lehet a megújuló energiahordozók rendelkezésre állására is, bár a változások mértéke (és iránya) gyakran bizonytalan. A napenergia-felhasználást érinti a várhatóan erősödő globálsugárzás és a felhőzet változása is. A vízenergia-felhasználást befolyásolja a szélsőséges csapadékeloszlás, árvizek, aszályok fellépése. A szélerőművek teljesítménye pedig függ a szélviszonyok változásától. Különösen bizonytalan a mezőgazdasági alapú energiahordozók elérhetősége. Ezeknek a megújuló energiahordozóknak a hozamát és beszerzési árát is érintheti a klímaváltozás, bár mértéke még ismeretlen. Az energiaszállítási rendszerek és közüzemi szolgáltatások terén növekvő kocká-

zatok azonosíthatók. A heves széllekedéseket kísérő viharok, villámárvizek veszélyeztetik a légvezetékeket, áramátalakító berendezéseket és a talaj szilárdságát. A téli félévben a zúzmara és a vizes hó miatti extrém hőterhelés, valamint az ónos eső veszélyt jelenthet a légvezetésekre. A gyakori forró és hőséggel járó napok, különösen a nagyvárosokban, növelik a villamosenergia-csúcsterheléseket, ami váratlan és kiterjedt áramszünetekhez vezethet. A tényleges fizikai károk mellett az átviteli hálózatok kapacitása is csökken a hőmérséklet emelkedésével. Az elkövetkező hatásokra mind az energiaszolgáltatóknak, mind a fogyasztóknak fel kell készülniük. A fogyasztóknak számolniuk kell az infrastruktúra működési zavarainak megnövekedett kockázatával, mint például a hosszabb ideig tartó vagy gyakoribb szolgáltatáskiesés, valamint az esetleges költségnövekedéssel, ami adódhat a biztosítási díjak emeléséből vagy egyedi biztonsági beruházások elvégzésének szükségességéből.

Az elmúlt évtizedekben a globális felmelegedés hatásai Európában, azon belül a Kárpát-medencében is nyilvánvalóvá váltak, s ez a hatás jelentős mértékű a legtöbb ágazatban (*IPCC 2021; ITM 2020*). A megfigyelt trendek várhatóan fennmaradnak a század végéig és azon túl is. Kiemelkedő feladat annak meghatározása, hogy az éghajlattal kapcsolatos hatások várhatóan milyen mértékben fognak növekedni. Ez a jövőbeli éghajlati kockázatok kezelésére irányuló hatékony stratégia fontos eleme kell hogy legyen. Az éghajlatváltozás természeti katasztrófákat generál világszerte, Európában egyre gyakoribb és súlyosabb aszályokat, hóhullámokat, hideghullámokat, folyami és parti áradásokat, erdőtüzeket és szélviharokat tapasztalunk (*Lindner et al. 2014; Russo et al. 2014; Spinoni et al. 2015a, Forzieri et al. 2016*). Ezek a hatások a jövőben várhatóan erősebbek lesznek a valószínűsíthető globális felmelegedés miatt Európában (*Jacob et al. 2014; Harrison et al. 2015; IPCC 2021*). Az éghajlatváltozással érintett szektorok közé tartozik az energiaszektor is (*Santamouris et al. 2015*). Mivel az energiaszektor a kritikus szektorok közé tartozik, ezért fontos vizsgálni, hogy milyen mértékben lehet érintett a jelenben is zajló

éghajlatváltozás miatt, hogyan változhat az energiaigény a következő évtizedekben.

Spinoni és társai (Spinoni et al. 2018) Európai léptékben vizsgálták, hogy a hűtés és a fűtés kizárólag időjárásfüggő energiaigénye hogyan változik az éghajlatváltozás hatására. A fűtéssel és hűtéssel összefüggő energiafogyasztás két, az időjárás által befolyásolt éghajlati indexét elemezték: a fűtési foknapokat (Heating Degree Days) és a hűtési foknapokat (Cooling Degree Days). E mutatók alakulását vizsgálták az 1981 és 2100 közötti időszakban mérések és 11 nagy felbontású EURO-CORDEX-szimuláció alapján. A mérsékeltnek mondható és az üvegházhatású gázok fokozatos stabilizálódásán, illetve a 21. század közepe utáni csökkenésén alapuló RCP4.5 és a kibocsátások folyamatos növekedését feltételező RCP8.5 éghajlatváltozási forgatókönyvek (IPCC 2014) esetében vizsgálták a jövőbeli trendeket. Mindkét RCP a HDD jelentős csökkenését vetíti előre, különösen Skandinávia és Oroszország területén. A CDD-t tekintve növekedés valószínű, ami a mediterrán térségben és a balkáni régióban lesz a legnagyobb mértékű. A HDD csökkenése és a CDD növekedése valószínűleg csak az évszázad utolsó évtizedében stabilizálódik az RCP4.5 esetén. Az RCP8.5 esetében a HDD csökkenése és a CDD növekedése valószínűleg folytatódik a század végéig és még azon túl is.

A hazai éghajlati trendek tekintetében megállapíthatjuk, hogy az éghajlatváltozás legnyilvánvalóbb jele Magyarországon a magas hőmérsékletekkel kapcsolatos szélsőségek növekedése (Lakatos et al. 2021). Gyakoribbak a hőhullámok, de nemcsak a nyár, hanem a tél és az átmeneti évszakok is melegebb tendenciát mutatnak, mely hatással van minden termelő és szolgáltató szektorra. Az őszi, téli és tavaszi hónapokra tehető fűtési szezon és a hozzá társuló fűtési energiaigény is befolyásolja a klímaváltozás okozta emelkedő hőmérsékletek. A fűtési energiaigény hosszú távú alakulása kulcsfontosságú az éghajlati, környezeti és gazdasági kérdésekben. Az emelkedő hőmérsékletek miatt a fűtési szezon rövidülhet, illetve a hideg hónapok enyhébbek lehetnek, ami potenciálisan csökkentheti a fűtési energiaigényt. A fűtési energiaigény csökkenése mellett az érem másik oldala azonban, hogy a hőhullámok gyakoribbá és intenzívebbé váltak a melegedéssel (Bokros-Lakatos 2022), ami a hűtési foknapok növekedését eredményezi.

E cikk első felében a fűtési foknapok alakulását mutatjuk be a múlt század elejétől napjainkig Magyarország egész területére. A fűtési foknap a fűtésre vonatkozó, kizárólag az időjárástól függő energiafogyasztás egy mutatója, ami egy adott küszöb (15,5 °C) mellett a napi minimum-, maximum- és középhőmérséklet figyelembevételével adja meg azt az energiamennyiséggel arányos foknap értéket, amely egy adott napon szükséges ahhoz, hogy a belső környezetet egy meghatározott hőmérsékletre melegítse. Fontos, hogy az értéke nem függ az épületek szigetelésének modernitásától, gazdasági mutatóktól, az energiahordozók fajtájától, ez egy éghajlati

klímaindex. Lényegében minél hidegebb az idő, minél jobban eltér a léghőmérséklet a 15,5 foktól (Spinoni et al. 2015b), annál több energia szükséges a belső környezet felfűtéséhez, s annál nagyobb lesz a fűtési foknap értéke.

A cikk második felében pedig a hűtési foknapokra készült elemzésünket mutatjuk be. A hűtési foknap a fűtési foknap származtatásának logikájára épülve hasonló módon történik. Lényegében azzal az energiamennyiséggel arányos, amelyre ahhoz van szükség, hogy a belső környezetet egy meghatározott hőmérsékletre hűtsük. Arányos a napi minimum-, maximum- és középhőmérséklet alakulásával egy meghatározott küszöbhőmérséklet (22 °C) mellett (Spinoni et al. 2015b). Minél melegebb tehát az idő, és minél magasabb a léghőmérséklet a 22 °C-nál, annál több energiára van szükség a belső környezet hűtéséhez.

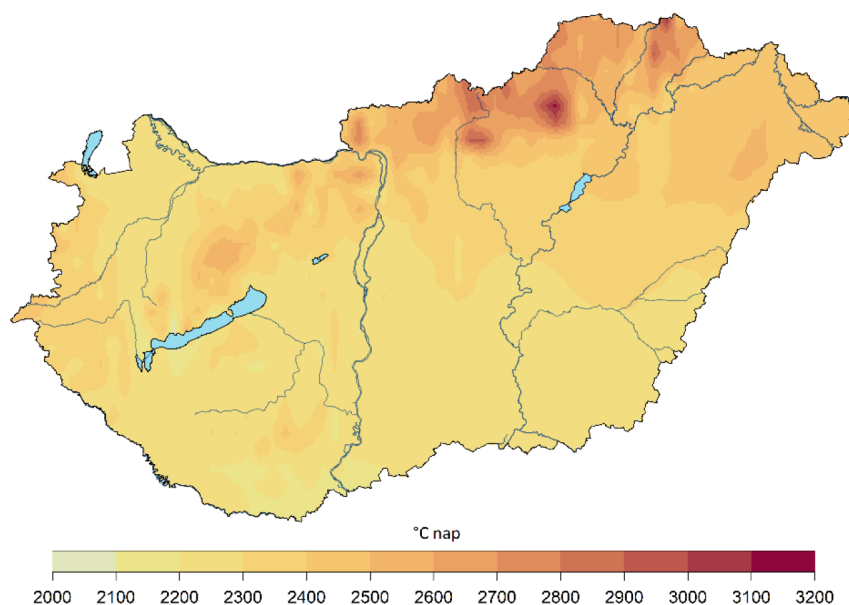
Arra kerestük tehát a választ, hogy miként mutatkozik meg a fűtési és hűtési foknapok havi, illetve éves összességében a klímaváltozás hatása Magyarországon. Mindkét mutató fontos lehet az energiafelhasználás stratégiai tervezéséhez.

Felhasznált adatok

A számításokhoz használt napi minimum-, maximum- és átlaghőmérsékleti adatok az OMSZ hivatalos adatbázisából származnak, melyek a feldolgozás során ellenőrzésen és pótláson estek át. Az adatok ellenőrzése, az adathibák kiszűrése szükséges ahhoz, hogy a mérési sorokból megbízható következtetésre jussunk az éghajlat állapotát, illetve változását illetően. Az ellenőrzést követően az állomási adatsorokat homogenizáltuk és pótoltuk a MASH¹ (Szentimrey 1999, 2008) homogenizációs módszerrel. Az országos átlagok, trendek származtatásához és a térképek készítéséhez a homogenizált adatsorokat a kifejezetten meteorológiai adatokra fejlesztett MISH² eljárással interpoláltuk (Szentimrey-Bihari 2007). Mindezekre miért van szükség? A homogenizáció szükségességét az indokolja, hogy a nyers adatsorok nem tekinthetők időben reprezentatívnak, mivel a mérési módszerekben, illetve az állomáshálózatban bekövetkezett jelentős mértékű változások (költöztetés, műszercsere stb.) inhomogenitást okoznak a sorokban. A Meteorológiai Világszervezet ajánlása szerint (WMO 2020) is homogenizálni kell a múltbeli méréseket, különösen, ha az éghajlatváltozás folyamatát vizsgáljuk. Az adathibák kiszűrése, az adatok ellenőrzése is elengedhetetlen, hogy megbízható következtetésre jussunk a mérési sorokból az éghajlatváltozás tekintetében. Az is fontos, hogy ne csak időben, de térben is reprezentatív legyen a mérési adatbázis, ezért alkalmazunk interpolációt. Tény, hogy a meteorológiai állomások elhelyezkedése nem egyenletes az országon

¹ Multiple Analysis of Series of Homogenization.

² Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis.



1. ábra | Fűtési foknapok (°C nap) éves összege az 1991–2020-as, harmincéves éghajlati normálidőszak alapján (szeptember 15. – május 15. időszakra összegezve)

belül. Például a magasabban fekvő hegységeink területén kevesebb állomás működik, mint az alacsonyabban fekvő régiókban, ezen kívül a Dunántúl állomási lefedettsége nagyobb, mint az Alföldé, így pusztán az állomási átlagok nem reprezentálják megfelelően az ország egészét. Ezért sűrű, szabályos, kb. 10 km-es felbontású rácshálóra interpoláljuk a meteorológiai állapothatározókat, ezáltal az ország teljes területére reprezentatív módon vizsgálhatjuk az éghajlati elemeket és azok változását (Tszák–Bihari–Szentés 2021). (Az itt bemutatott adatokból készített grafikonok, térképek a szerzők saját ábrái.)

Enyhülő téli félév – alacsonyabb időjárásfüggő fűtési energiaigény

Az időjárásfüggő fűtési energiaigény becslésére a fűtési foknap klímaindexet alkalmaztuk. A fűtési foknapnak több hasonló, de az alkalmazott küszöbszámok szempontjából eltérő meghatározása létezik. Az általunk használt definíció a Spinoni és társai (Spinoni et al. 2015b) által megfogalmazott értelmezésnek felel meg.

A fűtési foknap meghatározása egy összetett, négy feltevéből álló rendszerrel történik (1. képlet) (Spinoni, et al. 2018).

A fűtési foknap értékeket összegezve megkapjuk a havi, vagy a teljes fűtési időszakra vonatkozó fűtési fok-

nap összegét °C nap-ban kifejezve. A 157/2005. (VIII. 15.) Korm. rendeletben foglaltak szerint a fűtési szezon az aktuális év szeptember 15. napja és a következő év május 15. napja közötti időszak, így elemzéseink során mi is erre a periódusra végeztük el számításainkat.

Európai léptékben is tájékozódhatunk a fűtési foknapok alakulásáról a Copernicus Éghajlatváltozási Szolgáltatásokat fejlesztő program felületén az 1979–2100 időszakra vonatkozóan (URL1). Ez a program szintén a 15,5 °C fokos külső hőmérsékletet tekinti küszöbnek Spinoni és társai nyomán (Spinoni et al. 2018). Ehhez a külső hőmérséklethez viszonyítva számítják a fűtési foknapot, így az összehasonlíthatóság lehetősége miatt mi is ezt az értéket vettük alapul.

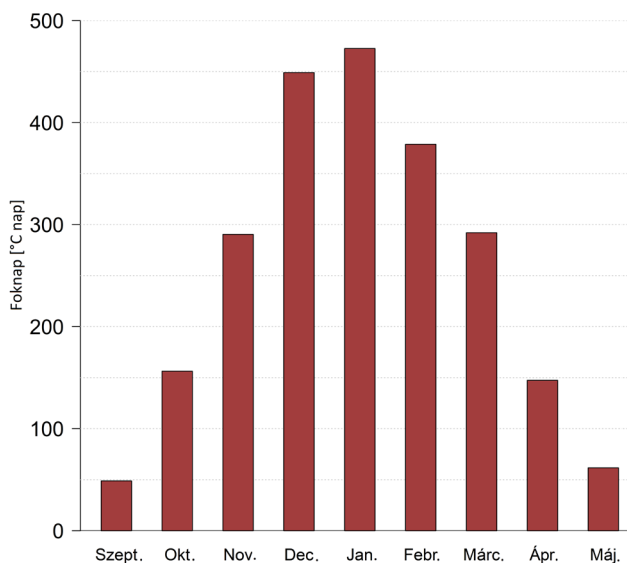
A fűtési foknap értékek trendelemzése során lineáris trendmodellt alkalmaztunk, a trend szignifikanciájára vonatkozó hipotézisvizsgálatot t -próbával végeztük $\alpha = 0,05$ szignifikanciaszintre. Vizsgálatainkat az 1901 és 2022 közötti időszakra végeztük el.

Fűtési foknapok országos átlaga és változása

Magyarországon az 1991–2020-as éghajlati normálidőszak alapján a fűtési foknapok évi összege (szeptember 15. – május 15. időszakra összegezve) átlagosan 2344 °C

$$\text{Fűtési foknap} = \begin{cases} \frac{T_{\text{alap}} - T_{\text{átlag}}}{2} - \frac{T_{\text{maximum}} - T_{\text{alap}}}{4} & \text{Ha } T_{\text{alap}} \geq T_{\text{maximum}} \\ \frac{T_{\text{alap}} - T_{\text{minimum}}}{4} & \text{Ha } T_{\text{maximum}} > T_{\text{alap}} \geq T_{\text{átlag}} \\ 0 & \text{Ha } T_{\text{átlag}} > T_{\text{alap}} > T_{\text{minimum}} \\ 0 & \text{Ha } T_{\text{alap}} \leq T_{\text{minimum}} \end{cases}$$

1. képlet

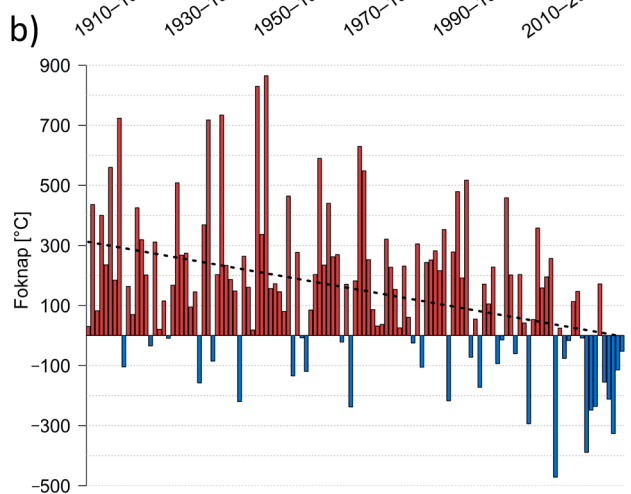
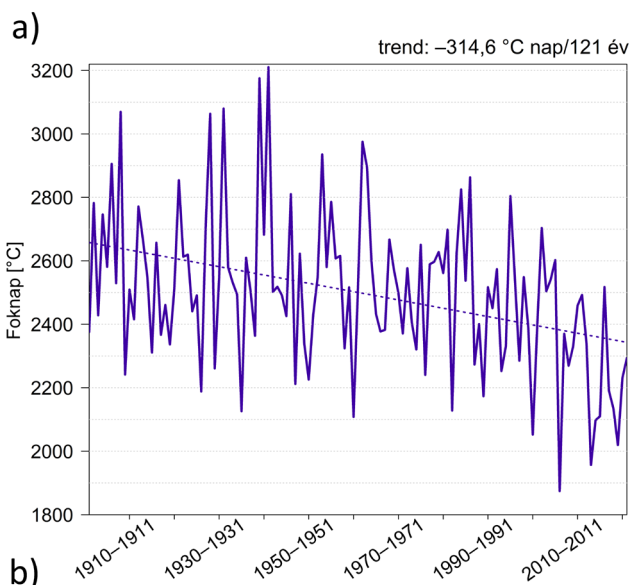


2. ábra A fűtési foknapok havi összegének országos átlaga az 1991–2020-as éghajlati normálidőszakok alapján

nap. A legalacsonyabb értékek a déli országrészre tehetőek. A Dél-Alföldre, a Maros-Körös közére, valamint a Dunántúl déli tájaira (2180–2260 °C nap), mely érték egyre növekszik északkelet felé haladva a kontinentális klímahatás növekedésével egészen a 2500–2600 °C nap értékekig (1. ábra). A tengerszint feletti magassággal csökken a hőmérséklet, így a fűtési foknapok nőnek, ennek megfelelően magasabb értékek jelennek meg az Alpoknál, a Dunántúli- és az Északi-középhegység tájain. Az ország legmagasabb pontjain évi 3100 °C nap körüli értékek is feltűnnek.

A fűtési foknapok havi átlagos összegei (2. ábra) közül a decembert és januárt jellemzik a legmagasabb értékek, hiszen ezek a leghidegebb hónapok, így a legnagyobb fűtési igény is erre a két hónapra tehető. Havi összegeik mindkét hónapban meghaladják a 450 °C napot. A fűtési szezon két legmelegebb hónapjában alacsony a fűtési foknapok értéke, megközelítőleg 50 °C nap.

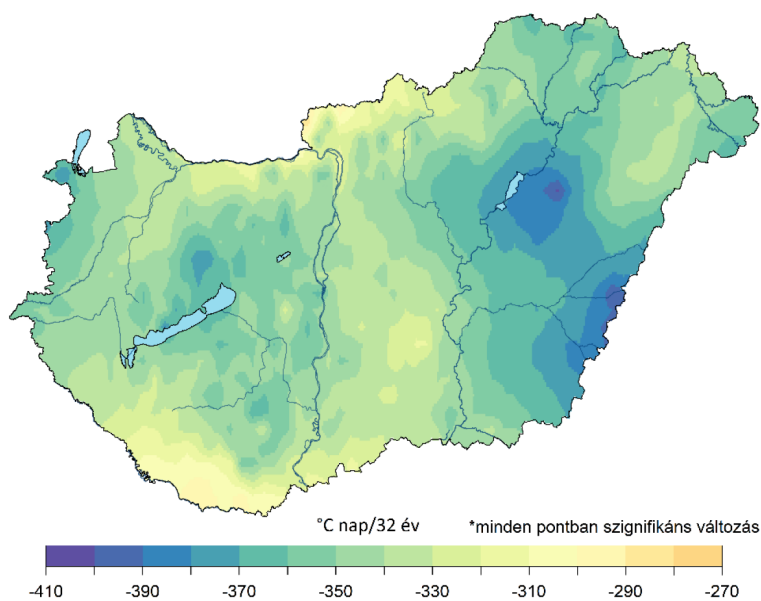
A 3.a és b ábrák szemléltetik a fűtési foknapok éves összegeinek országos átlagát a múlt század elejétől kezdve egészen a 2021/22 fűtési szezonig, illetve ezen összegek eltérését az 1991–2020-as normálidőszak átlagától. Országos átlagban 314,6 °C nappal csökkent a fűtési foknapok éves összege a lineáris trendmodell alapján 1901-től. Ez azt jelenti, hogy a melegedéssel nagymértékben csökkent az időjárásfüggő fűtési energiaigény a múlt század elejétől. A klímaváltozásból fakadó kevés előny egyike, hogy a melegedés miatt kevesebb energia szükséges a belső terek felfűtéséhez, ha csak az időjárási paramétereket vesszük figyelembe, s ez kifejezetten igaz a legutóbbi évtizedekre, amikor a normálhoz képest rendszerint alacsonyabbak voltak az évi összegek (3.b ábra). A hosszú sorra tekintve megállapítható, hogy három szezon esetén 300 °C nappal múlta alul az átlagot, az igen enyhe 2006/2007-es fűtési időszakban pedig



3. ábra Fűtési foknapok éves összegének országos átlaga (a), és anomáliája (b) az 1991–2020-as normálidőszakhoz képest 1901/02 és 2021/22 között

közel 500 °C nappal volt kisebb a fűtési foknapok összege, mint az átlagos.

Kiszámoltuk a fűtési szezon egyes hónapjaira a fűtési foknap átlagot és két időszakra a trendeket, ezeket közöljük az 1. táblázatban. Az egyik időszak a hosszú távú változások jellemzésére szolgál, 1901-től 2022-ig tart, a másik pedig 1991-től, a hőhullámok nagymértékű gyakrodásnak kezdetétől szintén 2022-ig. A változást gyakran szemléltetik a tíz évre jutó változás bemutatásával, mi is ezt az utat választottuk. Minél meredekebb az illesztett trend, annál nyilvánvalóbb a változás. Egyöntetűen csökkenést látunk mindkét időszakra, de statisztikailag szignifikáns változást a hosszú időszakban találunk jellemzően, viszont a decemberi és a márciusi változás ott sem szignifikáns. A rövidebb, gyorsabban melegedő időszakban meredekebb a trend, és a decemberi csökkenés jelentős és szignifikáns is. Ez az elemzés is megerősíti, hogy a változás mértékét erősen meghatározza, hogy milyen időszakra végezzük el a trendillesztést.



4. ábra | Fűtési foknapok éves összegeinek változása ($^{\circ}\text{C nap}/31$ év) 1991 és 2022 között, a változás az ország egész területén szignifikáns $\alpha = 0,05$ szignifikanciaszinten

1. táblázat | Fűtési foknapok 30 éves átlaga ($^{\circ}\text{C nap}$) és változása 1991–2022, valamint 1991–2022 között ($^{\circ}\text{C nap}/10$ év). A statisztikailag szignifikáns változást **vastag kiemelés** jelöli

Hónap	1991–2020 átlag ($^{\circ}\text{C nap}$)	Változás 1991-től ($^{\circ}\text{C nap}/10$ év)	Változás 1991-től ($^{\circ}\text{C nap}/10$ év)
Szeptember	52	-1,7	-4,3
Október	162	-2,4	-12,0
November	301,7	-3,8	-21,8
December	466,2	-1,2	-32,7
Január	497,1	-4,8	-7,0
Február	403,3	-5,9	-26,9
Március	302,8	-2,9	-11,1
Április	148,4	-3,8	-8,1
Május	58,1	-1,8	-1,0

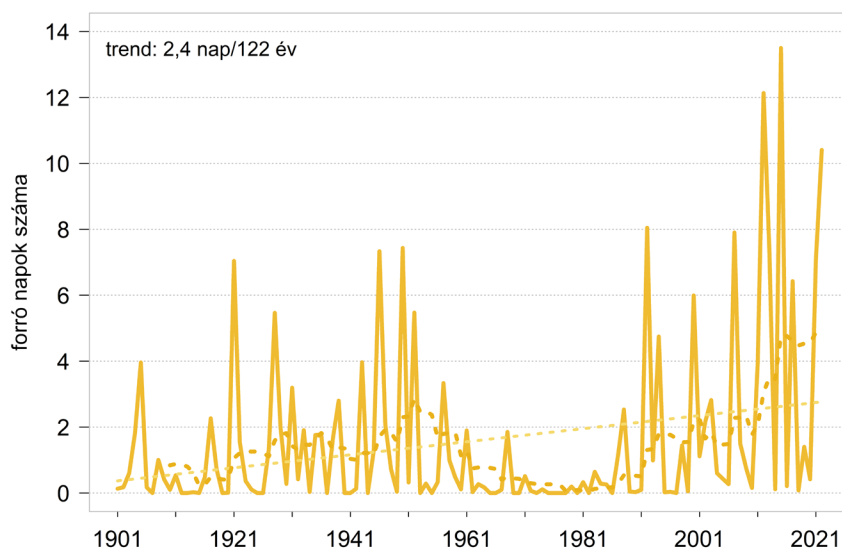
A múlt század utolsó évtizedétől bekövetkezett változás területi eloszlását mutatja a 4. ábra. Az országos átlagnál kisebb mértékben csökkent a fűtési foknapok éves összege a Dunántúl déli, határ menti területein, a Duna-Tisza közén szűkebb régiókban, valamint a Nógrádi-medencében. Az országos átlagos változásnak megfelelő mértékű a fogyás a Dunántúl középső területein, kivéve az Észak-Bakonyt, ahol ennél nagyobb a negatív trend. A Tiszántúl nagy részén és az Északi-középhegység keleti régióiban és a Cserehát térségében jelentősen kevesebb ennek a mutatónak az értéke. A legnagyobb mértékű csökkenés a Körösök vidékén és a Hortobágyon rajzolódik ki, ott $390\text{--}410$ $^{\circ}\text{C nap}/32$ év a fűtési foknapok változása. Az ország minden pontján statisztikailag szignifikáns csökkenés következett be $\alpha = 0,05$ szignifikanciaszinten.

Az OMSZ új éghajlati szolgáltatásainak egyike, hogy megyeszékhelyekre lekérhetőek különböző éghajlati indexek, illetve éghajlati indikátorok, köztük a fűtési foknap értékek (HDD) grafikonon megjelenítve egészen a múlt század elejétől. Bízunk benne, hogy ezek az információk támogatják az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás folyamatát és a települési éghajlatváltozási stratégiák kialakítását, valamint ezekhez kapcsolódóan a cselekvési tervek kidolgozását (URL2).

Melegedő nyár, növekvő időjárásfüggő hűtési energiaigény

Magyarországon a nyárra jellemző a legmarkánsabb hőmérséklet-növekedés az évszakos középhőmérsékleti menetben 1901 óta: országos átlagban a 122 év alatti növekedés $1,74$ $^{\circ}\text{C}$. Az egyes melegindexek, mint a hőségnapok ($T_{\max} \geq 30$ $^{\circ}\text{C}$), forró napok ($T_{\max} \geq 35$ $^{\circ}\text{C}$) száma is emelkedő tendenciát mutat. Előbbinek az éves összege több mint 2 héttel ($15,5$ nappal) nőtt, a forró napoké pedig $2,4$ nappal (5. ábra) a múlt század eleje óta. Az emberi szervezetet jelentősen megterheli, ha kánikulai napokon az éjszakai hőmérséklet sem csökken 20 $^{\circ}\text{C}$ alá, ezek az úgynevezett trópusi éjszakák, melyek éves száma szintén emelkedő tendenciát mutat (Bokros–Lakatos 2022). E hőség okozta terhelés ezekben a forró időszakokban légkondicionáló készülékek működtetésével csökkenthető.

Ebben a fejezetben a hűtési foknap alakulását vizsgáljuk, ami az időjárásfüggő hűtési energiaigénnyel arányos mérőszám. Hűtési időszaknak tekintjük a fűtési időszak komplementer időszakát, vagyis a május 15. és a szeptember 15. közötti periódust. Ez alapján jellemezzük az 1991–2020-as normálidőszakot országosan, valamint



5. ábra | Forró napok éves összegének változása 1901 és 2022 között homogenizált (MASH) és interpolált (MISH) adatok alapján a lineáris trend és a 10 éves mozgóátlag feltüntetésével

a 122 év alatt, és a legutóbbi évtizedekben (1991 és 2022 között). A forró napok erőteljes gyarapodásának időszakában, a legutóbbi három évtizedben bekövetkezett változásokat is ismertetjük. Végül bemutatjuk Budapest bel- és külterületének hűtési foknapokban való eltérését.

A hűtési foknap klímaindex definícióját Spinoni és társai cikke szerint alkalmaztuk (Spinoni et al. 2015b). Minél magasabb a léghőmérséklet a 22 °C-os küszöbhőmérsékletnél, annál több energiára van szükség a belső környezet hűtéséhez. Ha a foknapértékeket összegezzük, megkapjuk a havi vagy a szezonális hűtési foknap összegét °C napban kifejezve, amely egy adott hónap vagy a teljes hűtési időszak alatt keletkezik. Fontos kiemelni, hogy az általunk vizsgált hűtési foknap csak és kizárólag az időjárás függvénye, tehát az épületek különböző fizikai paramétereitől nem függ.

Ahogy utaltunk rá, a hűtési foknapokat a május 15-től szeptember 15-ig tartó időszakra adjuk meg. Számításához egy négy feltételből álló rendszert használunk (Spinoni et al. 2018). Azokon a napokon, amikor a maximumhőmérséklet 22 °C alatti, a hűtési foknap zérus. Egyéb esetekben vizsgáljuk, hogy a 22 °C-os alaphőmérséklet a napi maximum- és középhőmérséklet közötti-e, vagy a napi közép- és minimum-hőmérséklet közötti érték-e, vagy a minimum-hőmérséklet alatt helyezke-

dik-e el. Ehhez mérten adjuk meg a hűtési foknap értékét (2. képlet).

Európai léptékben is tájékozódhatunk a hűtési foknapok alakulásáról – hasonlóan a fűtési foknapokhoz – az 1979–2100 időszakra vonatkozóan a Copernicus Éghajlatváltozási Szolgáltatásokat fejlesztő program felületén keresztül, melyben szintén a Spinoni és társai által meghatározott 22 °C fokos küszöbhőmérsékletet vették alapul (Spinoni et al. 2018; URL1).

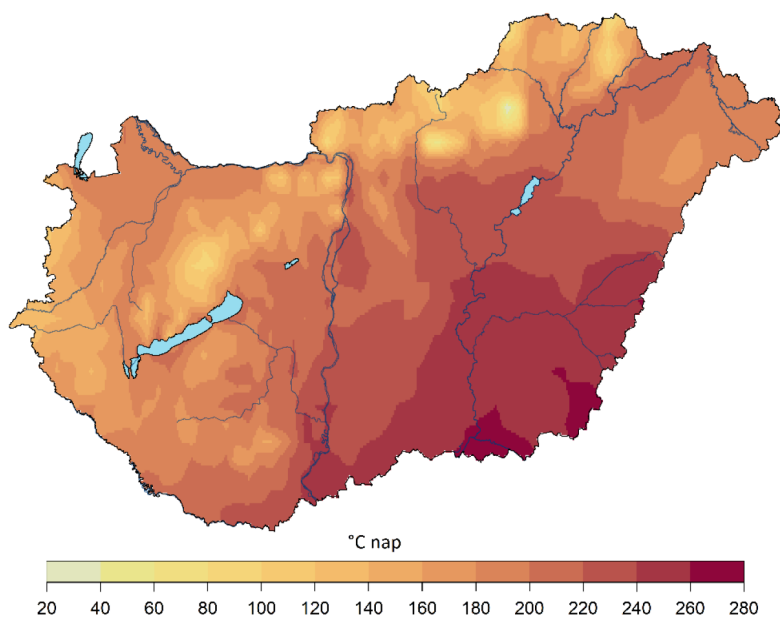
A hűtési foknap értékek trendelemzése során is lineáris trendmodellt alkalmaztunk, a trend szignifikanciájára vonatkozó hipotézisvizsgálatot *t*-próbbával végeztük $\alpha = 0,05$ szignifikanciaszintre. Vizsgálatainkat az 1901 és 2022 közötti időszakra végeztük el.

Hűtési foknapok átlaga és változása

Magyarországon átlagosan a legutóbbi 30 évet jellemezte a legmagasabb hűtési foknap érték (200,5 °C nap) az elmúlt évszázad 30 éves éghajlati normálidőszakait tekintve. Az országos átlaghoz képest magasabb hűtési energiaigény jellemző hazánk délkeleti régiójában, az Alföld déli, délkeleti területein mintegy 200–220 °C nap hűtési foknap értékekkel, valamint a Duna–Tisza köze és az Alföld középső tájain is az átlagnál magasabb, 180–200 °C nap értékek tűnnek fel (6. ábra). Északkelet-

$$\text{Hűtési foknap} = \begin{cases} 0 & \text{Ha } T_{\text{alap}} \geq T_{\text{maximum}} \\ \frac{T_{\text{maximum}} - T_{\text{alap}}}{4} & \text{Ha } T_{\text{maximum}} > T_{\text{alap}} \geq T_{\text{átlag}} \\ \frac{T_{\text{maximum}} - T_{\text{alap}}}{2} - \frac{T_{\text{alap}} - T_{\text{minimum}}}{4} & \text{Ha } T_{\text{átlag}} > T_{\text{alap}} > T_{\text{minimum}} \\ T_{\text{alap}} - T_{\text{átlag}} & \text{Ha } T_{\text{alap}} \leq T_{\text{minimum}} \end{cases}$$

2. képlet

Hűtési foknapok összegének 30 éves (1991-2020)
a nyári félévben (05.15.- 09.15.)

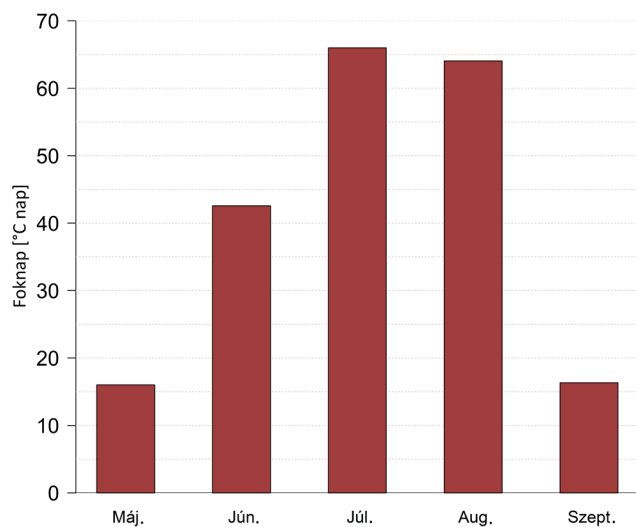
6. ábra | Hűtési foknapok (°C) éves összege az 1991–2020-as éghajlati normálidőszak alapján (május 15. – szeptember 15. időszakra összegezve)

Magyarországon, a Kis-Alföldön, a Dunántúl keleti szegletén átlag körüli értékek mutatkoznak. A Dunántúl többi részén, a magasabb tengerszint feletti magasságú területeken (Alpokalja, Dunántúli-középhegység, Dunántúli-dombság) az alacsonyabb hőmérsékleti értékek miatt a hűtési foknapok átlaga is alacsonyabb, az ország leghűvösebb klímájú régióiban (Északi-középhegység) 20–60 °C nap hűtési foknap értékek mutatkoznak.

A nyári időszakon belül – minimális eltéréssel – júliusra és augusztusra jellemző a legmagasabb hűtési foknap: 63,8 °C nap és 63,4 °C nap az értéke ezekben a hónapokban (7. ábra és 2. táblázat). A hűtési foknapok országos átlagának hosszú távú változása minden nyári hónap-

ban statisztikailag szignifikáns növekedést mutat. A legmeredekebben az augusztusi érték növekedett, míg a júliusi és júniusi emelkedés kevésbé markáns. A rövidebb, a legintenzívebb melegedés időszakra illesztett trendegyenes lényegesen gyorsabb változásra utal, mint a hosszú távú változást reprezentáló tízéves trendérték. Míg a hosszú távú változás az augusztusi változás a legjelentősebb, addig a rövidebb, a jelentősebb helyező időszakban a júliusi hűtési foknap emelkedése kiugró. A legutóbbi hideg májusok miatt csökkenést látunk a hűtési szezon kezdetén, de ez nem jelentős, statisztikailag nem szignifikáns. Összességében közel 80 °C napos növekedés adódik a teljes hűtési időszakra a múlt század eleje óta országos átlagban (8. ábra).

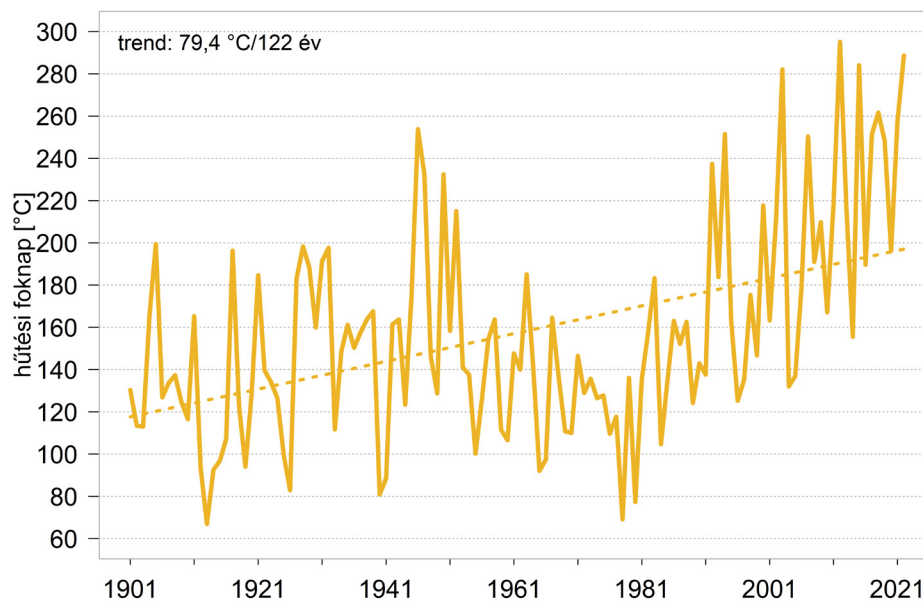
A legtöbb hűtési foknap 2012-t jellemezte, majd ezt követi az elmúlt 122 év legmelegebb nyara a 2022-es, 255,8 °C nap értékkel. 2015 nyarán fordult elő a legtöbb hóhullámos nap (URL3), ez áll a harmadik helyen. A 10 legnagyobb hűtési foknappal rendelkező hűtési



7. ábra | A hűtési foknapok havi összegének országos átlaga az 1991–2020-as éghajlati normálidőszak alapján

2. táblázat | Hűtési foknapok 30 éves átlaga (°C nap) és változása 1901–2022, valamint a legutóbbi évtizedekben 1991–2022 között (°C nap/10 év) a hűtési időszakban. A statisztikailag szignifikáns változást vastag kiemelés jelöli

Hónap	1991–2020-as átlag (°C nap)	Változás 1901-től (°C nap/10 év)	Változás 1991-től (°C nap/10 év)
Május	16,2	0,4	–0,7
Június	40,8	1,7	7,9
Július	63,8	1,8	9,0
Augusztus	63,4	2,4	7,1
Szeptember	16,3	0,3	3,8



8. ábra | Hűtési foknapok összegei a nyári félévben (május 15. – szeptember 15.) 1901 és 2022 között Magyarországon homogenizált (MASH) és interpolált (MISH) adatok alapján

szekon listáját a 3. táblázatba gyűjtöttük ki. Ezek közül 8 az elmúlt 20 évből származik, 1 a 90-es évekből, 1 pedig a múlt század első feléből. Ez a táblázat is rávilágít a közelmúltban tapasztalható erőteljes melegedésre.

A hűtési foknapok a jelenlegi éghajlati trendet leginkább jellemző 32 éves változásának országon belüli eloszlását a 9. ábra szemlélteti, melyen az ország egyes tájain 15–115 °C nap növekedés rajzolódik ki. A legnagyobb mértékben az ország középső és alföldi területein, különösen a Körösök vidékén növekedett meg ez a klímaindex. A Kisalföld területén is jelentős (90–100 °C nap/32 év) emelkedés történt ebben a paraméterben. Északkelet-Magyarországon, valamint az ország magasabban fekvő régióiban (Alpokalja, Dunántúli-dombság, Dunántúli-középhegység [65–75 °C nap/32 év] és az Északi-középhegységben [15–45 °C nap/32 év]) növe-

kedett a legkisebb mértékben 1901 óta. Az elmúlt, lényegében három évtizedben az ország minden pontján statisztikailag szignifikánsnak adódott a növekedés.

Hűtési foknapok összehasonlítása belterületen és külterületen

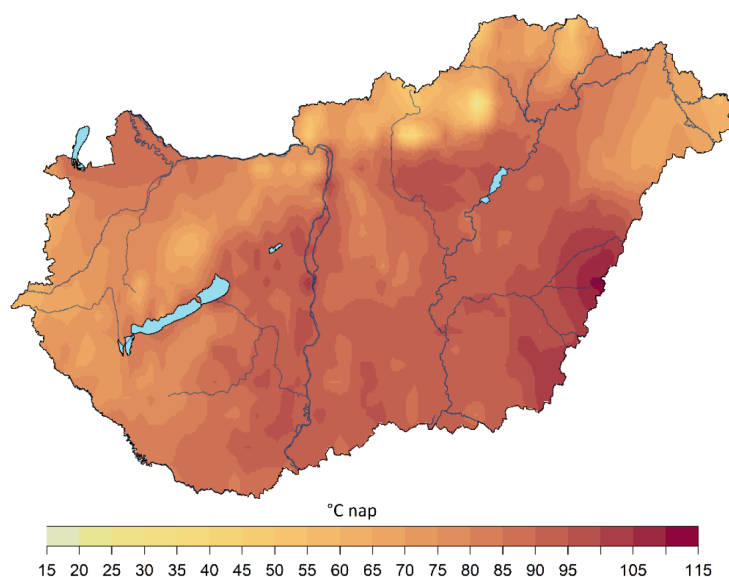
A zöldövezetben és a külvárosban az épületek általában gazdag növényzettel vannak körülvéve, ezáltal a természetes árnyékolás sok esetben véd a fokozott hőhatástól. Ennek köszönhetően csökken a túlzott felmelegedés veszélye. Emellett a fák, cserjék és egyéb növények párologtatással hűsítik a levegőt, egy olyan mikroklímát alakítanak ki, amely kellemesen hűvös, ellentétben a városi környezettel, ezáltal kevesebb energiát igényelnek hűtésre, mint a belvárosi lakások. A belvárosi területeken gyakran találunk mesterséges felületeket, mint például járdákat, utakat és épületeket, amelyek bizonyos fizikai tulajdonságok miatt (alacsony albedó, magas hővezető képesség) nagy hőterhelésnek vannak kitéve. Ebben a környezetben általában kevesebb fa és zöld terület található, ami csökkenti a természetes növényzet által nyújtott hűtő hatást (Unger 1997; 2012).

Minderről Budapest bel- és külterületének (Budapest-Pestszentlőrinc) hűtési foknapjainak alakulását szemlélve meg is bizonyosodhatunk. A 10. ábra mutatja a két állomás hűtési foknapjainak nyári összegeit 1991 és 2022 között. Az ábráról egyértelműen kitűnik, hogy egy-egy év kivételével a belterületi állomás hűtési foknapjai magasabbak. Továbbá szembevetendő, hogy bár mindkét állomáson növekvő a hűtési foknapok tendenciája, a két állomás éves összegei közti eltérés is nagymértékben nőtt a jelenhez közeledve, mivel a belterületi állomás éves hűtési foknapjai nagyobb mértékben nőnek, mint a külterületi állomásé.

3. táblázat | A 10 legmagasabb hűtési foknapú év (május 15. – szeptember 15.) Magyarországon

Év	Hűtési foknap (°C nap)
2012	295,11
2022	288,63
2015	284,04
2003	282,04
2018	261,63
2021	257,39
1946	253,79
1994	251,47
2017	251,41
2007	250,41

Hűtési foknapok változása 1991 és 2022 között

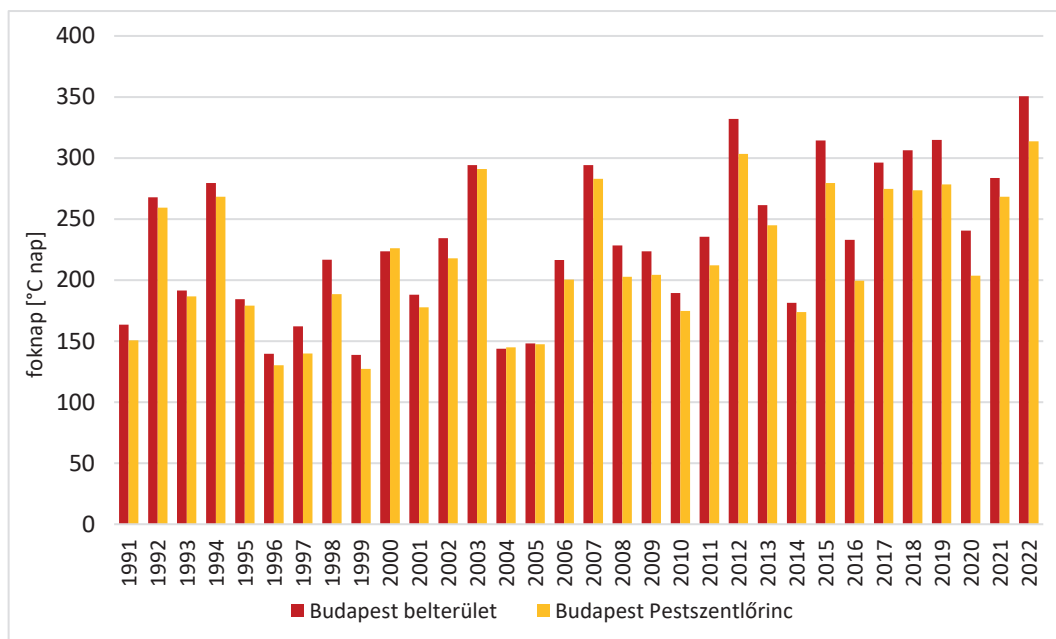


9. ábra | Hűtési foknapok éves összegeinek változása ($^{\circ}\text{C nap}/32 \text{ év}$) 1991 és 2022 között, a változás az ország egész területén szignifikáns $\alpha = 0,05$ szignifikanciaszinten

Konklúzió

Az éghajlatváltozás okozta hőmérséklet-emelkedés komplex hatásokat gyakorol a fűtési és hűtési szezonra és a kizárólag időjárásfüggő fűtési és hűtési energiaigényre, amelyeknek gazdasági és környezeti vonatkozásai is vannak. A fűtési és hűtési foknapok olyan éghajlati klímaindexek, melyek tükrében az éghajlatváltozás hatásai Magyarországon is nyomon követhetők. A cikkben bemutatott feldolgozások alapján megállapíthatjuk, hogy a fűtési foknapok éves, valamint havi összegei is csökkentek a múlt század eleje óta, a legnagyobb mértékben

a hegyvidéki területeken és Nyugat-Magyarországon. A klímaváltozásból fakadó kevés előny egyike, hogy kevesebb energia szükséges a belső terek felfűtéséhez, ha csak az időjárási faktorokat vesszük figyelembe, s ez kifejezetten igaz a legutóbbi évtizedekre, amikor a normálhoz képest rendszerint alacsonyabbak voltak az évi fűtési foknap összegek. A fűtési foknapok csökkenése mellett az érem másik oldala azonban, hogy a hóhullámok gyakoribbá és intenzívebbé váltak a melegedéssel, ami a hűtési foknapok növekedését eredményezi. Magyarországon átlagosan a legutóbbi 30 évet jellemezte a legmagasabb hűtési foknap érték az elmúlt évszázad éghajlati



10. ábra | Budapest bel- és külterületének hűtési foknap összegei évente az 1991 és 2022 közötti időszak hűtési szezonjaiban

normálidőszakait tekintve. A legintenzívebb melegedés időszakában az augusztusi hűtési foknap érték nőtt meg a legnagyobb mértékben.

Az itt felvázolt megfigyelt trendek várhatóan folytatódhatnak a jövőben. Kiemelt feladat kell hogy legyen az energiatermelés és ellátás biztonságát befolyásoló éghajlati paraméterek nyomon követése és jövőbeli alakulásának becslése. A jövőbeli éghajlati kockázatok kezelésére irányuló hatékony stratégiák csak ezek mentén alakíthatók ki.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) és az RRF-2.3.1-21-2022-00014 Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium az Éghajlatváltozásért projekt támogatásával valósult meg.

Hivatkozások

- Bokros K., & Lakatos M. (2022) Hőségperiódusok vizsgálata Budapesten a XX. század elejétől napjainkig. *Légkör*, Vol. 67. No. 4. pp. 208–218. <https://doi.org/10.56474/legkor.2022.4.4>
- Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voudoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R., & Cid, A. (2016) Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climate Change*, Vol. 137. No. 1. pp. 105–119.
- Harrison, P. A., Dunford, R., Savin, C., Rounsevell, M. D. A., Holman, I. P., Kebede, A. S., & Stuch, B. (2015) Cross-sectoral impacts of climate change and socio-economic change for multiple, European land- and water-based sectors. *Climate Change*, Vol. 128. No. 3–4. pp. 279–292.
- IPCC (2014) In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY 1535 pp.
- IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- ITM (2020). Jelentés az éghajlatváltozás Kárpát-medencére gyakorolt esetleges hatásainak tudományos értékeléséről.
- Izsák B., Bihari Z., & Szentes O. (2021) Éghajlatváltozás: homogénizált vagy nyers adatsorokat vizsgálják? *Légkör*, Vol. 66. No. 3. pp. 12–15.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., ..., Yiou P. (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, Vol. 14. No. 2. pp. 563–578.
- Lakatos M., Bihari Z., Izsák B., Marton A., & Szentes O. (2021) Megfigyelt éghajlati változások Magyarországon. *Légkör*, Vol. 66. No. 3. pp. 5–11.
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N. E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M.-J., Laasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B., & Hanewinkel, M. (2014) Climate change and European forests:

what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management*, Vol. 146. pp. 69–83.

- NÉS-2 (2018) 2018. évben elfogadott, a 2018–2030 időszakra (kitekintéssel 2050-ig) szóló második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia 23/2018. (X. 31.) OGY határozat a 2018–2030 közötti időszakra vonatkozó, 2050-ig tartó időszakra kitekintést nyújtó második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégiáról 157/2005. (VIII. 15.) Korm. rendelet
- Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., Singleton, A., Montagna, P., Barbosa, P., & Vogt, J. V. (2014) Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 119. No. 22. pp. 12500–12512.
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015) On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings – a review. *Energy and Buildings*, Vol. 98. pp. 119–124.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015a) European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, Vol. 127. pp. 50–57.
- Spinoni, J., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015b) European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. *International Journal of Climatology*, Vol. 35. No. 1. pp. 25–36. <https://doi.org/10.1002/joc.3959>
- Spinoni, J., Vogt, J. V., Barbosa, P., Dosio, A., McCormick, N., Biganob, A., & Füsse, H.-M. (2018) Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100. *International Journal of Climatology*, Vol. 38. No. S1. pp. e191–e208. <https://doi.org/10.1002/joc.5362>
- Szentimrey, T. (1999) Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH). In: Proceedings of the Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data, Budapest, Hungary. WMO, WCDMP (41), pp. 27–46.
- Szentimrey, T. (2008) Development of MASH homogenization procedure for daily data, Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, 2006; WCDMP-No. 71, WMO/TD (1493), pp. 123–130.
- Szentimrey, T. & Bihari, Z. (2007) Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). In: Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, pp. 17–27.
- Unger J., Sümeghy Z., Kántor N., Gulyás Á. (2012) Kistérségű környezeti klimatológia. JATE Press, Szeged
- Unger J. (1997) Lokális és mikroklimák, kiadó: JATE Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, Szeged
- WMO (2020) Guidelines on Homogenization, WMO (1245)

Internetes hivatkozások

- URL1: Mavel, V., Barghini, A., Amici, A., Berckmans, J., Cagnazzo, C., & Almond, S. (2021) Heating and Cooling Degree Days from 1979 to 2100 Application. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-heating-cooling-degree-days?tab=app> (letöltés: 2022. 12. 15.)
- URL2: Hidegindexek - Megfigyelt hazai változások - met.hu (letöltés ideje: 2023. 10. 30.)
- URL3: Hőhullámok: ami ma szélsőséges, az a jövőben valószínűleg átlagos lesz. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1969&chir=Hohullamok:_ami_ma_szelsoseges,_az_a_jovoben_valoszinuleg_atlagos_lesz (letöltés ideje: 2023. 10. 30.)

A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek.