LÉGKÖR

69. ÉVFOLYAM 2. SZÁM

LEJTŐSZÉL A BAKONYBAN ÉS A BALATONON

BŐVEBBEN A HŐTERHELÉSRŐL

TAVI VIHARJELZÉS

A REGIONÁLIS VIHAROK NYOMÁBAN

AZ EVAPOTRANSZSPIRÁCIÓ MEGHATÁROZÁSÁNAK KORLÁTAI

2024. ÁPRILIS

Szaharai porrétegen megjelenő Tyndall sugarak
Kiss Győző, Fonyód, 2024. április 1.

Glória és Brockeni kísértet a Dévényi Antal kilátó árnyéka körül
Somogyi Csaba, Nagy Kopasz hegy, 2024. február 18.

Üde tavaszi posztfrontális égkép hullósávokkal
Rokonál Zoltán, METÉSZ, Tiszalök, 2024. március 25.

LÉGKÖR

69. évfolyam 2. szám
2024. április

A HUNGAROMET MAGYAR METEOROLÓGIAI SZOLGÁLTATÓ NONPROFIT ZRT. ÉS A MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG SZAKMAI TÁJÉKOZTATÓJA

Kiadja a
HUNGAROMET MAGYAR METEOROLÓGIAI SZOLGÁLTATÓ NONPROFIT ZRT.
1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1.

A kiadásért felel:
a HUNGAROMET NZRT. vezérigazgatója

Készült:
PREMIER Nyomda

Felelős vezető:
Király Attila

ISSN 0133-3666

Készült 500 példányban

Éves előfizetési díja: 3600 Ft
A Magyar Meteorológiai Társaság tagjai számára ingyenes.
Megrendelhető a legkor@met.hu címen.

Főszerkesztő: Fejes Edina
Főszerkesztő-helyettes: Tóth Róbert

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

ELNÖK:
Dr. Haszpra László

TAGOK:
Dr. Barcza Zoltán, Dr. Bartholy Judit, Bíróné Dr. Kircsi Andrea, Dr. Bonta Imre, Dr. Dobi Ildikó, Dr. Gál Tamás, Kolláth Kornél, Dr. Lakatos Mónika, Péliné Dr. Németh Csilla, Dr. Sarkadi Noémi, Dr. Somfalvi-Tóth Katalin, Dr. Szépszó Gabriella, Dr. Szintai Balázs, T. Puskás Márta

Tervezőszerkesztő, grafikus: Szabó Dorottya

TARTALOM

PÁSZTOR MARCELL, CZANIK CSENGE, BONDÁR ISTVÁN: Regionális viharok azonosítása és követése infrahanghullámok segítségével 74
Identification and tracking of regional thunderstorms using infrasound

INCZE DÓRA, BARCZA ZOLTÁN, PINTÉR KRISZTINA, NAGY ZOLTÁN, FODOR NÁNDOR, HASZPRA LÁSZLÓ: Az eddy-kovariancia mérések alapján származtatható evapotranspiráció bizonytalanságának vizsgálata 86
Investigation of the uncertainty of evapotranspiration derived from eddy covariance measurements

KURCSICS MÁTÉ, GERESDI ISTVÁN, HORVÁTH ÁKOS: Szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél a Bakony-Balaton térségben 93
Synoptically-forced downslope wind in the Bakony-Balaton region

ZSIKLA ÁGOTA, SZILÁGYI ESZTER: A 2023. évi tavi viharjelzési szezonról 104
About the sorm warning season at lakes in 2023

ÁCS FERENC, KRISTÓF ERZSÉBET, ZSÁKAI ANNAMÁRIA: Esszé az emberi hőterhelésről és hőérzékelésről 111
Essay on human thermal load and thermal perception

PÁTKAI ZSOLT: A HungaroMet Nonprofit Zrt. szerepe a katasztrófák elleni védekezésben 121

DOBI ILDIKÓ: A Meteorológiai Világszervezet 19-ik Kongresszusának 2024-2027-es időszakra vonatkozó döntései 125

SZOLNOKI-TÓTIVÁN BERNADETT: 2023/2024 telének időjárása 130

MARTON ANNAMÁRIA, IZSÁK BEATRIX, SZENTES OLIVÉR, SZOLNOKI-TÓTIVÁN BERNADETT: A 2023. év éghajlati elemzése 136

ERDŐDINÉ MOLNÁR ZSÓFIA, KOVÁCS ATTILA VIKTOR: A 2023 őszének időjárása agrometeorológiai szempontból 142

HÍREK 144

KISLEXIKON 148

CÍMLAPON: Budapest, 2020. április 2.

SZERZŐKNEK SZÁNT ÚTMUTATÓ

A LÉGKÖR meteorológiai tárgyú, a légkörtudományhoz kapcsolódó tudományos és ismeretterjesztő írásokat, szakmai beszámolókat és rövid ismertetőket, híreket közöl magyar nyelven. A kéziratokat anonim szaklektorok véleménye alapján a szerkesztőbizottság fogadja el. A közlésre szánt írások elektronikus formában nyújthatók be a **legkor@met.hu** e-mail címen. A cikkekkel kapcsolatos formai elvárásokat a www.met.hu/ismeret-tar/kiadvanyok/legkor/ oldalon részletezzük.

Regionális zivatarok azonosítása és követése infrahanghullámok segítségével

Pásztor Marcell Sebestyén, Czanik Csenge, Bondár István
ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, pasztor.marcell@epss.hun-ren.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.2.1

Az egyetlen magyar infrahangállomás (PSZI) Piszkés-tetőn 2017 májusa óta működik. A PSZI az azóta eltelt idő alatt több, mint egymillió jelet detektált. Ezek között ismert és ismeretlen forrásokból származó észlelések egyaránt szerepelnek. Az észlelések azonosítása és kategorizálása fontos a jövőbeli automatizált jelfelismerés szempontjából. A tanulmány célja azon észlelések azonosítása és összegyűjtése, amelyek zivatarokhoz és villámokhoz tartoznak. Bemutatunk egy módszertant a zivatarok azonosítására, amely a Blitzortung adatbázis villámadatainak és a PSZI észleléseinek korrelációján alapszik. E módszerrel 32 000 infrahangészlelést soroltunk be a zivatar címszó alá. Vizsgáltuk az észlelt zivatarok irányainak és távolságainak eloszlásait, melyek az állomás érzékenységét jellemzik. Ismertetünk egy közeli (<50 km) zivatarokra alkalmazható eljárást konkrét villámlások azonosítására, mely segítségével 68 kisülést találtunk.

Identification and tracking of regional thunderstorms using infrasound

The infrasound array at Piszkés-tető, Hungary (PSZI) has been operational since May 2017. Since then, PSZI has detected more than one million infrasound signals. These include detections both from known and unknown sources. The identification and categorisation of the detections are important for future automation. The objective of this study is to identify and collect those detections that belong to thunderstorms and lightning bolts. A methodology to identify thunderstorms is presented, by which 32,000 infrasound detections were classified as of thunderstorm originated. The methodology relies on correlating lightning data from the Blitzortung database (considered as ground truth) with infrasound detections. We also analyse the distributions of the directions and distances of the detected thunderstorms which characterise the sensitivity of the station. Additionally, a detailed lightning search procedure led to the identification of 68 lightning discharges in thunderstorms close to the array (<50 km).

A hangokat frekvencia alapján három nagy csoportba sorolhatjuk, 20 Hz és 20 kHz között található az emberi fül számára hallható tartomány. E frekvencia tartomány fölött vannak az ultra-, alatta az infrahangok. Az infrahanghullámok a kis légköri csillapodás miatt nagy, akár több száz, több ezer kilométer távolságig el tudnak jutni, átjárva így a Föld légkörét. Az infrahanghullámoknak megannyi természetes és mesterséges forrása létezik. Előbbiekhez tartoznak például meteorok, nagyobb földrengések, vulkánkitörések, zivatarok,

villámlások, mikrobaromok (a tengerek és óceánok hullámzása által a légkörben gerjesztett hullámok). Emberi tevékenységhez kapcsolódóan alacsony frekvenciás jeleket többek között robbantások, robbanások, gyárak, repülőgépek keltenek.

Az infrahanghullámok észlelésére nagyon érzékeny légnyomásmérőket, mikrobarométereket használnak. Egy állomás legalább három ilyen műszerből áll a hullámok paramétereinek meghatározásához. A műszerek regisztrátumain – az idő-légnyomás görbéken – különböző eljárásokkal kereshetünk koherens jelet. Az egyik legelterjedtebb az ún. Progressive Multi Channel Correlation (PMCC), (*Cansi*, 1995) módszer, amely a hullámformák keresztkorrelációján alapul. Egy megtalált eseményt detekciónak, észlelésnek nevezünk. Az észlelések három legfontosabb paramétere a frekvenciaösszetétel, az azimut és a látszólagos sebesség (trace velocity). Az azimut adja meg, hogy az állomásra beérkező hullám mekkora szöget zár be az északi iránnyal óramutató járásával megegyezően mérve. A látszólagos sebesség definíció szerint a hullám terjedési sebességének vízszintes komponense.

A villámlások infrahangkeltési mechanizmusa nem tökéletesen ismert. Az első leírás szerint (*Wilson*, 1920) a felhő egy töltött régiójában a nyomás kisebb, mint a külső nyomás, a töltött vízcseppek kölcsönös taszítása miatt. Ezért a villámkisülést követő felhőn belüli elektrosztatikus mező hirtelen változása kelti az alacsony frekvenciás akusztikus hullámot. *Dessler* (1973) továbbfejlesztette Wilson ötletét, a modellje szerint először egy ritkulás (dekompresszió, völgy) észlelhető a hullámformákon, amelyet esetleg egy kompresszió (csúcs) követ. A spektrális csúcsnak a 0,2–2 Hz-es tartományban kell jelentkeznie. Néhány kísérlet (például *Bohannon et al*., 1977; *Balachandran*, 1983) épp a modell által jósoltak ellenkezőjét mutatta ki. Az eredmények alapján a legtöbb villámláshoz köthető hullámformán a kompresszió megelőzte a dekompressziót. Egy magyarázat szerint a megfigyelt kezdeti pozitív csúcsot az elektromos tér hirtelen (kb. 0,5 s alatti) növekedése okozhatja közvetlenül a kisülés előtt (*Bohannon et al*., 1977). Numerikus modellek alapján a kisülés előtti töltéssűrűség növekedés hosszabb ideig, 2–6 másodpercig is eltarthat. E modellekből levont következtetések szerint minél hosszabb a töltési idő, annál kisebb a pozitív csúcs (*Pasko*, 2009). A kezdeti kompresszió másik magyarázata szerint a villámláskor történő kisülés hatására, töltésáram (szuperszonikus töltéstranszport) által csökken a töltött rétegben a térerősség. Ez az áram kis fűtéssel jár, ami a pozitív légnyomás perturbációt okozza. E modell az egymást követő kompressziós és dekompressziós csúcsok abszolút értékeinek arányára körülbelül 0,4 értéket jósol (*Few*, 1985).

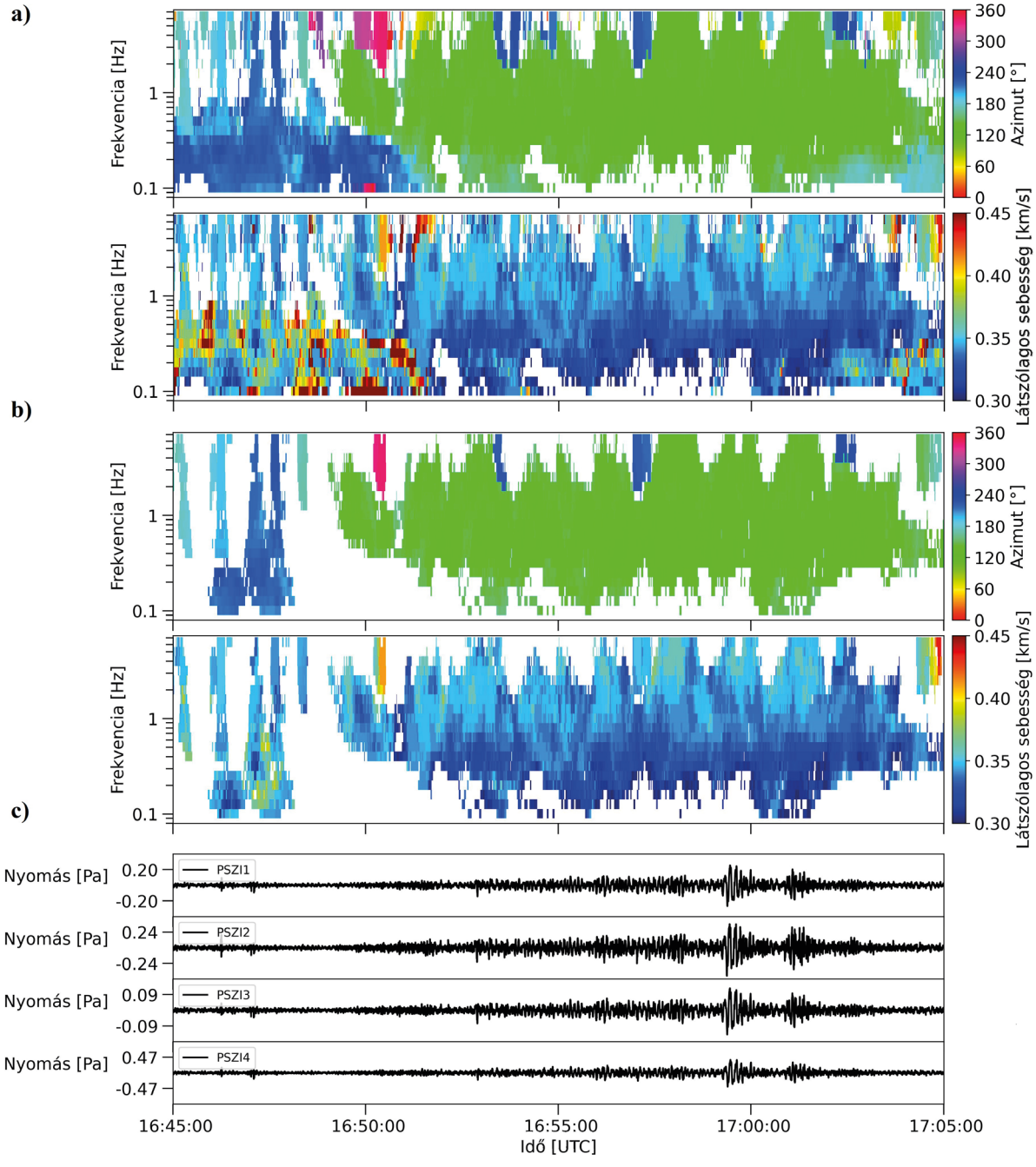
Chum és társai 2013-as kutatásuk során, elektromágneses és infrahang méréseket végeztek. A vizsgálat során 0,25 Hz és 3 Hz közötti domináns frekvenciatartománnyal rendelkező infrahang hullámcsomagokat találtak. Az akusztikus jeleket az EUCLID villámdetektáló hálózat és egy térerősségmérő idősorainak korrelláltatásával villámokként azonosítottak. Eredményeiket egyik korábban ismertetetett modell sem magyarázta. Megjegyzendő, hogy a szerzők által használt mikrobarométerek 4 Hz frekvenciaértéknél levágnak, így a megtalált kisülések jelei magasabb frekvenciákat is tartalmazhatnak. Minden villámlásnál dekompresszió (völgy) követte a kompressziót (csúcs). A völgyek és a csúcsok abszolút értékeinek arányára 1 körüli értéket kaptak a Few modelljével jósolt 0,4-es értékkel szemben. A szerzők konklúziója alapján az ismertetett infrahangkeltési módok módosíthatóak például több töltött réteg figyelembevételével (*Chum et al*., 2013).

A zivatarokban a villámlásokon kívül más mechanizmusok is kelthetnek infrahangtartományú akusztikus jeleket. Több szerző vizsgálta ezen lehetséges forrásokat (például *Georges*, 1973, 1976; *Beasley et al*., 1976; *Jones* and *Georges*, 1976). A zivatarokban infrahanghullámokat kelthet a látens hő felszabadulása, villámlásokon kívüli egyéb elektrosztatikus folyamat. Két további fontosabb forrás pedig a turbulencia és a légörvények (*Georges*, 1976; *Bowman* és *Bedard*, 1971). Alacsony frekvenciás megfigyelések kapcsolhatók vörös lidércekhez is (például *Farges et al*., 2005; *Liszka* and *Hobara*, 2006; *Farges* and *Blanc*, 2010).

Jelen cikk a zivatarokhoz és villámlásokhoz tartozó észlelések kategorizálásának egy-egy módszerét mutatja be. Előbbi alapján jellemezzük az állomás érzékenységét, vagyis vizsgáljuk milyen irányokból és távolságokból képes regisztrálni a zivatarokat az állomás.

Adatok

A Piszkés-tetőn található infrahangállomás (PSZI) 2017 májusa óta üzemel a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium felügyelete alatt. A nyers adatok (hullámformák) nyíltak, szabadon hozzáférhetőek [**3**]. PSZI négy darab SeismoWave gyártmányú MB3d mikrobarométerből áll, az állomás apertúrája körülbelül 250 m. Az adatok automatikus feldolgozására a CTBTO (Átfogó Atomcsend Egyezmény Szervezete, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) NDC-in-the-box software csomagban megtalálható DTK-GPMCC programot használjuk.



1. ábra. A PMCC módszer (lásd a szövegben) szemléltetése. A felső két panel (a) pixel szinten, a középső kettő (b) family szinten mutatja az észleléseket, legalul (c) a PSZI 4 mikrobarométerének hullámformái láthatók 2020. augusztus 4. 16:45 és 17:05 (UTC) között.

A már említett PMCC (*Cansi*, 1995; *Le Pichon* and *Cansi*, 2003; *Brachet et al*., 2010) algoritmus a hullámformák keresztkorrelációján alapszik. Kiválasztva egy három elemű alhálózatot az R_n hálózaton (jelölje az n az állomások elemeinek számát) keressük azon Δt időtolásokat, amik a legnagyobb korrelációs értékeket adják. A hullámparaméterek ezen időtolásokból származtathatók. Vezessük be r_{ijk} értéket egy adott három elemű alhálózatra (jelölje az elemeket szimbolikusan $i,j,k \in R_n$) az időtolások összegeként:

$$r_{ijk}=\Delta t_{ij}+\Delta t_{jk}+\Delta t_{ki}\,. \qquad (1)$$

Az alhálózatokat figyelembe véve és kiszámolva ezekre is az időtolásokat, az (1) egyenlet ismeretében definiálhatjuk a c_n konzisztenciát az alábbi egyenlőség segítségével:

$$c_n=\sqrt{\frac{6}{n(n-1)(n-2)}\sum r_{ijk}^{\,2}}\,. \qquad (2)$$

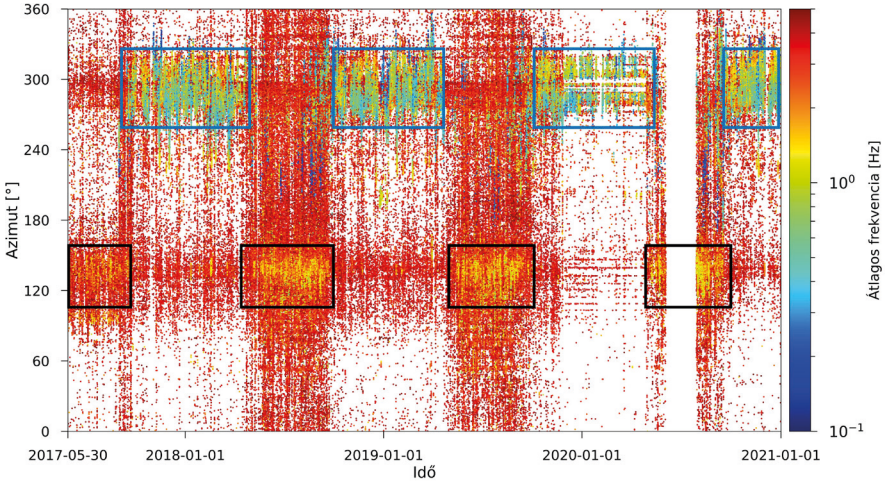
Amennyiben a konzisztencia egy előre definiált érték alatt van, akkor egy elemi észlelés (pixel) jön létre a teljes hálózatra értelmezve. Az elemi észelések keresése különböző frekvenciasávokban és ezeknek megfelelő időablakokban történik. Utófeldolgozás során kereshetjük, hogy mely pixelek tartoznak egybe. Ez megtehető például a Mahalanobis-távolsággal az idő (t), frekvencia (f), sebesség (v), azimut (α) térben. Jelölje két tetszőleges pixelt P_1 és P_2, akkor a távolságuk:

$$d(P_1,P_2)=\sqrt{\frac{(t_2-t_1)^2}{\sigma t^2}-\frac{(f_2-f_1)^2}{\sigma f^2}-\frac{(v_2-v_1)^2}{\sigma v^2 v_2 v_1}-\frac{(\alpha_2-\alpha_1)^2}{\sigma\alpha^2}}, \qquad (3)$$

ahol σ az egyes paraméterekhez tartozó súlyfaktor. Amíg a d távolság egy előre definiált küszöb alatt található, a pixelek egy családba (family) tartoznak, ezeket nevezzük észeléseknek/detekcióknak. Egy-egy észlelés paramétereit (például azimut, látszólagos sebesség) az őt felépítő pixelek paramétereinek átlaga adja meg. Így tehát a későbbiekben az észlelések frekvenciaösszetétele alatt is a pixelek frekvenciaértékének átlagát értjük. Az *1. ábra* szemlélteti a PMCC algoritmus eredményét 2020. augusztus 4. 16:45 és 17:05 (UTC) példáján. A legfelső két panelen (a) a pixelek láthatók idő-frekvencia szerint megjelenítve felül azimut alul pedig látszólagos sebesség szerint színezve. A középső két panelen (b) már csak azok a pixelek szerepelnek, melyek egy-egy észlelés részévé váltak. Legalul (c) a PSZI négy műszerének hullámformái láthatóak. (a) és (b) felső paneljein a zöld színezésű (körülbelül 134°-hoz tartozó észlelések kapcsolódnak a bejrúti robbanáshoz). PSZI esetében rutinfeldolgozásban alkalmazott frekvenciasávok 0,09 és 7,1 Hz közöttiek logaritmikus skálán, az időablakok ezeknek megfelelően 60–12,35 s hosszúságúak, átfedésük 95%. Az előre beállított konzisztencia küszöb 0,2 s. Az utófeldolgozás során az észlelések mérete 100 és 2000 pixel közé esik.

Az infrahang észleléseket gyakran bulletin formájában tárolják. A bulletin tulajdonképpen egy egyszerű, táblázatos formátumban kimentett szöveges fájl, amely tartalmazza az észlelések idejét, minimum, maximum és átlagos frekvenciaértékeit, az azimutot (°) és bizonytalanságát, a látszólagos sebességet (km/s) és hibáját, és egyéb, a PMCC módszer által meghatározott értékeket (*Le Pichon* és *Cansi*, 2003).

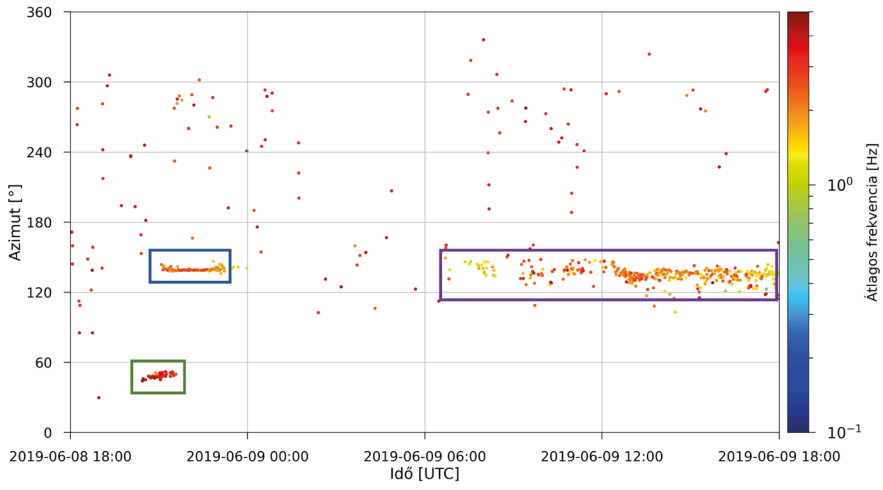
A 2017 óta eltelt években az állomás több, mint egymillió észlelést gyűjtött össze. Ezek között vannak ismert és ismeretlen eredetűek egyaránt. A *2. ábra* a PSZI 2017 májusa és 2021 áprilisa közötti észleléseit mutatja idő-azimut diagramon, ahol a színezés alapja az átlagos frekvencia. Az évek során kirajzolódott egy évszakos váltakozás, amely az uralkodó troposzferikus széliránynak tudható be (*Drob et al.*, 2008). Nyáron az állomáshoz viszonyítva keleti forrású, télen a nyugati forrású jelek észlelései vannak többségben. A téli észlelések zömét az atlanti-óceáni mikrobaromok adják (*Šindelářová et al.*, 2021), a nyáriakét feltehetőleg a fekete-tengeriek. Megjegyzendő, hogy utóbbiak eredete nem bizonyított, mert ebben az irányban több antropogén zajforrás is generál infrahang jeleket. Megfigyelhető továbbá az ábra sávossága 270° és 300°, valamint 110° és 150° között, ezek tipikusan mesterséges forrásoknak tudhatók be, ahonnan állandó irányból érkeznek az infrahanghullámok. Ilyen például a Mátrai



2. ábra. A piszkés-tetői infrahangállomás PMCC módszerrel feldolgozott észlelései 2017 májusa és 2021 eleje között idő-azimut diagramon. A színezés alapját az átlagos frekvenciaösszetétel adta. Kék kiemelések jelölik a téli időszakban az atlanti-óceáni, fekete keretek a nyári időszakban a feltételezett fekete-tengeri mikrobaromokat.

Erőmű körülbelül 137° azimutnál. 2020 nyarán egy közel kéthónapos szünet mutatkozik, ekkor az állomás műszerei szervizelés miatt nem üzemeltek.

Az ábrán is látható meganynyi észlelés közül csak a töredékük eredete ismert. A már említett mikrobaromokon kívül többek között repülőgépeké, bolidáké (*Kereszturi et al.*, 2021), vulkánkitöréseké, robbanásoké, valamint bányarobbantásoké (*Czanik et al.*, 2021). Évente kiadásra kerül a szeizmikus és infrahangjelek együttes feldolgozásával a Magyarországi Szeizmo-Akusztikus Bulletin [**4**], (*Bondár et al.*, 2019), mely a hazai és a környező országok bányarobbantásainak azon részét tartalmazza, melyeket mind a két technológia regisztrált.



3. ábra. A piszkés-tetői infrahangállomás PMCC módszerrel feldolgozott észlelései 2019. június 8. 18:00 és 2019. június 9. 18:00 (UTC) között idő-azimut diagramon. A színezés alapját az átlagos frekvencia adta. Két jellegzetes forrás kék és lila keret jelöl, ezek rendre a Mátrai Erőmű és a feltételezett fekete-tengeri mikrobaromok jelei. Zöld téglalap foglalja magába a feltételezett zivatarhoz tartozó észleléseket.

A zivatarok azonosításához, pontosabban szólva az infrahangészlelések zivatarokhoz kötéséhez a Blitzortung [**1**] adatbázisában szereplő villámlásokat használtuk fel, mint viszonyítási alap (ground truth, olyan események, melyek helye és ideje ismert). A Blitzortung egy világszerte működő, közösségi villámdetektáló hálózat. A villámlások helymeghatározására Time-of-Arrival (ToA) módszert használja, mely a VLF (Very Low Frequeny, 3-30 kHz) elektromágneses hullámok beérkezési idejének különbségén alapszik. A hálózat hatékonysága (detektált villámlás/összes villámlás) hazánk és a régiójának területén nem ismert (Blitzortung dokumentáció). Megjegyzendő, hogy *Narita* és *munkatársainak* (2018) munkája négy vizsgált zivatar alapján 12% és 39% közé teszi a Blitzortung hatékonyságát a TEPCO Power Grid cég adatbázisához képest, továbbá 1,43 km és 2,23 km közöttire becsüli a helymeghatározás pontosságát. *Kamagowa* és *munkatársai* (2023) vizsgálták, hogy a japán nemzeti hálózathoz (JLDN) képest mennyire megbízható a Blitzortung adatbázis hazájuk területén. Eredményeik alapján a Blitzortung hatékonysága 25% és 95% között változik cloud-to-ground (CG) kisülések esetén. A helymeghatározás relatív eltéréseire 5,3 km-es átlag, 3,6 km-es medián és 2 km-es módusz értéket kaptak. Kijelenthető, hogy a hálózat nem regisztrálja az összes villámlást, mégis segítséget nyújtanak a zivatarok azonosításához és követéséhez.

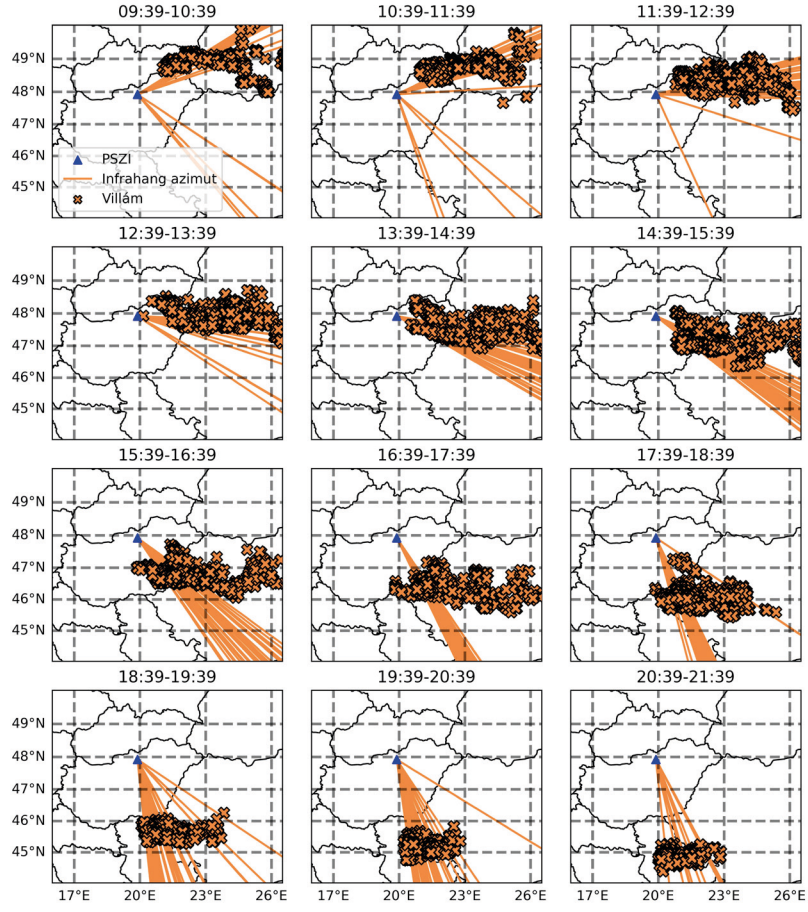
Módszerek

Zivatarokhoz kötés

A hipotézis a következő: a zivatarok hosszabb-rövidebb szakaszokként, foltokként jelennek meg az idő-azimut diagramon, a tér- és időbeli mozgásuknak megfelelően. A vizsgált időtartományban, vagyis 2017 és 2020 között, minden év május elejétől szeptember végéig összesen 366 ilyet sikerült azonosítani. A tapasztalat szerint ezek 1–3 napos nagyítás mellett jelölhetők ki. A *3. ábrán* egy tipikus nyári, 24 órás intervallum látható 2019. június 8. 18:00 és 2019. június 9. 18:00 (UTC) között. Kék keret emeli ki a Mátrai Erőműből érkező jeleket, ezek könnyen felismerhetők a közel állandó 137° azimutról. Lila téglalap foglalja magába a feltételezhetően fekete-tengeri mikrobaromokat és egyéb zavaró észleléseket. Elmondható, hogy a zivatarok keresését az előbbi kettő nehezíti a 120°–150° szögtartományban. Egy feltételezett zivatar képe a zöld keretben helyezkedik el. A megtalált észlelés csoportokat bulletin formájában mentettük ki.

A feladat a továbbiakban a kigyűjtött infrahang észlelésekhez zivatarok keresése, melyeket a villámlások azonosítanak. A villámlások és infrahangészlelések korrelációja alapján tehát a zivatarok akusztikus jelei azonosíthatók, ez megtehető kvalitatív módon, például térképi megjelenítés útján. A bulletinekhez, vagyis a feltételezett zivatarokhoz kigyűjtött észlelések

alapján tér-, és időbeli szűrést végeztünk a villámlásokon. Térben azok a villámlások jöhetnek szóba, melyek az legkisebb és a legnagyobb infrahanghullám azimut által meghatározott szögtartományba esnek. Hasznos e tartományt az alsó és felső határán bővíteni, ennek oka az infrahanghullámok elhajlása a terjedésre merőleges szél által. Ennek következménye, hogy a forrás és az észlelés azimutja nem egyeznek meg (*Diamond*, 1964; *Le Pichon et al*., 2005; *Amezcua* és *Barton*, 2021). Célszerű lenne a távolság függvényében kiterjeszteni a szögtartományt, ám itt a priori információ nélkül ez nem lehetséges (a későbbiekben, konkrét villámlások azonosításához e módon jártunk el). Zivatarok azonosításához tehát az empirikusan elégségesnek bizonyuló 10–10° szögértékek kibővítéssel dolgoztunk. Ennél nagyobb bővítés feleslegesen sok villámlást venne figyelembe. Időben azokat a villámlásokat kell keresni, melyek helyéről, idejéről a bulletin által kijelölt időtartományban érkeznek, érkezhetnek be infrahanghullámok az állomásra. Ez azért fontos, mert közeli események esetén a menetidő néhány perc, de több száz kilométeres távolságoknál a késés akár 1-2 óra is lehet. A villámlások idejét annyival toltuk el, amennyi idő alatt a Blitzortung adatbázisában szereplő helyről az infrahang elérne Piszkés-tetőre. Az infrahanghullámok bonyolult mozgást végeznek, a felszín és a légkör különböző reflektáló felületei között pattogva haladnak, de a tapasztalat szerint a direkt hullám feltételezéssel jól becsülhető a menetidő. Az időtolás (t) értékét az i-edik villámra a $t_i=d_i/c$ hányados adja meg, ahol d_i az infrahangállomás és az adott villámlás távolsága, c (celerity) a hullámút menti átlagos hangsebesség. A celerity nagyságrendileg 220–360 m/s között változik (*Brachet et al.*, 2010; *Nippress et al*., 2014; *Blom et al*., 2015). Célszerű lehet távolság függvényében megválasztani a celerity értékét a különböző hullámutaknak (pl. troposzferikus és sztratoszferikus reflexiók) megfelelően, azonban *Assink* és *munkatársai* (2008) nyomán 340 m/s-nak választottuk meg ezt az értéket, amely kis távolságokra (<100 km) működik jól (*Nippress*, 2014). Előre vetítve az eredményeket, zömmel olyan zivatarokat regisztrál a PSZI, amelyek 500 kilométeres körön belülre esnek, e távolságra becsült menetidő 260 m/s, 300 m/s és 340 m/s celerity értékek esetében rendre kb. 32, 28 és 24,5 perc. A különböző celerity értékek által számolt menetidő különbségek sokkal rövidebbek, mint a feltételezett zivatarok hossza a bulletinek alapján (több órás intervallum), így nem változtattuk a celerityt a távolság függvényében. Azonban a konstans feltételezés kompenzálása érdekében időtartományban a bulletin által meghatározott időablakot kibővítettük a határokon 10–10 perccel. A műveletek elvégzése után az idő- és térbeli korreláció kvalitatív úton történő vizsgálata lehetővé válik például térképi megjelenítés útján. A *4. ábra* egy 2019. június 27-ei fél napon át, 09:39 és 21:39 (UTC) között északkeletről délnyugat felé vonuló zivatar példáján mutatja, hogyan követik az infrahangészlelések (a megfelelő azimuttal vonalakkal reprezentálva) a villámlásokat (keresztek). A térképeken balról jobbra, fentről lefelé egy-egy órányival eltolva mutatja a zivatar mozgását. Megjegyezzük, hogy jelen vizualizáció során a villámlások térbeli szűrése nem órás bontásban, hanem a bulletinben szereplő legkorábbi és legkésőbbi észlelés által meghatározott intervallumra végeztük el, ez okozza például



4. ábra. Egy zivatar képe 2019. június 27-én az azonosításhoz használt térképi megjelenítésben. Balról jobbra, fentről lefelé 1-1 órával elcsúszva szerepelnek mind az infrahangészlelések (vonalak) a piszkés-tetői állomástól a hozzájuk tartozó azimuttal rajzolva és a villámlások (keresztek).

16:39 és 17:39 között a sok eltérő azimutnál található villámlást. A legtöbb zivatar esetében elég volt egy térképi nézet a zivatarok azonosításához, néhol segítségképpen animációkat készítettünk (a *3. ábrához* hasonlóan, ámde kisebb időlépésekkel).

Az állomás érzékenysége vizsgálható a zivatarok térbeli eloszlása alapján, vagyis elemezhető, hogy PSZI milyen távolságokból és milyen irányokból képes meghallani egy zivatar jelét. Ehhez olyan zivatarokat kerestünk az azonosítottak között, melyek legfeljebb 3–4 órát ölelnek át és kis területre (kb. 2°×2°) koncentrálódnak. Ezekhez a villámlások koordinátái alapján rendeltünk hozzá egy középpontot, centroidot.

Konkrét villámok keresése

Az előző fejezetben, a zivatarok azonosításánál a villámlásokat csupán arra használtuk, hogy az azonosításhoz kirajzolják mikor, merre volt zivatar. Az állomáson regisztrált jelek azonban a villámlásokon kívül a zivatarokban lezajlódó egyéb infrahangkeltési mechanizmusból származhatnak. Ezek ellenére, körülbelül 50 kilométer távolságig a zivatarokban az egyes villámlások is beazonosíthatók (*Assink et al.*, 2008; *Chum et al.*, 2013). Direkt hullám feltételezéssel élve egy a t_{EM} időpontban kipattanó villámlásból származó infrahanghullám a t_{infra} időpontban ér az állomásra, ez a következőképpen írható fel (*Assink et al*., 2008):

$$t_{infra} = t_{EM} + \frac{d}{c} + \Delta t \ , \qquad (4)$$

ahol d a villámlás és az állomás távolsága, c=340 *m/s* feltételezett átlagos hangsebesség és Δt egy, a bizonytalanságból adódó paraméter, jellemzően néhány másodperc. A bizonytalanságnak több oka van. Egyrészt adódik infrahanghullám beérkezési idejének, a villámlás helyének (a Blitzortung által használt ToA módszer esetében ez *Narita* és *munkatárai* (2018) nyomán körülbelül 1–2 kilométer) és idejének meghatározásából, másrészt a modellben feltételezett direkt hullám terjedéstől való eltérésből, valamint az infrahanghullámok elhajlásából. Átrendezve az előbbi egyenletet a következő reláció alapján kapcsolhatók össze infrahangészlelések villámlásokkal időben:

$$t_{infra} - \left(t_{EM} + \frac{d}{c} \right) < \Delta t \ , \qquad (5)$$

Az időbeli keresés kiegészítendő egy térbeli szűréssel, mely szerint az észlelés és villámlás azimutjainak különbsége (abszolút értékben) nem haladja meg a választott $\Delta\varphi(d)$ távolságfüggő értéket. A távolságfüggés oka az, hogy az állomástól távolodva ugyanakkora azimutbeli eltérés sokkal nagyobb távolságkülönbségeket jelentene. Azt az értéket, hogy a villámlás helye mennyivel térhet el a villámadatbázisban szereplőétől maximum 2 kilométerre akartuk szabni, a villámlások helymeghatározási hibájának becslésével a Japánban meghatározott pontosságok nyomán (*Narita et al*., 2018; *Kamagowa et al*., 2023). A $\Delta\varphi(d)$ értéket az éppen vizsgált villámlás távolsága alapján határozhatjuk meg a következő tapasztalati egyenlettel:

$$\Delta\varphi(d) = \arctan\left(\frac{2\ \text{km}}{\text{d}} \right) + 1°. \qquad (6)$$

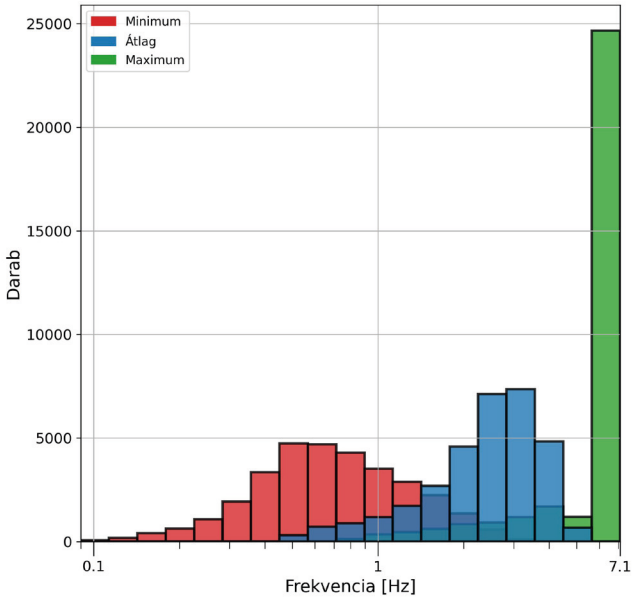
A kifejezés első tagja szerint a villámlás az adatbázisban szereplő koordinátáitól 2 kilométeres sugarú körben lehet. A második tag egy tesztelések során empirikusan megállapított érték. Megjegyzendő, hogy a bizonytalanság miatt a tér-, és időbeli szűrések egy észleléshez több villámlást is kapcsolhatnak, ez esetben a felhasznált módszerekkel nem lehet eldönteni, hogy melyik jelét regisztrálta az infrahangállomás. Azt, hogy ténylegesen villámlás jele került detektálására, a szűrt hullámformák vizsgálatával határoztuk meg, ehhez a PSZI négy mikrobarométere közül legalább hármon ki kellett rajzolódnia a várt, jellegzetes jelalaknak. A hullámformák szűrésére zérófázisú, harmad rendű 0,25 Hz-es alsó és 5 Hz-es felső határokkal rendelkező sávszűrőt alkalmaztunk, ugyanis ebben a tartományban várhatóak a villámlások domináns frekvenciái (*Assink et al.*, 2008).

Eredmények, diszkusszió

2017 és 2020 között, szisztematikusan vizsgálva idő-azimut diagramon az adatokat, összesen 366 feltételezett zivatart gyűjtöttünk ki. A kiválogatás alapját az a hipotézis adta, mely szerint a zivatarok hosszabb-rövidebb szakaszokként, foltokként jelennek meg az idő-azimut diagramon. A 366 potenciális zivatarból 309 bulletin esetében tudtuk valóban zivatartevékenységhez kötni az észleléseket a kvalitatív korrelációs módszer felhasználásával. Ez körülbelül 84%-os találati arányt jelent, mely alapján a hipotézis helyesnek mondható. A fejlesztett módszer gyorsnak mondható abban az értelemben, hogy nem igényli például a hullámút követést, (ray tracing) amelyet minden egyes észlelésre el kellene végezni, amely rendkívül időigényes (és számításigényes) feladat lenne. A módszer hátránya, az infrahangészlelések esetleges félreklasszifikálása (lásd *3. ábra* felső sor). A fennmaradó

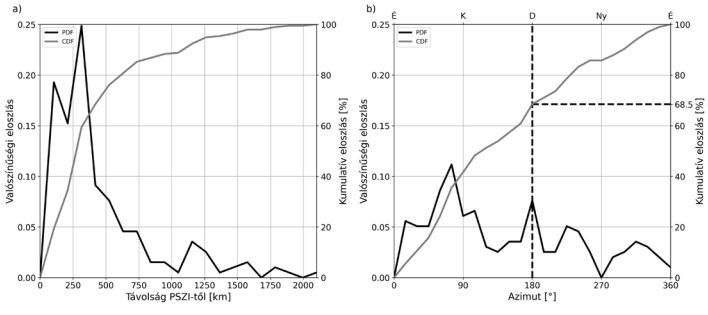
57 esetben, (16%) érdemes lehet radaradatokkal, csapadéktérképekkel összenézni az észleléseket olyan egyéb, infrahang hullámokat keltő időjárási események keresése érdekében, melyekhez nem társult villámtevékenység. A 309 bulletin összesen 32000 észlelést tartalmaz, amik megkapták a „zivatar" kategóriát. Ez a vizsgált időtartományban, vagyis 2017 májusa és 2020 októbere között összesen összegyűlt körülbelül 630 000 észlelés 5%-a.

A 32 000 kategorizált észlelés alapján vizsgáltuk a zivatarokból érkező jelek PMCC által pixel szinten meghatározott és átlagolt frekvenciaszerinti összetételét. Ennek eredményeit az *5. ábra* mutatja. A minimum és átlagos frekvenciaértékek átlagai $< f_{min} > = 0{,}83$ Hz, $< f_{átlag} > = 2{,}56$ Hz. A maximumok eloszlása torzultnak mondható, a legfelső frekvenciasáv közepéhez esik a csúcs, ami (5,64 Hz + 7,1 Hz) /2 ≈ 6,37 Hz. Ez alapján a zivatarok jelei magasabb frekvenciákat is tartalmazhatnak.

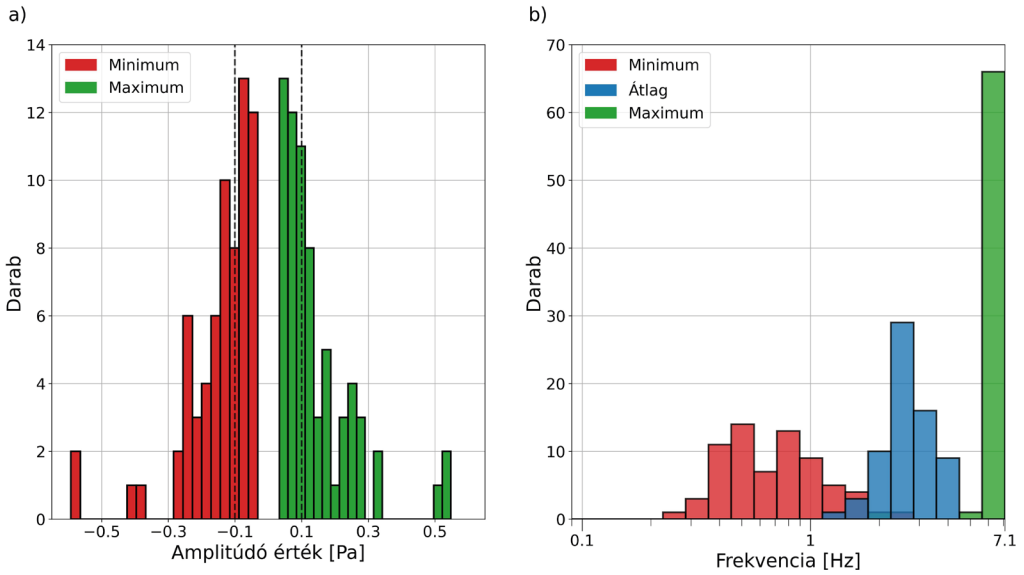


5. ábra. A zivatarokhoz kapcsolt infrahang észlelések minimum (piros), maximum (zöld) és átlagos (kék) frekvencia szerinti eloszlása.

Az azonosított 309 zivatar között külön kerestünk olyanokat, melyek legfeljebb 3-4 órát ölelnek át és kis területre (kb. 2°×2°) koncentrálódnak, mely megszorításokra a forrás lokalizációja miatt volt szükség. Egy másik megközelítés alapján felhasználhattuk volna az összes zivatart is, felbontva különböző időlépésekben, például a *3. ábránál* bemutatott egy órás intervallumokban. Célunk az észlelt zivatarok távolság- és irányeloszlásainak legegyszerűbb becslése, elemzése volt, amely rosszul megválasztott időlépés esetén torzíthatta volna ezen eloszlásokat, így az előbbi módon jártunk el. A kiválasztott zivatarokhoz összesen 197 középpontot, centroidot rendeltünk a villámlások koordinátái alapján. A centoridok PSZI-től vett távolságuk és azimutjaik eloszlását rendre a *6. (a)* és *(b) ábra* mutatja. Fekete folytonos vonal jelöli a valószínűségi sűrűségfüggvényt (PDF), szürke folytonos vonal a kumulatív eloszlásgörbét (CDF). A centroidok eloszlásáról távolság szerint elmondható, hogy a távolság növekedésével csökken a számuk. Az állomás nagyobb részben a regionális zivatarok jeleit fogja, mert 197 centoridból 133 (körülbelül 70%) 400 kilométeres távolságon belülre esett. A harmadik kvartilis is csak 514 kilométer távolságnál található, és az átlagos érték 406 kilométer. A legtávolabbi centroid majdnem 2100 kilométer távolságra esett PSZI-től, ez a zivatar Afrika északi partjainál tombolt. Azimut szerint a keleti zivatarok vannak többségben, ennek a hátterében az áll, hogy a vizsgált időszakokban (május eleje – szeptember vége) az uralkodó troposzferikus szélirány miatt dominálnak a keleties észlelések (*Drob et al.*, 2008). Megjegyzendő, hogy az 57 bulletin esetében, ahol nem sikerült villámlások által zivatarhoz kötni az észleléseket 41 alkalommal mutattak az azimutok nyugatias (180° – 360°) irányba, megerősítve a szükségességét az egyéb, például radar adatokkal való összevetésnek nyugati frontokként való azonosítás céljából. Körülbelül 2:1 arányban estek a centroidok azimutjai 0° és 180°, valamint 180° és 360° közé, 180°-nál 68,5%-os értéket vesz fel a CDF. A (b) ábrán megfigyelhető 120° és 150° közötti hiány oka a Mátrai Erőmű és a feltételezett fekete-tengeri mikrobaromok zavaró hatása a zivatarok keresésében. A 270°-os azimut körüli hiány magyarázata további vizsgálat tárgyát képezi.



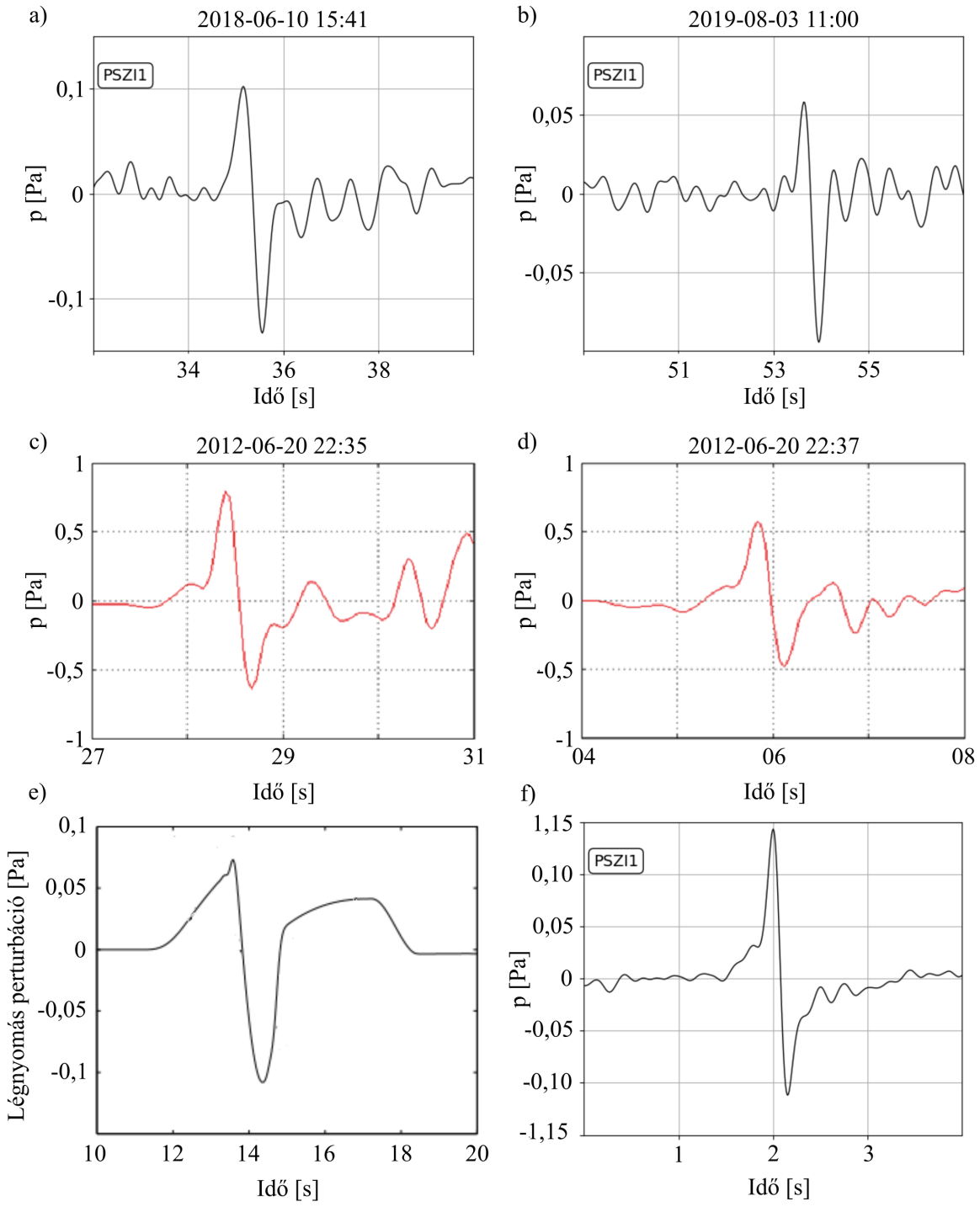
6. ábra. A zivatarok centroidjainak PSZI-től vett távolság (a) és azimut (b) szerinti eloszlása. Fekete folytonos vonal mutatja a becsült valószínűségi sűrűségfüggvényt (PDF), szürke folytonos vonal az ebből számolt kumulatív eloszlást (CDF). Az azimutok eloszlásánál függőleges szaggatott vonal jelöli a nyugatias és keleties észlelés határát.



7. ábra. (a) A villámlásokhoz kapcsolt észlelések hullámformáiból számolt minimum (piros) és maximum-zöld) amplitúdók eloszlása. (b) A villámlásokhoz kapcsolt infrahang észlelések minimum (piros), maximum (zöld) és átlagos (kék) frekvencia szerinti eloszlása.

Az (5) egyenlőtlenség és a (6) egyenlet segítségével, a közeli, már azonosított zivatarokban (<50 km) 956 infrahangészleléshez 1226 villámlást társítottunk. Az észlelések további vizsgálata, vagyis a szűrt hullámformák manuális átnézése után ezek közül 68-at azonosítottunk villámként, a modell alapján várt és a korábban megfigyelt (például *Balachandran,* 1983; *Chum et al*., 2013; *Arechiga et al*., 2014) hullámformához való hasonlítás által. Ugyan a nyers hullámformákon is sok esetben ki lehetett venni a keresett jellegzetes jelalakot, a sávszűrő alkalmazása segítette a villámlások azonosítását. Mind a szűrő impulzusválaszának, mind a nyers (szűrés nélküli) hullámformák vizsgálata, azt mutatta, hogy a szűrt idősorokon a villámlásként értelmezett jelalakok nem magának a szűrő impulzusválaszának a hatása. Szűrésre minden esetben megfelelőnek bizonyult a zérófázisú, harmad rendű sávszűrő 0,25 Hz-es alsó és 5 Hz-es felső határokkal módosítva *Chum* és *társai* (2013) által használt felső szűrési határt, ugyanis ebben frekvenciatartományban várhatóak a villámlások infrahang jeleinek domináns összetevői (*Assink et al*., 2008). Távolság szerint a legközelebbi nagyjából 3 kilométer távolságban, a legtávolabbi a maximálisan vizsgált 50 kilométer messzeségben történt. Az átlagos távolság a PSZI-től 27,6 kilométer. A legtöbb esetben a csúcsok -0,1 Pa és 0,1 Pa tartományba estek. A maximumok és minimumok eloszlásai az *7. (a) ábrán* láthatóak. A csúcsok abszolút értékeinek arányaira 1 körüli értéket kaptunk, az átlag 1,05 lett a 68 villámlás alapján. Ez megegyezik *Chum* és *társainak* 2013-as valamint *Arechiga* és *társainak* (2014) eredményeivel. Itt kiemelendő, hogy a három esetben vizsgált frekvenciasáv kissé eltér. (Esetünkben 0,25-5 Hz, *Chum* és *társai* munkájában (2013) 0,25-3 Hz, valamint *Arechiga* és *társainak* kutatásában 0,2-10 Hz.) Ez a megfigyelés ellentmond a Few modellje által jósolt 0,4-es értéknek, mely a modell pontosítását vetíti előre. Ugyan az észlelések végső azonosítástát a 0,25–5 Hz frekvenciatartományban sávszűrt hullámformák vizsgálata adta, a frekvenciaösszetétel kiértékelését az észlelés pixelszintű frekvenciaösszetétele alapján végeztük. A *7. (b) ábra* a villámokhoz kapcsolt észlelések minumum (piros), maximum (zöld) és átlagos (kék) frekvenciaösszetételét mutatja. A 68 infrahangészlelés áltagos frekvenciaösszetételei a következőek: $<f_{min}> = 0{,}767$ Hz, $<f_{átlag}> = 2{,}626$ Hz. Ahogy a zivatarokhoz kapcsolt észleléseknél, itt is torznak mondható a maximumokhoz tartozó eloszlás, a csúcs a legmagasabb frekvenciasávhoz esik, tehát a villámokhoz kapcsolt észlelések szintén tartalmazhatnak magasabb frekvenciaértékeket.

A *8. ábra* két megtalált villám hullámformáit (felső sor) hasonlítja össze *Chum* és *társai* 2013-as eredményeivel (középső sor) és Pasko 2009-es numerikus modelljével *(d)* és az átlagos hullámformákkal *(e)*. Az első két saját ábrán PSZI 1 hullámformái láthatók: az *(a) ábrán* 2018. június 10. 15:41:34 és 15:41:38 (UTC), és a *(b) ábrán* 2019. augusztus 3. 11:00:51 és 11:00:55 (UTC) között. Ezeken a regisztrátumokon zérófázisú, harmad rendű 0,25 Hz-es alsó



8. ábra. Megtalált villámlások (felső sor) összevetése Chum és társai által azonosított villámlásokkal (középső sor, módosítva Chum et al., 2013 után) és (e) Pasko modellezett eredményével (módosítva Pasko, 2009 után). Az (f) ábrán a 68 megtalált villámlás alapján számolt átlagos hullámformát mutatja a csúcsoknál összetolva, előtte és utána 2-2 másodperccel megjelenítve.

és 5 Hz-es felső határokkal szűrt hullámformák szerepelnek. A *(c)* és *(d)* egy a Panska Ves-re (Csehország) kitelepített mikrobarométer regisztrátumai láthatók rendre 2012. június 20. 22:35:27 és 22:35:31, illetve 22:37:04 és 22:37:08 óra között. Ezen hullámformákon zérófázisú, nyolcad rendű 0,25 Hz-es alsó és 3 Hz-es felső határokkal rendelkező sávszűrő szerepel. Itt a felső határ azért alacsonyabb, mert a szerzők által használt műszer 4 Hz-nél levág. A felső négy kivágat a jobb összehasonlítás érdekében négy-négy másodperces idősávokat fed le. A legalsó sorban, az *(e) ábrán* ezzel szemben egy hosszabb intervallum (10 másodperc) látható. Az *(f) ábra* a 68 villámlás hullámformáinak átlagát mutatja a csúcsoknál összetolva, a csúcs előtt és után 2-2 másodperccel megjelenítve. A kezdeti kompressziós fázis és a dekompressziós csúcs (völgy) mind a hat esetben megfigyelhető. A harmadik kompressziós fázis (általában laposabb pozitív csúcs) azonban csak a *(b) ábrán* és a *(d) ábrán* rajzolódik ki. Ez a 68 vizsgált villámlás alapján ritkábban látszik, és rövidebb is a modellhez képest, valamint kisebb amplitúdóval rendelkezik. *Chum* és *társai* eredményeihez képest elmondható továbbá, hogy az általunk talált villámlások amplitúdói kisebbek, inkább Pasko modelljénél is látható ±0,1 Pa tartományba estek (ahogy a *7 (a) ábra* is mutatja). További sávszűrök tesztelése során (alsó határok: 0,2 Hz, 0,25 Hz, 0,5 Hz, 0,75 Hz, 1 Hz és felső határok: 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 8 Hz kombinációival) az amplitúdó értékek továbbra is a ±0,1 Pa tartományba estek, valamint arányaik sem változtak az 1 körüli értékhez képest. Ugyanakkor a sávszűrő alsó határának növelésével megjelent a harmadik, kompressziós csúcs az átlagos hullámformákon.

Összefoglalás

Olyan félmanuális eljárást/eljárásokat fejlesztettünk ki, melyekkel egy infrahangállomás észlelései közül nagy bizonyossággal kiválaszthatóak, hogy melyek tartoznak zivatarokhoz, villámlásokhoz infrahang és villámeloszlás térképek összevetésével. A módszer gyorsnak mondható, mert nem igényli a hullámút követés (ray tracing) alkalmazását, amely jóval időigényesebb lenne ekkora számú észlelés esetén. A fejlesztett eljárással a vizsgált időtartományban, vagyis 2017 májusa és 2020 októbere között összesen összegyűlt körülbelül 630000 észlelés 5%-át sikerült besorolni a zivatar kategóriába.

Az azonosított zivatarok között azokhoz, melyek rövid ideig tomboltak és kis helyre koncentrálódtak centroidokat rendeltük. Ezek alapján vizsgáltuk, hogy milyen irányokból és milyen távolságokból képes regisztrálni a zivatarok által keltett infrahanghullámokat a piszkés-tetői állomás. A 197 centroid vizsgálata kimutatta, hogy azimut szerint – a nyárias troposzferikus széljárásnak megfelelően – a keleti zivatarok vannak többségben, 2:1 arányban a nyugatiakhoz képest. Távolság szerint többnyire regionális (<400 km) zivatarok jeleit veszi az állomás, de egészen 2000 km távolságig is képes regisztrálni ilyen eseményt. A PSZI-hez közeli (<50 km) zivatarokban külön kerestünk villámlásokat időbeli, valamint távolságfüggő térbeli szűrések alkalmazásával. Az észlelésekhez kapcsolódó hullámformák átvizsgálása után 68 villámlást sikerült azonosítanunk.

A jövőben az ismertetett módszerek rutinszerű alkalmazása hozzájárul, hogy jobban megértsük mit is „hall" hazánk eddig egyetlen infrahangállomása.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott munkákat a K128152 OTKA kutatási projekt és a NKM2018-10 cseh-magyar bilaterális egyezmény keretein belül végeztük. Köszönet illeti meg a Blitzortung hálózatot, valamint Barta Veronikát az adatbázishoz való hozzáférésben nyújtott segítségéért. Köszönet illeti meg továbbá a bírálót, aki kérdéseivel, javaslataival hozzájárult a cikk minőségének javításához.

Irodalomjegyzék

Amezcua, J., and Z. Barton, 2021: Assimilating atmospheric infrasound data to constrain atmospheric winds in a two-dimensional grid. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 147*, 3530–3554. https://doi.org/10.1002/qj.4141

Arechiga, R., M. Stock, R. Thomas, H. Erives, W. Rison, H. Edens, and J. Lapierre, 2014: Location and analysis of acoustic infrasound pulses in lightning, *Geophys. Res. Lett. 41*, 4735–4744. https://doi.org/10.1002/2014GL060375

Assink, J. D., L. G. Evers, I. Holleman, and H. Paulssen, 2008:, Characterization of infrasound from lightning, *Geophys. Res. Lett. 35*, L15802. https://doi.org/10.1029/2008GL034193

Balachandran, N. K., 1983: Acoustic and electric signals from lightning, *J. Geoph. Res. 88*, 3879–3884. https://doi.org/10.1029/JC088iC06p03879

Beasley, W.H., T.M. Georges, and M.W. Evans, 1976: Infrasound from convective storms: An experimental test of electrical source mechanisms. *J. Geophys. Res. 81*, 3133–3140. https://doi.org/10.1029/JC081i018p03133

Blom P.S., O. Marcillo, and S.J. Arrowsmith, 2015: Improved Bayesian Infrasonic Source Localization for regional infrasound, *Geoph. J. Int. 203*, 1682–1693. https://doi.org/10.1093/gji/ggv387

Bohannon, J.L., A.A. Few, and A.J. Dessler, 1977: Detection of infrasonic pulses from thunderclouds. *Geoph. Res. 4*, 49–52. https://doi.org/10.1029/GL004i001p00049

Bondár, I., Cs. Czanik, B. Czecze, D. Kalmár, M. Kiszely, P. Mónus, and *B. Süle*, 2019: *Hungarian Seismo-Acoustic Bulletin 2017–2018*, Kövesligethy Radó Seismological Observatory, MTA CSFK GGI.

Bowman, H. S., and A. J. Bedard Jr., 1971: Observations of infrasound and subsonic disturbances related to severe weather. *Geoph. J. Roy. Astron. Soc. 26*, 215–242. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb03396.x

Brachet N., Brown D., Le Bras R., Mialle P., Coyne J. Le Pichon A., Blanc., and *Hauchecorne A*., 2010: Monitoring the Earth's atmosphere with the Global IMS Infrasound Network, Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies, Springer, 77–118. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5_3

Cansi, Y., 1995: An automated seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method, *Geophys. Res. Lett. 22*, 1021–1024. https://doi.org/10.1029/95GL00468

Chum, J., G. Diendorfer, T. Šindelářová, T. Baše, and F. Hruška, 2013: Infrasound pulses from lightning and electrostatic field changes: Observation and discussion, *J. Geophys. Res. Atmos. 118*, 10,653–10,664. https://doi.org/10.1002/jgrd.50805

Czanik, C., M. Kiszely, P. Mónus, B. Süle, and *I. Bondár*, 2021: Identification of Quarry Blasts Aided by Infrasound Data, *Pure Appl. Geophys. 178*, 2287–2300. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02748-5

Dessler, A.J., 1973: Infrasonic thunder. *J. Geoph. Res. Lett. 78*, 1889–1896. https://doi.org/10.1029/JC078i012p01889

Diamond, M., 1964: Crosswind effect on sound propagation. *J. Appl. Meteorol. Climat. 3*, 208–210. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003<0208:CWEOSP>2.0.CO;2

Drob, D.P., J.T. Emmert, G. Crowley, J.M. Picone, G.G. Shepherd, W. Skinner, P. Hays, R.J. Niciejewski, M. Larsen, C.Y. She, J.W. Meriwether, G. Hernandez, M. J. Jarvis, D.P. Sipler, C.A. Tepley, M.S. O'Brien, J. R. Bowman, Q. Wu, Y. Murayama, S. Kawamura, I. M. Reid, and *R A. Vincent*, 2008: An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07, *J. Geoph. Res. 113*, A12304. https://doi.org/10.1029/2008JA013668

Farges, T., and *E. Blanc*, 2010: Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas, *Geophys. Res. Lett. 115*, A00E31. https://doi.org/10.1029/2009JA014700

Farges, T., E. Blanc, A. Le Pichon, T. Neubert, and *T.H. Allin*, 2005: Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign. *Geophys. Res. Lett., 32*, L01813. https://doi.org/10.1029/2004GL021212

Few, A.A., 1985: The production of lightning-associated infrasonic acoustic sources in thunderclouds, *J. Geoph.. Res. 90*, 6175–6180. https://doi.org/10.1029/JD090iD04p06175

Georges, T.M., 1973: Infrasound from convective storms: Examining the evidence. *Rev. Geoph. Space Phys. 11*, 571–593. https://doi.org/10.1029/RG011i003p00571

Georges, T.M., 1976: Infrasound from convective storms. Part II: A critique of source candidates. NOAA *Tech. Rep.* ERL 380–WPL 49, [Available from the National Technical Information Service, 5285 Port Royal Rd., Springfield, VA 22161.]

J*ones, R.M*., and *T.M. Georges*, 1976: Infrasound from convective storms. III. Propagation to the ionosphere. *J. Acoust. Soc. Amer. 59*, 765–779. https://doi.org/10.1121/1.380942

Kamogawa M., T. Suzuki, H. Fujiwara, T. Narita, E. Wanke, K. Murata, T. Nagao, T. Kodama, J. Izutsu, A. Matsuki, et al. 2023: Characteristics of the Blitzortung.org Lightning Location Catalog in Japan. *Atmosphere 14*(10):1507. https://doi.org/10.3390/atmos14101507

Kereszturi A., V. Barta., I. Bondár, Cs. Czanik, A. Igaz, P. Mónus, D. Rezes, L. Szabados, B.D. Pál, 2021. Review of synergic meteor observations: linking the results from cameras, ionosondes, infrasound and seismic detectors, *Month. Not. R.. Astron. Soc. 506*, 3629-3640. https://doi.org/10.1093/mnras/stab1918

Le Pichon and *A.Y. Cansi*, 2003: Progressive Multi-Channel Correlation: Technical Documentation. CTBTO, Vienna.

Liszka, L. and *Y. Hobara*, 2006): Sprite-attributed infrasonic chirps. Their detection, occurence and properties between 1994 and 2004, J. *Atmos. Sol. Terr. Phys. 68*, 1179– 1188. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.016

Narita, T.; Wanke, E.; Sato, M.; Sakanoi, T.; Kumada, A.; Kamogawa, M.; Ishikawa, H.; Harada, S.; Kameda, T.; Tsuchiya, F. et al., 2018: A Study of Lightning Location System (Blitz) Based on VLF Sferics. In Proceedings of the 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, 2–7 September 2018. https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503311

Nippress A., D.N. Green, O.E. Marcillo, and *S.J. Arrowsmith*, 2014: Generating regional infrasound celerity-range models using ground-truth information and the implications for event location. *Geoph. J. Int. 197*, 1154–1165. https://doi.org/10.1093/gji/ggu049

Pasko, V.P., 2009: Mechanism of lightning-associated infrasonic pulses from thunderclouds, *J. Geoph. Res. Lett. 114*, D08205. https://doi.org/10.1029/2008JD011145

Šindelářová T., M. De Carlo, Cs. Czanik, D. Ghica, M. Kozubek, K. Podolská, J. Baše, J. Chum, and *U. Mitterbauer*, 2021: Infrasound signature of the post-tropical storm Ophelia at the Central and Eastern European Infrasound Network. *J. Atm. Solar-Terr. Phys. 217*, 105603. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105603

Wilson, C.T.R., 1920: Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms, *Philos. Trans. R. Soc. A 221*, 73–115. https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0003

Internetes hivatkozások

[**1**] https://www.blitzortung.org/hu/live_lightning_maps.php (2021.09.30.)

[**2**] https://www.blitzortung.org/Compendium/Hardware/Documentation_20_6.html (2021.08.02.)

[**3**] https://www.fdsn.org/networks/detail/HN/ (2023.12.08.)

[**4**] https://infrasound.hu/index.php/hu/magyarorszagi-szeizmo-akusztikus-bulletin (2024.02.07.)

Az eddy-kovariancia mérések alapján származtatható evapotranspiráció bizonytalanságának vizsgálata

Incze Dóra, Barcza Zoltán, Pintér Krisztina, Nagy Zoltán, Fodor Nándor, Haszpra László
ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, incze.dora96@gmail.com

DOI:10.56474/legkor.2024.2.2

A számos kutatás és módszertani fejlesztés ellenére az evapotranspiráció az egyik legnehezebben becsülhető komponense a vízmérlegnek. Az egyik közvetlen módszer, amivel az evapotranspirációt becsülni tudjuk, az ún. eddy-kovariancia mérés, amelyet a sok befolyásoló tényező és alapfelvetés miatt számottevő bizonytalanság terhel. Kutatásunk célja az evapotranspiráció mértékének és korlátainak meghatározása és becslése gyepes és szántóföldi területek felett a Magyarországon rendelkezésre álló hosszú idejű eddy-kovariancia mérések alapján.

Investigation of the uncertainty of evapotranspiration derived from eddy covariance measurements

Despite numerous research and methodological developments, evapotranspiration is one of the most difficult components of the water balance to estimate. One of the direct methods, with which evapotranspiration can be estimated, is the so-called eddy covariance; however, it may suffer from significant uncertainties due to many factors and basic assumptions. The current research aims to determine the rate and estimate the limits of evapotranspiration over grassland and arable land based on Hungarian long-term eddy covariance measurements.

A felszíni párolgás a víz bonyolult globális körforgásának egyik legfontosabb komponense. A talaj-növény-légkör rendszerben a talajban tárolt vízmennyiség a csupasz talajról történő párolgás (evaporáció), és a növények párologtatása (transpiráció) révén távozik a légkörbe. Emellett a lehullott csapadék egy része nem éri el a talajt, mert a vegetáció felfogja a vizet (intercepció). A növényzet felszínéről a nedvesség szintén evaporációval kerül vissza a légkörbe. Az említett folyamatokat együttesen evapotranspirációnak (ET) nevezzük (*Aubinet et al*., 2012; *Bonan*, 2002).

Az ET mértéke (az ún. tényleges evapotranspiráció) a különböző meteorológiai paraméterek (globálsugárzás, léghőmérséklet, relatív páratartalom, szélsebesség) mellett függ a vegetációtól és a talajban rendelkezésre álló vízmennyiségtől is (*Stisen et al*., 2021). A párolgási folyamatokkal kapcsolatos ismereti hiátusok miatt jelenleg az ET a vízmérleg egyik legnehezebben becsülhető komponense a számos kutatás és módszertani fejlesztés ellenére is (Dimitriadou and *Nikolakopoulos*, 2021; *Stisen et al*., 2021).

A közvetlen ET becslési módszerek telepítési és karbantartási költségei magasak, azonban pontosabb és megbízhatóbb értékeket szolgáltatnak, mint az egyéb módszerek. Az egyik ilyen közvetlen módszer az ún. eddy-kovariancia mérésekre támaszkodik. Az eddy-kovariancia alapú mérések bár alapvetően kutatási célúak, sok esetben mégis monitoring jellegűek, azaz sok éven keresztül szolgáltatnak finom időbeli felbontásban ET adatokat adott mérési helyre vonatkozóan. Jó példa erre a FluxNet hálózat (*Baldocchi*, 2014). Emiatt a mérések eredményei új és meghatározó fontosságú információt nyújtanak a vízmérleg komponenseiről (*Baldocchi*, 2014; *Pan et al*., 2020).

Az itt bemutatott kutatás célja az ET mértékének meghatározása gyepes, valamint szántóföldi területek felett a Magyarországon rendelkezésre álló eddy-kovariancia mérések alapján. A jelen kutatáshoz felhasznált adatokat a Bugacon és Kajászón található eddy-kovarianca tornyok szolgáltatták.

Az eddy-kovariancia méréstechnika

Az eddy-kovariancia (EK) méréstechnika egy olyan mikrometeorológiai módszer, ami folyadékdinamikai és statisztikai alapokon nyugszik (*Baldocchi*, 2014). A módszer elnevezése a légkörben előforduló turbulens örvényekre (angolul "eddy") utal, amelyek biztosítják a talaj-növény-légkör rendszerben lezajló folyamatok által létrehozott különböző anyag- és energiaáramok (például szén-dioxid, szenzibilis és/vagy látens hő, illetve momentum) szállítását. Kellően magas frekvenciával működő, rövid válaszidővel rendelkező szónikus anemométerek és gázanalizátorok segítségével a mikrometeorológiában jól ismert anyagmegmaradási egyenletből kiindulva ezen függőleges irányú, turbulens, sztochasztikus jellegű anyag- és energiaáramokat tudjuk számszerűsíteni (*Stull*, 1988). Az elnevezésben szereplő „kovariancia" egy statisztikai mérőszám, amivel azt vizsgáljuk, hogy két adatsor (esetünkben a vertikális szélsebesség és a gázkoncentráció idősorai) esetén a mért paraméterek változékonysága milyen mértékben hasonlít egymáshoz. Két valószínűségi változó (X,Y) kovarianciájának kiszámítása az alábbi egyenlet alapján történik:

$$cov(X,Y)=E(X\cdot Y)-E(X)E(Y) \quad (1)$$

ahol E az úgynevezett várhatóérték-operátor (*Goodman*, 1960).

Elméletben a vertikális szélsebesség és egy adott gázkoncentráció kovarianciáját származtatjuk, ami leírja az időegység alatt felületegységen átáramló anyag mennyiségét, azaz a fluxust. Továbbá, ha a száraz levegő sűrűségét állandónak feltételezzük, és alkalmazzuk a kvázi-hidrosztatikus közelítést, akkor az EK méréstechnikával az említett mennyiségek fluktuációját tudjuk regisztrálni. A fluxusokat általában félórás vagy órás felbontásban szokás megadni. A hőmérséklet mérések alapján a szenzibilis hőáram, míg a vízgőz és a szén-dioxid koncentrációból a látens hőáram, valamint a szén-dioxid turbulens fluxusa származtatható (*Aubinet et al*., 2012). Az EK módszert széles körben alkalmazzák a szárazföldi növényzet, illetve a nyílt vízfelületek felett kialakuló fluxusok számszerűsítésére (*Fine et al*., 2022).

A felszíni energiamérleg egyenlete az említett hőáramok alapján a következőképpen írható fel (*Mauder et al*., 2020):

$$R_n=LE+H+G+\varepsilon \quad (2)$$

ahol R_n a nettó sugárzás (W m^{-2}), LE a látens hőáram (W m^{-2}), H a szenzibilis hőáram (W m^{-2}), G a talajhőáram (W m^{-2}), ε pedig a maradéktag (W m^{-2}).

Az ET a látens hő és a párolgáshő hányadosából határozható meg (*Denager et al*., 2020). Az EK méréstechnikával számolt látens hőáram (LE) félórás értékeiből a következő módon aggregálunk napi ET értéket:

$$ET_{EK,napi}=\frac{1}{\rho_w}\sum_{i=0}^{48}\frac{LE_{30\,min}^{i}}{\lambda\,(T)} \quad (3)$$

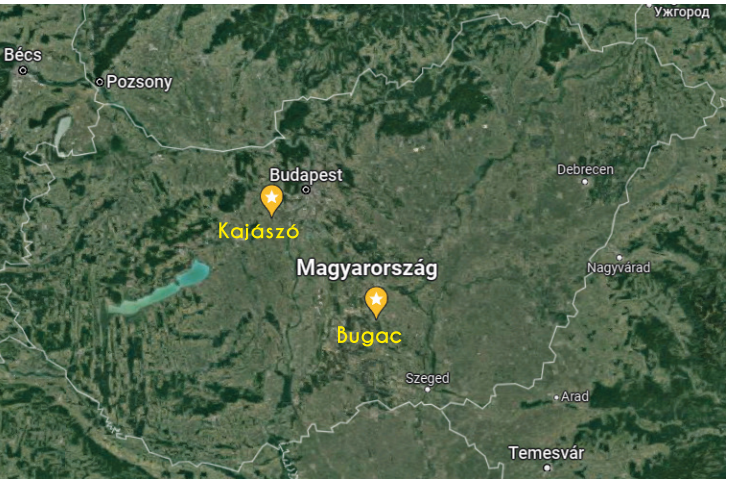
ahol ρ_w a víz sűrűsége (kg m^{-3}) és λ a párolgáshő (MJ kg^{-1}), ami a T léghőmérséklet (°C) függvénye. Ez utóbbit a *Ding et al.* (2010) egyenlete alapján számítjuk:

$$\lambda = (2.501 - 0.00236T) \quad (4)$$

Annak ellenére, hogy az EK módszer az egyik legelterjedtebb direkt árammérési technika, pontossága sok szempontból megkérdőjelezhető. A módszerrel – az elméletéből kiindulva – ideális esetben (viszonylag sík területen, valamint anticiklonális és advekció nélküli időjárási helyzetben) lehetne pontos mérést végrehajtani. Mivel a legtöbb esetben ezek a feltételek nem adottak, a mérések sok esetben véletlen hibával terheltek. Emellett szisztematikus hiba is felléphet a műszerek válaszidejéből, illetve az egyéb veszteségekből adódóan, ami további korrekciót igényelhet. A mérésekben megjelenhetnek hibák az időjárási viszonyok sztochasztikus jellegéből adódóan is, illetve a turbulencia fejlettségének kapcsán (*Loescher et al*., 2006).

A felhasznált eddy-kovariancia mérőállomási adatok

Magyarországon több helyen végeznek EK méréseket, melyeknek az összehasonlító elemzését az ET vonatkozásában *Incze et al.* (2023) foglalta össze. Hegyhátsálon (é.sz. 46,95°, k.h. 16,65°, 248 m tszf.) 1997 óta egy 82 m-es magastornyot, valamint 1999 óta egy gyepes terület feletti 3 m-es tornyot működtetnek (*Barcza et al*., 2003). Kartalon (é.sz. 47,66°, k.h. 19,53°, 153 m tszf.) 2017 őszétől működik egy szántóföldi területre telepített, a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport által üzemeltetett EK mérőtorony (*Balogh et al*., 2022). Pettenden (é.sz. 46,00°, k.h. 17,7°, 135 m tszf.) 2018-ban telepítettek EK tornyot szántóföldi környezetben (*Barcza* és *Fodor*, 2018). Az országban további helyszíneken – Szurdokpüspökin (*Nagy et al*., 2011), Szegeden (*Salavec et al.*, 2017), Siójuton (*Gandhi et al*., 2018), a Fertő-tavon (*Kiss* és *Torma*, 2014; *Kiss* és *Józsa*, 2014, 2015) és a Balatonon (*Lükő et al*., 2021, 2022; *Istvánovics et al*., 2022) – is végeztek/végeznek EK méréseket. Jelen kutatáshoz az adatokat a bugaci gyepes területről és a kajászói szántóföldről (*1. ábra*) gyűjtöttük be annak érdekében, hogy vizsgáljunk a növényborítottság esetleges hatását is.



1. ábra. A vizsgált EK mérési helyszínek (sárgával) földrajzi elhelyezkedése [Forrás: Google Earth].

Bugac

Bugacon (é.sz. 46,69°, k.h. 19,60°, 111 m tszf.) a nagy fajgazdagságú, 550 ha területű szürkemarha legelőn 4 m magasságban történik EK mérés a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport tevékenységeinek keretén belül. A legelő a Kiskunsági Nemzeti Parkhoz tartozik. Az állomás 2002 júliusában lett telepítve (*Nagy et al*., 2007), az adatsor azóta folyamatos. Részben a bugaci EK állomáson mért látens hőáram adatai szolgáltak alapul a 2019–2020-as években a térben modellezett párolgási értékek, illetve ET térkép validálásához (*Pintér* és *Nagy*, 2022).

Kajászó

2018-ban Pettendhez közel, Kajászón (é.sz. 47,33°, k.h. 18,72°, 163 m tszf.) telepítettek EK tornyot az AgroMo projekt keretén belül. Kartalhoz és Bugachoz hasonlóan a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport végzi az EK mérést szántóföldi környezetben. 2019 óta őszi búzával, repcével, valamint árpával zajlanak a mérések (*Barcza* és *Fodor*, 2018).

Az EK toronymérésekkel kapcsolatos információkat az *1. táblázatban* foglaltuk össze: ezek a mérési helyszínek növényborítottság szerinti besorolása, kiegészítve a mérési magassággal és a mérések által lefedett időtartamokkal. A kajászói szántóföldi mérőállomáson a kijelölt mérési időtartamokon túl is történtek mérések. A terület az aratás utáni és vetés előtti köztes időszakokban csupaszon volt hagyva (amit időnként gaz vagy tarló boríthatott). Az adatgyűjtésünk 2022 végével zárult. Az EK állomásokon a fluxusok mérése mellett meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, relatív nedvesség, csapadék, globálsugárzás) értékeit is rögzítik (*Barcza* és *Fodor*, 2018).

Mérőállomás	Növény-borítottság	Mérés magassága	Mérés időtartama
Bugac	gyep	4 m	2003.01.01. – 2022.12.31.
Kajászó	őszi búza	3,3 m	2019.01.01. – 2019.07.17. 2021.10.03. – 2022.06.27.
Kajászó	árpa	3,3 m	2019.10.09. – 2020.06.27.
Kajászó	repce	3,3 m	2020.08.28. – 2021.07.10.

1. táblázat. Mérőállomások paraméterei.

Adatfeldolgozás

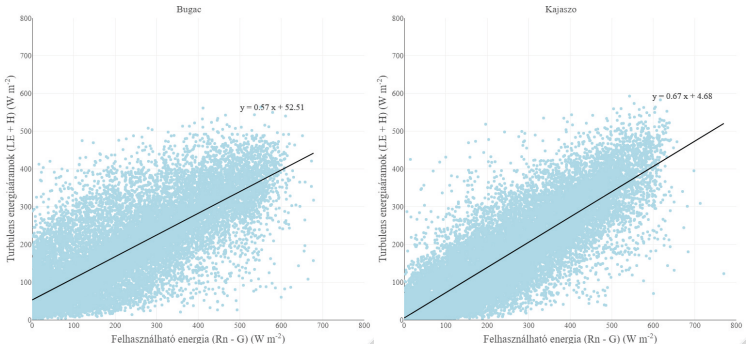
Első lépésként az EK toronymérésekből származó félórás adatokat gyűjtöttük össze. Az ET származtatása az adott állomás vezető kutatója által választott adatfeldolgozási

módszertannal lett elvégezve, amit itt külön nem részletezünk. A begyűjtött adatokon az adatpótlástól eltekintve utófeldolgozást nem végeztünk. A hiányzó adatok pótlása az átlagos napi menetek (mean diurnal variance (MDV); *Falge et al*., 2001) módszerével történt.

A félórás, illetve órás adatokból a napi ET értékek a (3) és (4) egyenletek alapján becsülhetők. A (4) egyenletből kapott λ párolgáshő a hőmérséklet függvénye, emiatt a meteorológiai paraméterekre vonatkozó méréseket is összegyűjtöttük. A kutatás során a nappali ET meghatározására fókuszáltunk, vagyis amikor $H > 0$, $LE > 0$ és $R_n\text{-}G > 0$ (*Durand*, 2022).

Az EK mérések esetében felmerül az energiamérleg lezárásának problémája is (*Twine et al*., 2000; *Mauder et al*., 2020). A lezárási probléma azt jelenti, hogy az EK alapú ET mérések valószínűleg alulbecslik a valóságot. Az adatfeldolgozás során emiatt megvizsgáltuk az energiamérleg-hiányt, vagyis a látens és a szenzibilis hőáram, illetve a felhasználható energia egyensúlyát. Abban az esetben, amikor a regresszió meredeksége egy körüli (azaz az energiamérleg zár, és teljesül az energiamegmaradás törvénye), a becslés realisztikusnak tekinthető (*Verma et al*., 2005).

A *2. ábra* az energiamérleg hiányát mutatjuk be a félórás értékek alapján Bugac és Kajászó esetén a 2019–2022-es időszakot tekintve. A kutatás célja kifejezetten a félórás értékek vizsgálata volt, mivel a szakirodalom szerint a zárási hiba a napi értékek alkalmazásával csökken (*Mauder et al*., 2020). Az ET bizonytalanságának meghatározásához azonban célszerű a nagyobb zárási hibával rendelkező, félórás értékeket figyelembe venni. Az ábrán jól látható, hogy a regressziók meredekségei rendre 0,57 és 0,67, amik jóval alatta vannak a kívánt eredménynek. Ebből adódóan az EK módszer akár jelentősen is alulbecsülheti az ET értékét (*Foken*, 2008). A szakirodalom (*Mauder et al.*, 2020; *Durand*, 2022) több megoldást javasol az energiamérleg lezárásához, amik alapján három esetet vizsgáltunk meg: 1) kizárólag a szenzibilis hőáramnak tulajdonítottuk a veszteséget; 2) kizárólag a látens hőáramnak tulajdonítottuk a veszteséget; 3) a Bowen-arány (a szenzibilis és látens hő aránya) megmaradását figyelembe véve korrigáltuk a szenzibilis és a látens hőáramot. Az 1) esetben az ET lehető legkisebb, a 2) esetben pedig a lehető legnagyobb értékét kaptuk, tehát energetikai szempontból behatároltuk a lehetséges ET értékét. Vizsgálataink a 2019–2022-es időszakra terjedtek ki, mivel a különböző mérési helyszíneken telepített EK toronymérések eltérő



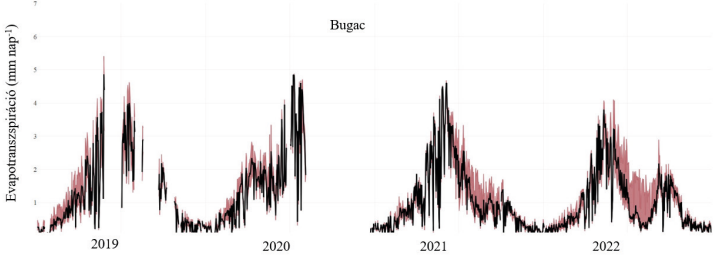
2. ábra. Az energiamérleg hiány vizsgálata Bugac (bal oldal) és Kajászó (jobb oldal) esetén a 2019–2022 közötti időszakot tekintve a félórás értékekből kiindulva.

időszakokat fedtek le (*1. táblázat*). Az ET összegeinek meghatározásához a hiányzó napi adatokat a havi átlaggal pótoltuk (*Zitouna-Chebbi et al*., 2018).

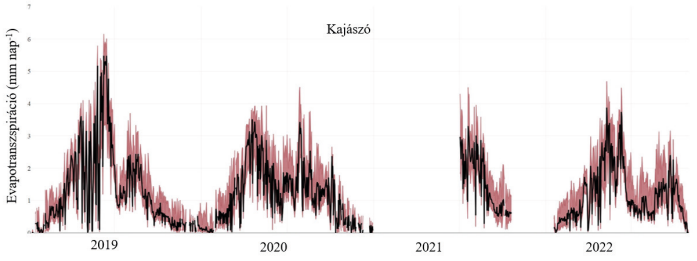
Eredmények

A korrekciót követően meghatároztuk a lehető legnagyobb és legkisebb napi ET értékeket (mm nap^{-1}) a bugaci gyepes területre, valamint a kajászói szántóföldre vonatkozóan a teljes idősorra vonatkozóan. A 2019–2022 közötti időszak lehetséges ET értékeit a *3.* és *4. ábra* szemlélteti, míg a számszerűsített eredményeket a *2. táblázat* foglalja össze. Mivel célunk a gyep és a szántóföldi növények összehasonlítása volt, így az egyes években az aratás időpontjáig (január 1. és június 30.) vettük figyelembe a napi ET értékeket. Kajászón a 2021-es év első felében hiányos/hibás volt a mérés, így ezt az időszakot kihagytuk az elemzési folyamat során.

A legmagasabb napi ET érték Bugac esetén 5,43 mm nap^{-1} (2020), Kajászó esetén pedig 6,15 mm nap^{-1} (2019) volt. A szántóföldi növények



3. ábra. A napi ET lehetséges értékei (mm nap^{-1}) Bugac (gyepes terület) esetén a 2019–2022 közötti időszakban. Az intervallumba eső vonal a Bowen-arány megőrző módszer eredménye.



4. ábra. A napi ET lehetséges értékei (mm nap^{-1}) Kajászó (szántóföld) esetén a 2019–2022 közötti időszakban. Az intervallumba eső vonal a Bowen-arány megőrző módszer eredménye.

	2019	2020	2021	2022
	A legnagyobb napi ET érték (mm nap-1)			
Bugac	5,41	5,43	4,82	4,10
Kajászó	6,15	4,51	-	4,69
	A maximális különbség a lehető legnagyobb és legkisebb napi ET érték között (mm nap-1)			
Bugac	1,91	1,62	1,59	1,78
Kajászó	2,71	2,63	-	2,46
	A legnagyobb ET összeg (mm)			
Bugac	259	255	266	258
Kajászó	372	334	-	322
	A legkisebb ET összeg (mm)			
Bugac	161	177	210	169
Kajászó	184	146	-	145
	Csapadékösszeg (mm)			
Bugac	305	262	192	151
Kajászó	273	175	198	184

2. táblázat. Bugac (gyepes terület) és Kajászó (szántóföld) összehasonlítását segítő számszerűsített eredmények. Az eredmények az egyes évek január 1. és június 30. közötti időszakainak korrigált értékeire vonatkoznak.

esetén összességében magasabb napi ET értékeket kaptunk, azonban a napi ET lehetséges értékei is nagyobb tartományban ingadoznak. Kajászón az évi legnagyobb napi eltérések meghaladták a 2,5 mm nap^{-1} mértékét, ezzel szemben a bugaci gyepet tekintve ezek az eltérések nem érték el a 2 mm nap^{-1} értéket. A napi eltérésekből kiindulva a vizsgált időszakra számított ET összegek is a szántóföldi növények esetén mutatnak nagyobb bizonytalanságot. Az őszi búza például 2022-ben minimum 145 mm-t, maximum 322 mm-t párologtatott; a gyepre számított legkisebb ET összeg 169 mm, a legnagyobb pedig 258 mm volt 2022-ben.

Az ET értékét nagyban befolyásolja továbbá a rendelkezésre álló vízmennyiség, amit a csapadék mennyisége alapvetően meghatároz. Emiatt az ET mellett számszerűsítettük még a meteorológiai változóknak a napi értékeit is. Az eredmények alapján a 2019-es év jóval csapadékosabb volt a későbbi évekhez viszonyítva. Valószínűleg ebből kifolyólag az ET értékek 2019-ben voltak a legmagasabbak, főként a szántóföldi növényeket tekintve.

Említésre méltó a különböző módszerekkel korrigált ET értékek közötti eltérés. Az eredmények azt sugallják, hogy igen nagy bizonytalansággal becsülhető az ET az EK mérések alapján, és hogy igen nagy szükség lenne egy elfogadott, a kutatói közösség által támogatott korrekciós módszerre, ami csökkenti a bizonytalanságot.

Összefoglalás

Az édesvízkészletek fenntartható használata iránti nemzetközi érdeklődés az ET mérési és modellezési módszereinek tesztelését és fejlesztését szorgalmazza (*Marek et al*., 2014). Az egyik népszerű módszer az EK mérésekre támaszkodik (*Pan et al*., 2020), amivel a függőleges irányú, turbulens anyag- és energiaáramokat tudjuk számszerűsíteni, köztük a látens hőáramot, amiből az ET meghatározható. Mivel azonban az EK mérések esetén sokszor felmerül az energiamérleg lezárásának problémája, ezért az ET meghatározása előtt korrekcióra van szükség. Tekintve a szakmai konszenzus hiányát a korrekció kapcsán, ebben a tanulmányban úgy korrigáltuk a hőáramokat, hogy megkapjuk napi szinten a lehető legkisebb és legnagyobb ET értékeket, amit a hozzáférhető energiamennyiség korlátozott.

Az itt bemutatott kutatáshoz felhasznált adatokat két EK mérőtorony szolgáltatta, melyek gyepes terület (Bugac) és szántóföld (Kajászó) felett lettek telepítve. A számítások során a 2019–2022 közötti időszakra fókuszáltunk. Az eredmények alapján a szántóföldi növények esetén nagyobb a bizonytalanság, akár a 2,5 mm nap^{-1}-t is meghaladhatja a lehető legmagasabb

és legalacsonyabb értékek közötti eltérés napi szinten. Az ET értékeinek napi szintű lehetséges tartománya segíti az eredményeket felhasználó modellek validálását és optimalizálását.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A tanulmány elkészítéséhez hozzájárult még a TKP2021-NKTA-06 projekt, amely a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból, a [TKP2021-NKTA] támogatási program keretében finanszírozott, az Innovációs és Technológiai Minisztérium által nyújtott támogatással valósult meg.

A kutatások a GINOP-2.3.2-15-2016-00028 és az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projektek és a HUN-REN-MATE Agroökológia Kutatócsoport támogatásával valósultak meg.

Irodalom

Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., 2012: Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis. Dordrecht, the Netherlands/ Heidelberg, Germany/London, UK/New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1

Baldocchi, D., 2014: Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere - the state and future of the eddy covariance method. *Glob. Change Biol. 20*, 3600–3609. https://doi.org/10.1111/gcb.12649

Balogh, J., Pintér, K., Fóti, S., De Luca, G., Mészáros, Á., Bouteldja, M., Insaf, M., Gajda, G., Nagy, Z., 2022: Szántóföldi szénmérleg egy közép-magyarországi mintaterületen. *Agrokémia és Talajtan 71*(2): 273–288. https://doi.org/10.1556/0088.2022.00125

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Bartholy, J., 2003: Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus B*: *Chem. Phys. Meteorol. 55*(2), 187–196. https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2003.00014.x

Barcza, Z., Fodor, N. (szerk.), 2018: Az AgroMo megközelítés: integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer kialakítása a hazai agroklimatológiai környezetben – modellfejlesztés és megfigyelőrendszer kapcsolata és együttműködése. Martonvásár.

Bonan, G., 2002: Ecological Climatology. Concepts and applications. Camridge University Press, Cambridge. https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)00008-3

Denager, T., Looms, M.C., Sonnenborg, T.O., Jensen, K.H., 2020: Comparison of evapotranspiration estimates using the water balance and the eddy covariance methods. *Vadose Zone J. 19*(1): e20032. https://doi.org/10.1002/vzj2.20032

Dimitriadou, S., Nikolakopoulos, K.G., 2021: Evapotranspiration Trends and Interactions in Light of the Anthropogenic Footprint and the Climate Crisis: A Review. *Hydrology 8*, 163. https://doi.org/10.3390/hydrology8040163

Ding, R., Kang, S., Li, F., Zhang, Y., Tong, L., Sun, Q., 2010: Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China. *Agric. Water Manage. 98*, 87–95. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.001

Durand, P., 2022: A Possible Reconciliation between Eddy Covariance Fluxes and Surface Energy Balance Closure. *Atmosphere 13*, 1965. https://doi.org/10.3390/atmos13121965

Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, G., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C.T., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., Wofsy, S., 2001: Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agric.Forest Meteorol. 107*, 71–77. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00235-5

Fine, L., Richard, A., Tanny, J., Pradalier, C., Rosa, R., Rozenstein, O., 2022: Introducing State-of-the-Art Deep Learning Technique for Gap-Filling of Eddy Covariance Crop Evapotranspiration Data. *Water 14*, 763. https://doi.org/10.3390/w14050763

Foken, T., 2008: The energy balance closure problem: An overview. *Ecol. Appl. 18*, 1351–1367. https://doi.org/10.1890/06-0922.1

Gandhi, A; Gyöngyösi, A Z; Tordai, Á V; Torma, P; Rehák, A; Szilágyi, M; Horváth, Á; Weidinger, T., 2018: Micrometeorological measurements of foggy situations in Siójut (November – December, 2018), *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, https://doi.org/10.31852/EMF.33.2020.040.047

Goodman, L.A., 1960: On the exact variance of products. *J. Amer. Stat. Assoc. 55*, 708–713. https://doi.org/10.1080/01621459.1960.10483369

Incze, D., Barcza, Z., Pintér, K., Nagy, Z., Balogh, J., Fodor, N., Haszpra, L., 2023: Eddy-kovariancia alapú evapotranspiráció mérések összehasonlító elemzése. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 35.

Istvánovics, V., Honti, M., Torma, P., Kousal, J., 2022: Record-setting algal bloom in polymictic Lake Balaton (Hungary): A synergistic impact of climate change and (mis) management. *Freshwater Biology 67*, 1091–1106. https://doi.org/10.1111/fwb.13903

Kiss, M; Torma, P., 2014: Sekély tavi energiaáramok fluxus gradiens eljárás alapú becslése örvény-kovariancia mérésekből. *Hidrológiai Közlöny 94*(4), 48–56.

Kiss, M; Józsa, J., 2014: A Fertő tó energiaháztartásának meghatározása örvény-kovariancia módszerrel. *Hidrológiai Közlöny 94*(4), 38–47.

Kiss, M; Józsa, J., 2015: Wind profile and shear stress at reed-open water interface: recent research achievements in Lake Fertő. *Pollack Periodica, 10*(2),107–122.

Loescher, H.W., Law, B.E., Mahrt, L., Hollinger, D.Y., Campbell, J., Wofsy, S.C., 2006: Uncertainties in, and interpretation of, carbon flux estimates using the eddy covariance technique. *J.Geophys. Res. 111*, D21S90. https://doi.org/10.1029/2005JD006932

Lükő, G; Torma, P; Weidinger, T; Krámer, T., 2021: Hullámzás módosította turbulens impulzusáram mérése és becslése a Balaton légkör-víz határfelületén. *Hidrológiai Közlöny 101*, 52–60.

Lükő, G, Torma, P; Weidinger, T; Krámer, T., 2022: Air-lake momentum and heat exchange in very young waves using energy and water budget closure. *J. Geophys. Res.: Atmospheres, 127*(12), e2021JD036099.

Marek, G.W., Evett, S.R., Gowda, P.H., Howell, T.A., Copeland, K.S., Baumhardt, R.L., 2014: Post-processing techniques for reducing errors in weighing lysimeter evapotranspiration (ET) datasets. *Amer. Soc. Agric. Biol. Engin. 57*, 499–515. https://doi.org/10.13031/trans.57.10433

Mauder, M., Foken, T., Cuxart, J., 2020: Surface-energy-balance closure over land: A review. Bound,-Lay, *Meteorol. 177*, 395–426. https://doi.org/10.1007/s10546-020-00529-6

Nagy, Z, Pinter, K, Czobel, S., Balogh, J., Horváth, L., Fóti, Sz., Barcza, B., Weidinger, T., Csintalan, Zs., Dinh, N.Q., Grosz, B., Tuba, Z., 2007: The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agric. Ecosyst. Environ. 121*, 21–29. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.003

Nagy, Z., Barcza, Z., Horváth, L., Balogh, J., Hagyó, A., Káposztás, N., Grosz, B., Machon, A., Pintér, K., 2011: Grasslands. In: (ed. Haszpra, L.) Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9950-1_6

Pan, S., Pan, N., Tian, H., Friedlingstein, P., Sitch, S., Shi, H., Arora, V.K., Haverd, V., Jain, A.K., Kato, E., 2020: Evaluation of global terrestrial evapotranspiration by state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning, and land surface models. *Hydrol. Earth Syst.Sci. 24*, 1485–1509. https://doi.org/10.5194/hess-2019-409

Pintér, K., Nagy, Z., 2022: Building a UAV Based System to Acquire High Spatial Resolution Thermal Imagery for Energy Balance Modelling. *Sensors 22*. 3251. https://doi.org/10.3390/s22093251

Salavec, P et al., 2017. Repülést veszélyeztető mikroskálájú légköri jelenségek a 2015-ös szegedi planetáris határréteg-mérési adatsorokban. *Repüléstudományi Közl. 29*, 379–400.

Stisen, S., Soltani, M., Mendiguren, G., Langkilde, H., Garcia, M., Koch, J., 2021: Spatial Patterns in Actual Evapotranspiration Climatologies for Europe. *Remote Sens. 13*, 2410. https://doi.org/10.3390/rs13122410

Stull, R.B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8

Twine, T.E., W.P. Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesely, M.L., 2000: Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. Forest Meteorol. 103*, 279–300. https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00123-4

Verma, S.B., Dobermann, A., Cassman, K.G., Walters, D.T., Knops, J.M., Arkebauer, T.J., Suyker, A.E., Burba, G.G., Amos, B., Yang, H., 2005: Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maizebased agroecosystems. *Agric. Forest Meteorol. 131*, 77–96. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.05.003

Zitouna-Chebbi, R., Prévot, L., Chakhar, A., Marniche-Ben Abdallah, M., Jacob, F., 2018: Observing actual evapotranspiration from flux tower eddy covariance measurements within a hilly watershed: Case study of the Kamech site, Cap Bon Peninsula, Tunisia. *Atmosphere 9*, 68. https://doi.org/10.3390/atmos9020068

Szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél a Bakony-Balaton térségben

Kurcsics Máté, Geresdi István, Horváth Ákos

HungaroMet Nonprofit Zrt., Siófoki Viharjelző Obszervatórium, kurcsics.m@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.2.3

A Balaton vízfelülete, valamint a tőle északra húzódó Bakony nagy mértékben képes módosítani az időjárási elemek alakulását: befolyásolják a levegő hőmérsékletét, a szélviszonyokat, de még a felhőzetet és a csapadékhullást is. A balatoni hajósok jól ismerik a Bakony völgyeiből az esti órákban fújó lejtőszelet. Van azonban a Bakonynak egy ennél jóval markánsabb, ugyanakkor kevésbé ismert, a balatoni szélmezőt módosító hatása is. Egy olyan lejtőszél, amelyet szinoptikus skálájú folyamatok alakítanak ki, akárcsak az adriai bóra vagy az alpi főn esetében. A Bakonynak ezen hatása a Balatonnál akár 30–40 km/h-val is megnövelheti a széllökések nagyságát, így fontos figyelembe venni ezt a tényezőt a tavi viharjelzések kiadásakor. Cikkünkben a szinoptikusan vezérelt bakonyi lejtőszelet mutatjuk be.

Synoptically-forced downslope wind in the Bakony-Balaton region

The water surface of Lake Balaton, as well as Bakony Mountains to the north of it, can significantly modify the characteristics of weather: they influence the air temperature, wind speed and direction, furthermore the cloud cover and precipitation. Sailors know well the downslope wind blowing from the valleys of Bakony during the evening hours. Bakony also has a more significant, but less well-known effect on the wind field at the Lake: a downslope wind forced by synoptic-scale processes, just like the Adriatic bora or the Alpine foehn. This effect of Bakony at Lake Balaton can increase the speed of wind gusts by 30-40 km/h, so it is important to take this factor into account when issuing lake storm warnings. In this paper results about the synoptically forced downslope wind of Bakony Mountains are presented.

A Balaton környékének időjárása gyakran jelentősen eltér a nagyobb térségre jellemző időjárási viszonyoktól. E mögött számos ok húzódhat: a legfontosabbak a terület nyíltsága, a környezetétől eltérő hőmérsékletű víztömeg és a Balatontól északra húzódó középhegység, a Bakony. A domborzat hatása nemcsak a néhányszor tíz kilométeres kiterjedésű konvektív felhők esetében figyelhető meg, de a nagytérségű szélviszonyokat is módosítja. Vizsgálataink szerint – összhangban korábbi kutatási eredményekkel – a Balatonnál hasonló lejtőszél alakulhat ki a Bakony miatt, mint a Kárpát-medence térségében jól ismert bóra és főn, vagy a kevésbé ismert, a Keleti-Kárpátokban kialakuló nemere és a Magas-Tátra lejtővihara, a halny.

A vizsgálatokat a hazai földfelszíni szinoptikus mérőhálózat, valamint radar és műhold mérések adatainak kiértékelésével, továbbá a WRF numerikus modellel

végzett kísérletekre alapozva végeztük el. A Balatonnál működő igen sűrű szélmérő hálózat igazolta a WRF modell eredményeit, jellegzetes lejtővihar-szerű struktúrák voltak megfigyelhetőek egyes időjárási helyzetekben. A vizsgálataink bizonyítják, hogy erős lejtőszél kialakulásához nem feltétlenül szükségesek 1000 méteres magasságot meghaladó hegyláncok, kedvező földrajzi helyzet és megfelelő meteorológiai körülmények esetén már egy 400–500 méteres átlagos magasságú középhegység is a jelenség kialakulását okozhatja. Ez a lejtőszél természetesen nem lesz olyan erősségű, mint például egy heves bóra, azonban a balatoni előrejelzések és viharjelzések esetében, melyek közvetlenül életvédelmi célokat szolgálnak, ezen domborzat okozta szélerősítő hatás pontosabb ismerete elengedhetetlen.

1. A légáramlás módosulása a Balaton hatására

A dunántúli területekre általában jellemző nagyskálájú áramlást a Balaton mezoléptékű skálán jelentősen képes módosítani. Ezen hatások ismerete és figyelembevétele pedig alapvető fontosságú az élet- és vagyonvédelmi célokat szolgáló tavi viharjelzésben. Nyugodt, anticiklonális időjárási helyzetekben a helyi hatások érvényesülnek, és kialakul a Balaton sajátos, napszaktól függő szélrendszere, a parti cirkuláció. Határozott irányú és erősségű szinoptikus alapáramlás esetén pedig gyakran tapasztalható, hogy a vízparton és a tó felett erősebb a szél, mint a környező területeken. Ez több tényező együttes hatására vezethető vissza:

Szélnek kitettség, kicsi súrlódás

A Balaton vízfelülete felett az érdesség értelemszerűen kisebb, mint a környező erdős, dombos területeken. Így a felszíni érdesség szélsebességet mérséklő hatása a tó felett érvényesül a legkevésbé. Sőt, a Balatont keresztirányban végigfújó szelek esetén gyorsulás tapasztalható, így a délnyugati szél a Balaton keleti medencéjében, míg az északkeleti a nyugati medencében lesz általában a legerősebb. Ebből tehát az is következik, hogy a fent említett szélirányoknál a Balaton nyugati vagy keleti felére különös figyelmet kell fordítani, ugyanis ott érheti el az áramlás a legnagyobb eséllyel a viharos fokozatot (*Ambrózy et al*., 1963). De ez az egyik oka annak is, hogy északias szél esetén a szélsebesség a déli part közelében általában nagyobb, mint az északinál.

Eltérő hőmérséklet

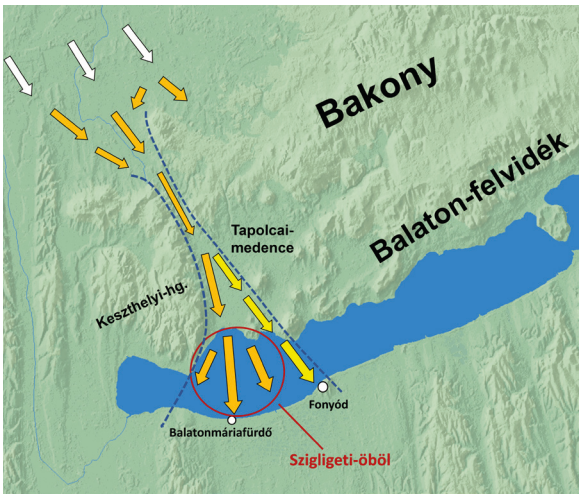
A vízhőmérséklet is összetett módon képes befolyásolni a balatoni szélviszonyokat. A parti cirkuláció jelensége jól ismert: a víznek nagyobb a fajhője, mint a szárazföldnek, így lassabban változik a hőmérséklete. Emiatt általában a víz felett a levegő nappal hűvösebb (kialakul az ún. hideg kupola/dóm), éjszaka melegebb, mint a szárazföld felett. Ez azt eredményezi, hogy éjszaka lokális alacsonynyomás, nappal lokális magasnyomás alakul ki a tó felett, így a felszín közelében éjszaka a part felől a víz felé, nappal a víz felől a part felé fúj a tavi szél. Ez a hatás annyira jellegzetes és olyan jelentős, hogy a szinoptikus alapáramlást akár teljes mértékben képes felülírni. Tipikus példája ennek a meleg, délnyugati szeles időjárási helyzet. Ilyenkor a Dunántúlon már reggeltől megélénkül, megerősödik a délnyugati szél, a Balaton azonban kivételt képez: a víz felett csak a déli óráktól fordul délnyugati irányba és élénkül, erősödik meg határozottan a légáramlás. Előfordulhat azonban olyan eset is, hogy a Balaton nappal is melegebb a szárazföldnél, így még rá is erősít a szélre (*Bartha*, 1978). A meleg víz felett ugyanis labilisabb a rétegződés, ezáltal magasabb légköri szintekről is le tud keveredni a szél a felszín közelébe. Bár nappal is van erre több példa, a jelenség igazán éjszaka jellegzetes. A meleg Balaton felett csak egy gyengébb inverziós réteg alakul ki, miközben a szárazföld feletti inverziós réteg tetején általában erősödik a szél (éjszakai jet), vagy akár észrevétlenül egy gyengébb hidegfront is elérheti a Balatont. Az éjszakai jet és a gyengébb hidegfrontok a szárazföld feletti inverziót nem tudják áttörni, a Balaton felett azonban le tudnak keveredni a felszín közelébe, ezzel kiugróan nagy szelet okozva a víz felett. Egyes nyári éjszakákon a vízhőmérséklet és a domborzati hatások együttes eredménye lehet, hogy az országban csak egyetlen helyen, a Szigligeti-öbölben fúj erős szél, míg mindenhol másutt gyenge vagy mérsékelt az áramlás.

Domborzati hatások

A Kárpát-medence térségében a szélviszonyok alakulását nagyban befolyásolja a domborzat. A medencét nyugaton az Alpok, délnyugaton a Dinári-hegység határolja, észak és kelet felől pedig körülöleli a Kárpátok vonulata. Attól függően tud érvényre jutni a hegyek hatása, hogy a szinoptikus időjárási körülmények milyen irányú és erősségű szelet okoznak a közép-európai térségben. Amikor egy légtömeg egy domborzati akadályhoz ér, a légkör stabilitási viszonyainak függvényében több módon is folytathatja az útját:

- beleütközik a hegybe és a hágókon, völgyeken át felgyorsulva áramlik tovább;
- az akadály felett áramlik tovább, de nem okoz erősebb szelet a hegy túlsó lábánál;
- átáramlik az akadály felett, majd lecsap a túlsó, lee oldali hegyláb közelében.

Az északnyugat felől jövő légtömegek a légkör alacsonyabb rétegeiben elsősorban az Alpok és a Kárpátok között, a Dévényi-kapu térségében érkeznek a Kárpát-medence nyugati felébe. A medence keleti területeire már a Kárpátokat megkerülve, elsősorban a hegyvonulat hágóin (Vereckei-hágó, Tatár-hágó) át északkelet felől érkezik a szél a felszín közelében. A domborzat tehát a nagytérségű hatások okozta szelet becsatornázza, ezzel a Dunántúlon, így a Balaton térségében is a szélviharok elsősorban északnyugati, északi irányból alakulnak ki. Az északnyugat felől jövő frontok ráadásul a medencébe belépve, a domborzati akadályt leküzdve fel is gyorsulhatnak, megnehezítve ezzel az előrejelzésüket (*Tánczer*, 1961). Stabil légrétegződés mellett a Balatonnál is találunk példát becsatornázott szélre: a Keszthelyi-hegység és a Bakony közötti szélcsatornába, a Lesence-patak völgyébe szoruló áramlás jelentősen felgyorsulhat. A megerősödött szél a környezeténél melegebb Balaton felett le is keveredhet a magasból a felszín közelébe, kiugróan nagy szelet okozva a Szigligeti-öbölben (*1. ábra*).



1. ábra. Az északnyugati áramlás becsatornázódása a Keszthelyi-hegység és a Bakony között.

Az esetek többségében, amikor a magasban erősebb a szél vagy labilis a légrétegződés, akkor az áramló levegő könnyebben áthalad a hegyvonulat felett, így a szélcsatornáknak nincs nagyobb jelentősége. Különösen a labilis időjárási helyzetekben jellemző, hogy a hegyvonulat még némi szélárnyékot is ad, csökkenti az átlagszelet, lökésessé téve ezzel az áramlást: alacsonyabb sebességű átlagszélre rakódnak nagy széllökések.

Abban az esetben, amikor olyanok a stabilitási viszonyok, hogy a levegő éppen hogy képes az akadály felett átáramlani egy keskeny csatornába szűkülve, szükségszerűen gyorsulnia kell az áramlásnak. Egyes helyeken, megfelelő domborzati adottságok és meteorológiai körülmények között ez a hatás a hegyek lee oldalán szélviharokat okoz. Erre a típusra is több példát találunk a Kárpát-medence térségében. Ilyen az Adriai partvidék jellegzetes lejtővihara, a bóra, illetve az Alpok lábánál fújó főn. A lejtőviharokat nagy amplitúdójú, vertikálisan kiterjedt orografikus hullámok alakítják ki, melyek létrejöttét máig többféle elmélettel is magyarázzák. Jelen tanulmánynak nem célja ezek bemutatása, általánosságban azonban elmondható: ahhoz, hogy egy hegység lee oldalán hullámok alakuljanak ki, három légköri feltétel teljesülése szükséges (*Ambrózy*, 1970): az áramlás legyen merőleges a hegyvonulatra, a szélsebesség nőjön a magassággal, és kellően nagy értéket érjen el, továbbá a légkör stabil egyensúlyi állapotban legyen. Alapvető fontosságú a szélsebesség és a légköri stabilitási viszonyok egymáshoz viszonyított aránya is.

2. A bakonyi szél tudományos vizsgálatának a története

Nem csak a Kárpát-medencét körülölelő hegyek lábánál alakulhat ki bukószél, a medence belső területein is találkozhatunk vele. Erre különösen alkalmas lehet a Bakony-Balaton térség. Az itt kialakuló, a bórához vagy a nemeréhez több tulajdonságában is hasonlító szelekről, a domborzat keltette szélviharokról a hazai meteorológiai szakirodalomban kevés említés esik, pedig a Bakony igen fontos szerepét a Balatonra lecsapó szélviharok kialakulásában már a XX. század elején is ismerték, több korai vizsgálat is lejtővihar-szerű jelenségként írta le a bakonyi szelet.

A Balaton térségének a meteorológia területére is kiterjedő tudományos vizsgálata az 1890-es években kezdődött meg a Magyar Földrajzi Társaság Lóczy Lajos vezette Balaton-bizottságának köszönhetően. Már a kutatások kezdeti szakaszában a Bakonynak nagy szerepet tulajdonítottak a balatoni szélviszonyok alakításában (a valóságosnál is nagyobbat, mivel az időjárási frontokat még nem ismerték; a Balatonra lecsapó északi szélviharok mögött is a Bakony hatását sejtették). Maga Lóczy Lajos földrajztudós például a Bakonyból lecsapó szélnek tulajdonította,

hogy a Balaton medre a földtörténet során fenn tudott maradni (*Lóczy*, 1913). Ezt a megállapítását frissebb geológiai vizsgálatok is igazolhatják (*Sebe et al.*, 2011), melyek a Balaton medencéinek kialakulásában elsődleges szerepet tulajdonítanak a bakonyi szélnek. A Balaton kutatásában szintén nagy érdemeket szerzett Cholnoky Jenő, akit elsősorban természettudósként ismerünk, de a meteorológia területén végzett munkásságát mi sem mutatja jobban, mint hogy több éven át a Magyar Meteorológiai Társaság elnöke volt. Cholnoky a balatoni halászoktól átvett „bakonyi főszél" kifejezéssel illette a Balaton északi szelét, és párhuzamot vont közte, illetve a bóra, a főn vagy éppen a misztrál között (*Cholnoky*, 1914). A bakonyi bukószél kialakulásának okát ugyan tévesen írta le, számos megfigyelése azonban helytállónak bizonyult. Pontosan megállapította, hogy a legnagyobb szélsebesség nem a felszínen alakul ki (100–200 méteres magasságot állapított meg), illetve a szél legnagyobb sebességét nem a parton, hanem a Balaton közepén éri el (*Cholnoky*, 1936). Pontosan leírta az északi part mentén megfigyelhető adiabatikus kiszáradás jelenségét is.

A hazai csapadékviszonyokat vizsgálva megállapításra került, hogy a Balaton déli partvidékén kevesebb csapadék hullik a környező területekhez képest (*Hajósy*, 1952). Ennek okaként a szinoptikus alapáramlás és a Bakony együttes hatását jelölték meg. Zách Alfréd, a balatoni viharjelzés II. világháború utáni újraszervezője és a Siófoki Viharjelző Obszervatórium építtetője, szintén döntő szerepet tulajdonított a Bakonynak a balatoni viharok kialakulásában (*Zách*, 1957). Hangsúlyozta, hogy a hegység merőleges az uralkodó szélirányra, ezzel pedig feltorlasztja a frontokat, amelyek aztán nagyobb erősséggel csapnak le a tóra. Megemlítette azt az elméletet is, miszerint a bakonyi lejtőszeleknek még a tó medrének kialakulásában is szerepük volt (*Zách*, 1953).

1957-re megépült Siófokon az Országos Meteorológiai Intézet Balaton Kutató és Viharjelző Obszervatóriuma, így amellett, hogy megfelelő állomás létesült a balatoni viharjelzés feladatának ellátásához, egy kiterjedt Balaton kutató program is elindult, melynek keretében újabb lendületet vett a térség időjárási viszonyainak, ezzel a Bakony áramlásmódosító hatásának a vizsgálata is. A bakonyi bukószelet az 1950-es évek végén főn jellegű, örvényes, lökéses szélként írták le, amely felelős a Balatonnál hirtelen fellépő szelekért (*Valent*, 1959).

Az 1950-es, 60-as években zajló Balaton kutatás során kiterjedt mérési expedíció zajlott a Balaton térségében, melynek keretében többek között léggömbökkel vizsgálták a Balaton felett kialakuló hullámok szerkezetét (*Béll* és *Takács*, 1974). Ezek kiegyensúlyozott, lassú emelkedésű léggömbök voltak. Arra törekedtek, hogy a léggömb vertikális mozgást elsősorban a hullámokhoz kapcsolódó le- és feláramlások miatt végezzen, azaz a léggömbre ható felhajtóerő közel azonos legyen a léggömb súlyával. A léggömböket Tihany, illetve Alsóörs közelében engedték fel északnyugati szeles időjárási helyzetekben. Abban az esetben, amikor a léggömb az igen összetett domborzat fölül a Balaton fölé sodródott, már egyéb zavaroktól mentesen tudta detektálni a Bakony hatására kialakult, Balaton feletti léghullámokat. A mérési adatok elemzésével 10 perc körüli rezgésidőket, 2–10 km-es hullámhosszakat és 100–250 m-es hullám amplitúdókat mutattak ki. Fontos megállapítása volt a mérési expedíciónak, hogy a Balaton feletti léghullámok északnyugati szélirány esetén alakulnak ki, olyan időjárási helyzetekben, amikor a beáramló hűvös levegő az alsó légrétegeket már stabilizálta. Inverzió jelenlétére azonban ehhez nincs feltétlenül szükség. A vizsgálat nagy szélsebességek esetén az északi part közelében a hegyektől elszakadt, vízszintes tengely mentén forgó rotorok jelenlétét is kimutatta, melyek átmérője 100–250 m közötti volt. Az eredmények tehát igazolták, hogy a Balaton felett is kialakulnak olyan nagy amplitúdójú lee oldali hullámok, melyek szinoptikusan vezérelt lejtőszelet okozhatnak.

Az olyan időjárási helyzetekben, amikor nem elég nagy a stabilitás a nagy amplitúdójú hullámok kialakulásához, a Bakony árnyékában turbulenssé, lökésessé válhat a szél. Ezt a jelenséget mérésekkel is sikerült kimutatni a Balatonnál: a Balatonfüred és Siófok között közlekedő menetrend szerinti hajójáratra forgókanalas szélmérőműszert szereltek, és vele minden ÉNy-i szeles időjárási helyzetben szélméréseket végeztek (*Titkos*, 1963). Az eredmények azt mutatták, hogy a Balaton déli partjának közelében sokkal egyenletesebb, egyúttal nagyobb sebességű szél fúj, mint Balatonfüred térségében. A déli parttól pár km-re eltávolodva az átlagos szélsebesség csökkenni kezd, de a siófokihoz hasonló széllökések észak felé haladva is előfordulnak. Balatonfürednél az átlagos szélsebesség már csak a siófoki 60%-ának adódott, mégis a legnagyobb széllökést az északi part közelében detektálták (*Götz et al.*, 1966). Ezek az eredmények azt mutatják, hogy bár a Bakony szélárnyéka az átlagszelet csökkenti, turbulenssé, örvényessé is teszi az áramlást, lehetővé téve nagyobb széllökések lekeveredését az északi part közelében.

A csapadék hazai középhegységeink körüli eloszlásával foglalkozó vizsgálat kimutatta, hogy a hegyek, köztük a Bakony hatása az olyan időjárási helyzetekben tud a leginkább megnyilvánulni, amikor az áramlás

merőleges a hegyvonulatra, mind a talaj közelében, mind a magasabb szinteken (*Szepesi*, 1962). A labilitási viszonyokra is meghatározó tényezőként tekintettek, nemcsak közvetlenül, a csapadékképződésen keresztül, hanem közvetett módon is, mint a vertikális sebesség befolyásolójaként. Ezek a bakonyi bukószelek szempontjából is fontos eredmények.

Péczely György a hazai hegyeket nem tartotta elég magasnak ahhoz, hogy jellegzetes bukószél kialakulhasson (*Péczely*, 1976). Ugyanakkor vizsgálta a Bakony hatására kialakuló hullámokat, melyekről megállapította, hogy a hegy déli oldalán kiszáradást okozhatnak, és ezzel nem halnak el, hanem tovább terjedhetnek délkelet felé, akár több teljes hullámrendszert alkotva (*Péczely*, 1962). Ugyancsak megfigyelte az északi szeles időjárási helyzetekben a Bakony déli oldalán kialakuló „ciklonális beöblösödést" (lee oldali teknő), amely a leszálló légáramlásra utal.

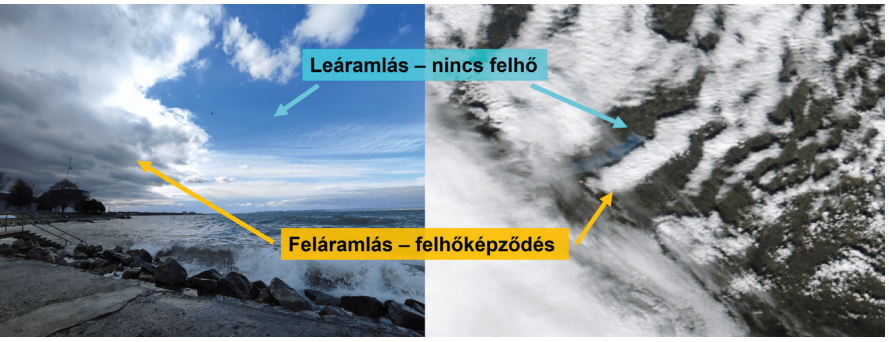
Az 1980–2010 közötti időszakban a balatoni szélre gyakorolt domborzati hatásokról kevés szó esett, bár a térségben zajlottak a domborzat légáramlást módosító hatását vizsgáló projektek, mint például az ALPEX (*Götz*, 1981). 2010-ben azonban rövid időn belül két erős ciklon is elérte a térséget: a mediterrán eredetű Zsófia és az atlanti eredetű Angéla ciklon. A két légörvénynek a hátoldali áramlási rendszere nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a Balatonnál 2010-ben fordult elő a legtöbbször erősen viharos, 90 km/h-t meghaladó széllökésű nap a távszélmérő hálózat 1987-es telepítése óta (*Zsikla*, 2011). A Balatonnál többfelé 35 m/s feletti, Balatonfüreden 39,7 m/s-os, Kab-hegyen 45 m/s-os széllökést mértek. Ezen széllökések magyarázatául a lejtővihar jelensége szolgálhatott – a 2004-es tátrai viharhoz hasonlóan (*Simon et. al.*, 2006; *Horváth*, 2004). A Zsófia viharciklon esetén egyértelműen megnyilvánult a Bakony hatása. A WRF modell segítségével kimutatták, hogy a hegység déli oldalán igen erős leáramlás alakult ki, a légnyomási mezőben pedig megjelent a Balaton felett a lejtőviharokra jellemző alacsony légnyomás, a lee oldali teknő (*Horváth et al*., 2010a). A pár héttel későbbi Angéla viharciklon hátoldalán kialakuló áramlásnak köszönhetően szintén a Balaton térsége volt az ország legszelesebb területe (*Horváth et al*., 2010b). Ez minden bizonnyal a hasonló nagytérségű izobár-elrendeződés és a lee oldali teknő megjelenése miatt szintén lejtővihar volt. Ezen két esetből általánosan is következtethetünk arra, hogy a nagy légnyomási-gradiensű, ciklonálisan görbülő izobárokkal rendelkező, ciklon hátoldali időjárási helyzetek kedveznek a balatoni bukószelek kialakulásához, azaz az ilyen szinoptikus helyzetekben egy a Bakony hatására jelentkező szélsebesség többlettel számolhatunk. 2020 októberének közepén szintén egy ciklon alakította a Balaton térségének időjárását egész napos esőzést és hátoldalán tartósan viharos szelet okozva (*Zsikla* és *Szilágyi*, 2020). Ebben az időjárási helyzetben a mért szélviszonyok, a megfigyelt felhőzet és csapadék, illetve a WRF modelleredmények is lejtővihar struktúrára utaltak (*Kurcsics* és *Horváth*, 2022). A Balaton északi partján a leáramlási területen jóval nagyobb volt a szélsebesség, mint a déli parton, a Balaton keleti medencéjének vízközépi mérőplatformján elhelyezett szélműszer pedig még egy az alapáramlással szembeforduló rotort is kimért (*Horváth*, 2020).

3. A bakonyi szél vizsgálata mérések és modell alapján napjainkban

A rendelkezésre álló sűrű mérőhálózatot és meteorológiai modellek eredményeit felhasználva arra keressük a választ, hogy valóban kialakulhat-e a Bakony déli oldalán a lejtőviharokhoz hasonló, szinoptikus folyamatok által generált lejtőszél, és amennyiben igen, ez mekkora hatással van a hegység lábánál fekvő Balatonnál tapasztalt szélviszonyokra. A szinoptikus mérésekből a szélsebesség, szélirány, széllökés és légnyomás adatok voltak a legfontosabbak. Emellett felhasználtunk műholdfelvételeket, radarméréseket, illetve a Siófoki Viharjelző Obszervatóriumban készített felhőfilmeket is. Mind a mérési adatokat, mind a modelleredményeket az OMSZ HAWK3 munkaállomásának segítségével jelenítettük meg.

A bemutatott eredmények mérési adatok és numerikus modelleredmények elemzésén alapulnak. A számításokat a HungaroMet Nonprofit Zrt. (korábban Országos Meteorológiai Szolgálat) Siófoki Viharjelző Obszervatóriumának Ventus szuperszámítógépén futtatott WRF modellel végeztük el, melynek horizontális felbontása 1,6 km volt. A WRF modellel számított áramlásokban rendre jellegzetes, lejtővihar szerű struktúrák jelentek meg.

A WRF modellel elvégzett kísérletek mellett számos mérési adatot is elemeztünk. Megvizsgáltuk a hazai földfelszíni mérőhálózat adatait, különös tekintettel a balatoni szélmérő állomásokat. Ezek a mérések 10 perces időbeli felbontással állnak rendelkezésre. A Balaton térségében a felszíni szélmérő állomások elhelyezkedése meglehetősen sűrű, a tavi viharjelző szolgálat igényeinek megfelelően 10–20 km-enként helyezkednek el a tó körül, sőt, a nyári félévben még négy, a víz közepén elhelyezett meteorológiai mérőplatform is üzemel. Ennek a mérőhálózatnak köszönhetően



2. ábra. Álló léghullám a Balaton felett fényképen és műholdfelvételen 2023.02.02-án.

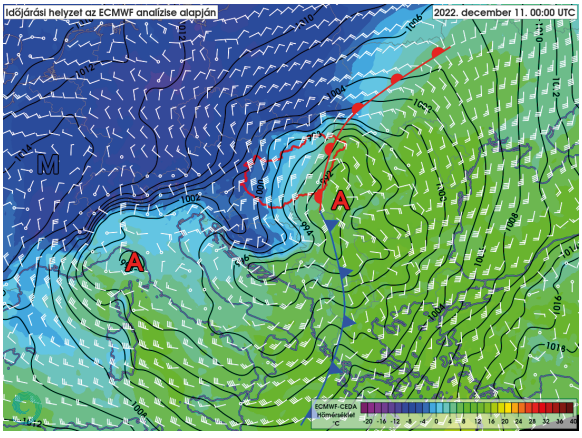
a mérési adatokból is jól vizsgálható a Bakony nagytérségű szélmezőre gyakorolt módosító hatása. Ez a hatás általában a szél jelentős megerősödésében nyilvánul meg, azonban vannak esetek, amikor a szél egyes helyeken történő gyengülése utal rá. Az, hogy a szélerősödés a tó melyik területét érinti, attól függ, hogy milyen hullámhosszú hullám alakul ki a Bakony felett. Rövid hullámok (~5 km-es hullámhossz) esetén az északi part térségében tapasztalható – esetenként 20–40 km/h-s – növekedés a széllökésekben. Ezek az esetek általában egyértelműen a lejtőszéllel magyarázhatók. Ha a hullámhossz nagyobb (10–15 km), akkor a lecsapó szél közelíti a déli partot, és a vízközépi mérőplatformok vagy a déli parti mérőállomások detektálhatják a szélsebesség növekedést. Ilyenkor az északi parton gyengébb a szél, ott már a hegység szélárnyékoló hatása érvényesül. Az ilyen helyzetekben általában már nehezebb megállapítani, hogy a Bakony vagy a Balaton hatása okozza a szélsebesség növekedést, azonban erre vonatkozóan is végeztünk vizsgálatokat.

Összességében elmondható, hogy hátoldali időjárási helyzetekben, az erős hidegadvekció megszűnését követően, az eleinte viszonylag homogén balatoni szélmező igencsak változékonnyá válik a Bakony hatására, egyes területeken jelentős széltöbblet, míg másutt akár mérséklődés és átmeneti irányváltás is előfordulhat. A Bakony hatására kialakuló orografikus hullámok általában a szélmezőben mutathatók ki a legjobban, kevésbé jellemző az, hogy a 2 méteres hőmérsékleti vagy nedvességi mezőben megjelenne a hatásuk.

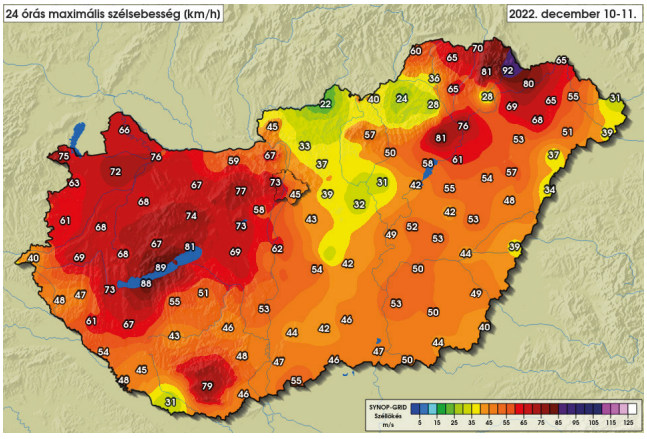
A modellszámítások és a felszíni mérési adatok mellett a felhőzet struktúrája is utalhat a szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél kialakulására. Ezt műholdas megfigyelések, valamint timelapse felhőfilmek is kimutathatják. Gyakran megfigyelhető, hogy a Bakonytól délre, a Balaton északi része felett egy, az alacsonyabb szinteken megfigyelhető, felhőmentes terület utal a leáramlás hatására. Dél felé haladva pedig, ahol a leáramlás feláramlásba vált, egy tartós felhővel fedett zóna alakul ki. Onnan a felhőket az erős magassági áramlás általában gyorsan dél felé szállítja, a folyamatos kondenzáció miatt azonban úgy tűnik, mintha egyhelyben állna a felhőzet [**1**]. Ezek az állóhullámok az idő előrehaladtával lassan mozognak. Hol északabbra, hol délebbre mozdul a kondenzációs zóna. Ezzel együtt a szeles területek helye is változik: ha egy állomás a feláramlási területről a leáramlásira kerül, ott igen gyors szélerősödés tapasztalható. Ezen állóhullámok helyének a megfigyelése adja az egyik legmegbízhatóbb információt a bakonyi lejtőszélről. Általában a Bakony által generált hullám gyorsan csillapodik, esetenként azonban a lejtőszelet követően többször is megismétlődik a fel-le áramlás, akár 50–100 km-rel távolabb is megfigyelhető a Bakony keltette hullámfelhőzet. Ilyen hullámfelhőzetet rögzített 2023.02.02-án a Siófoki Viharjelző Obszervatórium felhőkamerája, illetve a Suomi NPP kvázipoláris műhold VIIRS szenzora [**2**] is (*2. ábra*).

4. 2022. december 10–11-ei esettanulmány: egy jellegzetes téli balatoni lejtővihar

2022. december 10-én egy mediterrán ciklon alakította a térség időjárását. Az ország déli határához közel haladó, északkelet felé mozgó ciklonban nagy nyomásgradiens alakult ki. Középpontjában 990 hPa köré süllyedt a légnyomás, míg az Alpok térségében magasnyomás uralkodott. Ahogy egyre inkább a ciklon hátoldalára került a Kárpát-medence nyugati fele, úgy erősödött meg a szél is. December 10-én északias áramlással megkezdődött a hideg levegő beáramlása, december 11-re pedig olyan nagy légnyomás-különbségek alakultak ki a Dunántúlon, hogy már a hőmérséklet advekciótól függetlenül is tovább tudott erősödni a légmozgás. A *3. ábrán* a színezett területek a 850 hPa-os nyomási szint hőmérsékletét, a szélzászlók a 925 hPa-os nyomási szint szélviszonyait, míg a folytonos vonalak a tengerszintre átszámított légnyomást jelölik. 2022. december 11-én 00 UTC-kor a mediterrán ciklon középpontja Magyarországtól délkeletre helyezkedett el, a hátoldalán pedig áramlott be a hideg levegő a Dunántúlra. A szinoptikus helyzet kedvezett a bakonyi bukószelek kialakulásának. Ugyanis a közeli ciklonközéppontból adódóan az izobárok ciklonálisan görbültek, illetve a ciklon helyzetéből adódóan merőlegesek voltak a Bakony



3. ábra. Időjárási helyzet az ECMWF analízise alapján 2022.12.11. 00 UTC-kor.

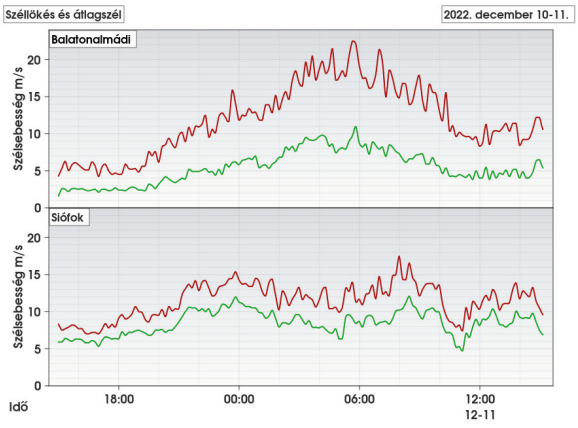


4. ábra. Legnagyobb széllökések a 2022.12.11. 12 UTC-t megelőző 24 órában az ország területén.

vonulatára, továbbá látható az is, hogy az áramlás közel geosztrofikus volt. A máshol kialakuló, szinoptikusan vezérelt bukószelekre vonatkozó ismereteink is alátámasztják, hogy ezek a körülmények kedveznek a nagy amplitúdójú lee oldali hullámok kialakulásához, ezáltal a lee oldali szélerősödéshez.

A mediterrán ciklon hátoldalán az északi, északnyugati szél fokozatosan megerősödött, majd többfelé viharossá fokozódott. Az ilyen szinoptikus helyzetekben Magyarországon a Dunántúl, illetve az északkeleti országrész a legszelesebb terület, míg a középső országrészben az Északi-középhegység (és az Északnyugati-Kárpátok) szélárnyékoló hatásának eredményeként mérsékeltebb a légmozgás. Tipikusan ilyenkor a Dunántúlon északi, északnyugati, keleten pedig északkeleti szélirány a jellemző. December 10–11-én a Bakony déli oldalán, a Balaton térségében jóval nagyobb volt a maximális szélsebesség, mint a környező területeken. A Dunántúlon egyedül ott fordultak elő 80 km/h-t meghaladó széllökések (*4. ábra*). Egy hasonló, a környezetéhez képest még nagyobb kiugrás a Mecsek déli oldalán is megfigyelhető. Utóbbi azt is igazolja, hogy a Balatonnál tapasztalható széltöbblet oka nem a Balaton, mint nyílt vízfelület, hanem a tőle északra húzódó Bakony. Ez abból is következik, hogy ebben az időjárási helyzetben (a megszokottól eltérő módon) a tó északi partja szelesebb volt a délinél.

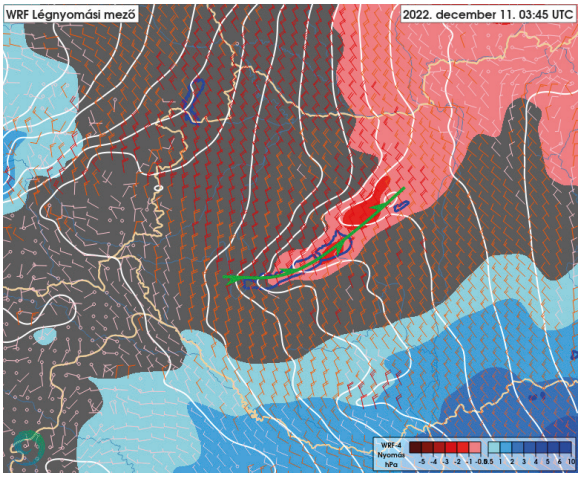
A szélviszonyok időbeli alakulását vizsgálva egymástól egészen eltérő menetet figyelhetünk meg a Balaton északi és a déli partján. Az átlagos szélsebesség az időszak nagyobb részében a déli parton volt a nagyobb, a legnagyobb széllökések mégis a tó északi partján alakultak ki. Hasonló eredményt publikált Titkos Ervin (*Titkos*, 1963). Az időszak első részében, december 11-én kb. 00 UTC-ig a Balaton déli partján, Siófokon volt erősebb a szél, ott fordultak elő nagyobb széllökések, az északi parti Balatonalmádiban gyengébb volt az áramlás (*5. ábra*). 00 UTC körül a déli parton csökkent, az északi parton pedig növekedni kezdett a szélsebesség. Ennél azonban jóval nagyobb mértékben növekedtek meg Balatonalmádiban a maximális széllökések, melyek többször meghaladták a 20 m/s-os sebességet is. Ez a folyamat a déli parti állomáson nem játszódott le, ott továbbra is jellemzően 15 m/s alatt maradtak a maximális lökések. Az időszak végére a szélviszonyok ismét hasonlóvá váltak. A szélsebesség és a széllökések Balatonalmádiban mért időbeli változásához hasonlót mértek a Balaton keleti felének összes északi parti állomásán. A déli parton csak Fonyódon tapasztaltak hasonlót. Ez arra utal, hogy ebben a sávban egy rendezett leáramlás alakult ki, a Bakonyból lebukó szél 5–8 m/s-os többletet jelentett a mért széllökés értékekben.



5. ábra. Szélsebesség (zöld) és széllökések (piros) alakulása Balatonalmádi és Siófok állomásokon 2022.12.10–11-én.

A 2022. december 10–11-i időjárási helyzetet a WRF modellel is megvizsgáltuk. Az ECMWF modell eredményei igazolták, hogy a nagytérségű időjárási helyzet alkalmas volt bukószél kialakulására: a Balatontól keletre jelen volt egy zárt ciklon, amelynek hátoldalán a Bakonyra közel merőlegesen futottak az izobárok (*3. ábra*). A WRF modell eredményei alapján pedig emellett azt is megállapíthatjuk, hogy a Bakony déli oldalán, a Balaton felett egy jelentős nyomásdepresszió is kialakult. A *6. ábrán* a fehér vonalak a tengerszintre átszámított légnyomást, a piros területek a 3 óra alatt bekövetkező nyomássüllyedést, a kék területek a nyomásemelkedést jelölik. A nagyfelbontású numerikus modellek eredményeiben megfigyelhető lee oldali teknő fontos jele a bukószél kialakulásának. Ennek tengelyét a *6. ábrán* a zölddel feltűntetett összeáramlási vonal jelzi. December 10-én, a kezdeti hidegadvekciós időszakban ez a teknő még csak gyenge formában jelentkezett. Majd ahogy a mediterrán ciklon középpontja kelet felé haladt, az izobárok pedig egyre inkább merőlegessé váltak a Bakony vonulatára, a lee oldali teknő gyorsan ki tudott mélyülni. Erre utal az ábrán látható légnyomás-tendencia is. A Dunántúl nagyobb részén a megelőző három órában nem változott jelentősen a légnyomás, a déli területeken emelkedés volt a jellemző. Eközben a Bakony déli oldalán három óra alatt 1–2 hPa-os nyomássüllyedés figyelhető meg.

A lejtőviharok kialakulása szempontjából a szinoptikus helyzet mellett a másik igen fontos tényező a vertikális hőmérsékleti rétegződés, valamint a szélprofil. Ezekről a mennyiségekről a vizsgált időszakban a Balaton térségére csak modelladatok álltak rendelkezésre. 2023 tavaszától azonban a Siófoki Viharjelző Obszervatóriumban már egy LIDAR berendezés is üzemel, amelynek segítségével szélprofilok állíthatók elő. A légköri stabilitási viszonyok és a szélsebesség vertikális profilja között megfelelő egyensúly szükséges ahhoz, hogy a lejtővihar kialakulhasson. A lejtőviharokhoz szükséges egy stabil réteg a hegycsúcs magassága felett, de nem túl magasan, ha pedig egy második stabil réteg is van a troposzféra alsó tartományában, az különösen kedvező lehet.

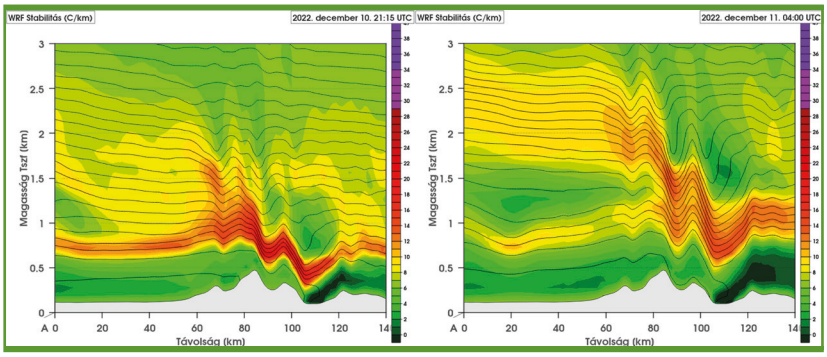


6. ábra. Légnyomás és 3 órás nyomástendencia a WRF modellben 2022.12.11. 03:45 UTC-kor.

2022. december 10-én 21 UTC körül egy erősen stabil réteg figyelhető meg a luv oldalon kb. 700–800 méteres tengerszint feletti magasságban. Ebben a rétegben a hegy fölött zavar keletkezett, a lee oldalon pedig az izentrópok (lsd. Kislexikon) rásimultak a hegyoldalra. Ezáltal az áramlás egy keskenyebb csatornába korlátozódott, ami szükségszerűen a szélsebesség növekedését eredményezte. A *7. ábrán* a folytonos fekete vonalak a potenciális hőmérséklet izovonalai (izentrópok), míg a színezés a potenciális hőmérséklet vertikális gradiensét ábrázolja (°C/km). A pirosas színek nagy gradienst, ezáltal erősen stabil rétegződést, míg a sötétzöld színek kis gradienst, instabilabb rétegződést jelölnek. December 11-én 04 UTC-re a 800 méter körüli stabil réteg gyengült, 2–2,5 km-es magasságban viszont kialakult egy újabb, erősen stabil réteg. Jól látható módon ez is nagy szerepet játszott a lejtővihar fennmaradásában. A Balatonnál nagyon gyakori, hogy egy hidegfront mögött két erősen stabil réteg is kialakul, ennek oka a földrajzi környezet. Ahogy már korábban említettük, a Dunántúlra a frontok mögött a hideg levegő az Alpok és Kárpátok közötti alacsonyabb térszínen, a Dévényi-kapu térségében áramlik be elsőként. Ahogy a front Kárpát-medencébe érő szakasza vertikálisan egyre jobban kiterjed, előbb-utóbb határozottan megindul a hidegadvekció a hegyek felett is, így a Balatonhoz egy második, magassági hidegfront is érkezik. Így hátoldali helyzetben egy második, 2–3 km magasságú stabil réteg is képződik, ez pedig különösen kedvezhet a bakonyi lejtőviharoknak, ahogy jelen esetben is látható.

Az időjárási helyzetben jól megfigyelhetők a bórához hasonló, lejtővihar-szerű struktúrák, ahogy a hidraulikus ugrás és az orografikus hullámtörés jelensége is (*8. ábra*). A szélsebesség metszetén látható, hogy a vizsgált időpontban a légkör alsó 2 km-es tartományában viharos, erősen viharos szél fújt. A luv oldalon a szélsebesség eloszlása közel homogén, majd a lee oldalra érve nagy mértékben megerősödött a felszínközeli szél, miközben 2 km-es magasságban teljes szélcsend alakul ki. Ez az adriai bórának is jellegzetessége.

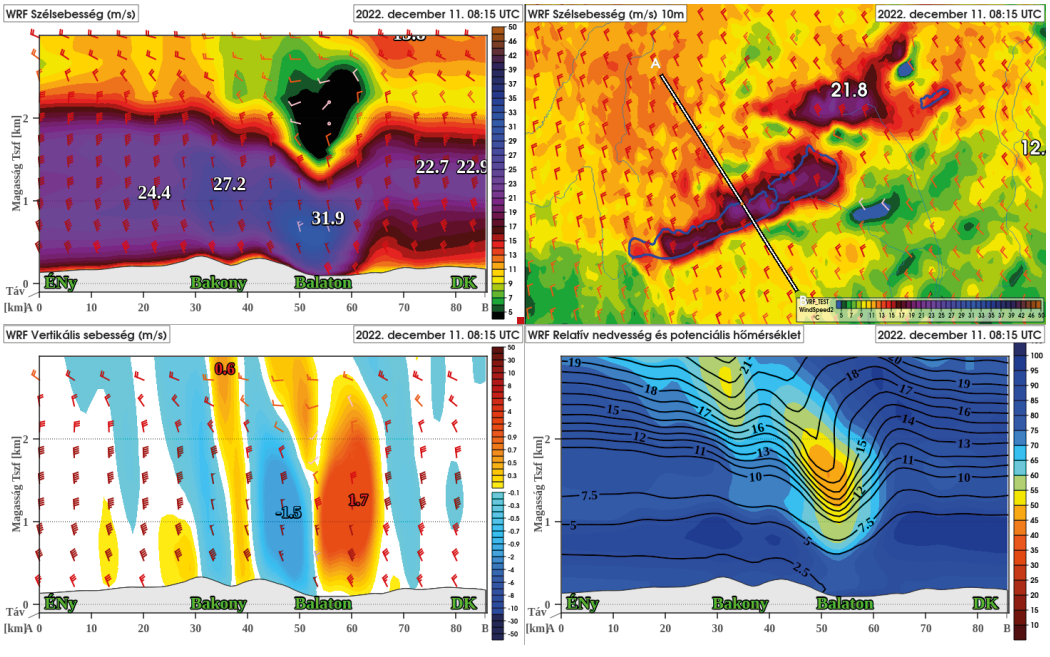
A legerősebb szél a Balaton felett figyelhető meg, majd a tó déli partja felett egy határozott gyengülés is látható. A Balatonhoz mérten erős vertikális áramok alakultak ki, mind az északi parti leáramlás, mind a déli parti feláramlás sebessége meghaladta az 1,5 m/s-ot, ami a Balatonnál csak az erősebb lejtőviharok esetén szokott előfordulni. Látható az is, hogy a hullámmozgás horizontális irányban nem terjed tovább, csak vertikálisan kiterjedt hullámok alakultak ki. A lee oldalon igen erős kiszáradás figyelhető meg azon a területen, ahol a potenciális hőmérséklet izovonalai a Bakony déli lejtője felé közelítenek, beszűkítve az áramlási csatornát.



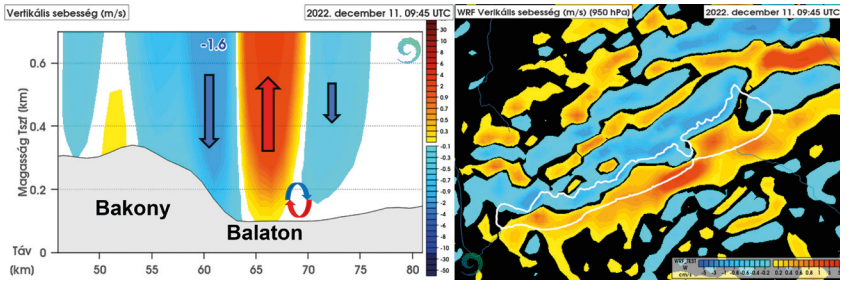
7. ábra. WRF modellel számított stabilitási viszonyok a Bakonyra merőleges, ÉNy-DK irányú metszet 2022.12.10. 21:15 UTC-kor és 2022.12.11. 04 UTC-kor.

A szinoptikus folyamatok által kialakított bakonyi lejtőszélhez a vertikális sebesség jellegzetes struktúrája társítható. A *9. ábrán* a kékes színek a leáramlásokat, a narancssárga színek a feláramlásokat jelölik. A Bakonytól délre, általában a Balaton északi partjának térségében egy rendezett leáramlási zóna húzódik végig szinte a teljes part mentén. Ez a leáramlás vertikálisan a légkör magasabb tartományaira is kiterjed, erőssége néhol megközelítheti a 2 m/s-os sebességet. A Balaton déli partja felé közeledve – a lee oldali hullám hosszától függően – megszűnik a leáramlás, majd egy feláramlási csatorna figyelhető meg. A feláramlás helyén csökken a szélsebesség a felszínközeli légrétegekben. A feláramlási csatornát egy második, gyengébb leáramlás is követheti délebbre, ezek határán pedig olyan rotorok alakulhatnak ki, melyek a felszín közeli szelet átmenetileg akár szembe is fordíthatják az alapáramlással (*Kurcsics* és *Horváth*, 2022).

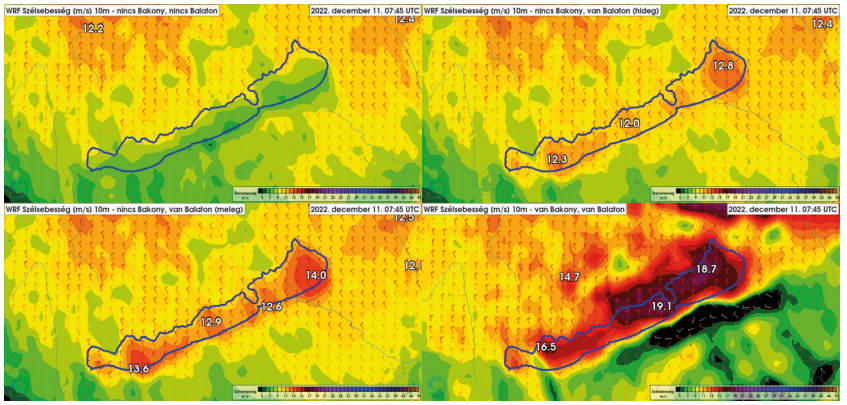
A WRF modellel hatásvizsgálatot végeztünk arra vonatkozóan, hogy az egyes, a Balaton térségében előforduló módosító hatásoknak az adott időjárási helyzetben mekkora szerep juthatott a szélviszonyok alakításában. Négy ilyen kísérletet végeztünk el: Az első kísérletben minden befolyásoló tényezőt (Bakony és Balaton) kivettünk a modellből, azzal a céllal, hogy sem a domborzat, sem az eltérő hőmérsékletű víz, sem maga a vízfelszín ne legyen hatással a szélre. A második kísérletben a Balaton már bekerült a modellbe, a vízhőmérsékletét még a szárazföld hőmérsékletével azonosra állítottuk be, hogy először csak az alacsony súrlódásból eredő hatást kapjuk meg. A harmadik kísérletben már a tényleges, a szárazföldénél pár fokkal magasabb vízhőmérsékletet adtuk meg. A negyedik kísérletben pedig a Bakony vonulatát is visszatettük a modellbe, így a valós domborzatot és felszínborítottságot kaptuk vissza. Az így kapott eredményeket megjelenítettük



8. ábra. WRF modellel számított szélsebesség (bal felső), vertikális sebesség (bal alsó), potenciális hőmérséklet és relatív nedvesség (jobb alsó) vertikális metszete, illetve a felszíni szélkökés mező (jobb felső) 2022.12.11. 08:15 UTC-kor.



9. ábra. Vertikális sebesség a Balaton térségében egy Balaton feletti, ÉNy-DK irányú metszet mentén, illetve a 950 hPa-os nyomási szinten 2022.12.11. 09:45 UTC-kor a WRF modellben.



10. ábra. Szélsebesség a WRF modellben 2022.12.11. 07:45 UTC-kor, különböző módosítások esetén.

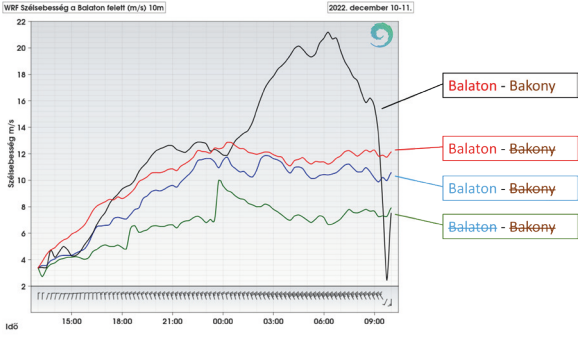
térképesen, egy adott időpontban (*10. ábra*), illetve ábrázoltuk a szélsebesség időbeli változását is egy adott pontban (*11. ábra*).

A Bakony és Balaton nélküli esetben - ahogy az várható volt -, a Balaton helyén a szélmező beleillik a környező területekbe, felette kiemelkedő szélsebesség nem figyelhető meg, a választott pontban pedig a szélsebesség végig 10 m/s alatt alakul. Ha már a Balatont betesszük a modellbe, megjelenik a tó felett egy a környezetéből kis mértékben kiemelkedő, szeles sáv, és az időbeli meneten is látható, hogy a teljes időszakban megnövekedett a szélsebesség. A vízhőmérséklet 4 fokos megemelése (ami ténylegesen megvalósult) további 1–2 m/s-os szélerősödést eredményezett, még kis mértékben ugyan, de már egyértelműen megkülönböztetve a Balatont a környezetétől. Ennek hátterében a melegebb vízfelület feletti labilisabb légrétegződés áll. A vízhőmérsékletből eredő hatás a téli időszakban kisebb, nyáron, kisebb alapszél esetén, illetve a széllökések tekintetében akár lényegesen nagyobb is lehet. Ez azonban még mindig nem ad magyarázatot a Balatonnál tapasztalt jelentős széltöbbletre. Az utolsó kísérletben, amikor már mindent a valóságnak megfelelően beillesztettünk a modellbe, – így az előző kísérlethez képest a Bakony is bekerült – az időszak második felében egy igen jelentős szélnövekmény figyelhető meg.

Ez az eredmény, összevetve a lealacsonyított domborzatú futtatásokkal egyértelműen igazolja, hogy a Bakony hegyvonulata nélkül, önmagában a Balaton miatt a szélsebesség közel sem lenne olyan kiugróan nagy, mint amit amilyen a valóságban. Összevetve az egyes hatásokat látható, hogy ebben a decemberi időjárási helyzetben a legnagyobb szerepe a Bakonynak volt, ezt követte a Balaton vize, majd a vízhőmérséklet.

Összefoglalás

Különböző meteorológiai méréseken, illetve modellezésen alapuló kutatásaink alapján beigazolódni látszik, hogy szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtővihar – mint például a bóra vagy a főn – akár alacsonyabb hegyek lábánál, esetünkben a Bakony hatására a Balatonnál is kialakulhat. Ehhez egy adott szinoptikus helyzetre, illetve a légkör megfelelő vertikális rétegződésére is szükség van. A szinoptikus helyzetet megfelelőnek tekinthetjük amennyiben a Dunától keletre egy zárt alacsonynyomású képződmény helyezkedik el, hátoldali áramlási rendszerében pedig az izobárok kifutása közel merőleges a Bakony vonulatára. Vertikálisan egy kellően stabil réteg jelenléte szükség a hegycsúcs felett, attól nem túl nagy távolságban. Emellett a szélprofilnak is megfelelőnek kell lennie, a szélsebességnek növekednie kell a magassággal. A lejtővihar várható kialakulásának egyik biztos jele a modellekben a lee oldali teknő megjelenése a Balaton felett az északi, északnyugati szeles időjárási helyzetekben.



11. ábra. A szélsebesség alakulása a Balaton egy adott pontja felett a WRF modellben, különböző módosításokat követően 2022. december 10-11-én.

Amennyiben a fenn említett feltételek adottak, a Bakony hatására a Balaton felett jelentős szélerősödés következhet be. Ez a szélerősödés azonban még nem feltétlenül jelentkezik a felszín közvetlen közelében. A tapasztalatok azt mutatják, hogy ehhez általában még szükséges valamely trigger hatás, ami kellő turbulenciát biztosít az átkeveredéshez. Ez lehet például a besugárzás okozta átkeveredés vagy egy pozitív örvényességi advekció által generált turbulencia is.

A bakonyi lejtőviharok kialakulását igazolhatjuk (és előrejelezhetjük) WRF modelleredményekkel, melyek jellegzetes lejtővihar struktúrákat adnak vissza a Bakony déli oldalán. Szintén alkalmasak erre a felszíni szélmérések, melyekben esetenként a váratlan szélerősödések, máskor az egyes területeken megfigyelhető hirtelen gyengülések utalnak a hullámok kialakulására. A műholdfelvételek szintén többször igazolják a Bakony hatására kialakult állóhullámok, ezzel a lejtővihar kialakulását.

A jelenség pontosabb megismerése fontos feladat a balatoni viharjelzésben. A vizsgálatokat a jövőben is folytatjuk annak érdekében, hogy olyan módszereket dolgozzunk ki, melyek lehetővé teszik a Bakony okozta széltöbblet, a bakonyi lejtőviharok kialakulásának előrejelzését.

A kézirat megjelenését GINOP-2.3.2-15-2016-00055 számú projekt keretében a Pénzügyminisztérium támogatta.

Irodalomjegyzék

Abatzoglou, J.T., Hatchett, B.J., Fox-Hughes, P., Gershunov, A., Nauslar, N.J., 2021: Global climatology of synoptically forced downslope winds. *Int. J. Climatol. 41*, 31–50.

Ambrózy, P., 1970: Lee hullámok hosszának számítása és összehasonlítása a műholdak felhőképeiről vett hullámhosszal. *Időjárás 74*, 251–261.

Ambrózy, P., Götz, G., Tänczer, T., 1963: Hirtelen kitörő szélviharok vizsgálata a Balaton térségében. *Időjárás 67*, 153–158.

Bartha, I., 1978: A DNY-i szél megerősödésének egy sajátos esete a Balatonnál. *Légkör 23*(4), 119–123.

Béll, B., Takács, L., 1974: A Balaton éghajlata. Az Országos Meteorológiai Szolgálat hivatalos kiadványa 105–117.

Cholnoky, J., 1914: Somogy vármegye természeti viszonyai. In: Magyarország vármegyéi és városai.

Cholnoky, J., 1936: Balaton. Budapest.

Götz, G., 1966: Sturmwarnung am Balatonsee. Az Országos Meteorológiai Intézet kiadványa 30.

Götz, G., 1981: ALPEX GARP – Kísérlet az Alpok térségében. *Légkör 26*(2), 2–8.

Hajósy, F., 1952: Magyarország csapadékviszonyai 1901–1940. Az Országos Meteorológiai Intézet hivatalos kiadványa. Magyarország Éghajlata 6.

Horváth, Á. 2004: A 2004. november 19-ei nagy vihar. *Légkör 49*(4) 6–9.

Horváth, Á., Zsikla, Á, Hadvári, M., 2010a: A „Zsófia" ciklon meteorológiai leírás. OMSZ Tanulmányok. https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1082&hir=A_%22Zsofia%22_ciklon_meteorologiai_leirasa

Horváth, Á., Zsikla, Á, Kovács, A., 2010b: Az „Angéla" ciklon meteorológiai leírás. OMSZ Tanulmányok. https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1084&hir=Az_%22Angela%22_ciklon_meteorologiai_leirasa

Horváth, Á., 2020: Álló léghullám a Balaton felett: miért fúj erősebb szél a Balatonnál hidegfront esetén? OMSZ Tanulmányok. https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2920&hir=Allo_leghullam_a_Balaton_felett:_miert_fuj_erosebb_szel_a_Balatonnal_hidegfront_eseten?

Kurcsics, M., Horváth, Á., 2022: Az adriai bórától a bakonyi lejtőviharig. *Légkör 67*(2) 77–89. OMSZ Tanulmány: https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3157&hir=Az_adriai_boratol_a_bakonyi_lejtoviharig__

Lóczy, L., 1913: A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I. kötet: A Balatonnak és környékének fizikai földrajza, I. rész: A Balaton környékének geológiája és morfológiája, I. szakasz: a Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. Budapest.

Péczely, Gy., 1962: Főnjelenség Magyarországon 1962. február 6-án. *Időjárás 66*, 306–309.

Péczely, Gy., 1976: Helyi szelek. *Légkör 21*(4), 81–86.

Sebe, K., Csillag, G., Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Thamó-Bozsó, E., Müller, P., Braucher, R., 2011: Wind erosion under cold climate: A Pleistocene periglacial mega-yardang system in Central Europe (Western Pannonian Basin, Hungary). *Geomorphology 134*, 470–482.

Simon A., Horváth Á., Vivoda J., 2006: Case study and numerical simulations of the November 19, 2004 severe windstorm in Central Europe. *Időjárás 110*, 91–123.

Szepesi, D., 1962: Középhegységeink orografikus csapadékképző hatásának mennyiségi vizsgálata. *Időjárás 66*, 269–274.

Tänczer, T., 1961: A balatoni viharjelzésről. *Légkör 6*(2), 9–12.

Titkos, E., 1963: A Balaton-felvidék szélárnyékoló hatása. *Időjárás 67*, 248–249.

Valent, E., 1959: A Balaton éghajlatkutatásának története. *Légkör 4*(2) 6–7.

Zách, A., 1953: Balatoni szél. Az Országos Meteorológiai Intézet kis népszerű kiadványa 1.

Zách, A., 1957: Elkészült a siófoki obszervatórium. *Légkör 2*(1), 6–8.

Zsikla, Á., 2011: A 2010 évi balatoni és velencei-tavi viharjelzési szezonról. *Légkör 56*(2) 69–72.

Zsikla, Á., Szilágyi, E., (2020): A 2020 évi tavi viharjelzési szezonról. *Légkör 65*(4), 190–196.

Internetes hivatkozások

[**1**] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3365

[**2**] https://worldview.earthdata.nasa.gov/

A 2023. évi tavi viharjelzési szezonról

Szilágyi Eszter, Zsikla Ágota
HungaroMet Nonprofit Zrt., Siófoki Viharjelző Obszervatórium, szilagyi.e@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.2.4

Az Országos Meteorológiai Szolgálat a vízen tartózkodók biztonsága érdekében minden évben viharjelző szolgálatot lát el a Balatonon és a Velencei-tavon, valamint 2012 óta teljes időszakban a Tisza-tónál is. A viharjelzési szezon április 1-je és október 31-e között tart. Ez az írás a 89. balatoni viharjelzési szezonról számol be, és áttekinti annak jellemző időjárási eseményeit, valamint ismerteti az első és másodfokú viharjelzések statisztikáját.

About the storm warning season at lakes in 2023

At Lake Balaton, Velencei-tó, and Tisza-tó there is a storm warning service operated by Hungarian Meteorological Service. This was the 89th storm warning season at Lake Balaton. The storm warning service is responsible for the safety of people at lakes. When strong or stormy wind is expected, storm warnings are issued on the first or second level. The duration of the storm warning season is seven months: from 1st April until 31st October. This paper is about the significant weather cases of the season in 2023 and contains a summary of the storm warnings.

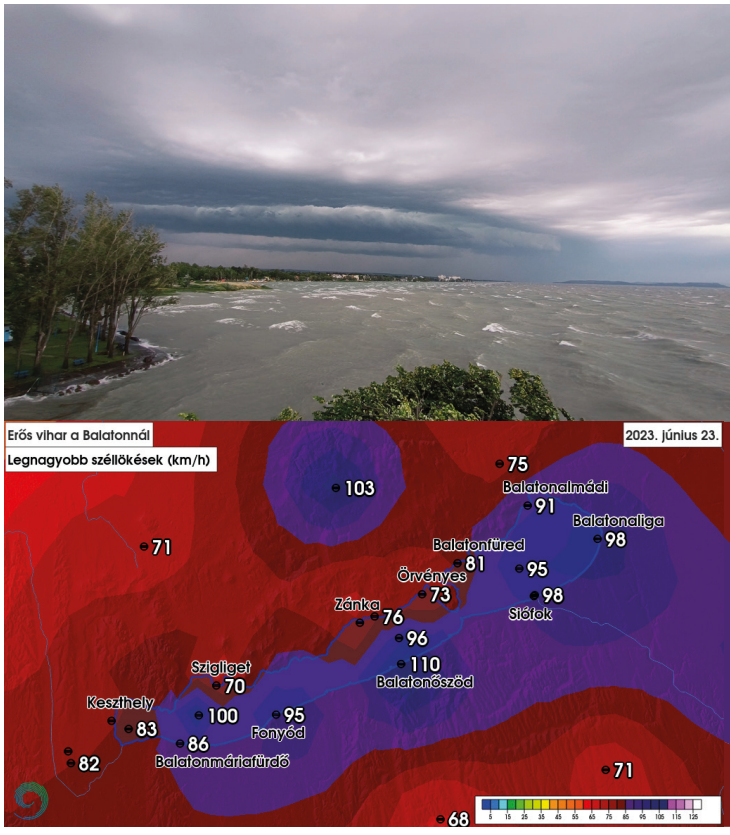
Október végén lezárult a 89. viharjelzési szezon a Balatonnál és a Velencei-tónál, és a 12. teljes viharjelzési szezon a Tisza-tónál.

A 2023. évi viharjelzési szezon összességében az átlagosnál melegebb, ugyanakkor csapadékosabb lett. A keleti medencében az átlagos szélsebesség a sokévi átlaghoz jobban közelített, míg a Balaton nyugati része gyengébben szeles volt (-8,5%). A nagy viharok száma elmaradt az átlagostól. A szélviszonyok és az időjárás ebben az évben kedveztek az előre kijelölt napokra tervezett nagy sportrendezvényeknek, a Balaton-átúszásnak, Balaton-átevezésnek, Balatonfüred-Tihany beevezésnek és a Kékszalag vitorlásversenynek. Ez utóbbi a legtöbb versenyen megszokottól eltérően, elsősorban a nappali órákban tartósan élénk északnyugati szélben zajlott, mely segítségével több időrekord is megdőlt. A tó látogatottságát a nagy számú parti rendezvény is növelte. A sportversenyek mellett ezek közül is többen kaptak külön meteorológiai előrejelzéseket és riasztásokat a Szolgálattól. Az enyhe őszi időjárás hozzájárult ahhoz, hogy a tó látogatottságának mérőszámát is jelző Balatoni Hajózási Zrt. októberi kimutatása szerint a 2023-as szezon utasszáma ismét meghaladta időarányosan az előző éveket, így a forgalmasabb 2022-es és 2019-es évet is.

I. A viharjelzési szezon időjárásáról

A szélviszonyokról: A 2023. év a hét hónapos viharjelzési szezon indulásától (2005) értékelve, az átlagosnál gyengébben szeles lett; a keleti medencében

mindösszesen 3,7%, míg a Balaton nyugati részén 8,5%-kal. A keleti medencében az április és az október volt az átlagosnál szelesebb, míg a július átlagosan szeles. A Balaton nyugati részén a tavaszi hónapok lettek a legszelesebbek, a többi hónapban az átlagsebesség az ilyenkor szokásosnál alacsonyabb volt. A 2023. évi viharjelzési szezonban hat erős vihar (90 km/h szélsebességet elérő, vagy meghaladó szélsebesség) érte el a Balatont és térségét. A nyári hónapokban négy (júliusban volt kettő), szeptemberben és októberben egy-egy alkalommal. Mindegyik esetben parti állomás is érintett volt. A parti állomásokon mért legnagyobb szélsebességeket június 23-án, illetve július 13-án rögzítették, mindkét esetben 110 km/h szélmaximummal. Júniusban a középső medencében egy nyugat felől jövő zivataros hidegfront hatására, júliusban pedig a keleti medencében egy zivatarvonal hatására keletkeztek a legerősebb széllökések. Az egyébként is szeles vízközépi platformon a keleti medencében egy rövid ideig tartó zivataros szélrohamban augusztus 28-án kiugróan magas, 131 km/h szélsebességet regisztrált az automata, mellyel új országos napi szélrekord is született. Október 27-én pedig egy hidegfront hatására a balatonszemesi platform mért kiugró, 121 km/h szélsebességet. Ezeken a napokon a parti állomásokon mindenütt 100 km/h alatt maradtak a legerősebb széllökések. A Tisza-tónál is volt egy erős vihar, ez augusztus 5-én érkezett a tóhoz. A fölöttünk lévő ciklon előoldalához tartozva ekkor 91 km/h-s szélrohammal zúdult ki a csapadék hűtötte levegő egy kiterjedt szupercellából.

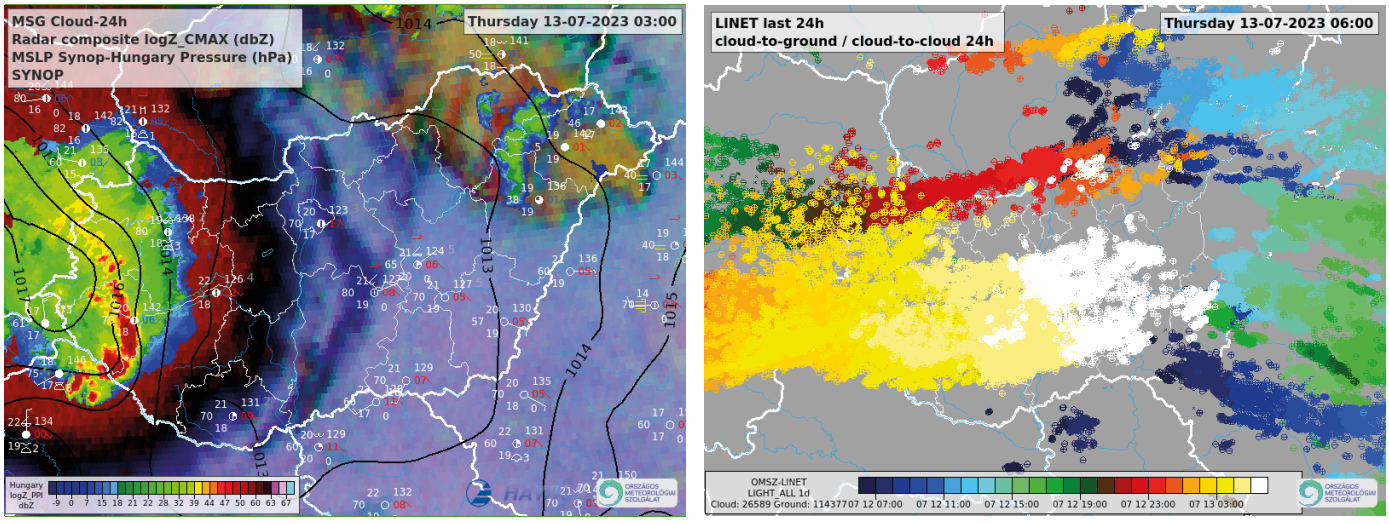


1. ábra. Fenn: Június 23-án látványos peremfelhőzettel érkeztek zivatarok a Balatonhoz (fotó: Szilágyi Eszter). Lenn: A tónál már a zivatarok érkezését megelőzően viharossá fokozódott a szél. Az OMSZ szélmérő hálózata számos állomáson 90 km/h-t meghaladó széllökést regisztrált. (2023.06.23)

Az erősen viharos napok jellemzése

Idén az erős viharok többsége a főszezonra jutott. Június 23-án az egész európai kontinensen keresztül húzódó hullámzó frontrendszer választotta el a déli forró, afrikai eredetű légtömegeket a front északi oldalán húzódó hűvösebb, óceáni eredetű levegőtől. Hazánk fölé a magasban nagy nedvességtartalmú, trópusi levegő áramlott a Szahara irányából, amely a rendkívül magas hőmérsékletű sivatagi levegőben telítetlen maradt, majd az európai hűvösebb területek fölé érve elkezdett kikondenzálódni. A zivatarok kialakulásához szükséges nedvesség és labilitás adott volt, a felhőképződéshez elengedhetetlen emelőhatást pedig az érkező hidegfront biztosította. A front torlasztó hatása rendezett konvekciót segített elő, az országban többfelé zivatarláncok szerveződtek. A fronthoz kapcsolódóan és annak előterében is kialakultak heves zivatarok. A hidegfront mögött jelentős nyomásemelkedés volt megfigyelhető, továbbá a nyugat felől érkező zivatarok a már meglevő nyomási gradienst lokálisan tovább növelték. Ennek eredményeként a Balatonnál már a zivatarok érkezését (*1. ábra, fenn*) megelőzően viharossá fokozódott az északnyugati szél (*1. ábra, lenn*). Öt parti és három vízközépi állomáson is előfordult 90 km/h-t meghaladó széllökés. A szárazföldi állomások közül Balatonőszödön mértük a legerősebb szelet (110 km/h), míg a platformok esetében Szigliget platformon volt a legnagyobb szél (100 km/h). Az Őszödön mért érték megegyezik a korábbi országos napi szélmaximummal. Így bár új szélrekordot nem avattunk, sikerült beállítani a korábbi rekordot [**1**].

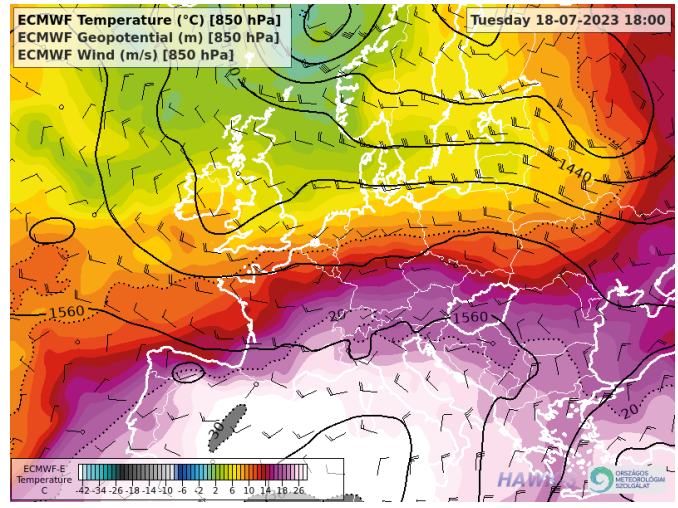
Júliusban a nagy szeles helyzeteket jellemzően már nem a nagy nyomási gradiens, sokkal inkább a zivatarok eredményezték. A hónapban sok volt a heves zivatarhoz kapcsolódó szélsőséges időjárási esemény. A július 13-i vihar a júniusi szélviharhoz nagyon hasonló szinoptikus körülmények között alakult ki. A szubtrópusi forró légtömeget az északi hűvösebb levegőtől egy lassan mozgó hullámzó frontálzóna választotta el.



2. ábra. Balra: Az OMSZ radarfelvételén látható az a gyorsmozgású hidegfront, ami július 13-án hajnalban nyugat felől érte el a Balatont. Jobbra: A front útját viharos szél és intenzív villámtevékenység kísérte (2023.07.13.).

A front torlasztó hatása és az előterében áramló nagy nedvességtartalmú, labilis rétegződésű levegő kedvező feltételeket teremtett zivatarok kialakulásához. A front-hoz kapcsolódó erős magassági szél pedig nagy szélnyírást hozott létre, ami lehetővé tette zivatarláncok szerveződését, illetve egyedi szupercellák kialakulását is. Az előrejelzési produktumok alapján különösen a déli vármegyékben heves kísérőjelenségekre lehetett számítani a zivatarokból, Somogyra a piros figyelmeztetés is kikerült. A front hajnalban nyugat felől érkezett, előterében egy konvergenciavonal mentén zivatarok szerveződtek (*2. ábra, bal*). A zivatarláncot gyors áthelyeződés jellemezte, megközelítőleg 90 km/h-s sebességgel tört rá nyugat felől a Balatonra. A legnagyobb széllökést a siófoki kikötőben elhelyezett szélmérő regisztrálta (110 km/h). Ez az érték egyúttal a viharjelzési szezon legnagyobb parti állomáson mért széllökése lett. A zivatarlánchoz magas, 60 dBZ körüli radar reflektivitási érték is kapcsolódott, továbbá intenzív villámtevékenység (*2. ábra, jobb*) kíséretében vonult végig a Balaton tengelyén (~9000 villám), amelyből a legtöbb lecsapót a keleti medence közelkörzetében érzékelte a villámlokalizátor.

A következő erősen viharos napra alig néhány napot kellett várni, július 18-án konvekcióhoz kapcsolódóan újabb vihar csapott le a tóra. Július közepét kánikula jellemezte, egy a Brit-szigetek térségében kialakult ciklonrendszer előoldali áramlása délnyugati irányból tartósan pumpálta fel a trópusi forró levegőt a kontinens belseje felé (*3. ábra*). A magasban zonális áramlás volt a meghatározó, így az óceán felől érkező nedves levegő kedvező táptalajt biztosított Nyugat-Európában zivatarok kialakulásához, amelyek nyugati áramlással rendre a Kárpát-medencébe is eljutottak. Ezen a napon kora este egy 10–12 km-es felhőtetővel rendelkező MKR (Mezoléptékű Konvektív Rendszer) vette célba a Balatont, amelynek útja egészen Franciaországból vezetett hazánkig. A konvektív rendszer hozzánk különösen instabil levegőbe érkezett, kiugróan magas labilitási viszonyok jellemezték a napot (~2000-es CAPE, 38-as Thompson-index, 30-as VT-index, 8-as SCP stb.). Kezdetben úgy tűnt, hogy



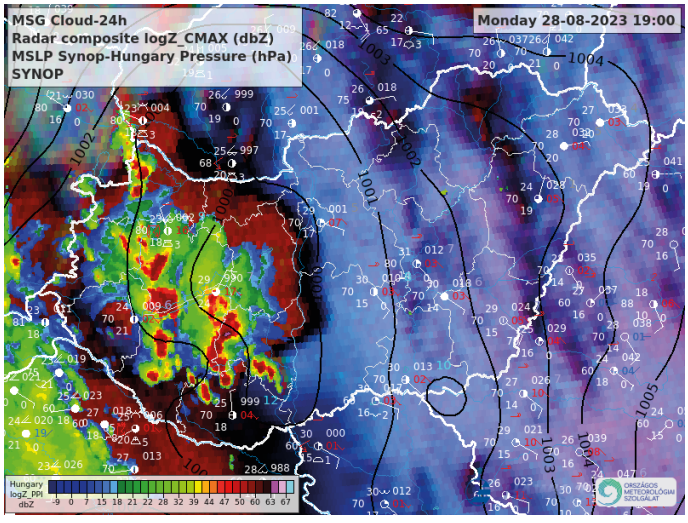
3. ábra. Július 18-án a Kárpát-medencétől északi, északnyugati irányban egy frontrendszer hullámzott, mely elválasztotta a déli forró, szubtrópusi levegőt az északi hűvösebb légtömegtől. Hazánk ekkor még a front előoldalán, melegszektorban helyezkedett el. Ebbe a forró, labilis légtömegbe érkezett meg Nyugat-Európából egy MKR.

a komplexum átvonul az egész Balatonon, végül kissé az alapáramlástól eltérülve, a tótól délnyugatra haladt el, jelentős nyomásemelkedést okozva. A nyomásemelkedés következtében az izobárokon átfújó délnyugati szél a tó nyugati felében viharossá fokozódott, Szigligeten pedig nem sokkal napnyugtát követően egy 91 km/h-s lökést is produkált.

A szezon legnagyobb vihara nyár végéig váratott magára. Augusztus 20-át követően gyakori, hogy megérkezik az évszakváltó hidegfront, így hirtelen kiürül a Balaton környéke. Idén azonban sokáig kitartott a meleg strandidő, így a balatoni turizmus is iskolakezdésig virágzott. Napközben szokatlanul meleg volt, a Dunától keletre néhol a 38–39 fokot is elérte a hőmérséklet, így többször új országos melegrekordot avattunk. Éjszakánként pedig sorra dőltek a legmagasabb minimum-hőmérsékleti rekordok, sokáig kitartottak a 20 fok feletti trópusi éjszakák. Az augusztus végi kánikulának egy lassan mozgó, hullámzó frontrendszer vetett véget. Augusztus 28-ra virradóan hidegfronti szakasza már behullámzott a Dunántúlra, majd napközben kelet felől ismét visszamelegedett, így a front visszahúzódott. Estére a front előterében a Dunántúlon két konvergenciavonal is kiépült, amelyeknek déli ágán, a Dél-Dunántúlon pattantak ki az első heves zivatarok (*4. ábra*). A magasban uralkodó déli széllel ezek a cellák a Balaton irányába helyeződtek át, és az este folyamán libasorban követték egymást. A zivatarvonalat alkotó cellák legfőbb kísérőjelensége a felhőszakadás mellett a viharos kifutószél volt, számos állomáson elérte vagy meghaladta a zivataros kifutószél sebessége a 70 km/h-t. A vízparton végül Zánkán mértük a legerősebb széllökést (DNy, 97 km/h), míg a nyílt vízen elhelyezett siófoki platformon 131 km/h-s szélroham is előfordult déli szélből [**2**]. Lokálisan, egy adott pont felett, ahol több alkalommal is átvonult zivatar, jelentős mennyiségű csapadék hullott. A Balaton térségében végül a legnagyobb csapadékösszeget Fonyód regisztrálta (30 mm).

A front mögötti tartós hidegadvekció végül 29-én indult meg, átmenetileg megtörve az augusztus végi kánikulát. A szezonzáró hidegfront bár talajközelben napközben átvonult, délnyugat felől erre siklott fel egy squall line. A zivatarlánc látványos peremfelhőzettel, intenzív villámtevékenység és viharos kifutószél kíséretében szelte át a Balatont.

Bár szeptember első három hete nyugodt időjárási körülmények közt telt, a hónap utolsó dekádjára ismételten jutott erős vihar, de ez már zivataroktól függetlenül következett be. Szeptember 24-én egy hullámzó frontrendszer és egy mediterrán ciklon együttese alakította időjárásunkat. A front szeptember 23-án, a késő



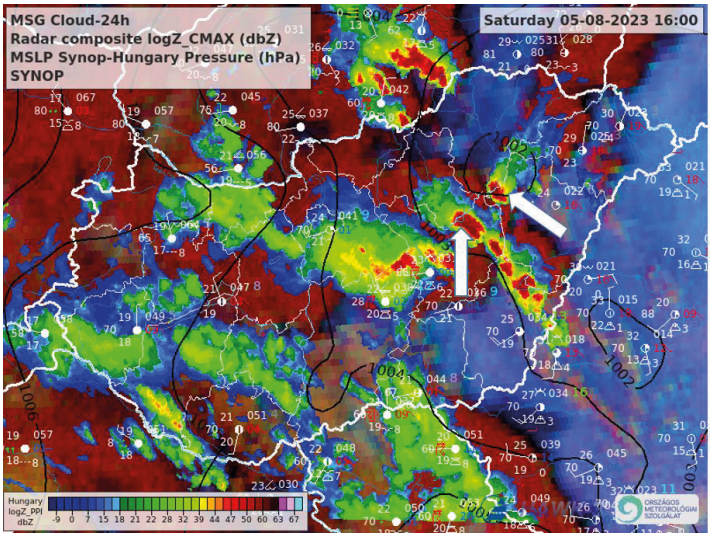
4. ábra. Az OMSZ radarfelvétele az augusztus 28-i esti (19:00 UTC) konvektív eseményekről. A Dunántúlon két konvergenciavonal mentén is zivatarok szerveződtek, amelyek dél felől sodródtak rá a Balatonra viharos kifutószelet okozva.

esti órákban vonult át felettünk jelentős, 10 fok körüli hidegadvekció kíséretében. A front hátoldalán bezúduló hideg levegő hatására fokozatosan viharossá fokozódott az északnyugat szél. Az éjszaka folyamán már tartósan viharos szél fújt, és napközben sem akart veszíteni erejéből, sőt délelőtt tovább fokozódott. Az északnyugati nyomási gradiens reggel, kora délelőtt érte el tetőpontját (5,4 hPa), ennek megfelelően a szél ekkor csúcsosodott ki. A Balatonnál végül 90 km/h-t meghaladó szelet egyedül Balatonmáriafürdőn jegyeztünk fel (93 km/h), amely országos viszonylatban is a legnagyobb érték lett a nap folyamán.

A hónap végét ugyancsak mozgalmas időjárás jellemezte, szokatlanul sok zivatarral. Sorra, szinte futószalagon érkeztek a kontinens belseje felé a ciklonok, illetve azok frontjai, így végül még a szezon utolsó napjaira is jutott erős vihar. Október 27-re virradóan az Alpok fölött egy ciklon mélyült ki, majd napközben hazánk irányába helyeződött át. A ciklon gyorsmozgású hidegfrontja kora délután érte el a Balatont. A front mögött határozott nyomásemelkedés (4 hPa/3h) rajzolódott ki, és a front nyomán északnyugatira forduló szél viharos lökések kíséretében tört rá a tóra. Továbbá a front torlasztó hatása a nedves, labilis, jelentős szélnyírással rendelkező légtömegben erőteljes gomolyfelhő-képződést tett lehetővé, így intenzív záporok, helyenként zivatar is kialakult a térségben. Ilyen esetben az intenzív csapadék képes „lekeverni” a magasban fújó viharos szelet, a magassági szél pedig rárakódva az alapáramlásra

5. ábra. Október utolsó napjaiban többször is nyári zivatarokat meghazudtoló látványban lehetett részünk a Balatonnál. A szezonzáró hidegfront előterében kipattanó zivatar október 31-én kora délután így érkezett Siófokra (fotó: Horváth Ákos).

további átmeneti szélrohamokat eredményez. Ennek következtében végül a parton, Balatonőszödön mérhettünk 90 km/h-t meghaladó szelet (ÉNy), míg a vízközépen a balatonszemesi platformon fújt orkán erejű szél. A nem mindennapi, 121 km/h-s értékekkel új országos napi szélrekord született [**3**]. Bár a térségben mindenhol előfordult csapadék, a záporokhoz kapcsolódó mennyiség nem volt rendkívüli, 10 mm körüli összegeket mért mérőhálózatunk.



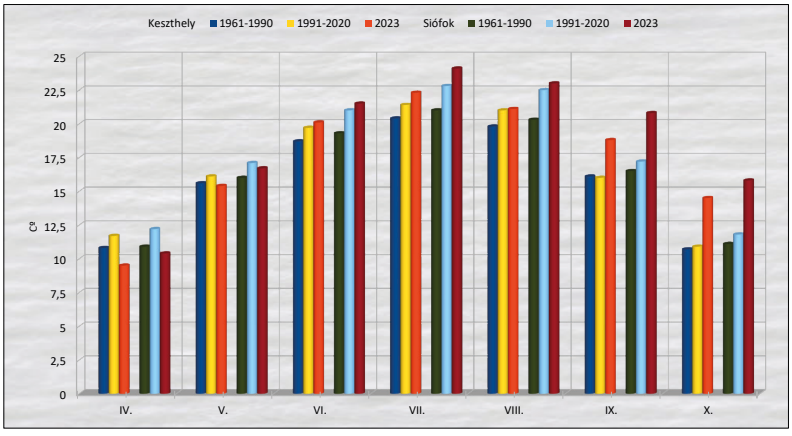
6. ábra. Augusztus 5-én délután az ország keleti felében a forró, labilis rétegződésű levegőben megfelelőek voltak a feltételek zivatarok kialakulásához. A nagy szélnyírás következtében szupercellák is feltűntek a Tisza-tó környezetében (OMSZ radar).

És nem ez volt az utolsó zivataros nap a szezonban. A szokatlanul meleg októbernek egy szezonzáró hidegfront vetett véget a hónap utolsó napján. A hidegfront előterében nagy számban pattantak ki ismét zivatarok (*5. ábra*), a nyugati medencét egy szupercella is érintette. A zivatarok végül láncba szerveződve, viharos szél kíséretében vonultak végig az országon. Bár ezen a napon a Balatonnál nem történt erős vihar, Kab-hegyen a legerősebb széllökések elérték a 100 km/h-t. Ezzel a viharral búcsúzott az időjárás a 2023-as balatoni viharjelzési szezontól [**4**].

A tavalyi évben nem csak a Balatonnál voltak erősen viharos napok, a Tisza-tónál is előfordult 90 km/h-t meghaladó szél a főszezonban. Augusztus 5-én az ország keleti fele egy mediterrán ciklon meleg szektorában helyezkedett el, így a forró, nedves levegő, továbbá az instabil légrétegződés megfelelő feltételeket biztosított zivatarok kialakulásához. Köztük hevesebb példányok, a szélnyírás következtében szép számmal forgó zivatarfelhők, úgynevezett szupercellák is feltűntek [**5**]. Késő délután egy dél felől és egy a Hortobágy irányából érkező szupercella épp a Tisza-tó térségében „csapott össze” (*6. ábra*). Ennek eredményeként a poroszlói szélmérő 91 km/h-s (D) lökést regisztrált, továbbá pillanatok leforgása alatt 30 mm-t megközelítő csapadék is lehullott. Az idei viharjelzési szezonban ez volt a legnagyobb széllökés a Tisza-tó térségében.

A hőmérsékleti viszonyokról

A szezon az átlagosnál hűvösebben indult. Az áprilisi középhőmérsékletek mintegy 2 fokkal, a májusiak 0,5 fok körüli értékkel lettek alacsonyabbak az ilyenkor szokásosnál. Ezt követően már a nyári hónapok mindegyike melegebb volt (0,2–1,3 fokkal) a harmincéves (1991–2020) átlagnál. A nyári hónapok középhőmérséklete Keszthelyen 21,1 °C, Siófokon 22,8 °C lett. A szeptember pedig, ahogy országos szinten is, rekord meleg volt. Az Éghajlati Osztályon végzett számítások szerint országos átlagban 2023 szeptembere lett 1901 óta a legmelegebb szeptember hazánkban, melyről részletesebben Szentes Olivér tanulmányában olvashatunk: „A legmelegebb szeptember 1901 óta” címmel [**6**]. Az európai, illetve a globális méréseket értékelve a WMO hasonló megállapításokat tett globális viszonylatban is [**7**]. A Balatonnál a szeptember hónap átlaghőmérséklete Keszthelyen 2,9 fokkal, Siófokon pedig 3,5 fokkal haladta meg a 30 éves klímaátlagot (*7. ábra*). Siófokon az elért 20,8 °C-kal



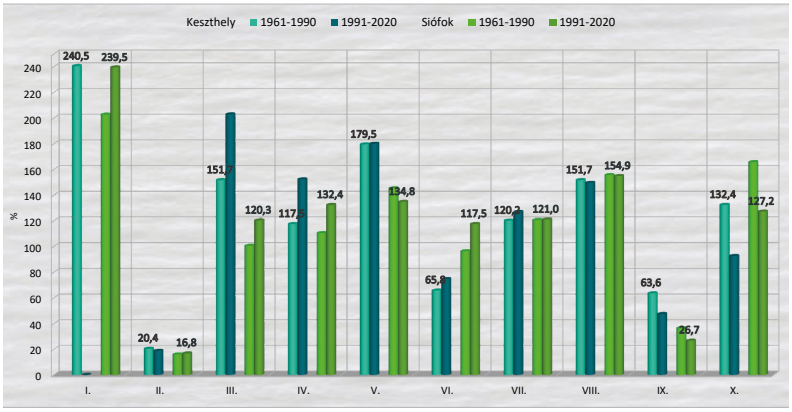
7. ábra. A havi átlaghőmérsékletek (8 mérésből) alakulása a Balatonnál 2023-ban.

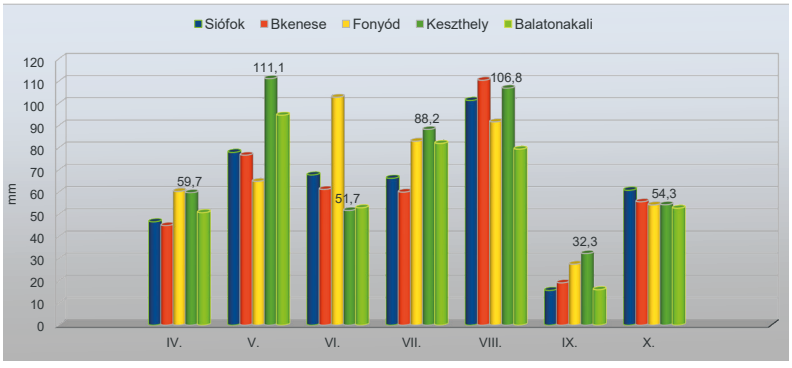
szintén túlléptük az 1901 óta mért legmagasabb havi középhőmérsékletet. Ebben a hónapban gyakran volt anticiklon felettünk, és a ciklonpályák leginkább az Atlanti-óceán fölött húzódtak. Gyengébb frontok érintették csak a Kárpát-medencét. Októberben folytatódott az évszakhoz képest meleg idő, és ekkor újra jelentősebben, 3,6, illetve 4,0 fokkal haladtuk meg az éghajlati normál értéket. Siófokon ismét rekord dőlt meg, ezúttal a múlt század eleje óta mért legmelegebb október valósult meg. Országos viszonylatban a harmadik, globális szinten pedig a legmelegebb október lett a 2023-as [**8**].

A legtöbb 30 °C-t elérő vagy meghaladó hőmérsékletű nap a Balatonnál 29 volt, míg a kisebb vízfelületű Velencei-tónál 33 nap. Ezen napok közül a Balatonnál 3, a Velencei-tónál 4 szeptemberre esett. 35 °C feletti léghőmérséklet a Balatonnál 2, a Velencei-tónál 4 napon fordult elő. A nyár legmelegebb hónapja a július volt. A szezon legmelegebb napja viszont augusztus 26-a lett, amikor Siófokon 35,2 °C, Fonyódon 36,4 °C, Agárdon 37 °C-kal tetőzött a hőmérséklet.

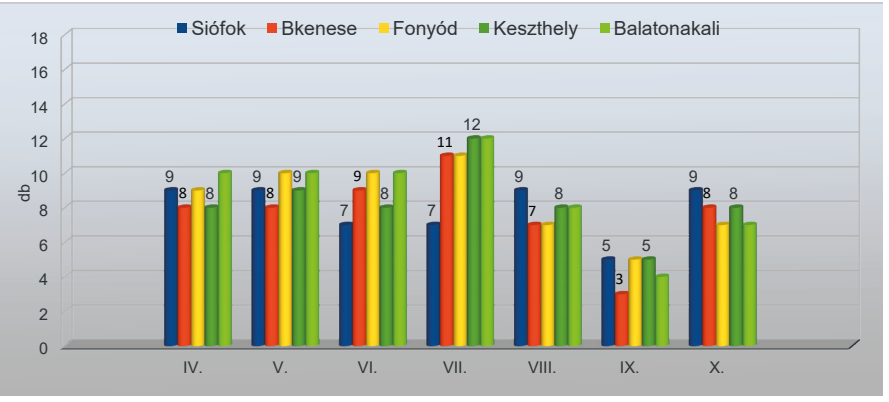
A csapadékviszonyokról

A szezon folyamán szeptember kivételével jellemzően az átlagosnál több csapadék hullott (*8. ábra, fenn*). Júniusban volt azonban a Balaton nyugati részén néhány helyen átlag alatti (65–75%) csapadék. Szeptemberben ugyanakkor jellemzően csak az elvárható mennyiség legfeljebb fele, volt, ahol csak negyede hullott. Augusztusban a havi csapadékösszeg több helyen elérte, vagy meghaladta a 100 mm-t (*8. ábra, lenn*). Júniusban és júliusban a Balaton nyugati részén, májusban keleten is egy-egy helyen mértek 100 mm feletti összegzett csapadékot. A napi csapadékösszegek maximumai ezekben a hónapokban állomásonként általában 20 és 40 mm között alakultak. Egy-egy helyen volt csak 40 mm-t meghaladó napi csapadék. Balatonlellén június 6-án azonban kiugróan magas értéket, 68,6 mm-t mértek. Aznap több alkalommal volt csapadék a térségben, így zivatarok is. Az időjárás meghatározója egy sekély alacsony nyomású képződmény volt nagy nedvességtartalmú légtömeggel. A Dunántúlon többfelé volt eső, zápor, zivatar és két további helyen is mértek 60 mm feletti





8. ábra. Fenn: 2023 havi csapadékösszegei a sokéves átlagok százalékában a Balatonnál. Lenn: Balatoni állomások havi csapadékösszegei 2023-ban.



9. ábra. Az 1mm csapadékot meghaladó csapadékos napok száma 2023-ban.

csapadékot. Ugyanakkor a Balatonnál legtöbb csapadékot adó hónapban, augusztusban az összmennyiség nagy része jellemzően hét-nyolc nap alatt hullott le (*9. ábra*). A csapadék döntő része a hónap első hetére, illetve a hónap végére esett, így közben kialakulhatott olyan hosszabb, több mint 10, nyugaton 15 napos összefüggő száraz időszak is a településeken, amikor összesen 0,5–1 mm csapadék sem hullott. De hasonlóan száraz volt pl. június második dekádja is 10–11 napos csapadékmentes időszakkal.

A Balaton átlagos vízállása április 1-jén 105 centiméterrel indult. A tóra hulló, illetve hozzáfolyó csapadékvíz hatására június 10-re a vízszint 121 centiméterre tudott emelkedni. Június 13-án megnyitották az új Sió-zsilipet, és a tervezett vízleengedés segítségével a Sió csatornán hajókat szállítottak a Dunára, majd másokat fel tudtak hozni onnan a Balatonra. A műveletet igénylő több hétig tartó nyitva tartás mellett csak 110 cm-re csökkent a tó vízszintje. A zsilip zárását követően az évszaknak megfelelően fokozatosan tovább csökkent a vízszint. A legalacsonyabb vízállás október közepén állt be, ezt 92 centiméternek jegyezték a vízügyi szakemberek.

II. A viharjelzések és a vízbiztonság

2023-ban az első és másodfokú viharjelzések összesített fenntartási ideje a Balatonnál a szezon teljes hosszának 36–37,4%-át tette ki. A Velencei-tónál ez az érték 22,7% lett, ami megfelelt 1167 órának. A másodfokú viharjelzésben fenntartott órák a Balatonnál a teljes időszaknak mintegy 10, a Velencei-tónál alig 3,4%-át tették ki. Ezzel a Velencei-tónál 2023-ban az eddigi legrövidebb ideig volt érvényben a másodfokú viharjelzés. A tavak közül a legkevesebb viharjelzésben fenntartott óra a Tisza-tónál volt. Az elsőfokú viharjelzés 836 órát, a másodfokú viharjelzés mindösszesen 173 órát volt érvényben, amely értékeket összesítve a teljes fenntartási idő 1009 órát tett ki. Mindegyik tavunknál az előző évihez képest növekedtek 1,5–3%-kal a fenntartási idők, amely elsősorban a csapadékosabb időjárásnak volt köszönhető.

Tavaink időjárásról az érdeklődők a HungaroMet Nonprofit Zrt. honlapján, a folyamatosan frissülő ***www.met.hu/idojaras/tavaink*** oldalról kaphatnak részletes információt. Továbbá a viharjelzést és az időjárási helyzetet folyamatosan követő, ingyenesen letölthető „Meteora" mobil alkalmazást is igénybe vehetik.

A Balatoni Vízirendészeti Rendőrkapitányság munkatársai a viharjelzési szezonban 165 esetben, összesen 332 fürdőzőt vagy vízi közlekedő személyt mentettek ki a vízből, ami az elmúlt 10 év átlaga alapján egy közepes értéket mutat. 2023. április 1. és október 31. között 13 ember fulladt a Balatonba. Halálos kimenetelű vízi közlekedési baleset nem történt.

Internetes hivatkozások

[1] https://met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=5296&m=2&hir=Szelrekorddal_erkezett_a_hidegfront_(2023.06.23.)

[2] https://met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=5396&m=2&hir=Szellokes_rekord_(2023.08.28.)

[3] https://met.hu/omsz/OMSZ_hirek/index.php?id=5482&m=2&hir=Tobb_rekord_is_megdolt_(2023.10.27.)

[4] https://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=3368&hir=Szezonzaro_vihar

[5] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3348&hir=Konvektiv_viharok_minden_formaban

[6] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3358

[7] https://www.met.hu/ismerettar/meteorologiai_hirek/index.php?id=3361&hir=Szeptemberben_megdolt_a_havi_homersekleti_rekord_globalis_atlagban

[8] https://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=3373&hir=Globalisan_a_legmelegebb_2023_oktobere_es_az_ev_elso_tiz_honapja

Esszé az emberi hőterhelésről és hőérzékelésről

Ács Ferenc, Kristóf Erzsébet, Zsákai Annamária
ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, acs@staff.elte.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.2.5

Viselt ruházatunkat alapvetően a kültéri (időjárás) vagy beltéri (a helység mikroklímája) hőterhelés és annak érzékelése határozza meg. Életünkben a termikus komfort megléte vagy elérése alapvető fontossággal bír. E tanulmányban a kültéri levegőkörnyezet hőterhelését becsültük egy ruházati termikus ellenállás-operatív hőmérséklet modell alapján, és a hőterhelést megfigyelt hőérzet-kategóriák hozzárendelésével is jellemeztük. A hőterhelés és a hőérzet közötti kapcsolatrendszert a Kárpát-medence alföldi régióiban jellemző ún. hideg-típusú időjárási helyzetekben (*lsd. Kislexikon*) elemeztük. Megállapítottuk, hogy Magyarország alföldi területein, nyáron, nagy besugárzás és magas léghőmérséklet esetén az operatív hőmérséklet (T_o) 70–80 °C is lehet. Télen -10 °C körüli léghőmérséklet és derült égbolt esetén a T_o kisebb -20 °C-nál és a ruházati termikus ellenállás 3–3,5 clo (mértékegység a ruhák hőszigetelő képességére, 1 clo = 0,155 $m^2 \cdot °C \cdot W^{-1}$) körüli. Ilyenkor az emberek hőterhelésében és szubjektív hőérzékelésében nagy különbségek lehetnek. A termikus komfort állapotában a ruházati termikus ellenállás 0–0,5 clo közötti, a T_o pedig 20 és 30 °C között változik. Ilyenkor a hőterhelés és a hőérzet emberek közötti változékonysága a legkisebb.

Essay on human thermal load and thermal perception

The clothing we wear is basically determined by the outdoor (weather) or indoor (local microclimate) thermal load and its perception. Experiencing or achieving thermal comfort is a fundamental aspect of our lives. In this study, we estimated the thermal load of the outdoor air environment based on a clothing thermal resistance-operative temperature model, and we also characterized the thermal load by assigning the observed thermal sensation categories. The thermal load-thermal perception relationships are analysed for „cold-weather" situations (weather in which clothing resistance values are greater than zero) in the lowland regions of the Carpathian Basin. We found that in summer in lowland areas of Hungary, in case of high irradiation and high temperature (thermal sensation category: very warm), the operative temperature (T_o) is about 70-80 °C. In winter, at air temperatures around -10 °C and in clear sky conditions (thermal perception category: very cold), T_o is less than -20 °C and clothing thermal resistance is 3-3.5 clo (measurement unit for the thermal insulation of clothes, 1 clo = 0.155 $m^2 \cdot °C \cdot W^{-1}$). In such cases, there can be large interpersonal differences in people's thermal load and thermal perception. In the thermally neutral state, clothing thermal resistance varies roughly between 0-0.5 clo and To between 20 and 30 °C. In these cases, the interpersonal variability of thermal load and thermal perception is the smallest.

1.1. Az emberi hőterhelés-modellek és a PET index hőérzet-kategóriái

Manapság már egy tucat emberi hőterhelést szimuláló modell van (*de Freitas and Grigorieva*, 2015; *Potchter et al*., 2018). Az első modelleket egy-egy kiválasztott meteorológiai elem alkotta (*Bruce*, 1916; *Macpherson*, 1962), vagy valamilyen kombinációjuk (*Thom*, 1959). A múlt század második felében azonban megjelentek az emberi test energiaegyenlegén alapuló komplexebb modellek is (*Fanger*, 1970; *Gagge et al*., 1971), melyek népszerűsége állandóan nőtt. E modellekben ún. „standard" vagy „átlagos" ember szerepel. Így pl. a leggyakrabban használt PET-modellben (PET-Physiological Equivalent Temperature (Fiziológiailag Ekvivalens Hőmérséklet)) a „standard" ember egy fiktív ember, aki 35 éves, férfi, 75 kg-os és 175 cm magas. E „standard" ember hőérzetét *Matzarakis* and *Mayer* (1996) jellemezte. A hőterhelést a PET indexszel írták le, dimenzióját °C-ban adták meg. A PET tehát egy °C-os dimenzióval rendelkező hőterhelés-mutató, amit indexnek kereszteltek el. A °C-ban kifejezett PET index határértékei és a hőérzet-kategóriák közötti kapcsolatot az *1. táblázat* szemlélteti.

PET index (°C) határértékei	Hőérzet-kategória
41 < PET	nagyon forró
35 < PET ≤ 41	forró
29 < PET ≤ 35	meleg
23 < PET ≤ 29	enyhén meleg
18 < PET ≤ 23	neutrális
13 < PET ≤ 18	enyhén hűvös
8 < PET ≤ 13	hűvös
4 < PET ≤ 8	hideg
PET ≤ 4	nagyon hideg

1. táblázat. A PET index °C-ban kifejezett határértékei és a PET index modellben szereplő „standard" ember hőérzet kategóriái közötti kapcsolat.

Matzarakis and *Mayer* (1996) nem ismertették az eljárást, a módszertant, ami alapján megállapították a PET index formájában kifejezett hőterhelés határértékek és a hőérzet-kategóriák közötti kapcsolatot. Utaltak arra, hogy e táblázat a nyugat- és közép-európai klímában élő, e klímához alkalmazkodott „standard" emberre vonatkozik. Említsük meg, hogy Nyugat- és Közép-Európa klímája *Köppen* (1936) szerint többnyire *Cfb* (*C*–meleg mérsékelt, *f*–nincs szezonalitás a csapadék évi változásában, *b*–meleg nyár) klímaképlettel jellemezhető, míg *Feddema* (2005) szerint e klíma "hűvös, nedves", "hűvös, nyirkos", vagy "hűvös, száraz" a "hőmérséklet nagy, vagy extrém ingadozásával". Legvégül megemlítendő az is, hogy a komfort zónát (neutrális hőérzet) jellemző hőterhelés határértékek klímatípustól klímatípusig változnak (*Cohen et al.*, 2013; *Potchter et al.*, 2018).

1.2. Az emberi hőérzékelés mechanizmusa

Az emberi hőérzékelést termoreceptoroknak (az érzőreceptorok egyik fajtája) nevezett specializált hámsejtek végzik. Négy termoreceptor fajta van: a meleg, a hideg, a fájdalmasan meleg és a fájdalmasan hideg érzékelésére specializált receptorok. Amennyiben a bőrfelszín hőmérséklete 33 °C-os, azt az emberi test termikusan közömbösnek (se nem hideg, se nem meleg) érzékeli. A hideg receptorok a 15–33 ºC-os tartományban, a fájdalmasan hideg receptorok pedig a 15 ºC-nál alacsonyabb hőmérsékleteken lépnek működésbe. A meleg termoreceptorok 33–45 ºC-os tartományban, míg a fájdalmasan meleg receptorok a 45 ºC-nál magasabb hőmérsékletek esetén regisztrálnak. A receptorokban a környezeti hőterhelés hatására elektromos ingerület keletkezik, amit szaknyelven akciós potenciálnak nevezünk. Ez az akciós potenciál a receptorok falán jön létre, a fal külső és belső oldala közötti potenciálkülönbséget jelenti. A sejtfal két oldala közötti potenciálkülönbség a sejtfalba beágyazott ionpumpaként működő fehérjék révén alakul ki. E komplex, ioncsatornaként működő fehérjék molekuláris hőmérők, mivel a rajtuk áthaladó iontöltésmennyiség nagysága mérhetően függ a kültéri hőmérséklettől (*Vriens et al.*, 2014). Ezekből több fajta van (*Zhang*, 2015), és a fent említett kritikus hőmérsékleti értékek ezen ionpumpák hőmérséklet-függő működéseivel kapcsolatosak. A létrejött akciós potenciál vezetése öntovaterjedő folyamat, hasonló ahhoz a folyamathoz, amit egy puskaporcsíkon tapasztalhatunk, ha a végén meggyújtjuk. Ezen elektromos jelként tovaterjedő ingerület, áttevődve neuronról neuronra, átjutva az idegrostokon eljut az agy különböző tartományaiba, ahol az hőérzetté konvertálódik. E konverzió fizikai megvalósulásáról a mai napig is keveset tudunk.

1.3. Cél

E tanulmány célja 1) az individuális ruházati termikus ellenállás-operatív hőmérséklet modell részletes bemutatása, valamint 2) az individuális emberi hőterhelés és hőérzet kapcsolatát jellemző klimatológiai adatbázis értékelésével kapott főbb eredmények ismertetése a) az extrém hőterhelések, b) a hőterhelést meghatározó főbb időjárási elemek és c) az individuális hőterhelések és hőérzetek közötti eltérések vonatkozásában.

2. Módszerek

Négy módszert fogunk ismertetni: az emberi hőterhelést szimuláló ruházati termikus ellenállás modellt, az emberi hőérzékeléssel kapcsolatos módszertani alapelemeket, a hőterhelés és a hőérzet kapcsolatát jellemző adatsorok kezelési módszertanát és a testforma leírására szolgáló Heat-Carter-féle szomatotipizálási módszert.

2.1. Ruházati termikus ellenállás modell

A ruházati termikus ellenállás modell fizikájának részletes leírása megtalálható *Ács* és *munkatársai* (2019, 2021a, 2022) tanulmányaiban. A modell a) az emberi test energia-egyenlegén alapul, és b) az emberi testet egy egységes hengerként kezeli (*Katić et al*., 2016). A modell a ruházattal borított emberi test és a környezet közötti hőcsere-folyamatokat taglalja. A különböző hőszabályozási folyamatok (pl. izzadás, didergés) taglalását viszont mellőzi. Megjegyzendő, hogy az r_{cl}-T_o modell sokkal egyszerűbb, mint a PET modell. A modellben az emberi test belsejének hőmérséklete (37 °C) és a bőrfelszín hőmérséklete (34 °C) határfeltételek. A modell feltételezi, hogy a ruházat a) befedi az emberi testet teljes egészében, b) szorosan tapad a bőrhöz, valamint azt is, hogy a ruházat és a bőrfelszín albedója megegyezik. Kültéri környezetben 1,1 $m \cdot s^{-1}$ (4 $km \cdot h^{-1}$) sebességgel gyalogoló, nem izzadó embert szemlélünk. Ezúttal csak a ruházati termikus ellenállás (r_{cl}), az operatív hőmérséklet (T_o) és az aktivitáshoz tartozó (gyaloglás) metabolikus (M) hőáram-sűrűség számítását ismertetjük. Ez alapján

$$r_{cl} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_S - T_o}{M - \lambda E_{sd} - \lambda E_r - W} - r_{Hr}, \quad (1)$$

$$T_o = T_a + \frac{R_{ni}}{\rho \cdot c_p} \cdot r_{Hr}, \quad (2)$$

ahol ρ a levegő sűrűsége ($kg \cdot m^{-3}$), c_p a levegő állandó nyomáson vett fajhője ($Jkg^{-1} \cdot °C^{-1}$), T_S a bőrfelszín hőmérséklete (°C) (állandó, 34 °C), r_{Hr} a terresztriális sugárzási és a konvektív hőtranszporttal szembeni kombinált ellenállás paraméter (sm^{-1}), T_a a levegő hőmérséklete (°C), R_{ni} az izotermális sugárzási egyenleg energiaáram-sűrűsége (Wm^{-2}), λE_{sd} a száraz bőr párolgása (Wm^{-2}), λE_r a respirációs párolgás (Wm^{-2}) és W az izmok mechanikai munkavégzésének hőáram-sűrűsége (Wm^{-2}) az adott aktivitás során, a mi esetünkben a gyaloglás során. Mindkét paraméter, az r_{cl} és a T_o is hőterhelés mutató. A fő különbség közöttük az, hogy az r_{cl} ezt hőszigetelésként, míg a T_o hőmérsékletként fejezi ki, egyébként mindkét kifejezés az energiaegyenlegből következik függetlenül attól, hogy ez itt nincs megmutatva. A T_o használata praktikus, és értelemszerűen integrálja a légköri hőterhelést okozó tényezőket. A sugárzási egyenleget az izotermális sugárzási egyenleg bevezetésével és használatával becsültük,

$$R_{ni} = S \cdot (1 - \alpha_{cl}) + \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_{cl} \sigma T_a^4, \quad (3)$$

ahol S a teljes besugárzás, α_{cl} a ruházat albedója, ϵ_a a légkör emisszivitása, ϵ_{cl} a ruházat vagy a bőrfelszín emisszivitása és σ a Stefan–Boltzmann állandó. A modellünkben α_{cl} = 0,25–0,27, ϵ_{cl}=1. A függőleges felszín helyett vízszintes felszínt választottunk a minél egyszerűbb számítások végett. A globálsugárzást a relatív napfénytartam *rsd* alapján becsültük *Mihailović* és *Ács* (1985) munkája alapján,

$$S = Q_0 \cdot [\alpha + (1-\alpha) \cdot rsd], \quad (4)$$

ahol Q_0 az adott órára vonatkozó globálsugárzási állandó ($MJ \cdot m^{-2} \cdot óra^{-1}$) derült égbolt esetén, és α ugyan ezen óraközre vonatkozó dimenziótlan sugárzási állandó. A relatív napfénytartam a hőérzet-megfigyelések időtartamára (5–10 perc) és az emberi testre vonatkozó adat, azaz, egyenlő a napsütötte emberi test időtartamának és a hőérzet-megfigyelés időtartamának hányadosával. Jelezzük, hogy az S $MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ dimenzióban megkapott értékét Wm^{-2} dimenzióra konvertáltuk! A kombinált sugárzás-konvektív ellenállási paraméter r_{Hr} a sugárzási r_R és a konvektív tagok r_{Ha} következő kombinációja:

$$\frac{1}{r_{Hr}} = \frac{1}{r_{Ha}} + \frac{1}{r_R}, \quad (5)$$

$$r_{Ha}\,[sm^{-1}] = 7.4 \cdot 41 \cdot \sqrt{\frac{D}{U_{1.5}}}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{r_R} = \frac{4\epsilon_{cl}\,\sigma T_a^3}{\rho c_p}\,, \qquad (7)$$

ahol D (m) annak a hengernek az átmérője, amellyel közelítjük az emberi testet, $U_{1.5}$ a levegő emberi testhez viszonyított áramlási sebessége az ember mell-magasságában (ez kb. 1,5 m). $U_{1.5}$-t a 10 m-es magasságban mért szélsebességből becsültük a neutrális rétegződéshez tartozó profil alapján.

Weyand et al. (2010) alapján az adott aktivitáshoz tartozó metabolikus energiaáram M (W) (a mi esetünkben gyalogoló ember) a következőképpen becsülhető,

$$M = M_b + M_w, \qquad (8)$$

ahol M_b az alapanyagcsere hőáram-sűrűsége (a nyugalmi helyzetben levő ember) és M_w a gyalogolás metabolikus hőáram-sűrűsége. Mindkét tag az ember állapothatározói (pl. nem, kor (év), testtömeg M_{bo} (kg), magasság L_{bo} (cm)) alapján becsülhető. M_b-parametrizációk vannak, ezeket *Frankenfield et al.* (2005) tekintették át. Ezek közül *Mifflin et al*. (1990) parametrizációja az egyik legjobb:

$$M_b^{férfi}\,[kcal\cdot nap^{-1}] = 9.99\cdot M_{bo} + 6.25\cdot L_{bo} - 4.92\cdot kor + 5, \qquad (9)$$

$$M_b^{nő}\,[kcal\cdot nap^{-1}] = 9.99\cdot M_{bo} + 6.25\cdot L_{bo} - 4.92\cdot kor - 161. \qquad (10)$$

A képletekben a ma már nem szokványos *kcal* mértékegység szerepel, tudnunk kell, hogy 1 kcal = 10^3 cal és 1 cal = 4,187 J. Ahhoz, hogy az M_b-t Wm^{-2}-ben megkaphassuk, az emberi test felszínét A (m^2) is becsülnünk kell. Az A-t *Dubois* and *Dubois* (1915) képlete alapján számítottuk ismerve az M_{bo}-t és az L_{bo}-t,

$$A = 0.2 \cdot M_{bo}^{\,0.425} \cdot \left(\frac{L_{bo}}{100}\right)^{0.725}. \qquad (11)$$

$$M_w = 1.1 \cdot \frac{3.80\cdot M_{bo} \cdot \left(\frac{L_{bo}}{100}\right)^{-0.95}}{A} \qquad (12)$$

Az M_w-t *Weyand et al.* (2010) alapján parametrizáltuk, *Weyand et al.* (2010) munkájának (1)-es képlete az 1 m-es hosszúságú útra vonatkozik. Mivel a mi esetünkben a másodpercenként megtett út hossza 1,1 m, Weyand (1)-es formuláját 1,1-del szoroztuk. Elosztva ezt az értéket A-val, megkapjuk az M_w-t Wm^{-2}-ben. A $\lambda E_{sd} + \lambda E_r$ összeg az M alapján is becsülhető *Campbell* and *Norman* (1998) szerint. W-t *Auliciems* and *Kalma* (1979) alapján számítottuk.

2.2. A hőérzet megfigyelése

E tanulmány első két szerzője (humán állapothatározóik és metabolikus hőáram-sűrűség jellemzőik az *1. táblázatban* vannak) végzett hőérzet-megfigyeléseket. A megfigyelés olyan szempontból sajátos, hogy a hőérzet-skálát diszkrét hőérzet-kategóriák alkotják a megfigyelés számszerűsíthetősége miatt. Az általunk használt hőérzet kategóriák a következők: "nagyon hideg", "hideg", "hűvös", "neutrális", "enyhén meleg", "meleg" és "nagyon meleg". A megfigyelések protokollszerűen zajlottak: termikusan neutrális környezetből jöve, minimum 5 perces kültéri kitettségben lenni ugyanazon a helyen a neutrális hőérzethez tartozó ruházatban, sapka, kesztyű használata nélkül. A megfigyelők nem izzadtak, nem dideregtek, és nem éreztek semmilyen vérkeringésbeli változást az 5–10 perces megfigyeléseik során. Megemlítendő az is, hogy a megfigyelők itt születve adaptálódtak a régió klímájához. A régió klímája *Köppen* (1936) értelmezésében *Cfb* (*C*–meleg mérsékelt, *f*–nincs szezonalitás a csapadék évi változásában, *b*–meleg nyár), míg *Feddema* (2005) értelmezésében "hűvös, száraz, a hőmérséklet extrém ingadozásával".

Láthatjuk, hogy Köppen szerint a klímánk "meleg mérsékelt", meleg nyárral, míg Feddema szerint "hűvös", a hőmérséklet extrém ingadozásával. E leírások inkább ellentmondanak egymásnak, mintsem illeszkednek egymáshoz. A leírás nem a hőterhelést, hanem a hőérzetet jellemzi, ami viszont szubjektív és individuális. Egyik motivációnk hőérzet-megfigyeléseink során az volt, hogy klímánkat a hőérzet szempontjából minél pontosabban jellemezzük.

2.3. A hőterhelés és a hőérzet adatok kezelése

A hőterhelést meghatározó időjárás adatokat és a hőérzet adatokat egyidőben gyűjtöttük, azaz, az időjárási adatok a hőérzékelés időtartamára vonatkoznak. Ezen adatsorokat minőségileg ellenőriztük, úgy, hogy megvizsgáltuk az időjárási adatokból számított hőterhelés és a megfigyelt hőérzet-kategória közötti megfelelést. Csak az egymással párosítható hőterhelés-hőérzet adatpárokat vittük be az adatbázisba. A megfeleltetést mind az r_{cl}-hőérzet mind a T_o-hőérzet adatpárokra elvégeztük. Minden egyes megfeleltetés során egy r_{cl} érték, egy T_o érték és a megfigyelt hőérzet-kategória összeegyeztethetőségét ellenőriztük. Az r_{cl} esetében értelemszerűen csak a hőhiányt jellemző hőérzet-típusok lehetségesek, így a "nagyon hideg", a "hideg",

a "hűvös" és a "neutrális" hőérzet-típusok. Ugyanis, az r_{cl} egy ellenállás paraméter, ezért csak pozitív lehet (a negatív ellenállás értelmezhetetlen). A 0 clo körüli r_{cl} értékhez értelemszerűen csak neutrális (közömbös) hőérzet-kategória párosítható. A T_o esetében a párosítás értelemszerűen kiterjed az összes hőérzet-típusra a "nagyon hidegtől" kezdve a "neutrálison" át a "nagyon melegig". Az adatsorunkat statisztikailag is karcsúsítottuk, úgy, hogy a T_o értékekből az 5. percentilis alatti és a 95. percentilis feletti értékeket kihagytuk az elemzéseinkből.

2.4. A Heath-Carter-féle testforma osztályozás

A morfológiai testalkat számszerű jellemzésére vezették be 1990-ben a Heath-Carter-féle testalkat-osztályozó módszert, amely napjaink antropometriai vizsgálataiban még mindig a leggyakrabban használt módszer a testalkat tipizálásakor (*Carter* és *Heath*, 1990). Több előnye közül kiemelendő, hogy néhány testméret ismeretében egyszerre becsülhető az emberi test relatív zsírossága (endomorfia komponens), a csontozat-izomzat kifejezettsége (mezomorfia komponens) és a nyúlánkság mértéke (ektomorfia komponens) is. E három szomatotípus (*lsd. Kislexikon*) komponens dominanciaviszonyai (melyik komponens vagy melyik kettő komponens dominál az alkatban) pedig lehetőséget teremtenek arra, hogy a vizsgált személy alkatát a *Carter* (2002) által bevezetett 13 alkati típus egyikébe besorolhassuk. Az egyéni, illetve a csoportokra jellemző, átlagos szomatotípusokat a kétdimenziós szomatotérképen tudjuk megjeleníteni. A térképen a három komponens transzponálásával nyert x-y koordináták segítségével helyezendők el a szomatotípusok egy gömbháromszöghöz viszonyítva. A gömbháromszög három csúcsa az extrém endomorf, mezomorf, illetve ektomorf alkati típusokat reprezentáló pontok (lásd 5. Eredmények). Megjegyzendő, hogy valós alkati típusok vannak a háromszög területén kívül is, azaz, a gömbháromszög oldalai nem jelölnek ki határokat az alkati típusok előfordulásában. A szomatotérkép középső régiójában elhelyezkedő, ún. centrális alkati típusok esetében a három komponens egyenlő mértékben alakítja a testalkatot, egyik komponens sem dominál a testalkatban.

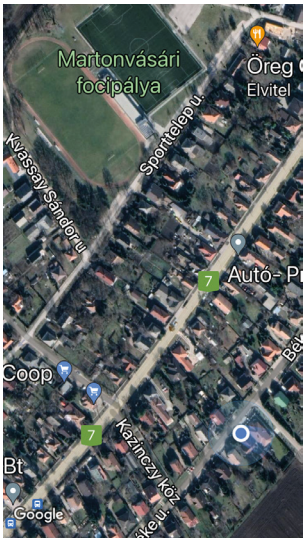
3. A megfigyelések helyszínei

A megfigyelések helyszínei: Martonvásár és Budapest XIV. kerületének kertvárosi része. A martonvásári és a budapesti helyszínek képeit a Google Maps helymeghatározó szoftver segítségével állítottuk elő, ezek az *1.* és a *2. ábrán* láthatók.

4. Adatok

Két adattípus van: időjárási és humán adatok. Ezek főbb jellemzőit a következőkben taglaljuk.

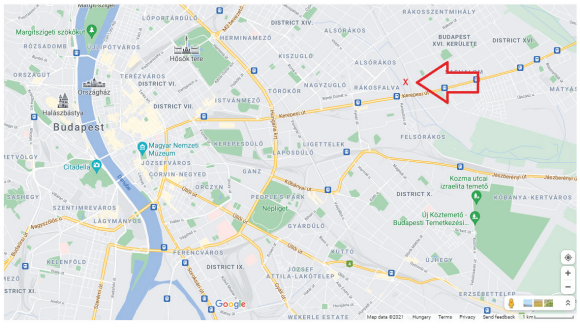
4.1. Időjárási adatok



1. ábra. A hőérzet-megfigyelés helyszíne (kék pont) Martonvásáron a Google Maps helymeghatározó szoftver alapján.

Az időjárási adatok közül a léghőmérsékletet, a légnedvességet, a szélsebességet, a széllökést, a felszíni légnyomást, a felhőzetet és relatív napfénytartamot használtuk. Az összes adatot az utóbbi kettő kivételével a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. vagy az Időkép Kft. automata állomásairól írtuk át, melyek légvonalbeli távolsága a megfigyelések helyszínétől három km-nél kisebb volt. A felhőzet és a relatív napfénytartam adatokat a megfigyelők biztosították. A teljes besugárzást a 2.1. fejezetben ismertetett parametrizáció alapján ((4)-es képlet) számítottuk. Hőérzet-megfigyeléseket csak 2 személy végzett, a továbbiakban ők 1. és 2. személyként szerepelnek.

Az 1. személy megfigyelési időszaka 2020. április 1-jétől 2021. február 20-áig tartott. Az adott időszakban igen változatos volt az időjárás, és voltak mind nappali (a bejövő napsugárzás nagyobb, mint nulla), mind esti/éjjeli (nincs napsugárzás) megfigyelések. A megfigyelések kb. 40%-a az esti/éjjeli időszakra



2. ábra. A hőérzet-megfigyelés helyszíne Budapesten a Google Maps helymeghatározó szoftver alapján.

esett, ekkor a léghőmérséklet -11 és 28 ºC között változott, többnyire szélcsend uralkodott, de voltak igen szeles esetek is, amikor az átlagos szélsebesség 4 és 7 ms^{-1} közötti értékeket vett fel. A relatív nedvesség 40-100% volt. A nappali időszakban a becsült globálsugárzás 10 és 850 Wm^{-2} közötti, míg a léghőmérséklet -9 és 32 ºC között változott. Az esetek többségében mérsékelt erősségű (2–3 ms^{-1}) szél uralkodott, de nem volt ritka a nagyobb (az átlagos szélsebesség 6–7 ms^{-1}, a széllökés sebessége pedig nagyobb volt, mint 10 ms^{-1}), vagy a kisebb (1 ms^{-1}-nél is kisebb sebességek) széljárás sem. A relatív nedvesség 20–100% között változott.

A 2. személy megfigyelési időszaka 2020. április 7-e és 2021. március 2-a között volt. A megfigyelések számának kb. 2/3-a anticiklonális időjárási helyzetre vonatkozik. A felszíni légnyomás 993 és 1038 hPa értékek között változott és a megfigyelések során egyszer sem volt csapadék. Az esti/éjjeli időszakban (a megfigyelések kb. 35%-a) a léghőmérséklet -10 és 23 ºC, a relatív nedvesség 40 és 100%, míg az átlagos szélsebesség 0,1 és 6,7 ms^{-1} között változott. A nappali időszakban ezek a változások valamelyest nagyobbak voltak; a léghőmérséklet -9 és 34 °C, a relatív nedvesség 15 és 100%, míg az átlagos szélsebesség 0,1 és 7,8 ms^{-1} között volt megfigyelhető.

4.2. Humán adatok

A következő humán állapothatározókat használtuk: testtömeg (a legfontosabb), magasság, nem és kor. Ezeket és a metabolikus (alapanyagcsere, M_b, gyaloglás, M_w és az $M_b + M_w$ összeg) hőáram-sűrűségeket az 1. és a 2. személyre, valamint az átlagos magyar férfire (3. személy) és nőre (4. személy) vonatkozóan a *2. táblázat* tartalmazza.

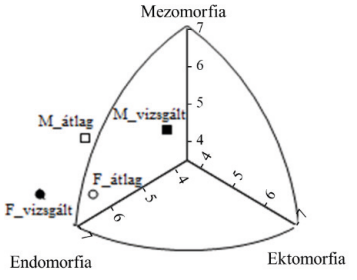
Mint ahogy már mondtuk, az 1. és a 2. személy adatait a hőérzet és a hőterhelés közötti kapcsolat jellemzése végett használtuk. A 3. és a 4. személy metabolikus hőáram-sűrűsége igen jó közelíti az átlagos magyar férfi és nő metabolikus hőáram-sűrűségét. Az életkor nem volt szempont az emberek kiválasztása során. Az emberi adatok változékonyságának hatása a humán hőterhelésre és hőérzékelésre *Ács et al*. (2021b) cikkében került részletesebb taglalásra.

5. Eredmények

5.1. A vizsgált személyek szomatotípusa

A tanulmányban feltüntetett négy ember szomatotípusait a *3. ábra* szemlélteti.

Az európai népek felnőtt férfiainak testalkata általában mezomorf, ektomorf vagy endomorf-mezomorf, amely alkati típusok az életkor előre haladtával endomorfabb alkati típusok felé tolódnak el, felnőttkorban



3. ábra. Az átlagos felnőtt férfi (M_átlag, mezomorf-endomorf) és átlagos felnőtt női (F_átlag: egyensúlyos endomorf) alkati típusok a Kárpát-medencében és a vizsgált felnőtt férfi (M_vizsgált: endomorfiás mezomorf) és felnőtt nő (F_vizsgált: egyensúlyos endomorf) szomatopontjai. Az 3. ábra síkban szemlélendő.

Személyek	Nem	Kor [év]	Testtömeg [kg]	Magasság [cm]	Alapanyag-csere hőáram-sűrűsége [Wm^{-2}]	A gyaloglás hőáram-sűrűsége [Wm^{-2}]	A teljes hőáram-sűrűség [Wm^{-2}]
1. személy	férfi	64	89,0	190,0	40,8	94,5	135,3
2. személy	nő	34	64,5	160,5	38,6	10,9	142,5
3. személy	férfi	19	85,5	179	45,2	101,7	146,9
4. személy	nő	33	65,5	169	38,8	96,1	134,9

2. táblázat. Négy ember humán állapothatározói és metabolikus hőáram-sűrűségei (1. személy: szerző1, 2. személy: szerző2, 3. személy: az átlagos magyar férfit reprezentáló férfi, 4. személy: az átlagos magyar nőt reprezentáló nő).

a férfiak testének relatív zsírtartalma is fokozódik. Ebbe a képbe beleillik a vizsgált felnőtt férfi mezomorf testalkata, amely alkati típust a csontozat-izomzat robosztucitása mellett az enyhén megnövekedett zsírtartalom jellemez. Ezzel szemben a felnőtt nők átlagos testformája egyensúlyos endomorf a reprodukciós szerepekre visszavezethetően megnövekedett zsírtartalom miatt. A vizsgálatban szereplő felnőtt nő morfológiai testalkata is a női átlagos testalkattal jellemezhető, egyensúlyos endomorf alkati típusú (*3. ábra*). Vegyük észre, hogy a vizsgált személyek testalkatai közötti eltérés nagyobb, mint az átlagos magyar férfi és nő közötti testalkati eltérés.

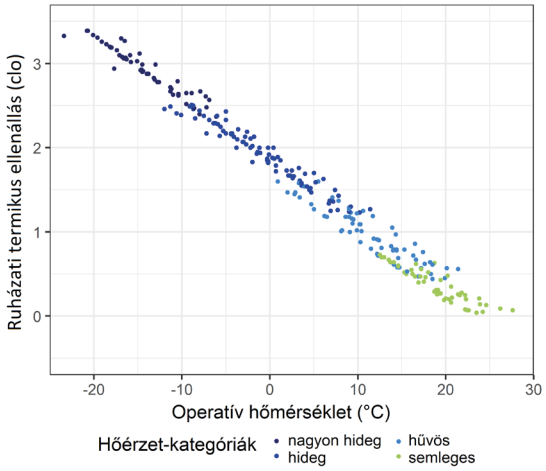
5.2. A testalkat típusok és a metabolikus hőáram-sűrűségek közötti kapcsolat

Összevetve a *3. ábrában* látható testalkat típusokat és a *2. táblázatban* feltüntetett metabolikus hőáram-sűrűségeket, egyértelműen látható, hogy a metabolikus hőáram-sűrűségek személyek közötti kicsi eltérései ellenére a testalkat típusok közötti eltérések észrevehetően nagyok. Az is nyilvánvaló, hogy a négy ember adatai alapján nem mondhatunk semmi bizonyosat az *M* és a testalkat típusok közötti esetleges kapcsolat jellegéről.

5.3. A ruházati termikus ellenállás és az operatív hőmérséklet kapcsolata

Az operatív hőmérséklet [(2)-es egyenlet] a ruhafelszínre vonatkozó energiaegyenleg egyenletéből levezethető, hőmérséklet dimenziójával rendelkező, hőterhelést kifejező paraméter. Ugyan függ a mell magasságában mért emberi test kerülettől az r_{Ha}-án keresztül, de mivel ez a függés igen gyenge, ember-független paraméterként kezelhetjük. A ruházati termikus ellenállás függ mind a T_o-tól, mind az *M*-től, azaz mind időjárás-, mind emberfüggő paraméter. Ez miatt minden r_{cl}–T_o kapcsolat individuális jellegű. Az 1. személyre vonatkozó r_{cl}–T_o pontfelhőt a *4. ábrán* láthatjuk.

Láthatjuk, hogy e pontok hőérzet-kategóriák szerint vannak színezve, így az adott hőterheléshez tartozó hőérzet kategória is leolvasható. A pontfelhők nyilván a modell (1) -es egyenlete szerint alakulnak, de a pontok színezése miatt hőérzet-információt is közvetítenek. A megfigyelések legfontosabb humán-klimatológiai információi a következők: 1) a megfigyelési helyszínen a T_o kb. -25 és 25 ºC között változhat, 2) e tartománynak megfelelő r_{cl} tartomány 3,5 és 0 clo értékek közé esik, 3) a neutrális hőérzethez (a termikus komfort állapota) tartozó T_o és r_{cl} tartományok 20-30 ºC és 0,5 – 0 clo,



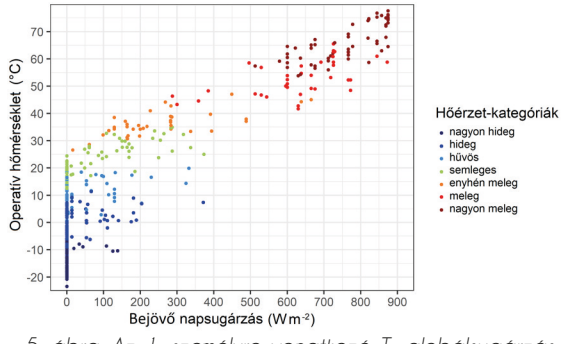
4. ábra. Az 1. személyre vonatkozó r_{cl}–T_o pontfelhő átlagos szélsebesség esetén.

rendre, 4) a szomszédos hőérzet-kategóriák (pl. hűvös/hideg, vagy hűvös/neutrális) pontjai átfedik egymást, ami egyértelműen mutatja azt, hogy a hőérzet-skála folytonos és nehezen bontható diszkrét tartományokra.

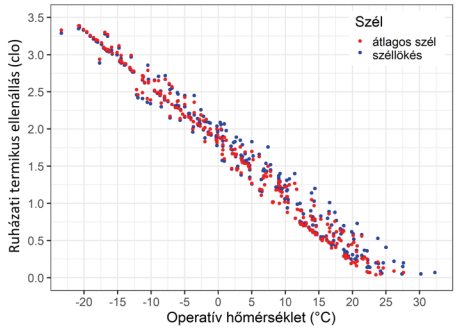
Az éjjeli és nappali napszakaszokra vonatkozó T_o–globálsugárzás pontfelhőt átlagos szélsebesség esetén 1. személyre vonatkozóan az *5. ábra* szemlélteti.

Szembetűnő, hogy az éjjeli időszakban a hideg hőérzet-kategóriák mellett a neutrális hőérzet-kategória még előfordul, de meleg hőérzet-kategóriák nincsenek, vagy legalább is nem regisztráltunk. Az is egyértelmű, hogy a „nagyon-meleg" hőérzet kategória kialakulásában döntő szerepe van a napsugárzásnak. Az *5. ábra* azt is egyértelműen bizonyítja, hogy a léghőmérséklet és a napsugárzás a két legfontosabb környezeti hőterhelés- és hőérzet-alakító tényező. A szél hőterhelés- és hőérzet-alakító szerepét a *6. ábra* szemlélteti.

Látható, hogy ezen az ábrán nem ábrázoltuk a hőérzet-kategóriákat, annak ellenére, hogy a nagyobb széllökések pillanatában jelentős lehet a hűtő hatás.



5. ábra. Az 1. személyre vonatkozó T_o–globálsugárzás pontfelhő átlagos szélsebesség esetén. A hőérzet kategóriákat színekkel fejeztük ki a nappali (S>0), valamint az éjjeli (S=0) időszakokban egyaránt.

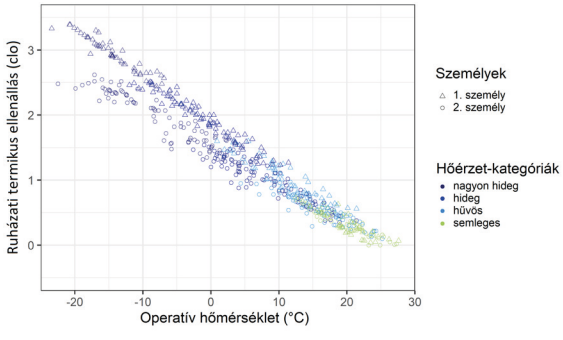


6. ábra. Az 1. személyre vonatkozó r_{cl}–T_o pontfelhő átlagos szélsebesség és széllökés esetén.

E pillanatszerű hőérzet-hatást bizonyossággal regisztrálni lehetetlen, ugyanakkor modellel becsülhető a hőterhelés-csökkentő hatás az átlagos szélsebesség és a széllökés esetén szimulált r_{cl} és T_o értékek összehasonlításával. A szimulált eredmények alapján a széllökés hűtő hatása 0–0,3 clo közötti r_{cl} érték növekedést eredményez (a kék pontok a piros pontok felett vannak) a hőhiányos állapotokban. Ez a különbség valamelyest kisebb a neutrális esetben, amikor az r_{cl} 0 clo körüli.

Mint ahogy mondtuk, az r_{cl}–T_o pontfelhők különböznek embertől emberig. Az emberek közötti különbségek az emberek metabolikus hőáram-sűrűségein, M-en keresztül jutnak kifejezésre. Minél nagyobbak az emberek közötti M-eltérések, annál nagyobbak az r_{cl}-beli különbségek. Az 1. és a 2. személyre vonatkozó r_{cl}–T_o pontfelhőket a *7. ábra* szemlélteti.

Vegyük észre, hogy az 1. és a 2. személy közötti M-különbség kicsi, mindössze 7 Wm^{-2}, ami a személyek M-értékeinek kb. 5%-a, és láthatjuk, hogy ezen kicsi eltérés is egyértelműen észrevehető a *7. ábrán*. Az eltérések az extrém hőterhelések esetében a legnagyobbak, akár 1 clo értékűek is, a közömbös (neutrális) esetben a legkisebbek, 0,1–0,2 clo körüliek.



7. ábra. Az 1. és a 2. személyre vonatkozó r_{cl}–T_o pontfelhő a hőérzet-kategóriákkal együtt átlagos szélsebesség esetén.

Hőérzet-kategória	Az 1. személyre vonatkozó ruházati termikus ellenállás (r_{cl}) határértékek (clo)	A 2. személyre vonatkozó ruházati termikus ellenállás (r_{cl}) határértékek (clo)
neutrális	$0 < r_{cl} < 0{,}7$	$0 < r_{cl} < 0{,}6$
hűvös	$0{,}4 < r_{cl} < 1{,}6$	$0{,}2 < r_{cl} < 1{,}0$
hideg	$1{,}2 < r_{cl} < 2{,}5$	$0{,}3 < r_{cl} < 1{,}5$
nagyon hideg	$2{,}3 < r_{cl} < 3{,}4$	$1{,}2 < r_{cl} < 2{,}7$

3. táblázat. A ruházati termikus ellenállás határértékek hőérzetkategóriánként és személyenként.

5.4. A hőérzet és a hőterhelés kapcsolata

Az 1. és a 2. személyre vonatkozó hőérzet-hőterhelés kapcsolatát reprezentáló pontfelhőket a *8. ábra* szemlélteti. A hőterhelést a ruházati termikus ellenállás paraméterével jellemeztük.

Az 1. személyt a háromszögek, míg a 2. személyt a körök reprezentálják. Az r_{cl}–értéktartományokat külön-külön minden hőérzet-kategóriára és személyre a *3. táblázat* szemlélteti.

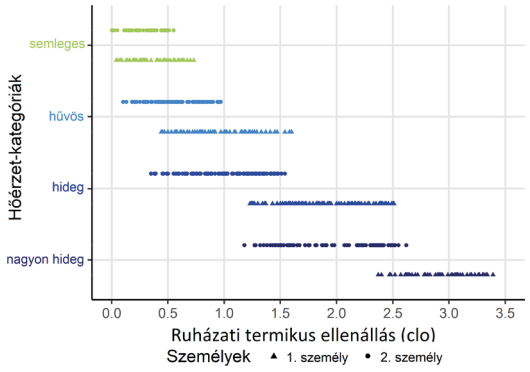
Az 1. személyre 370, míg a 2. személyre 317 pont van. Mindegyik pont egy időjárási helyzetre vonatkozik. A *8. ábra* és a *3. táblázat* alapján megállapíthatjuk, hogy 1) a "hűvös" és a "neutrális" hőérzet-kategóriák esetében lett az 1. és a 2. személy közötti r_{cl}-különbség a legkisebb. A hőhiány növekedésével a személyek közötti r_{cl}-különbségek is növekednek; így a "nagyon hideg" hőérzet-kategória esetében lettek ezek a különbségek a legnagyobbak. 2) A diszkrét hőérzet-kategóriákat a hőérzékelés számszerűsíthetősége végett vezettük be, ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy a hőérzet-skála folytonos. Ez abból is látható egyértelműen, hogy a szomszédos hőérzet-kategóriába eső pontok keveredtek, azaz, nincs egyértelmű határ közöttük. A pontok keveredése értelemszerűen mindkét személy esetében megfigyelhető. Ez nyilvánvalóan azt is mutatja, hogy a hőérzékelés szubjektív, egyén-specifikus folyamat.

Hasonlóképpen megalkothatók az 1. és a 2. személyre vonatkozó hőérzet-operatív hőmérséklet kapcsolatát reprezentáló pontfelhők. Ezeket a *9. ábrán* láthatjuk.

Vegyük észre, hogy a "nagyon meleg" hőérzet kategória a $T_o > 50$ °C-nál esetekben jelentkezik. Ezen extrém nagy hőterheléseket a nagy globálsugárzás okozza.

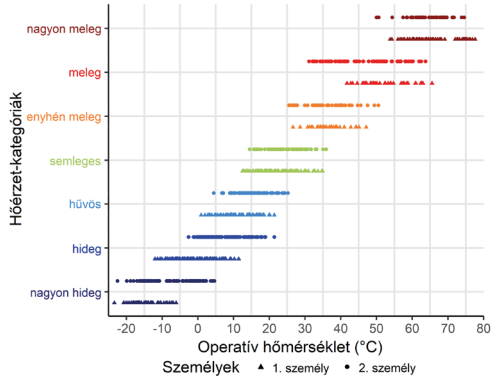
5.5. Az átlagos magyar férfi és nő hőérzete

A 3. és a 4. személy nem végzett hőérzékelést és a hőérzékeléssel kapcsolatos meteorológiai megfigyeléseket. A kérdés az, hogy mondhatunk-e akármi bizonyo-



8. ábra. Az 1. és a 2. személyre vonatkozó hőérzet-ruházati termikus ellenállás kapcsolatát reprezentáló pontfelhők.

sat az ő hőérzetükkel kapcsolatban az 1. és a 2. személy hőérzete alapján? A hipotézisünk az, hogy igen, mivel a személyek *M* értékei közötti különbségek kicsik, maximálisan 12 Wm^{-2}. Bizonyossággal mondhatjuk, hogy a mérsékelt hőhiányok (r_{cl} 0 és 1 clo közötti) esetén a hőérzetük megegyező az 1. és a 2. személy hőérzetével, azaz „neutrális", vagy „hűvös" hőérzet-kategóriák fordulnak majd elő. Nagy valószínűséggel mondhatjuk ezt az „enyhén meleg" hőérzetet kiváltó időjárási helyzetekre is, de a legextrémebb hőérzet-kategóriák esetében már az individuális különbségek jelentős nagyságúak lehetnek, olyan szempontból, hogy ami valakinek „nagyon hideg", az már a másik személynek csak „hideg", de semmiféleképpen sem azt, hogy „neutrális". Ugyan ez igaz a fordított esetben is, a nagy hőtöbbletek során. Így például nagy hőtöbblet esetén mondhatják, hogy „nagyon meleg", vagy „meleg" van, de már elvétve, sokkal kisebb valószínűséggel mondhatják, hogy „enyhén meleg", vagy még annál is hidegebb, azaz „neutrális" a hőérzetük. Az is kijelenthető, hogy az átlagos magyar férfi és nő hőérzékelése között nincs szignifikáns különbség.



9. ábra. Az 1. és a 2. személyre vonatkozó hőérzet-operatív hőmérséklet kapcsolatát reprezentáló pontfelhők.

6. Összefoglalás

E tanulmányban egy új individuális ruházati termikus ellenállás – operatív hőmérséklet modellt ismertettünk az időjárás vagy az éghajlat emberi hőterhelésének szimulálására. A modell legfőbb tulajdonsága az, hogy a metabolikus hőáram-sűrűséget a lehető legegyszerűbb módon szimulálja, úgy, hogy az emberek közötti individuális különbségek is kifejezésre jutnak. A modell azért is egyszerű, mert nem tartalmaz semmilyen hőszabályozási folyamatot. A modell a hőterhelés mellett hőérzet-becslésre is alkalmas, ha az individuális hőterhelés-hőérzet kapcsolatot jellemző regressziós görbe ismert. E regressziós görbe a hőterhelés és a hőérzet egyidejű megfigyelésével állapítható meg, ami e tanulmányban két személy esetében meg is történt mind hőhiányt mind hőtöbbletet eredményező időjárási helyzetekben.

E tanulmány legfontosabb eredményei a következők: 1) annak ellenére, hogy az emberek közötti metabolikus hőáram-sűrűség különbségek kicsik (12 Wm^{-2}-nél kisebbek), az emberek közötti testforma eltérések nagyok is lehetnek (pl. az endomorf mezomorf és az egyensúlyos endomorf testalkatok közötti eltérés), 2) a „neutrális" hőérzethez tartozó (komfort zóna) ruházati termikus ellenállás értéktartomány 0 és 0,5 clo közötti; a T_o értéktartomány pedig 20-30 ºC közötti, 3) kisebb hőhiányok (0,3 és 1 clo közötti r_{cl} értékek) esetén a különböző *M*-kel és testalkatokkal rendelkező emberek hőérzetei azonosnak vehetők, 4) extrém hőterhelések során (pl. nagy hőhiány esetében, amikor az r_{cl} nagyobb, mint 2 clo) az emberek közötti hőterhelés és hőérzet különbségek nőnek, 5) nyáron, nagy besugárzás és magas hőmérséklet esetén („nagyon meleg" hőérzet-kategória) a T_o 70-80 ºC. Télen, éjjel, az extrém hidegben és derült égbolt esetén („nagyon hideg" hőérzet-kategória) a T_o -25 – -20 ºC, az r_{cl} pedig 3-3,5 clo.

Aláhúzandó, hogy ezek az adatok nem fiktív, hanem konkrét kültéri hőterhelésben részesülő, gyalogló személyekre vonatkoznak, akik a Köppen-féle Cfb klímához (meleg-mérsékelt klíma meleg nyárral a csapadék szezonális ingadozása nélkül), vagy a Feddema-féle "hűvös, száraz klíma, a hőmérséklet extrém szezonális ingadozásával" típusú klímához alkalmazkodtak. Legvégül, megjegyzendő, hogy alföldi klímánk hőterheléséhez tartozó hőérzet-kategória a „hűvös" (Feddema szóhasználata), és nem a „meleg mérsékelt" (Köppen szóhasználata), ezt többéves hőterheléssel és hőérzékeléssel kapcsolatos kutatásaink alapján (*Ács et al.*, 2021a, 2022) mondhatjuk. Még egyszer összegezve: a Kárpát-medence alföldi térségében a C-típusú köppeni klímához tartozó hőérzet nem „meleg mérsékelt", hanem „hűvös".

Irodalom

Auliciems A. and *Kalma J.D.*, 1979: A Climatic Classification of Human Thermal Stress in Australia. *J. Appl. Meteorol. 18*, 616–626. https://doi.org/10.1111/j.1467-8470.1981.tb00373.x.

Ács F., Kristóf E., and *Zsákai A.*, 2019: New clothing resistance scheme for estimating outdoor environmental thermal load. *Geographica Pannonica 23*(4), 245–255. https://doi.org/10.5937/gp23-23717

Ács F., Zsákai A., Kristóf E., Szabó A. and *Breuer H.*, 2021a: Human thermal climate of the Carpathian Basin. I*nt. J. Climatol. 41*, E1846–E1859. https://doi.org/10.1002/joc.6816

Ács F., Zsákai A., Kristóf E. és *Szalkai Zs.*, 2021b: Milyen a legmegfelelőbb ember a klímaosztályozási célokra alkalmazandó humán termikus klíma vizsgálatokban. Megjelent: V. Orvosmeteorológiai Konferencia Jegyzőkönyve, Magyar Meteorológiai Társaság (Szerk. Dunkel Z.), Budapest, 13–17.

Ács F., Zsákai A., Kristóf E., Szabó A. and *Breuer H.*, 2022: Individual local human thermal climates in the Hungarian lowland: Estimations by a simple clothing resistance-operative temperature model. *Int. J. Climatol. 43*, 1273–1292. https://doi.org/10.1002/joc.7910

Bruce J.L., 1916: Vortrag. Royal. Society. NSW (public health section, 14.11.1916).

Campbell G.S. and *Norman J.M.*, 1998: An introduction to Environmental Biophysics. Springer, New York, USA, 286.

Carter J.L. and *Heath B.H.,* 1990: Somatotyping: development and applications. Cambridge University Press, Cambridge, 503 pp.

Carter J.L., 2002: The Heath-Carter anthropometric somatotype-instruction manual. Department of Exercise and Nutritional Sciences San Diego State University. https://www.mdthinducollege.org/ebooks/statistics/Heath-CarterManual.pdf

Cohen P., Potchter O., and *Matzarakis, A.*, 2013: Human thermal perception of coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Appl. Geogr. 37*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.001

de Freitas C.R. and *Grigorieva E.A.*, 2015: A comprehensive catalogue and classification of human thermal climate indices. *Int. J. Biometeorol. 59*, 109–120. http://doi.org/10.1007/s00484-014-0819-3

Dubois D. and *Dubois E.F.*, 1915: The Measurement of the Surface Area of Man. *Arch. Inter. Med. 15*, 868–881. https://doi.org/10.1001/archinte.1915.00070240077005

Fanger P.O., 1970: Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical, Copenhagen 244 pp.

Feddema J.J., 2005: A Revised Thornthwaite-type Global Climate Classification. *Phys. Geogr. 26*, 442–466. https://doi.org/10.2747/0272-3646.26.6.442

Frankenfield D., Roth-Yousey L., and *Compher C.*, 2005: Comparison of Predictive Equations for Resting Metabolic Rate in Healthy Non-obese and Obese Adults: A Systematic Review. *J. Am. Diet. Assoc. 105*, 775–789. https://doi.org/10.1016/j.jada.2005.02.005

Gagge A.P., Stolwij J.A.J., and *Nishi Y.*, 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological temperature response. *ASHRAE Trans. 72*, 247–262.

Katić K., Li R., and *Zeiler, W.*, 2016: Thermophysiological models and their applications: A review. *Build. Environ. 106*, 286–300. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.031

Köppen W., 1936: Das geographische System der Klimate). In (eds.: *Köppen, W.* and *Geiger, R.*) Handbuch der Klimatologie, Bd. 1, Teil C, Borntraeger, Berlin, 44.

Macpherson R.K., 1962: The Assessment of the Thermal Environment. A Review. *B. J. Ind. Med. 19*, 151–164. https://doi.org/10.1136/oem.19.3.151

Matzarakis A., Mayer, H., 1996: Another kind of environmental stress: thermal stress, *WHO News 18*, 7–10.

Mifflin M.D., St Jeor S.T., Hill L.A., Scott B.J., Daugherty S.A., and *Koh, Y.O.*, 1990: A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. *Am. J. Clin. Nutr. 51*, 241–247. https://doi.org/10.1093/ajcn/51.2.241

Mihailović D.T. and *Ács, F.*, 1985: Calculation of daily amounts of global radiation in Novi Sad. *Időjárás 89*, 257–261.

Potchter O., Cohen P., Lin T.P., and *Matzarakis A.*, 2018: Outdoor human thermal perception in various climates: A comprehensive review of approaches, methods and quantification. *Sci. Total Environ. 631–632*, 390–406. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.276

Thom E.C., 1959: The discomfort index. *Weatherwise 12*, 57–60.

Zhang X., 2015: Molecular sensors and modulators of thermoreception. *Channels 9*(2), 73–81, https://doi.org/10.1080/19336950.2015.1025186

Vriens J., Nilius B., and *Voets T.*, 2014: Peripheral thermosensation in mammals. *Nature Reviews Neuroscience 15*, 573–589. https://doi.org/10.1038/nrn3784

Weyand P.G., Smith B.R., Puyau M.R., and *Butte, N.F.*, 2010: The mass-specific energy cost of human walking is set by stature. *J. Exp. Biol. 213*, 3972–3979. https://doi.org/10.1242/jeb.048199

A HungaroMet Nonprofit Zrt. szerepe a katasztrófák elleni védekezésben

Pátkai Zsolt
HungaroMet Nonprofit Zrt., patkai.zs@met.hu

Magyarországon a katasztrófák elleni védekezésre feljogosított szervezet jogszabály szerint a Belügyminisztérium alá tartozó Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (továbbiakban BM OKF), ezen feladat nemzeti ügy. Írásunkban megpróbálunk áttekintést adni arról a sokoldalú együttműködésről, amely a BM OKF és a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zártkörűen Működő Részvénytársaság (2024. január 1. előtt Országos Meteorológiai Szolgálat; továbbiakban HungaroMet Nonprofit Zrt.) között fennáll.

A HungaroMet Nonprofit Zrt.-hez hasonlóan a BM OKF elődszervezetét is 1870-ben, Ferenc József uralkodása idején alapították (*Berki I.*, 2020). Helyi, önkéntes tűzoltó társaságok, mint például diáktűzoltóságok, gyári tűzoltóságok, önkéntes tűzoltó egyesületek már jóval korábban is léteztek – hasonlóan az ekkor még csak helyenként működő meteorológiai megfigyelésekhez – azonban ebben az évben jött létre országos hatáskörű szervezetként a Magyar Tűzoltóság. A szervezet megálmodója és egyben első főparancsnoka Gróf Széchenyi Ödön volt. A későbbi évtizedek során számos átalakuláson ment át a szervezet. A rendszerváltást követően például egy rövid ideig az önkormányzatok választható(!) feladatköre volt a tűzvédelemről való gondoskodás. 1993-ban létrejött a Tűz- és Polgári Védelmi Országos Parancsnokság, amely egy első kísérlet volt arra, hogy a tűzoltási és a polgári védelmi feladatok egy szervezethez kerüljenek.

Az 1996. évi XXXVII. törvény hatálybalépésével két új országos hatáskörű rendvédelmi szerv jött létre: a BM Tűzoltóság Országos Parancsnoksága és a Polgári Védelem Országos Parancsnoksága. E két szervezet nem volt hosszú életű, mivel az 1999-ben elfogadott katasztrófavédelmi törvény értelmében 2000-ben megszűntek, helyettük megalakult a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság. Ezzel a törvénnyel a tűzoltási és polgári védelmi feladatok ellátása közvetlen állami feladattá vált, amelyet a BM OKF a megyei és helyi szervezetein keresztül látott el. Bő tíz évvel később, 2012-ben további átalakulással jött létre a katasztrófavédelem ma is ismert szervezeti struktúrája és felelősségi köre. Ennek értelmében a BM OKF feladatai hatósági (Országos Iparbiztonsági Főfelügyelőség) és műveleti (Országos Tűzoltósági Főfelügyelőség, Országos Polgári Védelmi Főfelügyelőség) területekre terjednek ki. Feladatait Vármegyei Katasztrófavédelmi Igazgatóságokon, Kirendeltségeken, Parancsnokságokon, Örsökön, valamint Önkormányzati és Önkéntes Tűzoltóságokon, Önkéntes Mentőcsoportokon és egyéb Polgári Védelmi Szervezeteken keresztül látja el. A szervezetnél rendszeresített beosztások száma hozzávetőlegesen 13 ezer.

A BM OKF alapvető rendeltetése a magyar lakosság élet- és vagyonbiztonságának, a nemzetgazdaság és a kritikusinfrastruktúra-elemek biztonságos működésének

védelme. Fő feladata a katasztrófák megelőzése; a bekövetkező veszélyhelyzetekben a mentés végrehajtása; a védekezés megszervezése és irányítása; a káros következmények felszámolása; a helyreállítás-újjáépítés megvalósítása.

Ennek érdekében:

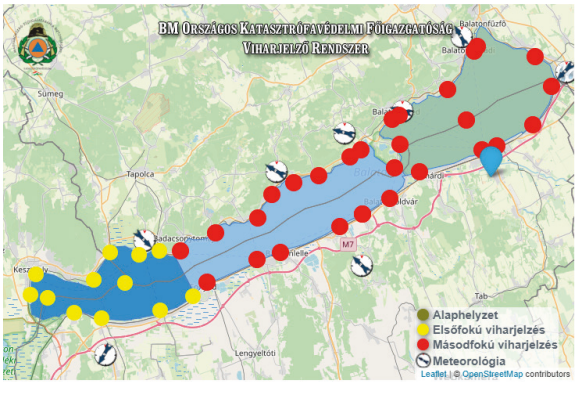
- Iparbiztonsági, tűzvédelmi, vízügyi és vízvédelmi hatósági hatásköröket gyakorol.
- Országos, vármegyei és helyi hivatásos szervezetekkel, önkéntes és bevont kötelezett polgári védelmi szervekkel, jelentős eszközparkkal, logisztikai háttérrel rendelkezik. Speciális eszközöket gyártó és javító gazdasági társaságot működtet.
- Helyi készenléti hivatásos szervei végzik a tűzoltási, műszaki mentési feladatokat, a lakosság védelmét, tájékoztatását és riasztását. Irányítja az önkormányzati, létesítményi tűzoltóságok, bevont önkéntes egyesületek részvételét a tűzoltásban, műszaki mentésben.
- Együttműködik a rendvédelmi szervekkel, a honvédséggel, az önkormányzatokkal, a biztonságot szolgáló hatóságokkal.

Az egységes katasztrófavédelem megalakulásával szinte egyidőben – 2001-ben – együttműködési megállapodást (továbbiakban EMÜ) kötött a BM OKF és a HungaroMet Nonprofit Zrt. jogelődje, az Országos Meteorológiai Szolgálat. Ez a megállapodás teremtette meg a kölcsönös adat és információcsere alapjait, fő irányait. Az EMÜ később számos alkalommal módosításra, bővítésre került. A kezdetben csupán 4 oldalas dokumentum 2015-re 14 oldal hosszúságúra bővült, mutatva a két szervezet közötti egyre szélesebb körűbb együttműködést. Cikkünk írásakor éppen zajlik az EMÜ felülvizsgálata, további elemekkel való bővítése, hiszen az eltelt közel 10 évben további feladatok jelentek meg a BM OKF-nél, amelyeknek időjárási vonatkozása is van. Ilyen például a központi szúnyoggyérítési program: a lárvafejlődés monitorozásakor, a beavatkozások megtervezésekor figyelembe kell venni az aktuális és a várható időjárási viszonyokat.

A polgári védelem szempontjából kiemelt jelentőségük van a HungaroMet Nonprofit Zrt. által kiadott figyelmeztető előrejelzéseknek és riasztásoknak. Ezek számos módon és helyre, automatizáltan jutnak el a BM OKF-en belül. A citrom fokozatú jelzéseket e-mail gyűjtőcímek kapják meg, és alapvetően a Főigazgatóság részlegei felé történik a továbbításuk. Más a helyzet a narancs és piros fokozatoknál. Az ezekhez társítható időjárási helyzetek már gyakran komolyabb, kiterjedtebb károkat okoznak, ezért kiemelt figyelmet érdemelnek. E két fokozat jelzései a védelmi igazgatás számára fejlesztett Marathon Terra nevű, zártkörű kommunikációs alkalmazásba is bekerülnek. Az alkalmazáson belül már a vármegyei katasztrófavédelmi igazgatóságok is közvetlenül hozzájutnak a riasztásokhoz. Fentieken kívül természetesen a HungaroMet Nonprofit Zrt. nyilvános honlapján (www.met.hu) is megtekinthető az aktuális veszélyjelzési helyzetkép; a reggeli koordinációk előtt a polgári védelem munkatársai első körben innen tájékozódnak.

A meteorológiai riasztásokat nemcsak a saját állomány tájékoztatása céljából használják fel, hanem a lakosság tájékoztatása is kiemelt feladat. Ennek érdekében a BM OKF fejlesztette VÉSZ mobil alkalmazásban minden riasztási információ megjelenik. Narancs és piros fokozat kiadását követően pedig a BM OKF Kommunikációs Szolgálata a szervezet Facebook oldalán is felhívja a figyelmet a magasabb fokozatú riasztásokra. Továbbá – hasonlóan a www.met.hu-hoz – automatikusan megjelenik a katasztrófavédelem honlap főoldalán az aktuális riasztási térkép.

A két szervezet együttműködésének egyik lényeges pontja a tavi viharjelzéshez kötődik. A HungaroMet Nonprofit Zrt. által kiadott viharjelzési fokozatok a BM OKF bázisán működő Rádiós Segélyhívó és Infokommunikációs Országos Egyesület (RSOE) kommunikációs rendszerébe kerülnek, majd a szintén kezelésükben levő viharjelző lámpákon megjelennek. A Balatonon több mint 50, LED technológiát használó villanóegység üzemel, a Velencei-tavon 3, míg a Tisza-tavon 5 (*1. ábra*).



1. ábra. A Balaton viharjelző hálózata.

Kevésbé ismert, hogy a HungaroMet Nonprofit Zrt. radiológiai mérőhálózatot is működtet, amelynek adatai a BM OKF-en keresztül jutnak el a hazai és nemzetközi partner szervezetekhez. Az állomáshálózat gerincét a 28 db gammadózisteljesítmény-mérő szenzor alkotja, amely kiegészül 3 helyszínen végzett aeroszol mintavételezéssel (Nagykanizsa, Napkor, Tésa). Megjegyezzük, hogy a teljes, országos radiológiai mérőhálózat

közel 160 mérőállomásból áll, a HungaroMet Nonprofit Zrt-n kívül természetesen a BM OKF, de a Magyar Honvédség, vagy épp a Paksi Atomerőmű Zrt is üzemeltet mérőeszközöket. A HungaroMet Nonprofit Zrt. központi adatbázis kezelő szoftvere figyeli a beérkező sugárzási értékeket, és 250 nSv/h-t, valamint, 500 nSv/h-t meghaladó értékek esetén riasztási üzenetet küld az érintettek telefonjára. A természetes háttérsugárzás szintje általában bőven 100 nSv/h óra alatt van, de intenzív csapadék, nyári felhőszakadások hatására olykor előfordul 250 nSv/h-t (*lsd. Kislexikon*) meghaladó sugárzási dózis.

A katasztrófák elleni védekezés során rendszeresen előfordulnak olyan helyzetek, amelyeket vármegyei szinten már nem lehet hatékonyan koordinálni; az adott vármegyében allokált hivatásos és önkéntes személyi és eszközállomány már nem képes egyedül kezelni a kialakult helyzetet. Ilyen esetekben első körben a BM OKF Operatív Törzse alakul meg, majd, ha ez sem elégséges, összehívásra kerül a Katasztrófavédelmi Koordinációs Tárcaközi Bizottság (KKB). Ennek fő munkaszerve a Belügyminisztérium bázisán ideiglenesen működő Nemzeti Veszélyhelyzeti Központ (KKB NVK). Ebben a munkaszervben igény szerint számos ágazat képviselteti magát: így például a Magyar Honvédség, a Rendőrség, az energetikai ágazatok, vízügyi szervek, vagy épp a Mentőszolgálat, de természetesen a meteorológiai szakterület is gyakran érintett. A munkaszerv működésének lényege, hogy megkönnyítse a különböző ágazatok és a BM OKF közötti kommunikációt, valamint az erő- és eszközigényeket központilag lehessen koordinálni. Például egy téli rendkívüli időjárási helyzetben igény esetén a Magyar Honvédség, vagy egyéb civil szolgáltatók is segítséget tudnak nyújtani mind élőerő, mind eszköz, nehéztechnika tekintetében. Ugyanakkor fontos, hogy mind a segítségkérés, mind a segítségnyújtás egy csatornás legyen. Így lehet elkerülni, hogy ugyanazt a civil hóeltakarító gépet a Katasztrófavédelem és a Rendőrség is igénybe próbálja venni különböző helyszíneken.

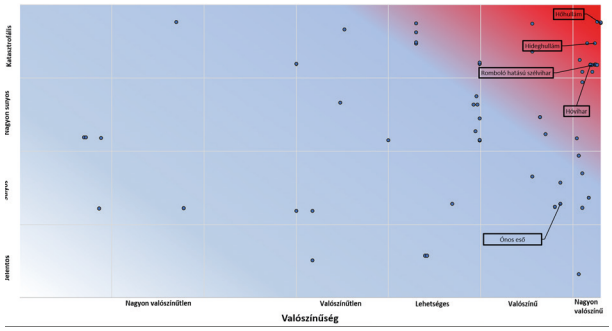
Jogszabály szerint a HungaroMet Nonprofit Zrt. vezérigazgatója tanácskozási joggal behívható a KKB-be, de ennél gyakrabban fordul elő, hogy a KKB NVK-ban meteorológus, legtöbbször előrejelző szakember jelenlétére van szükség. Országosan koordinált védekezés irányítására volt szükség az elmúlt évtizedben például a 2013. márciusi hóvihar, vagy a 2013. nyári dunai árvíz során. A valós katasztrófahelyzetek kezelése mellett éves gyakorisággal gyakorlatokat is szerveznek a dolgozó állomány tudásának frissen tartása végett. Ilyen rendszeres gyakorlat a minden ősz végén megrendezett téli rendkívüli időjárásra való felkészülési, valamint a minden tavasszal végrehajtott, árvizek elleni védekezési gyakorlat. Ezeket az eseményeket olykor technikai bemutatók színesítik, ahol a védekezést irányítók betekintést kapnak az adott helyzet helyszíni kezeléséről, illetve arról, hogy a központi döntések nyomán milyen folyamatok miként valósulnak meg.

Európai uniós elvárás, hogy a tagállamok azonosítsák a területükön előforduló katasztrófák típusait, és bizonyítsák, hogy megfelelő intézkedéseket hoznak azok elhárítása vagy a kockázat csökkentése érdekében. Ennek során készült el 2014-ben Magyarország első teljeskörű nemzeti kockázatértékelése (ún. „Ex-Ante jelentés"). Ennek továbbfejlesztése volt a 2020-ban közzétett „Magyarország nemzeti katasztrófakockázat-értékeléséről" szóló jelentés. Szintén EU-s elvárás, hogy a nemzeti kockázatértékelés folyamatosan frissítve legyen (ez egy ún. feljogosító feltétel az uniós támogatások kifizetése kapcsán), ezért rendszeresen felül kell vizsgálni – a cikk írásának idején is épp egy ilyen felülvizsgálat zajlott. Az Ex-Ante és a későbbi jelentések a Magyarországot érintő katasztrófa kockázatokat 3 fő kategóriába, azon belül pedig 12 kockázati területbe sorolták be (*2. ábra*). A három fő kategória a természeti események, a súlyos balesetek, valamint a szándékos események. Ezeket tovább bontották forgatókönyvekre, alforgatókönyvekre – utóbbi már

Kockázat területek
1.Szélsőséges időjárás
2. Vizek kártételei
3. Földtani kockázatok
4. Egészségügyi válsághelyzet
5. Űridőjárás
6.Veszélyes anyagok
7. Közlekedési baleset
8. Nukleárisbaleset
9. Terrorizmus
10. Infokommunikációs válsághelyzet
11. Biztonságpolitikai válság
12. Energiaellátási válság

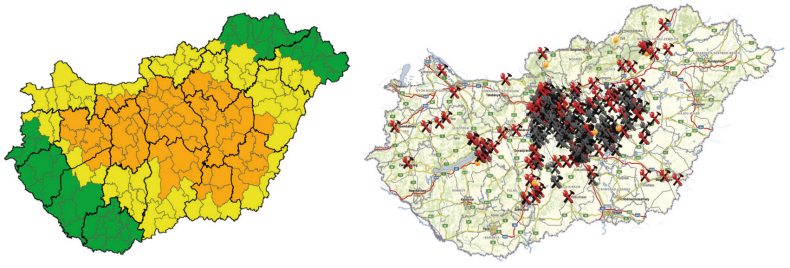
2. ábra. A kockázati területek besorolása.

77 egyedi katasztrófatípust takar. Minden egyes alforgatókönyv tekintetében kockázatelemzést végeztek, ennek során az érintett társadalmi értékek és a hatás súlyossága került figyelembevételre. Így született meg az összesített kockázati diagram, ahol az összes forgatókönyvet együttesen ábrázolják. A vízszintes tengelyen az adott esemény bekövetkezési valószínűsége, míg a függőleges tengelyen annak súlyossága szerepel (*3. ábra*). Sajnos nem meglepő, hogy legnagyobb valószínűséggel és a legsúlyosabb károkat okozó forgatókönyvek (jobb felső sarok) zöme időjárási eredetű: például hőhullám, rendkívüli hideg, szél- és hófúvás.



3. ábra. Összesített kockázati diagram.

A BM OKF egyik feladata a lakosság azonnali tájékoztatása a katasztrófahelyzetekben. Ezt általában írásos vagy szóbeli közlemények útján teszi, de a 2010. évi Médiatörvény lehetőséget ad arra, hogy közérdekű közleményt adjon ki, amelyet a közszolgáltató műsorszolgáltatók haladék nélkül, akár az adást is megszakítva beolvassanak, vagy pedig a képernyő alján egy scroll-sávban feltüntessenek. Korábban volt arra példa, hogy időjárási eredetű veszély esetén (piros riasztás kiadásakor) közérdekű közleményt jelentettek meg. A közösségi média térnyerésével azonban az információáramlás is felgyorsult, így szerencsére a magasabb fokozatú meteorológiai riasztások is gyorsan, széles felhasználói köröket érnek el, az online újságok is azonnal átveszik a hírt, maga a BM OKF is számos új – korábban említett – csatornán teszi közzé azokat. Ennélfogva az utóbbi időszakban a közérdekű közlemény fontossága háttérbe szorult.



4. ábra. A riasztás összevetése a káresemények térképes eloszlásával.

Az együttműködési megállapodás alapján egyedi kérésre a BM OKF adatokat biztosít a HungaroMet Nonprofit Zrt. számára a tűzoltó vonulásokról. Minden egyes tűzoltó vonulást követően a kárhelyparancsnok kárbejelentési adatlapot tölt ki, amelyen a beavatkozás jellegét, okát is megjelöli. A 30 elemből álló listán időjárási okok is szerepelnek, úgymint elemi csapás – viharkár, fakidőlés, vízkár. Az időjárási adatok és a káresemények összevetése a meteorológia számára is hasznos visszacsatolás (*4. ábra*). "Veszélyes időjárási események kategorizálása mérések és káresemény adatok felhasználásával" címmel 2017-ben még szakdolgozat is született e témában.

Az élet a legnagyobb rendező, tartja a mondás, és nem alaptalanul. Az elmúlt évek során olyan válsághelyzetekkel is szembesült a magyar társadalom, amelyek ugyan már szerepeltek az Ex-Ante jelentésben, de még kívül estek a korábbi időszak jogi és katasztrófavédelmi keretein. Ilyen volt például a 2015-ben kezdődött migrációs válság, vagy a 2020-tól a COVID okozta tömeges egészségügyi válsághelyzet. Ezt felismerve a kormány 2022. október 1. hatállyal létrehozta a Védelmi Igazgatási Hivatalt (továbbiakban VIH), amely a Miniszterelnöki Kabinetirodát vezető miniszter irányítása alá tartozó, központi hivatalként működő költségvetési szerv. A VIH megalakításának célja, hogy a válságkezelés és a különleges jogrend fennállása idején összkormányzati szinten koordinálja a feladatokat, legyen a válsághelyzet természeti vagy civilizációs eredetű. A szervezet működési kereteinek kialakítása még a cikk írásakor tervezési szakaszban volt, de az elképzelés szerint az Ex-Ante jelentésben megjelölt 12 katasztrófahelyzet bármelyikének kialakulása, előfordulása esetén, illetve különleges jogrend fennállásakor egyaránt képes lesz érdemben reagálni a kihívásokra. További cél, hogy az állami rendezvények biztosítását hivatott Operatív Törzs is a VIH részévé váljon, azonos technikai feltételek és szakember gárda mellett. Ez logikus lépés lenne, hiszen az állami rendezvényeket biztosító Operatív Törzs is a Miniszterelnöki Kabinetirodát vezető miniszter irányításával működik.

Talán e rövid áttekintésből is érzékelhető, menynyire összetett és sokoldalú az a feladatrendszer, amelyet a HungaroMet Nonprofit Zrt., illetve a BM OKF önmagában végez. Ráadásul ezek a feladatrendszerek számos ponton egymáshoz kapcsolódnak, egymásra épülnek. Az idő előrehaladtával a társadalmi igények várhatóan még tovább nőnek, így a két szervezet közötti kapcsolat a jövőben is minden bizonnyal sokrétű és összetett marad.

Irodalomjegyzék

Berki I., 2020: A Magyar Tűzoltóság 150 éves története. *Belügyi Szemle 68*, 11-30

1384/2014. (VII. 17.) Korm. határozat Magyarország nemzeti katasztrófakockázat-értékelési módszertanáról és annak eredményeiről szóló jelentésről.

[**1**] www.katasztrofavedelem.hu

[**2**] https://www.katasztrofavedelem.hu/26421/kockazatok-azonositasa

A Meteorológiai Világszervezet 19-ik Kongresszusának 2024–2027-es időszakra vonatkozó döntései

Dobi Ildikó
HungaroMet Nonprofit Zrt., dobi.i@met.hu

A Meteorológiai Világszervezet (WMO) 19-dik Kongresszusa 2023. május 21. és június 2. között ülésezett Genfben. A testület döntései a tagországok számára iránymutatók az elkövetkezendő négyéves ciklusra. A globális felmelegedés következtében szélsőségesebbé váló időjárásra való felkészülés kerül a fókuszba. Annak érdekében, hogy a világon minden ember időben értesüljön az időjárási veszélyhelyzetről és megfelelően cselekedjen, a WMO több ENSZ szervezettel, katasztrófavédelmi és hírközlési rendszerek hálózataival együttműködésben kiépíti a globális "korai veszélyjelzés mindenkinek" (EW4All) elnevezésű rendszert. Ennek hátterét biztosító operatív működéshez összekapcsolnak WMO programokat. Ajánlott a nyílt adatpolitika, internet bázisúvá válik az adatcsere, erősítik a köz- és magánszféra partnerségét.

A WMO az ENSZ szakosított szerve, amely a meteorológiai és hidrológiai tevékenységek globális és regionális koordinációját végzi. A nemzetközi szervezet közgyűlése és egyben legfőbb döntéshozó szerve a négyévente ülésező Kongresszus, melynek résztvevői a 187 tagállam (és 6 terület) hivatalos delegációi, valamint nemzetközi szakmai szervezetek küldöttségei, a meghívott szakértők, magán meteorológiai társaságok és a fejlesztésekbe, szolgáltatásokba bekapcsolódó multinacionális cégek képviselői. Az idei rendezvényen 152 tagországból változó létszámban összesen kb. 800 fő volt jelen a kongresszus helyszínén.

Magyarország a kezdetektől a Szervezet tagja, hazánk állandó képviselője (PR – Permanent Representative) a nemzeti meteorológiai szolgálat mindenkori vezetője, a kongresszus évében az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) elnöke, jelenleg már HungaroMet Nonprofit Zrt. vezérigazgatója. Tekintettel arra, hogy a pozíció 2023 májusában betöltetlen volt, Szijjártó Péter külügyi- és külgazdasági miniszter 2023. május 18-án kelt megbízó levelében a magyarországi küldöttség vezetésével a genfi „Állandó ENSZ és VTO Képviselet” (továbbiakban genfi magyar Misszió) vezetőjét, Szűcs Margit nagykövetasszonyt (*1.ábra*) bízta meg, helyettese a cikk szerzője volt. A helyszínen részt vevő további delegáltak dr. Csizmadia Zsófia, a genfi magyar Misszió WMO-ért felelős diplomata munkatársa, valamint hazánk állandó képviselőjének hidrológiai tanácsadójaként Csík András, az Országos Vízügyi Főigazgatóság osztályvezetője voltak. A hibrid konferenciához online kapcsolódtak be az OMSZ delegált munkatársai: dr. Lábó-Szappanos Eszter, dr. Bozó László és dr. Lakatos Mónika.

A WMO működési reformjának köszönhetően a korábbi háromhetes rendezvény egy héttel rövidebb lett. A Kongresszus programját tematikus napok köré

szervezték, melyeken összesen 63 határozati javaslatot tárgyaltak meg. Az első héten a szakmai programokat vették sorra, a vízügyi kérdésekről két napon ülésezett a Hidrológiai Közgyűlés. A második héten a szervezet működését szabályozó jogi, adminisztrációs és pénzügyi kérdésekben döntött a testület, majd a Kongresszus az új vezetőség titkos megválasztásával zárult.

1. ábra. A magyar delegáció vezetője Szücs Margit (jobb oldalon), tagjai dr. Csizmadia Zsófia (középen) és dr. Dobi Ildikó (bal oldalon) a választások napján.

Előző ciklus (2020 – 2023)

A megnyitón a lezáruló és a következő ciklus politikai és stratégiai irányvonalait ismertették. A WMO leköszönő főtitkára, a finn prof. Petteri Taalas az előző négyéves időszakot összefoglaló előadásában méltatta a 18-dik Kongresszus (*Lábó*, 2019) óta végrehajtott reform sikereit. Ennek eredményeként leegyszerűsödött és átláthatóbbá vált a világprogramok rendszere. Átalakult, hatékonyabbá vált a genfi Titkárság működése, a szervezet presztízse jelentősen nőtt az ENSZ-ben és a klímapolitikában egyaránt, emellett megújult a pénzügyi támogatások rendszere.

Petteri Taalas felhívta a figyelmet arra, hogy a 2023-as Világgazdasági Fórum szerint az elkövetkezendő tíz év legnagyobb kockázatainak sorában az első három helyen a klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás, az üvegházgázok kibocsátáscsökkentése, valamint az extrém időjárás okozta katasztrófák állnak. Statisztikák szerint 1970 és 2021 között több, mint 11 ezer szélsőséges időjárással összefüggő katasztrófa (aszály, vihar, árvíz, hőhullám és erdőtűz) pusztított világszerte. A halálos áldozatok száma meghaladta a 2 milliót, az anyagi kár becsült értéke a 4,3 milliárd dollárt. A tragédiák 90%-a kis szigeteken és fejlődő országokban következett be. Habár a korai veszélyjelzés igazoltan hozzájárul a veszteségek csökkentéséhez, a WMO tagállamok felében – jellemzően a legsérülékenyebb helyeken –nem működnek ilyen rendszerek. Ennek a helyzetnek az orvoslására az ENSZ új akciót hirdetett: öt éven belül a bolygó minden lakójának védelmére létrehoznak egy korai veszélyjelző rendszert (EWS – Early Warning System). 2022. március 23-án, a Meteorológiai Világnapon Antonio Guterres, az ENSZ főtitkára bejelentette a programot, és a végrehajtással a WMO-t bízta meg.

Korai veszélyjelzés mindenkinek (EW4All)

A Kongresszus megállapodott arról, hogy a fentiek értelmében a WMO legfontosabb teendője a 2024–27 időszakra a „korai veszélyjelzés mindenkinek” (EW4All – Early Warning for All) elnevezésű rendszer [**1**] kiépítése lesz. Az EW4All az extrém időjárási eseményekre fókuszál, a globálistól a regionálison át a nemzeti rendszereket átfogó koordinációig. A meteorológiai és hidrológiai tevékenységek (mérések, adatkezelés, modellezés stb.) célirányos fejlesztésén túl kiterjed a döntéshozók, valamint az érintett lakosság időben történő riasztását biztosító média tevékenységekre, ennek keretében a hatékony kommunikáció teljes skálájára, valamint a katasztrófavédelmi intézkedések körére. A veszélyjelzés kiszolgálásához alakítják a globális infrastruktúrát, a folyamatos működtetéshez szükséges tucatnyi WMO programot, valamint speciális pénzügyi konstrukciókkal segítik a forrásszegény tagországokat. A Főtitkár megfogalmazása szerint az EW4All elősegíti a veszélyjelzések tekintetében az „egyetlen hiteles forrást” biztosító nemzeti szolgálatok hálózatának megerősödését az „elkövetkezendő 150 évben”.

A programot négy szervezet: a WMO, az ENSZ katasztrófavédelemért (UNDRR) és a telekommunikációért felelős (ITU) intézményei, valamint a Nemzetközi Vöröskereszt (IFRC) a tagországokkal együttműködésében 3,1 milliárd dolláros forrásból 2027-re valósítja meg. Jelenleg 30 kiszolgáltatott helyzetű ország vesz részt a fejlesztésben, cél a résztvevő országok számának 100-ra növelése. A megnyitó napján a fejlesztést önkéntesen támogató donor országok és szervezetek, valamint az érintett tagállamok magas szintű politikai képviselői nyilvánították ki a program iránti elkötelezettségüket.

Európában jelenleg az európai meteorológiai szolgálatokat tömörítő EUMETNET MeteoAlarm programja operatívan koordinálja a korai figyelmeztetéseket.

Ehhez csatlakozik a HungaroMet Zrt. veszélyjelzési szolgáltatása (https://www.met.hu/idojaras/veszelyjelzes/) és a szervezet mobilon elérhető Meteora applikációja is. Régiónkban a katasztrófamegelőzési rendszerek fejlesztése 2017 óta a SEE-MHEWS-A (https://www.see-mhews.org/) program keretében folyik. Az EW4All mintaprojektje a mediterrán térségre kiterjedő korai veszélyjelző rendszer fejlesztése a MedEWSa projekt [2], melyet az Európai Bizottság 3 évre 5 millió euróval támogat, és amelynek koordinátora a WMO.

Üvegházgáz monitoring (G3W)

A WMO hosszútávú tervéhez és a következő ciklusra szóló Stratégiai Tervhez tartozó második prioritás a globális üvegházgáz-mérőhálózat koordinációja, amely a párizsi klíma-megállapodások kibocsátás-korlátozási intézkedéseinek kontrollját kívánja elősegíteni. Az üvegházgázok koncentrációjának, fluxusainak és egyéb paramétereinek mérésével sokféle szervezet foglalkozik. A Globális Időjárás Megfigyelő Hálózat (WWW) mintájára szerveződő Globális Üvegházgáz Monitoring Rendszer (Global Greenhouse Gas Watch, GGGW ill. G3W) célja ezen szervezetek tevékenységének összehangolása. Az új globális üvegházhatásúgáz-megfigyelő rendszer a kritikus információs hiányosságokat pótolja úgy, hogy olyan integrált, operatív keretet biztosít, amely egy rendszerbe foglalja az összes űr és felszíni megfigyelő hálózatot, valamint a modellezést.

A WMO szakmai igazgatója, Lars Peters Riishojgaard előadásában lényeges hiányosságokra hívta fel a figyelmet. Egyebek közt a karbonfluxus-egyenleg becslésekben a földhasználattal összefüggő számítások megbízhatósága rendkívül alacsony, alig 45%, a természetes nyelőké pedig kb. 25%, ami jelentős bizonytalanságot okoz a globális becsléseknél. A jövőben a kutatásokat célszerű ezekre a területekre fókuszálni.

Magyarországon az üvegházhatású gázok hegyhátsáli tornyon történő méréseit jelenleg az Atommagkutató Intézet (ATOMKI) üzemelteti. A magyarországi üvegházgáz leltár összeállítása az EU-s és UNFCC irányelvek szerint 2006 óta az OMSZ „Nemzeti Emissziós Leltárak Osztályának" feladata.

Krioszféra kutatások

A harmadik kiemelt terület a krioszféra megfigyelések fejlesztése. A tengerszint emelkedés felét a gleccserek és sarkvidéki jégfelületek olvadása okozza, mely az olvadó területektől távoli partszakaszokat, kis szigeteket veszélyezteti. A szárazföldi gleccserek eltűnése több milliárd ember ivóvízellátását fenyegeti, sok helyen a mezőgazdasági termelésre is jelentős kockázatot jelent, továbbá katasztrófákat, pl. földcsuszamlásokat okoz. Ráadásul a sarki permafroszt kétszer annyi szenet tartalmaz, mint a légkör, ami sürgetővé teszi a krioszféra monitoringját. Noha a szervezet 150 éves fennállása óta többször folyt célzott program a sarkvidékeken zajló folyamatok megismerésére, a hatásmechanizmus kevéssé ismert. A poláris régiók megfigyelésének kiemelt eszközei a meteorológiai műholdak, amelyek távoli területekről is képesek részletes információkat nyújtani. A déli sarkkörön túli terület kívül esik a WMO régiók területein, ezért a mérések támogatása csak önkéntes programként tud megvalósulni.

Bővülő meteorológiai szolgáltatások

A SERCOM meteorológiai szolgáltatásokat tömörítő Bizottság napján a WMO 2014-es Szolgáltatási Stratégiájának megújítása volt a fő téma (WMO-No 1129). A Kongresszus által jóváhagyott anyagban előtérbe került a különböző gazdasági ágazatok növekvő igényhez igazodó, felhasználó orientált meteorológiai kiszolgálás. Minden tagállam részére javasolják a „Szolgáltatás-fejlesztési terv" elkészítését, amelyhez a WMO Stratégia 6. és 7. fejezetei jó példákat mutatnak be, és ajánlásokat fogalmaznak meg. A Kongresszus során a társadalmi igényeket kielégítő adat- és információnyújtásra, illetve a tájékoztatás területén a katasztrófavédelemre, a légi és tengeri közlekedésre, az árvizekre, aszálykezelésre, valamint az egészségügyre vonatkozó határozatokat fogadtak el. Az a javaslat született, hogy minden tagország készítsen nemzeti összefoglaló atlaszt az időjáráshoz köthető „károk és veszteségek" témában.

Az EW4All program érdekében az Általános Meteorológiai Szabványok és Ajánlott Gyakorlatok (WMO-No.49) I kötet kibővült a média és érintettek körére kiterjedő Közös Riasztási Protokollal (CAP – Common Alerting Protocol). A Nemzetközi Légi Navigációs Meteorológiai Szolgáltatásokat szabályozó részt kiegészítették a vulkáni hamu, az űridőjárás és a trópusi ciklonok megfigyelésére vonatkozó útmutatásokkal. A dokumentum (WMO-No.49) II. kötete – a duplikáció elkerülése érdekében – megszűnt. (Megj. helyette az ICAO Annex 3 útmutatásai a mértékadók.)

Az aszályt illetően az Integrált Aszálykezelési Program (Integrated Drought Management Programme) feladata az aszálymegfigyelés, a kockázatbecslés és az aszály-előrejelzés globális koordinációjának kialakítása.

A SERCOM keretében az SG-ENE csoport foglalkozik a Stratégia megújuló energiákra vonatkozó célkitűzéseinek a koordinálásával [**3**]. Legfrissebb letölthető kiadványuk az „Integrált időjárási és éghajlati szolgáltatások a nettó nulla energiaigényű átállás támogatására" (WMO-No. 1312). Különösen a napenergia szolgáltatások témakörében várják a tagállamok hozzájárulását és tapasztalatait.

Meteorológiai infrastruktúra átalakulása

Amint a bevezetőben olvasható, a teljes (hidro) meteorológiai infrastruktúrát irányító INFCOM Bizottság tevékenységét is a szolgáltatások, ezen belül elsődlegesen az EW4All igényei szerint alakítják át. A szemléletváltást tükrözte, hogy a napirendben a SECOM programja megelőzte az INFCOM napot.

A veszélyjelzéshez nélkülözhetetlen egységes szabad hozzáférésű adatpolitikát 2021-ben fogadták el. Ennek jegyében a korábbi, kizárólag a nemzeti szolgálatok által elérhető (GTS rendszerű) zárt láncú adatmegosztást 2025-től web alapú nyílt rendszer WIS 2.0 (WMO Information System 2.0) váltja fel, melynek működését a WMO honlapján egy közérthető videó magyarázza el [4]. Lényege, hogy az adatok letöltését ingyenes szoftverek teszik lehetővé, jelentősen csökkentve ezzel az informatikai költségeket, és elősegítve a kevésbé tehetős tagországok adatelérését.

A „második generációs adathozzáférés" támogatja a Globális Alap-megfigyelő Hálózatot (GBON – Global Basic Observing Network), amely a numerikus előrejelzésekhez szükséges órás felszíni és rádiószonda adatok globális cseréjét biztosítja. A Kongresszus döntése értelmében a korábbi GDPFS (Global Data-Processing and Forecasting System) új elnevezése WMO Integrált Feldolgozó és Előrejelző Rendszer (WMO Integrated Processing and Prediction System, WIPPS) lesz.

A WMO egységes fellépést kért a tagországoktól a meteorológiai távérzékelési eszközök (radarok, műholdak) rádiófrekvencia sávjainak a védelme érdekében a WRC-n (World Radiocommunication Conferences) és egyéb releváns fórumokon.

Tudományos Nap

A Kutatási Testület (RB – Research Board) legfontosabb feladata, hogy a WMO szervezetek számára kutatásokra vonatkozó ajánlásokat tegyen. A testületnek mintegy 30 kiemelkedő szakember a tagja. A Kongresszus keretében elfogadták az RB által előterjesztett kutatási programok (WWRP, GAW) cselekvési terveit a következő ciklusra.

A Tudományos Tanácsadó Testület (SAP – Scientific Advisory Panel) ajánlása szerint az aktuális K+F+I területek az alábbiak: big data adatkezelés; porvihar- és erdőtűz-előrejelzések fejlesztése; a klímaváltozási átfordulási pontokhoz (ún. „tipping points") kapcsolódó kutatások; numerikus modellek fejlesztése a prognózistól a klímaszcenáriókig, modell outputok kiegészítése gépi tanulással és mesterséges intelligenciával. Ez utóbbi esélyt adhat a tíz napostól évszakosig terjedő időskálájú előrejelzésekre. Mindezekhez kapcsolódóan érdekes előadások hangzottak el.

Különösen érdekfeszítő volt a „Mesterségesintelligencia-fejlesztések az EW4All támogatásához" témában – a WMO RA VI régió által – szervezett szombat délutáni ülés, amelyen az Európia Középtávú Előrejelzési Központ (ECMWF), a Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezete (EUMETSAT), a Météo France, illetve a UK MetOffice képviselői és Big Tech cégek (Huawei, Google DeepMind, Microsoft, NVIDIA) vezető szakértői mutatták be az AI témájú fejlesztéseiket. A bemutatók anyaga és a több mint háromórás felvétel megtekinthető a WMO Youtube oldalán [**5**].

A fejlődés gyors üteme miatt rendkívül fontos a rendszeres szakmai továbbképzés. Évente 90 ezer fő oktatását biztosítják a WMO regionális központjai, a COVID-19 járvány óta jelentős részben online formában.

A Kongresszuson ünnepélyes keretek közt átadták az IMO díjat, melyet idén Mrs. Dr. Sue Barell ausztrál tudós vehetett át a globális időjárás-, víz- és éghajlatkutatásban elért kiemelkedő eredményeiért.

Hidrológiai döntések

A Kongresszus több napon át tárgyalt hidrológiai kérdéseket. Az éghajlatváltozás hatásai leginkább a hidrológiai rendszereken keresztül érzékelhetők, ezért kiemelten fontos a WMO koordinációja és szabványosítása mind a hidrológiai adatgyűjtés, mind a veszélyjelző rendszerek kiépítése területén, továbbá lényeges a hidrológiai szakmai csoportok integrálása a szervezeti struktúrába. Döntés született arról, hogy a hidrológiai tevékenységek a WMO kiemelt feladataivá válnak.

A Hidrológiai Közgyűlésen bemutatták a hidrológia központi szerepét a Földrendszer megközelítésében és az EW4All kezdeményezésben. A hatékonyabb árvízi előrejelzések kiépítését, az aszálymonitoringot elősegítő programokat, valamint a poláris, illetőleg magashegyi régiókat érintő javaslatokat hagyott jóvá a testület. A Kongresszus megerősítette a hidrológia hosszú távú jövőképét. A világ hidrológiai tanácsadói

számos kezdeményezést tettek, melyek közül a legfontosabb a Globális Hidrológiai Állapotmegfigyelő Rendszer (Global Hydrological Status and Outlook System – HydroSOS), melynek világszerte vízgyűjtők területén megvalósított eredményeit mutatták be a Kongresszuson elhangzott előadások.

Vezetőségválasztás

A tisztségviselők megválasztására a Kongresszus utolsó napjaiban került sor. Az intézmény történetében először a WMO vezetését főtitkárasszony, az argentin meteorológiai szolgálat korábbi vezetője Prof. Celeste Saulo látja el 2024. január 1-től. Az elnöki posztot dr. Abdullah Ahmed Al Mandus, az Egyesült Arab Emírségek meteorológiai központjának vezetője tölti be (*2. ábra*). Az első alelnök az elefántcsontparti Daouda Konate, a második alelnök Eoin Patrick Moran (Írország), a harmadik alelnök pedig Dr. Mrutyunjay Mohapatra, az indiai meteorológiai szolgálat vezetője lett. A WMO új vezetői legnagyobb kihívásnak az éghajlatváltozás hatásainak lehető legnagyobb mértékű mérséklését tekintik.

2. ábra. A WMO új főtikára, Prof. Celeste Saulo és elnöke, Abdullah Ahmed Al Mandus.

A 27 tagú Végrehajtó Tanács tagjainak kiválasztása régiónként történik. Öt régió azonnal megegyezett a jelöltekről, ezért azoknál nem volt szükség szavazásra. Az RA VI (európai) régióban azonban néggyel több jelölt volt, egyikük orosz. Hosszadalmas, éjszakába nyúló eljárással, másnap délben záruló szavazáson sikerült megszavazni a 9 testületi tagot: Románia, Írország, Egyesült Királyság, Németország, Svájc, Franciaország, Norvégia, Olaszország, Törökország nemzeti szolgálatának vezetőit.

A hét folyamán az RA VI régió rendkívüli ülés keretében végzett tisztújítást. A WMO Titkárság európai régiójának igazgatója 2023. február óta az OMSZ korábbi elnöke, dr. Radics Kornélia. Új elnöke dr. Elena Mateescu, a romániai meteorológiai szolgálat vezetője. Alelnök Mark Reider, a cseh hidrometeorológiai szolgálat vezetője.

Zárszó

Érdekes tapasztalat volt számomra a 19-dik kongresszust összehasonlítani a korábbi Cg-15 (2007) és Cg-16 (2011) ülésekkel. Sokkal koncentráltabb és követhetőbb lett a rendezvény azáltal, hogy 3 hétről 12 napra rövidült. Ezzel együtt az átolvasandó dokumentáció mennyisége több száz oldallal csökkent. Korábban párhuzamos megbeszélések közt kellett választani, most az ülések alapvetően a Plenáris terembe összpontosultak és online hozzászólásra is volt lehetőség. A folyosókon a WMO programok standjainál a munkatársak „zöld szemléletben" reklámozták a tevékenységüket: szórólapok helyett QR kódokkal és beszélgetéssel. Alig tucatnyi műszerfejlesztő cég állított ki demonstrációs eszközt, mivel időközben a MeteoTech expová nőtte ki magát. Amíg egy évtizede papírokon dolgoztunk, a 19-dik ülés összes anyaga publikusan elérhető online minden érdeklődő számára [**6**].

Hálás köszönetemet szeretném kifejezni a genfi magyar ENSZ Misszió munkatársainak, akiktől a Kongresszus teljes tartama alatt maximális segítséget és támogatást kaptam a feladatom elvégzéséhez.

Irodalomjegyzék

Lábó E., 2019: A WMO 18. Kongresszusa – Milyen változásokat tapasztalhatunk a nemzetközi meteorológia világában? *Légkör 64*, 71–75.

[**1**] https://wmo.int/site/wmo-and-early-warnings-all-initiative

[**2**] www.medewsa.eu

[**3**] https://community.wmo.int/en/activity-areas/energy

[**4**] https://community.wmo.int/en/activity-areas/wis/wis2-implementation

[**5**] https://youtu.be/4tywhVf0Dlk?si=1j3XKPko8ClImPdg

[**6**] https://wmo.int/world-meteorological-congress-cg-19

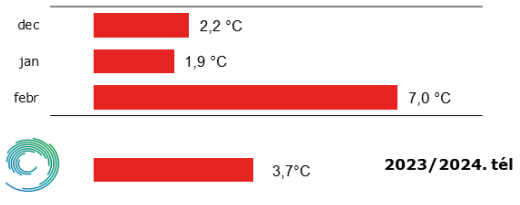
2023/2024 telének időjárása

Szolnoki-Tótiván Bernadett
HungaroMet Nonprofit Zrt., totivan.b@met.hu

A 2017/2018-as tél óta minden elmúlt tél melegebb volt, mint a sokéves átlag (0,4 °C), sőt az utolsó öt évben az évszakos átlaghőmérséklet 2 °C felett alakult. A mostani tél bizonyult a legmelegebbnek az 1901 óta íródó hosszú éghajlati sorban; 4,1 °C-os átlaghőmérséklettel.

A hőmérséklet és csapadék időbeli alakulása

Nem meglepő, hogy a mostani tél adódott a legmelegebbnek 1901. óta, mivel mindhárom hónap jócskán melegebb volt a sokéves átlagnál (*1. ábra*). A február volt a legmelegebb, és az az éghajlati normáltól való eltérés is itt volt a legnagyobb (+7,0 °C). Ezután jön a december +2,2 °C-os anomáliával, majd ezt követi szorosan a január (+1,9 °C). Az eddigi legmelegebb téli időszak 2006/2007-ben volt, melyet 0,5 °C-kal előz meg a 2023/2024-es tél átlaghőmérséklete. Az évszak hónapjai szintén elől végeztek az elmúlt 124 év rangsorában: a december tizenkilencedik, a január huszadik, a február pedig az abszolút legmelegebb lett.



1. ábra. Az országos havi és az évszakos középhőmérséklet eltérése a sokévi (1991–2020-as) átlagtól 2023/2024 telén (interpolált adatok alapján).

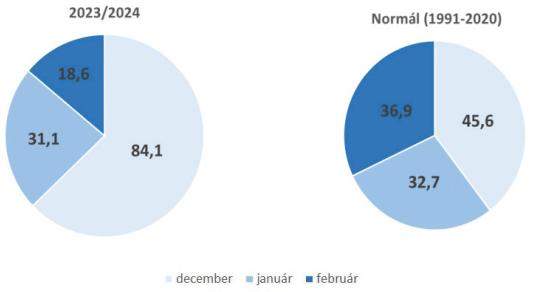
A küszöbnapokat megvizsgálva is az látszik, hogy nagyon enyhe volt a tél (*1. táblázat*). Minden hőmérséklettel kapcsolatos index jócskán elmarad a sokéves átlagától. Ez annak köszönhető, hogy a napi középhőmérséklet az évszak legnagyobb részében magasabb volt a sokéves átlagnál (*3. ábra*).

A csapadék időbeli eloszlása nagyon egyenetlen volt a télen. Bár jellemzően mindig a december adja az évszak csapadékának nagy részét, az elmúlt télen ez a megszokottnál nagyobb arányú volt. Sokéves átlag alapján ekkor hullik az évszakos összeg 40%-a, most ez 63% volt. A január, a 23%-val nagyjából a megszo-

Éghajlati indexek értékei 2023 őszén és ezek sokévi átlagai

	2023/2024	1991–2020
Fagyos nap ($T_{min} \leq 0$ °C)	44	63
Hideg nap ($T_{min} \leq -5$ °C)	10	24
Zord nap ($T_{min} \leq -10$ °C)	3	8
Téli nap ($T_{max} \leq 0$ °C)	1	22
Csapadékos nap ($r \geq 0,1$ mm)	34	31
Havas nap	9	16
Hótakarós nap	7	29

1. táblázat. A 2023/2024-es tél során jegyzett különböző éghajlati indexek és ezek 1991–2020-as sokéves értékei.

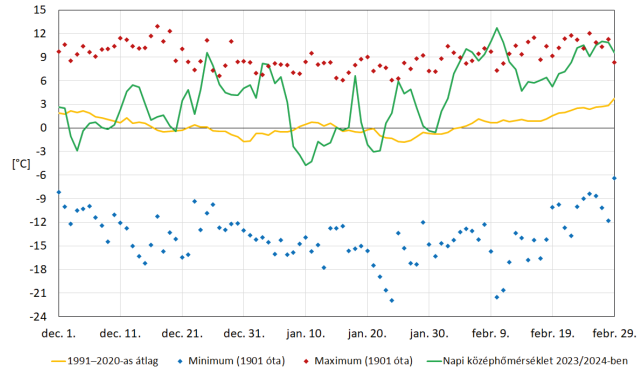


2. ábra. A 2023/2024-es tél havi csapadékösszegei és a normál területarányos kördiagramon (mértékegység: mm).

kott 28%-os érték körül mozgott. A szárazság miatt a február adta idén a legkisebb részt a téli összeghez:14%-ot, miközben átlagban 32% szokott lenni. Ezt szemlélteti a *2. ábra*, ahogy azt is, hogy az évszak csapadékösszege alig tér el a sokéves átlagtól, mivel a kördiagramok területei arányosak a havi és évszakos csapadékösszegekkel. 2023/2024 telén 16%-kal több volt a csapadék, mint a sokéves átlag. Az 1901-től kezdődő idősorban a 2023/2024-es tél a 37. helyre került a legcsapadékosabb telek sorában. A legkevesebb csapadék 2024 februárjában hullott (18,6 mm), mely a sokévi átlagnak mindössze a fele volt. Így ez lett az elmúlt 124 évben a 33. legszárazabb február. A januári 31,1 mm közel átlagosnak mondható, a december viszont extrém csapadékos volt. 2023. decemberében országos átlagban 84,1 mm érkezett, mely 184%-a az 1991–2020-es éghajlati normálnak.

A nagyjából átlagos csapadékot adó tél a csapadékkal kapcsolatos indexekben is megmutatkozik (*1. táblázat*), 2023/2024 telén országos átlagban kb. 10%-kal több csapadékos nap volt, mint a sokéves átlag. Viszont a magas középhőmérsékletek miatt havas napból és hótakarós napból sokkal kevesebb volt, mint a normálértékek.

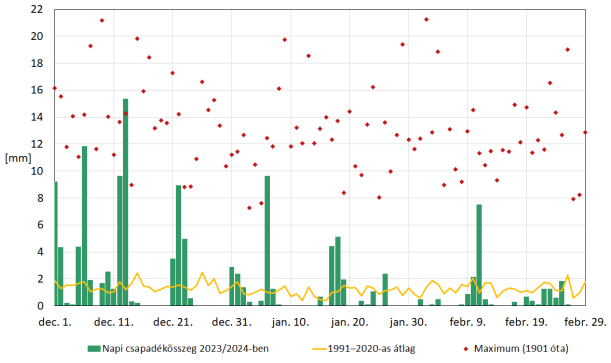
A *3. ábra* a 2023/2024-es tél napi középhőmérsékleteit, sokéves átlagait, valamint az 1901 óta tapasztalt szélsőértékeit mutatja be. Jól látható rajta, hogy a tél 91 napjából 72 napon a normálnál magasabbak voltak a napi átlaghőmérsékletek. Ez a 72 nap többnyire két hosszabb periódusból állt össze: december 11. és január 7. között, valamint január 23. és február 29. között. Mindkét időszakban több olyan nap is előfordult, amikor a napi középhőmérséklet 9–10 °C-kal meghaladta a sokéves átlagot, sőt február 10-én 12 °C-kal volt melegebb az ilyenkor szokásosnál, egyben ez a nap az évszak legmagasabb középhőmérsékletű napja is lett. Hosszabb hűvösebb periódust december elején és január



3. ábra. Országos napi középhőmérsékletek, a sokéves átlag (1991–2020), illetve a szélsőértékek 1901 óta 2023/2024 telén homogenizált, ellenőrzött, interpolált adatsorok alapján.

közepén volt: december 3–10. és január 8–15 között. Január 10. lett a tél leghidegebb napja: -4,6 °C-os országos középhőmérséklettel.

December első napjaiban országos csapadék volt, elsején többfelé jelentős mennyiségű eső hullott. Másodikán, mivel egy frontálzóna hátoldalán hidegebb légtömegek érkeztek fölénk, néhol havazás váltotta fel az esőt. Az ország déli és keleti részein viszont még egy mediterrán ciklon határozta meg az időjárást, melynek hatására napközben olyannyira meleg légtömegek érkeztek fölénk, hogy Csongrád-Csanád és Békés vármegyékben több helyen 17 °C körül alakult a csúcshőmérséklet. Békéscsaba repülőtéren meg is dőlt a napi legmagasabb maximumhőmérséklet rekordja, ahol a legmelegebb órákban 18,0 °C-ot mértünk. Az északnyugat felől beáramló hideg légtömegek hatására a napi középhőmérséklet elkezdett csökkenni, értéke negyedikére -2 °C alá süllyedt. Így több, mint 4 °C-kal maradt el a sokéves átlagtól. December 5-től kezdve hazánk időjárását egy északnyugatra található ciklon és egy délen képződő mediterrán ciklon együttesen alakította, melyek hatására a Dunántúlon vastagabb hóréteg alakult ki. 6-án már az ország középső részeit is elérte a csapadék, jelentősebb hóréteget (10–15 cm) kialakítva. Bár 7-én már gyengült a mediterrán ciklon, még mindig előfordult több helyen havazás, havas eső és eső is. Ezen a napon ködös, borult idő volt, és a Dunántúli-középhegységben a megerősödő északnyugati szél hordta a havat. 10-én egy okklúziós front vonult át a Kárpát-medence felett vegyes csapadékot hozva magával. Északon, északkeleten havazott, délen eleinte ónos eső, majd eső hullott. 11-től egy ciklonrendszer enyhülést hozott térségünkbe, így a sokéves átlag fölé emelkedtek a középhőmérséklet. A melegedés mellett bőséges csapadékot hoztak ezek a légköri folyamatok, főként 12-én és 13-án (*4. ábra*).



4. ábra. Országos napi átlagos csapadékösszegek 2023 őszén, a sokéves napi átlagok (1991–2020), illetve a maximumok 1901 óta homogenizált, ellenőrzött, interpolált adatsorok alapján.

20-án északnyugat felől hidegfront érkezett, feltámadt a szél, mely felszakította az előző napokban kialakult ködöt. Az ezt követő napokban az átvonuló frontok hatására csapadék érkezett és nagyobb területen viharossá fokozódott a délies szél. 22-én viszont már észak felől jött egy hideg légtömeg, mely következtében 23-ra lecsökkent a napi középhőmérséklet, így az ország legnagyobb részén havazott. 24-én a nyugat felől érkező enyhébb léghullámok hatására a havazást már havas eső és eső váltotta fel. Karácsonykor a hónap legmelegebb napja volt: 25-én 9,5 °C középhőmérséklettel, mely több, mint 9 °-kal haladta meg az ilyenkor szokásost. Bár az követő egy hétben már csökkent a hőmérséklet, még így sem süllyedt 4 °C alá. Ezzel az év utolsó hetében 4–5 °C-kal volt melegebb, mint a sokéves átlag. December 25–30. között nem fordult elő csapadék az év utolsó napján viszont egy hidegfront vonult át felettünk, mely többfelé hozott esőt, az északi hegycsúcsokra havazást.

Az újév napján hidegfront alakította időjárásunkat, ezért többfelé előfordult csapadék, néhol még zivatar is kialakult. A követő napokban nyugatias áramlással az ilyenkor szokásosnál enyhébb levegő érkezett a Kárpát-medencébe, helyenként záporok is előfordultak. A hónap legmelegebb napja január 3-án volt, országos átlagban 8,2 °C-os napi középhőmérséklettel, mely 8,9 °C-kal haladta meg a sokéves értéket. Negyedikén még ennél is egy tized fokkal nagyobb volt az eltérés az aznapi 1991-2020-as átlagtól. Jelentős lehűlést a 6-án érkező mediterrán ciklon okozott, többfelé csapadékkal. Ez volt a hónap legcsapadékosabb napja: országos átlagban 9 mm hullott, de a Dunántúl nagy részén 15 mm feletti összegeket regisztráltak. A ciklon hátoldalán sarkvidéki eredetű levegő áramlott fölénk, ezért az eső, havas esőre, havazásra váltott, a napi átlaghőmérséklet pedig a sokéves érték alá csökkent. Minimumát 10-én érte el -4,6 °C-kal, mely több, mint 5 °C-kal alacsonyabb a normálnál. A mediterrán ciklon mögött egy magasnyomású rendszer alakult ki, így a hideg légtömeg „beragadt", és több napig a Kárpát-medence időjárásának meghatározója volt. Egészen január 15-ig a sokéves átlag alatt maradt a napi középhőmérséklet. Ezután nyugat felől enyhébb légtömegek érkeztek, a melegfront hatására fagypont közeli hőmérséklet mellett vegyes halmazállapotú csapadék hullott. Nagy területen ónos eső is előfordult, ezért az Északi-középhegységben többfelé vastag jégpáncél képződött. Egy napra (január 18.) visszatért a szokatlanul enyhe idő 6,4 °C-os középhőmérséklettel és országos esővel. Viszont éjszaka már egy markáns hidegfront érkezett, emiatt 20. és 22. között ismét a sokéves átlag alá süllyedt a napi középhőmérsékleti. 24-én egy legyengült viharciklon meleg- és hidegfrontja is átvonult hazánk felett, kezdetben vegyes halmazállapotú csapadék, majd eső hullott. Erős, sok helyen viharos volt a szél, mely a következő napra mérséklődött. A több órás napsütés mellett ismét 6 °C közelében alakult a napi középhőmérséklet. Január 26. és 27. napján frontok vonultak át hazánk felett változékony, szeles időjárást okozva. A hónap utolsó napjaiban egy anticiklon hatására erősödött a ködhajlam, csapadék nem volt.

A február minden napján melegebb volt, mint az 1991–2020-as sokéves átlag. Leghűvösebb elseje volt, bár ekkor is 2,6 °C-kal volt melegebb, mint a normálérték. A hónap elején anticiklon uralta időjárásunkat, s enyhe levegő töltötte ki a Kárpát-medencét. Február 5-től további enyhe légtömegek érkeztek délnyugat

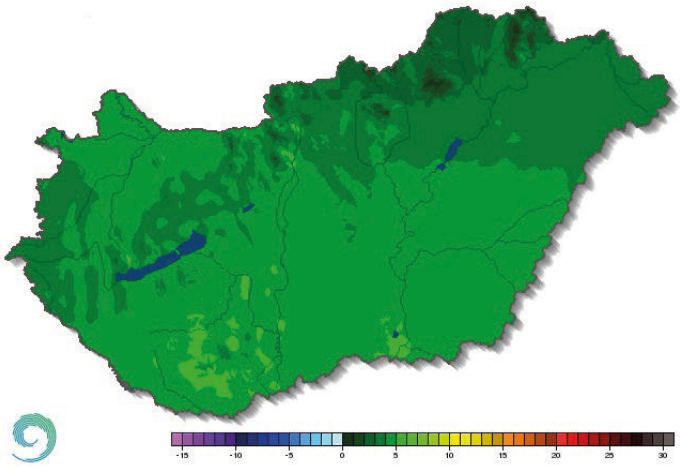
A hónap során mért legmagasabb hőmérséklet			
	Hőmérséklet	*Állomás*	*Napja*
december	18,0 °C	Békéscsaba repülőtér Kémes	december 2. december 25.
január	17,7 °C	Hercegszántó Karapancsa	január 18.
február	22,0 °C	Körösszakál	február 27.
A hónap során mért legalacsonyabb hőmérséklet			
	Hőmérséklet	*Állomás*	*Napja*
december	-13,2 °C	Zabar	december 4.
január	-14,1 °C	Kakucs Zabar	január 20. január 10.
február	-6,9 °C	Zabar	február 14.

2. táblázat. A téli hónapok során mért legmagasabb és legalacsonyabb hőmérsékletek 2023/2024-ben.

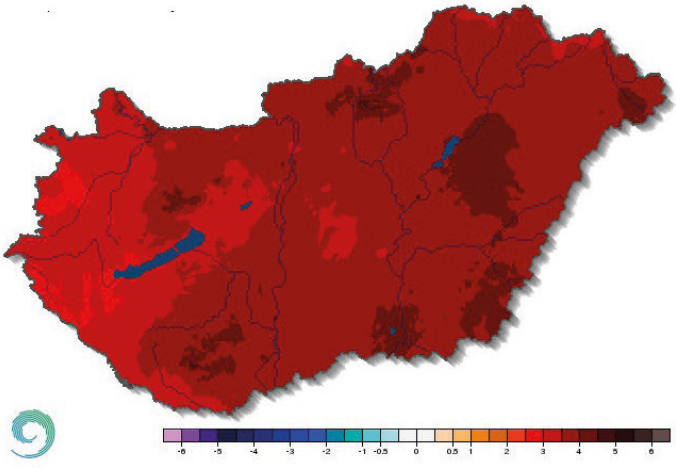
A hónap legnagyobb csapadékösszege			
	Csapadék	*Állomás*	
december	166,3 mm	Környe	
január	62,4 mm	Tiszabecs	
február	82,9 mm	Szuha Mátraalmás	
A hónap legkisebb csapadékösszege			
	Csapadék	*Állomás*	
december	46,3 mm	Sajószentpéter	
január	12,4 mm	Zics	
február	0,0 mm	Medgyesegyháza Bánkút-Rózsamajor	
24 óra alatt lehullott maximális csapadék			
	Csapadék	*Állomás*	*Napja*
december	50,8 mm	Sopron Brennbergbánya	december 22.
január	30,0 mm	Felsőrajk	január 6.
február	39,1 mm	Zalatárnok	február 11.

3. táblázat. A téli hónapok során mért legnagyobb és legkisebb havi csapadékösszegek, valamint a 24 órás maximumok 2023/2024-ben.

felől, így a napi középhőmérséklet elérte a 10 °C-ot is. Egy hullámzó frontrendszer hatásásra pár napra kissé visszaesett a hőmérséklet, majd 8-tól ismét emelkedni kezdett. Ekkor délies áramlással ismét enyhe és nedves levegő áramlott hazánk fölé. A következő napokban (9–11. között) többfelé volt jelentős mennyiségű csapadék a tőlünk délre örvénylő ciklonnak köszönhetően, s az időszak végén a Dunántúl délnyugati felére érkezett jelentős mennyiségű eső. Az Alföld délkeleti része ekkor is száraz marad, ott csak erős, helyenként viharos széllökések kísérték az elvonuló ciklont. Ezután észak felől hűvösebb levegő érkezett hazánk fölé erős széllökések kíséretében. 14-től nyugalomba került a levegő a Kárpát-medencében és napokig napos száraz idő volt a jellemző. Február 17-én egy gyengülő hidegfront vonult át, mely lehűlést nem hozott és eső is csak északon hullott. 19-én egy kettősfront okozott felhős, kissé csapadékos időt, tavaszias hőmérséklettel. 22-én megerősödő délies áramlással enyhe és nedves levegő érkezett fölénk. Főként az ország északi felén volt eső, záporeső; a délkeleti határ mentén ismét nem volt csapadék. 24-én a Felső-Tisza-vidéken hullott nagyobb mennyiségű eső, 25-én pedig a Cserhát és



5. ábra. A 2023/2024-es tél középhőmérséklete (°C).



6. ábra. A 2023/2024-es tél középhőmérsékletének eltérése a sokévi (1991–2020) átlagtól.

a Mátra térségében fordult elő csapadék. A tavaszias idő a hónap végéig kitartott, az átlagnál 6–8 °C-kal melegebb, csapadékmentes napokkal.

A hőmérséklet térbeli eloszlása

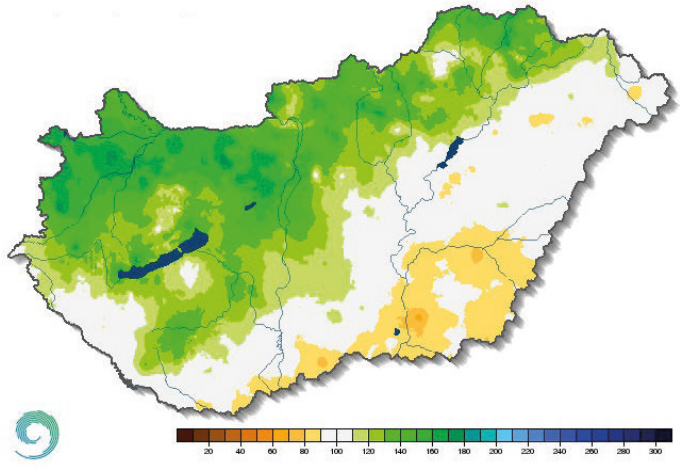
A tél átlaghőmérséklete 4,1 °C volt, mely 3,7 °C-kal magasabb az 1991–2020-as sokéves értéknél. Az évszakos átlagok 0 és 6 °C között mozogtak. Fagypont alatti háromhavi középhőmérséklet a korábbiakkal ellentétben ezen a télen nem fordult elő. A középhegységeinkben volt hidegebb, 0 és 3 °C közötti átlagokkal, az Alföldön és a Dunántúlon már 3–5 °C közötti értékek voltak jellemzők. A legmelegebb terület ezúttal is a Mecsek, Budapest és Szeged környéke voltak, ezeken a tájakon 5 °C felett alakult az évszakos átlag (*5. ábra*).

A *6. ábrán* jól látható, hogy az anomália mértéke mindenhol meghaladta a 2 °C-ot. A Dunántúl nyugati részén 2 és 3 °C közötti, míg az Alföldön 3 és 3,5 °C közötti volt az eltérés a sokéves átlagtól. A legmelegebb tájaink a télen a Mecsek, az Észak-Bakony, a Körös-Maros közének keleti része, a Hortobágy, a Mátra, valamint Szeged és környéke voltak. Ezeken a területeken a 3,5 °C-ot is meghaladta az anomália, sőt foltokban még 4 °C-nál is nagyobb eltérést tapasztaltunk.

A csapadék térbeli eloszlása

A tél folyamán lehullott csapadékösszegek térbeli eloszlása látható a *7. ábrán*. A térképen kirajzolódik, hogy északnyugatról délkelet felé csökken a csapadék mennyisége. A legszárazabb vidékek Békés, Csongrád-Csanád és Jász-Nagykun-Szolnok vármegyékben találhatók, itt többnyire 80–100 mm között alakult a háromhavi összeg. A legkevesebb téli csapadékot Békésszentandrás Duzzasztómű állomáson mértük: 84,8 mm. A Dunántúlon, a Mátrában, a Bükkben, valamint a keleti határ mentén a Felső-Tisza-vidéken 140 mm felett alakult csapadékmennyiség összege. A legmagasabb csapadékösszeget ezen a télen Hegymagason regisztráltuk: 293,5 mm-t.

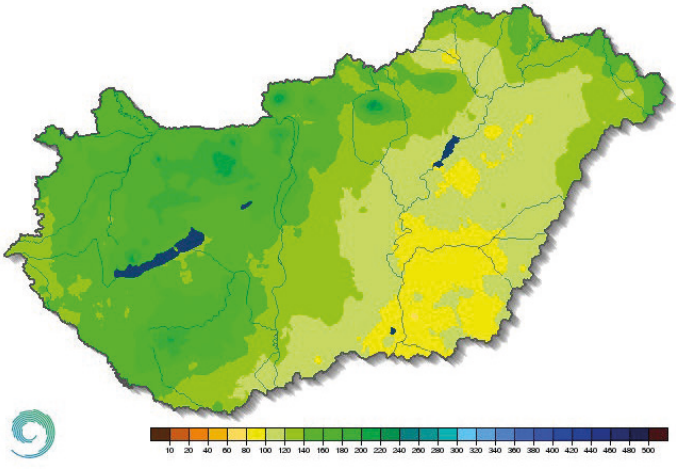
Országos átlagban a téli csapadékösszeg 134 mm volt, amely 16%-kal haladja meg az 1991–2020-as sokéves normált (115 mm). Ezzel együtt – mivel nagy volt a térbeli változékonyság – a déli országrészekben a csapadék mennyisége elmaradt az ilyenkor megszokottól (*8. ábra*). Az országot délnyugat-északkelet irányban átszelő sávban a háromhavi csapadék közel megegyezik a sokéves értékkel. Ettől a sávtól északra már az átlagosnál nagyobb összegek is megjelennek: az éghajlati normál 140–170%-a érkezett ezeken a területeken.



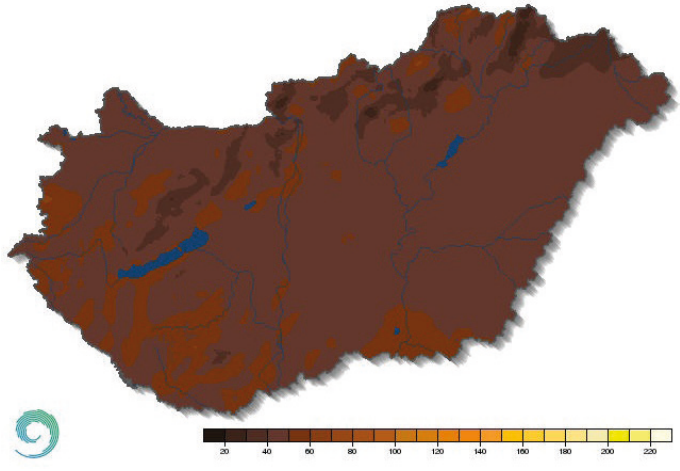
8. ábra. A 2023/2024-es tél csapadékösszege a sokévi (1991–2020-as) átlag százalékos arányában kifejezve.

A globálsugárzás térbeli eloszlása

A tél folyamán hazánk legnagyobb részén 50 kJ/cm^2 alatt alakult az évszakos globálsugárzás-összeg. Az alacsonyabb értékeket, ahogy a korábbi években, most is a Felső-Tisza-vidéken és a középhegységeinkben figyelhettük meg (*9. ábra*). A legalacsonyabb mért összeg Sátoraljaújhelyen 33 kJ/cm^2 volt. A legtöbb globálsugárzás az Alföldre érkezett, a legmagasabb mért érték Szegeden 52 kJ/cm^2.



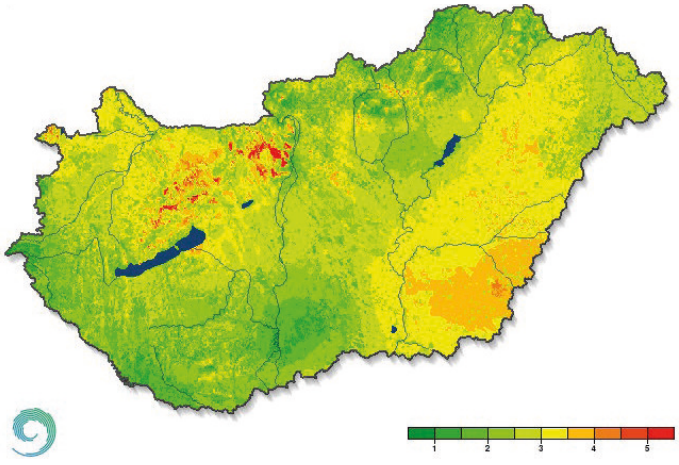
7. ábra. A 2023/2024-es tél csapadékösszege (mm).



9. ábra. A 2023/2024-es tél globálsugárzás összege (kJ/cm^2).

A szélsebesség térbeli eloszlása

A télen az ország legnagyobb részén 2 és 4 m/s között alakult az átlagos szélsebesség. Az alacsonyabb értékeket a délnyugati határ mentén, a Duna-Tisza-közének nyugati felén és az Északi-középhegységben találjuk (*10. ábra*). Ezeken a területeken akár az 1 m/s alatti érték is jellemző lehetett. A legmagasabb átlagértékek a Körös-Maros közén, a Mátrában, a Hajdúságban, a Dunántúli-középhegységben, valamint Siófok és Sopron környékén fordultak elő. Itt már 3,5 m/s feletti átlagos szélsebesség volt a télen. Bár az ábrán az átlagszelet mutatjuk be, emellett meg kell említenünk a széllökéseket is. Az évszak folyamán több alkalommal megdőlt a a napi legerősebb széllökésre vonatkozó rekord. December 3-án és január 24-én új fővárosi, míg január 25-én új országos rekord született. Mindegyik alkalommal Budapest János-hegy állomásunkon mértük az új, legmagasabb értékeket.



10. ábra. A 2023/2024-es tél átlagos szélsebessége 10 m-es magasságban (m/s).

Így tehát a tél legnagyobb széllökését 2024. január 25-én rögzítettük, Budapest János-hegyen: 30,7 m/s.

2023/2024 tél időjárási adatainak összesítője

(a mért értékek és az eltérések az 1991–2020-as sokéves átlagtól)

Állomás	Sugárzás, kJ/cm²	Hőmérséklet, °C						Csapadék, mm			Szél
	évszakos összeg	évszak közép	eltérés	max	napja	min	napja	évszak összes	átlag %-ában	$r \geq 1$ mm napok	viharos nap ($f_x \geq 15$ m/s)
Szombathely	52	3,0	2,9	19,0	2024.02.05	-10,0	2023.12.08	140	166	20	9
Nagykanizsa	–	3,4	2,6	18,1	2024.02.10	-11,3	2024.01.21	127	100	13	6
Pér	–	4,3		17,7	2024.02.10	-10,2	2024.01.11	147	143	24	15
Siófok	49	4,4	3,3	18,6	2024.02.10	-6,5	2024.01.11	133	127	20	14
Pécs	-	5,2	3,9	16,8	2024.02.28	-7,9	2024.01.11	111	96	25	13
Budapest	-	4,6	3,7	18,0	2024.02.10	-8,7	2024.01.11	156	155	23	9
Miskolc	41	3,6	4,0	17,8	2024.02.27	-10,2	2024.01.10	139	140	20	2
Kékestető	44	0,5	3,3	10,9	2024.02.29	-9,7	2024.01.09	175	122	26	48
Szolnok	47	4,6	4,0	18,9	2024.02.10	-8,4	2024.01.11	89	95	21	8
Szeged	52	4,8	4,0	20,2	2024.02.10	-9,7	2024.01.11	93	96	19	12
Napkor	–	3,8	4,0	20,3	2024.02.27	-9,9	2024.01.11	116	118	22	21
Debrecen	46	4,0	3,9	20,7	2024.02.27	-9,8	2024.01.10	96	97	19	7
Békéscsaba		4,6	4,0	20,4	2024.02.27	-7,8	2024.01.10	98	88	23	11

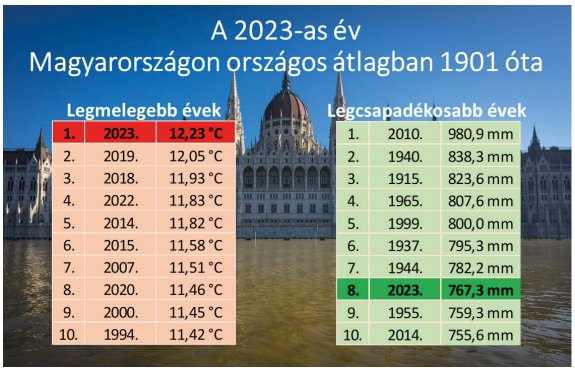
A 2023. év éghajlati elemzése

Marton Annamária, Izsák Beatrix, Szentes Olivér, Szolnoki-Tótiván Bernadett
HungaroMet Nonprofit Zrt., marton.a@met.hu

2023 tavaszán El Niño állapot vált uralkodóvá a trópusi Csendes-óceán térségében, ami jelentős befolyást gyakorol a légköri nedvesség eloszlására, melyen keresztül nemcsak a trópusok, hanem a mérsékelt öv időjárására, és klímájára is hatással van. Az ERA5 adatbázis alapján a 2023-as évben a globális átlaghőmérséklet 14,98 °C volt, ami 0,17 °C-kal múlta felül a 2016-ban mért értéket, és ezzel a legmelegebb év lett 1850 óta. 1,48 °C-kal volt melegebb az iparosodás előtti (1850–1900) szintnél, és 0,60 °C-kal haladta meg az 1991–2020-as normál átlagát.

2023-ban júniustól decemberig minden egyes hónap melegebb volt, mint bármelyik előző év megfelelő hónapja. 2023 júliusa és augusztusa volt a két legmelegebb hónap a feljegyzések szerint, ennek fényében nem meglepő, hogy a legmelebb nyarat zártuk az ERA5 adatbázisa alapján. A szén-dioxid és a metán légköri koncentrációja tovább emelkedett, és 2023-ban rekordszintet ért el (CO_2 419 ppm, CH_4 1902 ppb). Világszerte számos szélsőséges eseményt regisztráltak, köztük hőhullámokat, árvizeket, aszályokat és erdőtüzeket. Az erdőtüzek által okozott szén-dioxid kibocsátás 2023-ban becslések szerint 30%-kal nőtt 2022-hez képest, elsősorban a Kanadában tartósan fennálló erdőtüzek miatt.

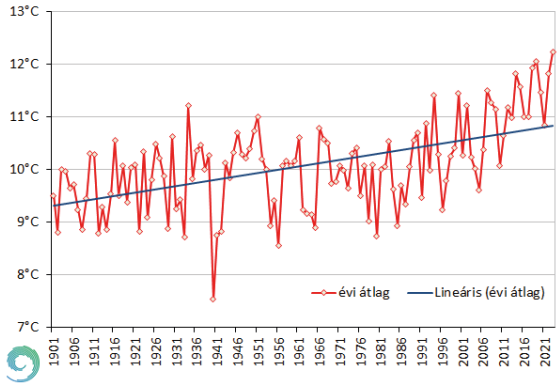
Hazánkban a 2023-as év a legmelegebb, illetve legcsapadékosabb évek rangsorában az első, illetve a 8. helyen végzett (*1. ábra*), amit jól mutat az éghajlati indexek alakulása is (*1. táblázat*). A 2023-as évi



1. ábra. Az országos évi középhőmérsékletek és csapadékösszegek a legmelegebb és legcsapadékosabb évek rangsorában 1901 és 2023 között.

Éghajlati indexek száma a 2023-as évben és ezek sokéves átlagai		
	2023	1991-2020
Nyári nap (Tmax ≥ 25 °C)	107	87
Hőség nap (Tmax ≥ 30 °C)	37	29
Fagyos nap (Tmin ≤ 0°C)	66	90
Téli nap (Tmax ≤ 0°C)	2	24
Csapadékos nap (r ≥ 0,1 mm)	135	117
Havas nap	17	21
Zivataros nap	24	18

1. táblázat. A 2023-as év során jegyzett különböző éghajlati indexek és ezek 1991–2020-as sokéves átlagai.

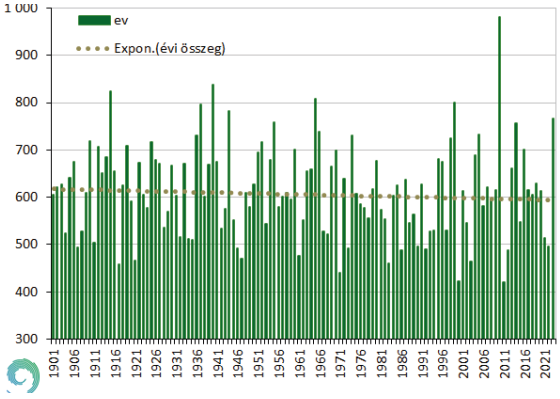


2. ábra. Az évi középhőmérséklet 1901 és 2023 között Magyarországon (homogenizált, interpolált országos átlag).

	Változás 1901-2023 [°C]
tél	1,61 (0,64 – 2,58)
tavasz	1,26 (0,71 – 1,81)
nyár	1,80 (1,32 – 2,28)
ősz	1,29 (0,72 – 1,87)
év	1,53 (1,17 – 1,90)

2. táblázat. Az országos évi középhőmérséklet trendjei 1901–2023 között (a 90%-os megbízhatósági intervallum határaival) Magyarországon.

középhőmérséklet országos átlagban 12,23 °C-nak adódott, 1,5 °C-kal volt magasabb az 1991–2020-as éghajlati normálnál. Az ellenőrzött, homogenizált (MASH v3.03) és interpolált (MISH v1.03) adatok alapján közel 0,2 °C-kal haladta meg az eddigi legmelegebb (2019) évet. Az évi középhőmérséklet országos átlaga 90%-os megbízhatósági szinten szignifikánsan emelkedik az 1901-től kezdődő hosszú idősor lineáris trendbecslése alapján (*2. ábra*). Változása az elmúlt 123 év alatt (1901 és 2023 között)



3. ábra. Az évi csapadékösszeg 1901 és 2023 között Magyarországon (homogenizált, interpolált országos átlag).

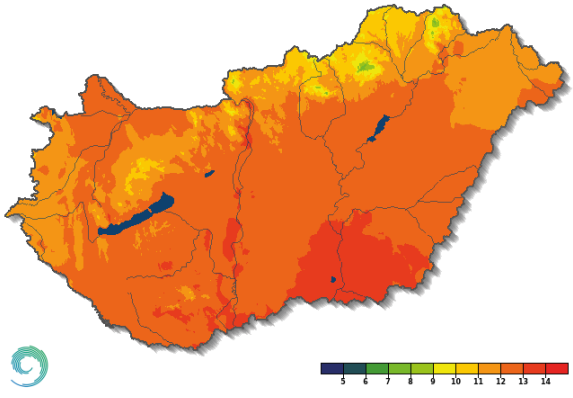
	Változás 1901-2023 [°C]
tél	5,37 (-11,73 – 25,78)
tavasz	-16,95 (-27,34 – -5,07)
nyár	5,96 (-8,63 – -22.88)
ősz	-8,20 (-24,13 – 11,08)
év	-3,78 (-11,26 – 4,33)

3. táblázat. Az országos évi csapadékösszeg százalékos változásának trendjei 1901–2023 között (a 90%-os megbízhatósági intervallum határaival) Magyarországon.

átlagosan +1,53 °C, míg az országon belül legalább +1,17 °C és legfeljebb +1,90 °C közötti hőmérséklet-változás fordult elő (*2. táblázat*).

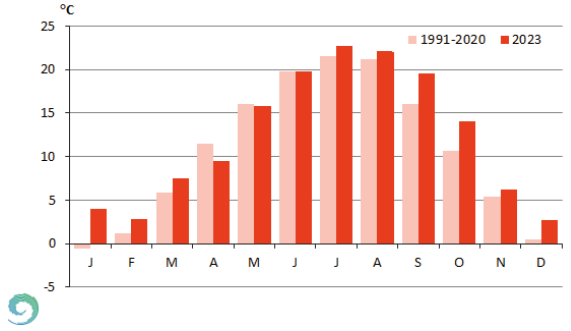
A 2023-as évi csapadékösszeg országos átlagban 767,3 mm volt (*3. táblázat*). Két egymást követő száraz év után 2023-ban 25%-kal több csapadék hullott a normálnál országos átlagban. Az évi összegek sora 3,8%-os csökkenést mutat 1901 óta, de a változás nem szignifikáns (*3. ábra*).

Hőmérséklet. A 2023-es év során az évi középhőmérséklet területi eloszlása leginkább a domborzat hatását tükrözte (*4. ábra*). Az ország legnagyobb részén 12–13 °C között alakult az átlaghőmérséklet, miközben az Alföld déli részén a korábbi évekhez képest szokatlanul nagy területen meghaladta a 13 °C-ot. Az Alpokalján és északkeleten 11–12 °C értékek, a Dunántúli-középhegység magasabban fekvő részein többnyire 10–11 °C, míg az Északi-középhegységben jobbára 8–10 °C volt jellemző.

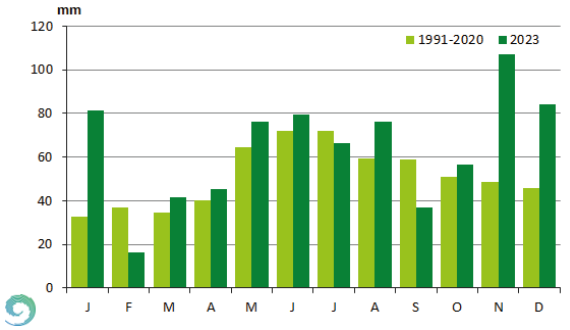


4. ábra. A 2023. évi középhőmérséklet (°C) (homogenizált, interpolált adatok alapján).

A 2023-as január középhőmérséklete megközelítette a 4 °C-ot, ezzel az év során ez volt az a hónap, amikor a pozitív anomália (+4,5 °C) a legnagyobb volt (*5. ábra*), amivel a 2007-es január után a 2. helyre került a legmelegebb januárok sorában a XX. század



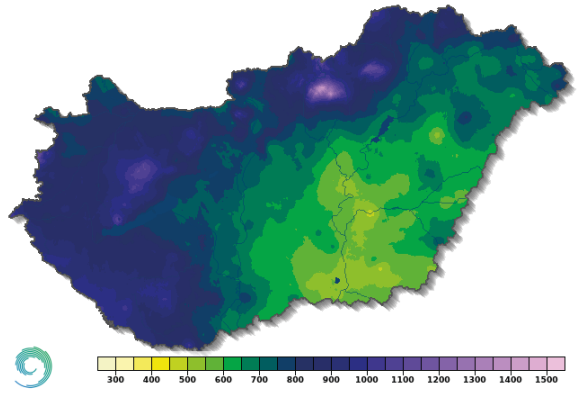
5. ábra. Az országos középhőmérséklet havi átlagai 2023-ban.



7. ábra. A országos csapadékösszeg havi átlagai 2023-ban.

kezdete óta. Az anomáliát tekintve január szeptember és október követte 3,5 °C körüli eltéréssel, 19,57 °C és 14,09 °C középhőmérséklettel, amivel szeptember a legmelegebb, míg október a 3. lett 1901 óta. A május és június átlag közeli, míg az április -2 °C-kal hűvösebb volt az 1991–2020-as normálnál.

Csapadék. 2023-ban a hegyvidékeken hullott a legtöbb csapadék, ami mellett egy nyugat-kelet irányú csökkenés is megfigyelhető (*6. ábra*). A legalacsonyabb, 500–650 mm közötti értékek az Alföld középső részén voltak jellemzőek, míg a Dunántúlon általában 700–900 mm között volt a csapadék éves összege. A Dunántúli-középhegységben többnyire 900–1100 mm, míg az Északi-középhegységben 900–1200 mm volt jellemző. A legmagasabb évi összeget (1406,6 mm) Kékestetőn mértük, míg a legkisebb éves értéket (467,3 mm) Békéssámson állomáson jegyezték.

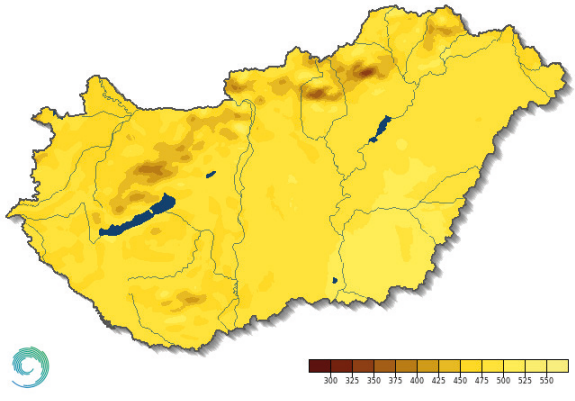


6. ábra. A 2023. évi csapadékösszeg (mm) (homogenizált, interpolált adatok alapján).

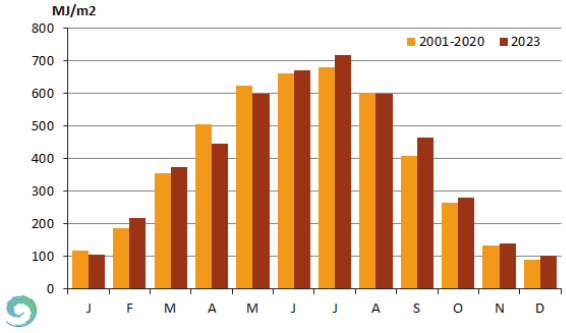
A csapadék esetén is a január tért el legjobban az éghajlati normáltól, a megszokott mennyiségnél másfélszer több hullott (*7. ábra*), ezzel a legcsapadékosabb január lett 1901 óta. Az átlagosnál sokkal nedvesebb volt a november és a december is, az előbbi 120%-kal, az utóbbi 84%-kal haladta meg az átlagot, mellyel a november a 8., december pedig a 10. legcsapadékosabb lett a XX. század kezdete óta.

Globálsugárzás. A Napból közvetlenül érkező (direkt) sugárzás és az égboltról érkező szórt (diffúz) sugárzás összegét globálsugárzásnak nevezzük. Területi eloszlása a domborzati adottságok mellett az átlagos felhőborítottsággal van kapcsolatban. A legmagasabb értékeket a derült nyári hónapokban, a sokévi átlag szerint júliusban, míg a legalacsonyabb értékeket a gyakran borult téli időszakban, decemberben és januárban várjuk. 2023-ban a globálsugárzás éves összege 4715,5 MJ/m^2-nek adódott. Ezzel több mint 200 MJ/m^2-rel maradt el a tavalyi év mögött, ami 2000 óta a napsütésben leggazdagabb év volt. 2016 óta nem volt ennyire alacsony az éves összeg, de még így is magasabb értéket kaptunk, mint a 2001–2020 közötti 20 éves átlag.

Az Alföldön sütött a legtöbbet a nap, itt 475–525 kJ/cm^2 volt jellemző, míg a hegyvidéki területek kevesebb sugárzásban részesültek. Ezek közül is kiemelkedik a Bükk (<350kJ/cm^2), a Mátra (<375kJ/cm^2) és a Bakony (<400kJ/cm^2) (*8. ábra*).



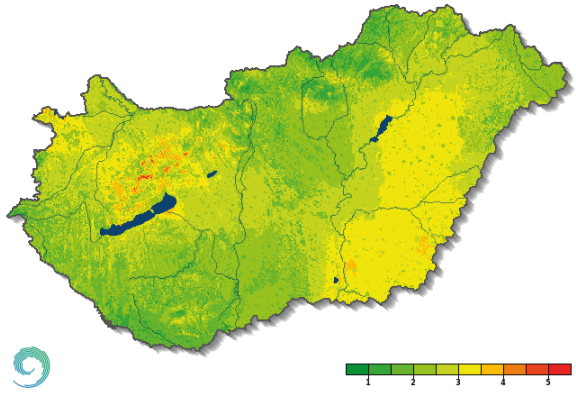
8. ábra. A globálsugárzás éves összege 2023-ban (kJ/cm^2).



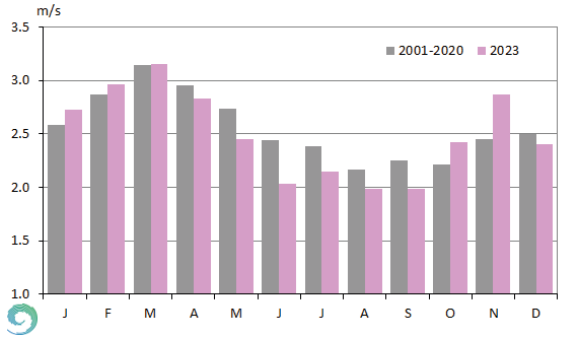
9. ábra. A globálsugárzás évi menete Magyarországon 2023-ban (homogenizált, interpolált országos átlagok).

A legmagasabb havi összeget júliusban jegyeztük, ekkor 5%-kal volt magasabb az összeg az átlagnál (*9. ábra*). A téli hónapok érdekesen alakultak; januárban 9%-kal kevesebb, míg februárban 17%-kal több volt a besugárzás. Áprilisban 11%-kal, míg májusban 4%-kal maradt el a globálsugárzás havi összege a megszokottól, ami egybeesik a hőmérsékleti viszonyok alakulásával (*5. ábra*). A július kivételével a többi nyári hónap az átlag körül alakult. A szeptemberi globálsugárzás jelentősen, 14%-kal volt több, de a többi őszi hónapot is pozitív anomália jellemezte. Végül pedig egy 13%-kal napfényesebb decemberrel zárult az év.

Szél. A szélsebesség évi átlaga hazánk területén többnyire 1,5 és 3,5 m/s között változott, az országos átlag 2001–2020 között 2,6 m/s volt, míg 2023-ban 2,5 m/s-nak adódott. A legmagasabb évi átlagok Északnyugat-Magyarországon voltak jellemzőek, a Dunántúli-középhegységben előfordultak 4 m/s-ot meghaladó értékek is. A Tiszántúlon jelentkeztek még az országos átlagnál szelesebb területek, 3 m/s-ot meghaladó szélsebességgel (*10. ábra*). A szélsebesség éves menetét jól mutatják a szürke oszlopok a *11. ábrán*. Január elejétől márciusig növekszik az országos átlag, majd augusztusig csökken, és újra növekedni kezd egészen az év végéig. 2023-ban az országos szélsebességek havi átlagai januárban és februárban meghaladták az átlagot. Március volt az egyetlen hónap, amikor közel átlagos volt az értéke, majd októberig jelentősen elmaradtak az átlagtól. A legnagyobb negatív irányú eltérés júniusban volt, így a júniusi átlag (~2 m/s), alig haladta meg az augusztusi és szeptemberi átlagokat (<2 m/s). A legjelentősebb pozitív eltérés novemberben adódott (~2,9 m/s), de az október is szelesebb volt a megszokottnál.



10. ábra. Évi átlagos szélsebesség 2023-ban (m/s).



11. ábra. A országos átlagos szélsebesség havi átlagai 2023-ban.

Szélsőségek Augusztus végén tapasztalhattuk a 2023-as év legjelentősebb hőhullámát. Augusztus 20-án a napi középhőmérséklet már meghaladta a 25 °C-ot, augusztus 24-én épphogy 25 °C alá került, majd augusztus 26-án és 27-én tetőzött a hőség, elérve a 27 °C-ot. Országos átlagban 27,1 fokos napi középértékkel augusztus 26-a lett az év legmelegebb napja. Dévaványán augusztus 27-én 39,5 °C-ot mértünk, ami a 2023-as év legmagasabb mért hőmérséklete (*4. táblázat*) és egyben új országos napi rekord.

Február 5-től a Kárpát-medencébe hideg, kontinentális légtömeg áramlott, melynek következtében a sokéves értékek alá hűlt a levegő, országos átlagban 2–5 °C-kal volt hidegebb a megszokottnál. Az anticiklon következtében derült, száraz időjárás uralkodott, nappal napsütéses éjszaka csillagfényes időjárás volt jellemző. Február 7. volt az év leghidegebb napja, ekkor -3,6 °C-nak adódott a napi középhőmérséklet, és ugyanezen a napon mértük a legalacsonyabb, -14,6 °C-os hőmérsékletet Zabaron (*4. táblázat*).

A legmagasabb minimumhőmérsékletet, 24,8 °C-ot (*4. táblázat*) augusztus 22-én, az augusztus végi hőhullám közepén mértük János-hegy állomásunkon. A hőhullám alatt az éjszakai órákban általában 18–20 °C közé esett vissza a hőmérséklet, de az országon belüli legmagasabb értékek augusztus 20-28. között minden nap meghaladták a 23°C-ot.

A 2023-as év szélsőségei			
Elem	Érték	Mérés helye	Mérés ideje
Legmagasabb mértrt hőmérséklet	39,5 °C	Dévaványa	2023.08.27
Legalacsonyabb mért hőmérséklet	-14,6 °C	Zabar	2023.02.07
Legmagasabb minimumhőmérséklet	24,8 °C	Budapest János-hegy	2023.08.22
Legnagyobb évi csapadékösszeg	1406,6 mm	Kékestető Meteorológia	
Legkisebb évi csapadékösszeg	467,3 mm	Békéssámson	
Legnagyobb 24 órás csapadékösszeg	122,0 mm	Kékestető Meteorológia	2023.06.06
Legvastagabb hótakaró	48 cm	Kékestető Meteorológia	2023.01.21
Maximális széllökés	38 m/s	Sátorhely	2023.07.21

4. táblázat. Az Országos Meteorológiai Szolgálat mérései szerint a 2023-as év szélsőségei, a mérés helye és ideje.

Június 4-től délnyugat felől egyre nedvesebb léghullámok érkeztek térségünkbe, majd fokozatosan egy sekély ciklon mélyült ki. Esőben, záporokban, zivatarokban bővelkedő időjárás vette kezdetét. Az időszak során a legtöbb csapadék országos átlagban június 6-án hullott, meghaladta a 15 mm-t, a felhőszakadással kísért zivatarokból lokálisan 40–50 mm-t meghaladó csapadék is előfordult az országban a Tiszától nyugatra eső területeken. Kékestető Meteorológia állomásunkon 122 mm-t mértünk, mellyel megdőlt a napi csapadékrekord, továbbá ez lett az év legnagyobb 24 órás csapadékösszege (*4. táblázat*).

Január közepén még csak hófoltokat jelentettek Kékestető állomásról, de ezt követően egy hidegfront érte el hazánkat, mely többfelé okozott csapadékot az országban. A középhegységekben havazás is előfordult, így 17-én reggel Kékestetőről már 12 cm hóról érkezett jelentés. Ettől kezdve több mediterrán ciklon is átvonult hazánk felett, több hullámban hozva csapadékot, így 19-én reggelre 27 cm-re vastagodott a hótakaró. Ezt követően egy ciklon hátoldalán északi áramlással a Kárpát-medencébe hideg levegő áramlott, így a csapadék formája több helyen esőről havas esőre, havazásra váltott. 20-án a Dunától keletre hullott jelentősebb, körülbelül 10–20 mm mennyiségű csapadék. Így január 21-én reggelre Kékestetőn 48 cm-es hótakaró alakult ki, ami a 2023-as év rekordja volt (*4. táblázat*).

Június 21-én délután mezoléptékű konvektív rendszer érte el térségünket, egyre több felé fordultak elő záporok, zivatarok, heves zivatarok. A nap során többfelé mértek 5–15 mm közötti csapadékösszegeket, a Dunántúl déli részén a horvát határ közelében fekvő Sátorhelyen pedig 38,0 m/s-os (136,8 km/h) széllökést, ami új országos napi rekord, és egyben a 2023-as év maximális széllökése (*4. táblázat*).

Érdekességek

A 2022. decemberi enyhe időjárás januárban és februárban is folytatódott, így a 2022/2023-as tél mind csapadék, mind hőmérséklet szempontjából előkelő helyen szerepelt a 123 éves adatsorunkban. Az enyhe időjárás miatt a csapadék eső formájában hullott, ami nagy területeken belvízi elöntéseket, a hegyvidéki területeken pedig helyenként árvizeket okozott (*12. ábra*). Az alföldön a talaj nedvességtartalma kedvezőtlenné vált a növénytermesztés szempontjából.

12. ábra. Áradás Ipolytarnócon 2023. január 19-én (fotó: Komka Péter).

Az áprilisi és májusi hideg időszakok miatt komoly fagyhelyzetek alakultak ki. Az egyik legjelentősebb ilyen esemény március 28. és április 6. között alakult ki. A fagyok már ekkor jelentős károkat okoztak a kajszibarack- és őszibarack-ültetvényekben, de más gyümölcsöket is érintettek, többek között az almát, a körtét, a cseresznyét és a meggyet. Az őszibarack

esetében a kedvezőtlen termőhelyi adottságú területeken és az érzékenyebb fajták esetében akár 100%-os, míg az ellenállóbb, fagytűrőbb fajták esetében 60–80%-os kárról számoltak be (*13. ábra*).

13. ábra. A kajszi megbarnult sziromlevelei jelzik a fagyást Miskolc térségében 2023. március 29-én (fotó: Kovács Attila).

A 2023-as nyár nem volt olyan forró és száraz, mint a korábbi két nyarunk, de még így is a 12. legmelegebb volt 1901 óta. Az erős ciklonális tevékenység kedvezett a záporoknak és zivatároknak, így a tavalyi aszályos év után ez a nyár bőségesen hozott viharokat, jégesővel, viharos széllökésekkel. Július 10–13. között például szupercellás zivatarok alakultak ki, amit több helyen jégeső és viharos szél kísért. Július 10-én Székesfehérváron szupercellás zivatar alakult ki dió nagyságú jéggel és 70–80 km/h-s széllökésekkel. Július 12-én Sopron közelében haladt el, július 13-án pedig Zala és Somogy megyét érintette egy heves, dió méretű jéggel járó szupercella. Július 20-án egy hidegfront érte el az országot, mellyel heves zivatarok is érkeztek. A Nyírségben szupercellás zivatar vonult végig, melyet nagyobb mennyiségű jég és viharos erejű szél kísért (*14. ábra*). A vihar több településre dió, néhol tojás nagyságú jégesővel, felhőszakadással, viharos széllel érkezett meg. Július 21-én pénteken délután lépték át a délnyugati határt a Horvátország felől érkező heves zivatarok. A jégeső mellett orkán erejű széllökés, cseresznye nagyságú jég is kísérte a Pécsre érkező szupercellát, 126 km/h-s széllökést mértek a városban.

Augusztus 16–18. között a Kárpát medence időjárását egy hidegcsepp alakította, melynek hatására elszórtan alakultak ki záporok, zivatarok, egy-egy intenzív zivatart viharos széllökés és felhőszakadás is kísért. A felhőszakadások következtében áradások is kialakultak. A láncba rendeződő zivatarcellák Nagykőrös környékén okoztak áradásokat. Augusztus 18-án továbbra is a hidegcsepp hatására alakultak ki heves zivatarok az ország középső, valamint a Dunántúl keleti területein. A zivatarokat felhőszakadás, erős, viharos szél, kisebb méretű jég kísérte, Pécsen 40 mm csapadék zúdult a város egy részére, ahol kisebb villámárvíz alakult ki emiatt.

14. ábra. Jégeső Sárospatakon 2023. július 21 (fotó: Kissné Bálint Brigitta).

Novemberben a csapadék mennyisége több mint kétszerese volt a szokásosnak. Az esős időjárás decemberben is folytatódott, és az év utolsó hónapja a szokásosnál 2,2 °C-kal enyhébb volt. December 21. és 24. között a Kárpát-medencében sokfelé 10–30 mm közötti csapadékot mértek, az Alpokban ennél jóval több, helyenként 30 és 70 mm közötti vegyes csapadék hullott. gyors olvadásához, a Duna és a Tisza vízgyűjtőin magasabb vízszinteket eredményezett (*15. ábra*).

15. ábra. Áradás Esztergom térségében 2023. december 26-án (fotó: Romet Róbert).

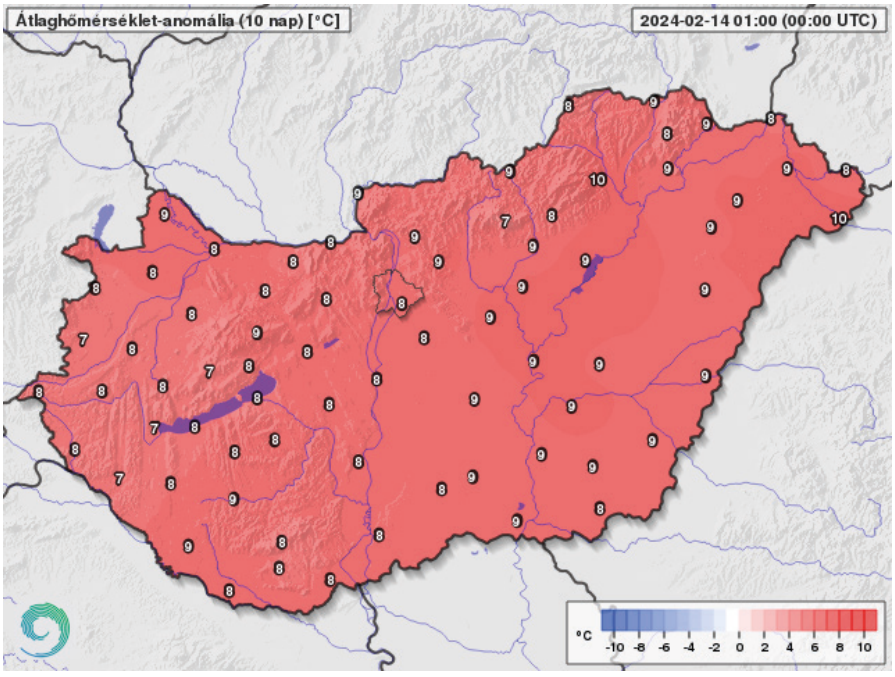
A 2023/24-es tél időjárása agrometeorológiai szempontból

Erdődiné Molnár Zsófia, Kovács Attila Viktor
HungaroMet Nonprofit Zrt., molnar.zs@met.hu

Az idén télen rekord enyhe időjárás zavarta a növények nyugalmi fázisát, és állítja majd komoly növényvédelmi kihívások elé a gazdákat a vegetációs időszak további részében.

2023-ban már november végén beköszöntött a téli idő, az ilyenkor szokásos értékek alá csökkent a hőmérséklet, és északkeleten összefüggő hóréteg is kialakult. A hideg időjárás december első dekádjában is folytatódott, éjszakánként -5 és -10 fok közötti hőmérsékletek is előfordultak. A hónap első napjaiban igen nagy mennyiségű csapadék érkezett, ami kezdetben északkeleten hó, majd országszerte eső formájában hullott. Már ekkor leesett az átlagos decemberi csapadékmennyiségnek megfelelő összeg, de néhány nappal később újabb csapadékzóna érte el hazánkat délnyugat felől hóval, esővel, nagy területen gyűlt össze 5-10, többfelé 20 cm körüli vizes, tapadó hóréteg. Mivel már október közepe óta csapadékos időjárás uralkodott, ezért a talajok felső egy méteres rétege december elején telítődött, és sokfelé a mélyebb talajrétegekbe is jutott a nedvességből. A csapadékos idő a hónap további részében is folytatódott, de ekkor már jelentős enyhüléssel jött az eső. December második és harmadik dekádjában csak gyenge fagyok fordultak elő, napközben pedig többször, nagy területen emelkedett 10 fok fölé a hőmérséklet. Ugyanakkor főként az Alföldön egyre nőtt a belvízzel elöntött területek nagysága, és az enyhe időben a tartós vízborítást nehezen viselték az őszi vetések. Január első hetének időjárása is a decemberihez hasonlóan alakult, csapadék is érkezett bőven, nagyrészt eső formájában, de Baranyában számottevő hótakaró is kialakult. A hónap közepére viszont jelentősen lehűlt az idő, és hideg, száraz légtömegek töltötték ki a Kárpát-medencét. Az éjszakai jelentős, többször -10 fok körüli fagyok, és a gyakran napközben is fagypont körüli hőmérsékletek gyérítették a kórokozókat és kártevőket, a talajok felszín közeli 5-25 centiméteres rétege is átfagyott, és csökkent a belvízborítás is. Az idei télen keménynek számító hideg azonban nem tartott ki sokáig, január második felében számos időjárási front okozott nagy hőmérsékleti ingadozásokat, és vegyes halmazállapotú csapadékot, majd a hónap végére tovább enyhült, és szárazabbra fordult az idő. A talajok felső egy méteres rétege telített maradt, de a talajfagy január végére megszűnt, vagy csak néhány centiméterre korlátozódott. A télies időjárás ekkor véget is ért, február első hetében erős nyugatias áramlással robbant be a tavasz. A +6 és +9 fok közötti átlaghőmérséklet felébresztette a vegetációt, a növények fejlődésnek indultak. Csapadék csak kevés érkezett, így a napos, meleg, gyakran szeles időben gyorsan szikkadni, száradni kezdett a talajok felső rétege. A szokásosnál

jóval enyhébb idő (*1. ábra*) az egész hónap során kitartott, sorra dőltek meg a melegrekordok. Bár február második dekádjában kissé visszaesett a hőmérséklet, ekkor többször is előfordultak gyenge fagyok éjszakánként, és napközben is „csak" 10 fok körül alakult a hőmérséklet szemben a hónap elejének és végének gyakran 15-20 fok közötti maximum értékeivel. Jelentősebb mennyiségű eső az északi és a délnyugati országrészben esett február folyamán, de összességében előbbi területek kivételével az ország túlnyomó részén szárazabb volt a február az átlagosnál. A fél méternél mélyebb talajrétegek továbbra is telítettek maradtak, és a középső talajréteg is bőven tartalmazott nedvességet a tél végén, a felszín közeli réteg azonban az északi országrész kivételével sokat veszített nedvességtartalmából, az Alföld déli, délkeleti felén meglehetősen kiszáradt. A belvízfoltok azonban csak igen lassan zsugorodtak az Alföldön, és az őszi vetések meg is sínylették a magas középhőmérséklet melletti tartós vízborítást, ezekben a foltokban ki is pusztultak (*2. ábra*). A nem belvizes területeken viszont tavaszi fejlődésnek indultak az őszi vetések. A korai csonthéjasok nedvkeringése már a hónap közepén megindult, a rügyek megpattantak, majd február végén délen már virágozni kezdtek a korai fajták. Összességében az idei tél első fele csapadékosabb, második fele kissé szárazabb volt az ilyenkor szokásosnál, a hőmérséklet pedig 3-4 fokkal magasabban alakult a sokéves átlagnál. Az őszi vetéseket leginkább a tartós belvízborítás veszélyeztette. A kártevők és kórokozók a rövid fagyos időszakokban nem gyérültek megfelelő mértékben, ez a növényvédelemben okozhat még gondokat, a vegetáció túl korai fejlődése miatt pedig a gyümölcsösökben keletkezhetnek a szokásosnál is nagyobb fagykárok.



1. ábra. A 10 napos átlaghőmérséklet eltérése a sokéves átlagtól 2024. február 14-ig (Celsius fok).

2. ábra. Megszűnő belvízfolt őszi búzában Miskolc térségében 2024. február 22-én, a víz alatt állt vetés megsárgult, a legtovább víz alatt állt pedig már ki is pusztult (fotó: Kovács Attila).

Hírek

Érdekességek a meteorológia világából, jeles napok, megemlékezések belföldről és külföldről

Március 23. A meteorológia világnapja

2024.03.26. ■ A Meteorológiai Világszervezet (WMO) és a nemzetközi meteorológus közösség minden évben megünnepli a WMO Egyezmény 1950. március 23-ai hatályba lépésének évfordulóját. A hatvannegyedik, 2024-es Meteorológiai Világnap témája: „A klímavédelem élvonalában". 2024. március 26-án a HungaroMet Nonprofit Zrt. dísztermében került sor a világnapi ünnepségre, ahol Szanka Gábor Gyula vezérigazgató és dr. Koncz Zsófia államtitkár helyettes köszöntője után egy szakmai előadást hallhatott a közönség „Éghajlatváltozás Magyarországon: HungaroMet a tudomány és a cselekvés élvonalában" címmel. Ezt követően a Magyar Meteorológiai Társaság elnöke ünnepélyes keretek között vehette át a MH Légierő Parancsnokság ezredesétől a jogi tagsági szerződést.

A hagyományokhoz híven, a meteorológiai világnapon kerültek átadásra a Schenzl Guidó-díjak és a Pro Meteorológia Emlékplakettek, valamint a Miniszteri Elismerő Oklevelek is. Kiosztásra került az Innováció a Meteorológiáért Díj, és az Év MET-ÉSZ észlelője cím, illetve a kiváló társadalmi észlelőket is köszöntötték.

Díjazottak

Schenzl Guidó-díj: *Kovács Győző Gyula*, aki elkötelezetten dolgozott a katonai meteorológiai szakma elismertségéért. Számos oktatási segédanyag, tankönyv megírása, szerkesztése köszönhető odaadó munkájának. A katonai repülőterek észlelőinek képzésében, szakmai felkészítésében és a repülőtéri meteorológiai rendszerek megújításában tett erőfeszítéseinek köszönhetően a katonameteorológiai észlelők a kor színvonalának megfelelő ismereteket sajátíthattak el, a meteorológiai szakállomány pedig a legmodernebb eszközökkel végezhette munkáját. Aktív kutatómunkát végez nyugdíjasként is, a veszprémi meteorológiai mérések és megfigyelések adatfeldolgozása a mai napig a szívügye.

Dr. Putsay Mária, aki a hazai és nemzetközi meteorológia területén végzett kimagasló tudományos, kutatási, szakmai tevékenységéért kapta a díjat, melynek során a modern technikai oktatási eszközöket intenzíven és hatékonyan alkalmazta az EUMeTrain programban végzett lelkiismeretes munkájában. Az EUMETSAT Scientific Working Groupban Magyarország képviselője volt. A Magyar Meteorológiai Társaság (MMT) Távérzékelési Szakosztályának elnöke a szakosztály megalakulása óta. Fáradhatatlan energiával, széles körben, a mai napig részt vesz a tudományág népszerűsítésében.

Pro Meteorologia Emlékplakett: *Fövényi Attila*, a repülésmeteorológia területén végzett több évtizedes, magas színvonalon végzett operatív tevékenységéért kapta a díjat, melyet sokoldalú szakmai tudással és innovatív hozzáállással lát el. Nevéhez kötődik a repülésre veszélyes időjárási elemek alkalmazott előrejelzési módszertanának kidolgozása és fejlesztése. Munkáját példamutató precizitással, elhivatottsággal végzi.

Dr. Gál Tamás Mátyás, a Szegedi Tudományegyetemen a meteorológia és a klimatológia területén végzett oktatási és oktatásszervezési tevékenységéért, valamint a városklimatológia témakörében folytatott kiemelkedő kutatási munkájáért kapta a díjat.

Dr. Kullmann László, az Országos Meteorológia Szolgálatnál eltöltött két évtizedes szakmai munkássága a modellezés és informatika területén számos szakmai osztály elismerését vívta ki. Szaktudása, teherbírása, elhivatottsága és tudásvágya az új területek megismerése iránt példamutató kollégái számára. Feladatait nagy precizitással, új technikák lehetőségeinek kiaknázásával végzi, az operativitás maximális figyelembevétele mellett.

Soósné Dr. Dezső Zsuzsanna, a hazai meteorológusképzésben és tehetséggondozásban betöltött lelkiismeretes és önzetlen munkájáért, a szinoptikus meteorológia területén végzett oktatási és kutatási tevékenységéért, valamint a szakmai közéletben vállalt szerepéért ítélték oda a díjat.

Miniszteri Elismerő Oklevél: *Dr. Diószeghy Márta*, harmincéves szakmai pályafutása során kezdettől fogva kiemelkedő szakmai hűséggel, s példamutató lelkiismeretességgel végzi a munkáját. Feladata a meteorológiai műholdas produktumok hazai alkalmazásának elősegítése, aktív szereplője hazai és nemzetközi távérzékelési együttműködéseknek. Magyarországnak a Meteorológiai Műholdak

Hasznosításának Európai Szervezetéhez 1999-ben társult tagként, majd teljes jogú tagként való csatlakozása óta magyar delegáltként részt vesz a Szervezet Bizottságainak munkájában, a döntéshozatal előkészítésében. Az EUMETSAT és a magyar meteorológiai szolgáltató között kiemelkedően tölti be a szakmai kapcsolattartói feladatokat.

Gyarmatiné Mészáros Erzsébet Zsuzsanna, elkötelezettségéért, értékes és odaadó munkájáért kapta a díjat, mellyel példát mutat a közvetlen munkatársainak, és az őt ismerők is szívesen fordulnak hozzá szakmai segítségért.

Erdődiné Molnár Zsófia, példaértékű szakmai elhivatottságáért és odaadó munkájáért kapta a díjat, mellyel a tavi viharjelző szolgálat újjászervezését, kialakítását elősegítette. Áldozatkész tevékenységéért, melyet a minőségügyi előírások kidolgozásában, az agrometeorológiai előrejelzések és agroklimatológiai információk közzétételében, az információk fejlesztésében nyújtott.

Jenki Szilvia, negyvenéves szakmai pályafutása során tevékenysége végig az időjárás-előrejelzéshez kapcsolódott. Hangja, barátságos, közvetlen személyisége mindenkihez közelebb hozza az általa közérthetően előadott elemzéseket. Hosszú időn keresztül az M1 időjárás-jelentő csapatának aktív tagja volt. Az elmúlt évtizedek során kezdettől fogva kiemelkedő szakmai hűséggel és példamutató lelkiismeretességgel végzi a munkáját. A Magyar Meteorológiai Társaság tevékeny tagja.

Makó Zoltán, 1981. október 1. óta elkötelezett hivatásos észlelője az Országos Meteorológiai Szolgálatnak. Szakmai felkészültségét, mindig magas színvonalú megbízható munkáját példaképként szeretnénk állítani a jelen és jövő generációja elé.

Innováció a meteorológiáért díj: *Kelemen Tibor*, a díjazott főként a meteorológiai alkalmazások és eljárások informatikai fejlesztésében valósított meg innovációt.

Év MET-ÉSZ észlelője – 2023 cím: *Póth Ariel*, 2013-ban, a MET-ÉSZ indulásakor regisztrált Romhányból, azóta közel 10 000 észleléssel gyarapította a nemzeti adatbázist. A Nógrád vármegyei településnek nagy múltja van a meteorológiai mérések téren, hiszen a csapadékmérés 1896-ban indult, majd 1958-tól 1997-ig klímaállomásként is működött. Ariel vállalta, hogy a társadalmi csapadékmérő hálózatunk tagja legyen, s 2018 óta a naponta jelentő állomásaink között végzi magas színvonalon a méréseket. Lelkesedése az időjárás megfigyelése iránt példaértékű.

Kitüntetett társadalmi csapadékmérők, észlelők: *Csáki Csaba*, Abony, *Kozma István*, Kemecse, *Tóth Lászlóné*, Gyöngyöspata, *Kovács Istvánné*, Mátyásdomb és *Gyurgyovics István*, Alsószentmárton

Indul a tavi viharjelzési szezon

2024.04.01. ■ Április 1-jén kezdetét veszi a tavi viharjelzési szezon, amely 2024. október 31-ig tart. A Balatoni Viharjelzés idén már 90 éves lesz, ugyanis 1934. július 8-án indult el legnagyobb tavunknál a viharjelző szolgálat. A tavi viharjelzés a HungaroMet Nonprofit Zrt. speciális feladatai közé tartozik, amely közvetlenül az életvédelmet szolgálja. A balatonihoz hasonlóan viharjelző rendszer működik a Velencei-, a Tisza- és a Fertő tónál is, ez utóbbi kiszolgálását az osztrák meteorológiai szolgálat (GeoSphere Austria) látja el. Az érintett tavaknál a katasztrófavédelem által üzemeltetett viharjelző lámpák mutatják az érvényes jelzési fokozatot. A HungaroMet a nap 24 órájában figyelemmel kíséri a légköri folyamatok alakulását és az időjárási előrejelzések mellett szükség esetén viharjelzéseket ad ki a tavakra, amelyekről a www.met.hu honlapon, illetve a Meteora nevű, ingyenesen letölthető mobiltelefonos alkalmazás segítségével lehet folyamatosan tájékozódni.

Az elsőfokú viharjelzés az erős (40 km/h és 60 km/h közötti) szélre, a másodfokú viharjelzés pedig a viharos (60 km/h-t meghaladó) szélre figyelmeztet. A viharjelzések a szélerősödést megelőzően fél-másfél órás időelőnnyel kerülnek kiadásra.

Az aktuális viharjelzéseket a tavak körüli viharjelző lámpák jelzik. A riasztást a HungaroMet Zrt. adja ki, a viharjelző lámpák technikai üzemeltetését pedig a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság végzi. A Balatonnál négy vízközépi platformon is működnek viharjelző lámpák. Ezek kiegészülnek 15 mobil viharjelzőlámpával, amelyek a strandokon kapnak helyet. A Balatonon tehát összesen 55 viharjelzőlámpa van. Ennek köszönhetően egy adott pontról legalább hármat is lehet látni.

A Velencei-tónál négy, a Tisza-tónál öt, a Fertő-tónál pedig 11 viharjelzőlámpa van, ebből egy működik a magyar oldalon.

Elhunyt dr. Varga-Haszonits Zoltán agroklimatológus

2024.03.16. ■ Dr. Varga-Haszonits Zoltán agroklimatológus, az MTA köztestületének tagja, a Széchenyi István Egyetem professzor emeritusa és a Magyar Meteorológiai Társaság tagja életének 91. évében, március 16-án elhunyt.

Varga-Haszonits Zoltán 1933. július 4-én született Kónyban. Középiskolai tanulmányait a győri Révai Miklós Gimnáziumban végezte, ahol 1951-ben érettségizett. Az Eötvös Loránd Tudomány Egyetem Természettudományi Kar meteorológus szakán 1955-ben szerzett diplomát. Diplomamunkájának címe: „A Duna-Tisza köz területi csapadékviszonyai". Az Országos Meteorológiai Intézetben helyezkedett el, egyetemi doktori disszertációját 1963-ban védte meg „A talajművelés hatása a talajhőmérsékletre" címmel. A földrajztudományok kandidátusa fokozatot „Agroklimatológiai modell az őszi búza fenofázisainak meteorológiai jellemzésére" (1973) című disszertációval szerezte meg. Az MTA doktora fokozatot 1993-ban nyerte el, 1991-től tanszékvezető egyetemi tanár volt a Mosonmagyaróvári Egyetem Mezőgazdasági és Élelmiszertudományi Karán.

Kutatási területei voltak: az éghajlati változékonyság és a termesztett növények; hazánk agroklimatológiai erőforrásainak feltárása és elemzése; az éghajlat és az agroökoszisztémák. Szakirodalmi tevékenysége igen kiterjedt volt: szakkönyvek, egyetemi tankönyvek és szakpublikációk szerzőjeként ismerte a szakma. Több állami kitüntetés birtokosa lett: a Magyar Meteorológiai Társaság Steiner Lajos emlékéremmel (1979) és Berényi Dénes Díjjal (1994) ismerte el szakmai tevékenységét. A környezetvédelmi miniszter 2001-ben Schenzl Guidó Díjban részesítette.

2017-ben a LÉGKÖR folyóiratban megjelent interjúban Varga-Haszonits Zoltán – vagy ahogy közvetlen kollégái hívták "VHZ" – többek között így nyilatkozott: „Néha leballagok a Balaton partra, leülök egy padra, nézem a tavat, a túlparti dombokat. Végiggondolom az életem: a Horthy rendszerben születtem és voltam gyerek, aztán jött a Szálasi rendszer, aztán a háború után egy-két év demokrácia, majd 1948 és 1956 között a Rákosi rendszer, 1956-ban a forradalom, 1957 és 1989 között a Kádár rendszer, majd 1989 után ismét demokrácia. Az életem több mint 80 éve alatt hat rendszerváltás volt, egy világháború ment rajtunk keresztül, s megéltünk egy forradalmat. Ez alatt különböző eszmék befolyásolták az életünket, a rohamosan fejlődő technika rányomta bélyegét a mindennapjainkra, változtak a vezetőink, változtak a munkatársaink, változott minden. Hérakleitosz görög filozófus jutott az eszembe, aki azt mondta: „minden változik." „Nem lehet kétszer ugyanabba a folyóba lépni." Igen, a mi életünk folyamatos változás volt. Ebben a folyamatos változásban – úgy gondolom – az volt a legfontosabb, hogy az ember végezze a munkáját, gondoskodjon a családjáról, és megőrizze emberségét."

Varga-Haszonits Zoltán szakmai pályafutását az Országos Meteorológiai Szolgálatnál végezte, az agrometeorológia elismert szakembereként. Emlékét tisztelettel őrizzük. Nyugodjék békében!

Hetedik szezonját kezdi a jégkármérséklő rendszer

2024.04.15. ■ Április 15-től ismét működik hazánkban a jégkármérséklő rendszer, amely számára 2024-től az Országos Meteorológiai Szolgálat jogutódjaként, a HungaroMet Nonprofit Zrt. biztosítja a szükséges időjárás-előrejelzéseket. A 986 db talajgenerátorból álló rendszer üzemeltetője a Nemzeti Agrárgazdasági Kamara. Idén is szeptember 30-ig segíti a mezőgazdaságot a megelőzési folyamat.

A tavalyi évben is sikeresen védte az országot a hálózat, pedig 2022. aszályos időjárásához képest 2023-ban jóval több, akár hevesebb vihar érte hazánkat. A rendelkezésre álló adatok alapján jelentősen kevesebb volt a jégkár, mint a környező országokban. Az ezüst-jodidot a felhőkbe juttató talajgenerátorok a védekezési szezonban 96 napon kerültek bekapcsolásra, s összesen 176 639 üzemórát működtek.

A generátorok ezüst-jodid tartalmú hatóanyagot égetnek el, ami feláramlással a felhőkbe jut, ott pedig jégképző magok lévén, csökkentik a kialakuló jégszemcsék méretét. A jégesők előfordulásának valószínűsége így sem zárható ki teljesen, azt viszont garantálni lehet, hogy a lehulló jégszemcsék mérete kisebb lesz annál, mint amekkorák a rendszer használata nélkül hullanának le.

KÖNYVAJÁNLÓ

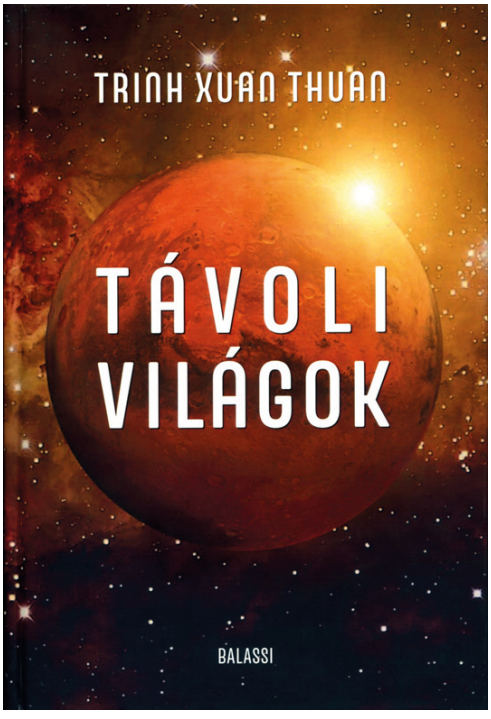
Érdekes könyvek a Légkör olvasóinak

Trinh Xuân Thuan: Távoli világok

Egyedül lennénk a Világegyetemben? Trinh Xuân Thuan az élet elterjedésének esélyeit boncolgatja nemrég magyarul is megjelent könyvében.

Kopernikusz felismerésével kikerült a Föld a Világegyetem középpontjából. Csupán egyike a Tejútrendszer 100 milliárdnyi bolygójának, miközben a Tejútrendszer is csak egyike a milliárdnyi galaxisnak. Ha a Föld nem kivételezett hely az Univerzumban, akkor az élet talán máshol is kialakulhatott, és az evolúció elvezethetett értelmes lények megjelenéséig. Hogyan alakult a Világegyetem sorsa az ősrobbanás után, hogyan alakultak ki a galaxisok, a csillag- és bolygórendszerek? A kozmikus folyamatok alapján szinte végtelen számú bolygóval számolhatunk. Bár még ma sem tudjuk pontosan, hogy az első szaporodásra képes szervezetek hogyan jöttek létre, de az a tény, hogy a Naprendszer stabilizálódása után kozmikus léptékben igen rövid idő alatt létrejöttek azt jelezheti, hogy az élő-élettelen átmenet nem lehet különösebben rendkívüli, számtalan bolygón megtörténhetett. Az elmúlt bő évtizedben távoli naprendszerek bolygóinak (exobolygók) ezreit sikerült felfedezni, nem egynek fizikai jellemzőit is meghatározva. Közülük sok elvileg alkalmas lehet élő szervezetek megjelenésére. Közel állunk ahhoz, hogy eszközeinkkel elemezni tudjuk exobolygók légkörét, amelyek összetétele utalhat a biológiai tevékenység, az élet jelenlétére. Ha pedig az élet megtelepedett egy bolygón, akkor némelyiken talán technikai civilizációk is kifejlődhettek. Eddig azonban nem sikerült ilyenekre bukkannunk.

Mégis egyedül lennénk a Világegyetemben? Ha nem, miért nem sikerült eddig kapcsolatot találnunk másokkal? A vietnami származású francia-amerikai asztrofizikus ezt a kérdést járja körbe tudományos alapossággal, ugyanakkor közérthető formában. A tudományos ismeretterjesztő munkájáért több díjjal is kitüntetett, nagyrészt francia nyelven publikáló szerző Távoli világok (Mondes d'ailleurs) című könyvének első fele a Világegyetem kialakulását és az élet kifejlődésének lehetőségeit tárgyalja, míg a további fejezetek a földön kívüli élet felderítésének lehetőségeit ismertetik. Ha egyszer sikerül földönkívüli élő szervezeteket találnunk, az a természettudományi ismeretek ugrásszerű bővülésén túlmenően számos filozófiai és teológiai kérdést is felvet majd a szerző szerint. Bár a különböző kutatási programok évtizedek óta figyelik, felbukkannak-e a világűr zajában értelemre utaló jelek, eddig ilyet nem találtak. A miértre számtalan teória született. A szerző reméli, hogy nem azért hallgat az űr, mert a kialakuló technikai civilizációk esetleg gyorsan felélik erőforrásaikat és elpusztítják saját létfeltételeiket, melynek veszélyével itt a Földön mi is szembekerültünk.



Trinh Xuân Thuan érdekes, sok ismeretet közlő munkája Mészáros Ernő akadémikus értő fordításában, kiegészítő lábjegyzeteivel és utószavával, a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával a Balassi Kiadó gondozásában került könyvesbolti forgalomba, a magyar olvasó kezébe.

Kislexikon

bolida: olyan meteor, amely a légkörben felrobbanva hangrobbanást kelt, emellett fontos, hogy fényessége meghaladja a Vénusz fényességét. (*In: Pásztor Marcell et al.: Regionális zivatarok azonosítása és követése infrahanghullámok segítségével*)

csonthéjas: a csonthéjas termések vagy csonthéjasok a növényi termések egy jellegzetes típusa. Egy vagy két termőlevélből, felső vagy középső állású magházból fejlődő húsos termések. Az általános csonthéjas terméstípus külső része (exocarpium) bőrnemű és színes, középső része (mezocarpium) húsos, éretten édes, míg belső része (endocarpium) megvastagodott, az ún. „csonthéj". (*In: Erdődiné Molnár Zsófia, Kovács Attila Viktor: A 2023/24-es tél időjárása agrometeorológiai szempontból*)

hullámút követés (ray tracing): a fizikában ez egy olyan módszer, amelynek segítségével a hullámok útvonalának kiszámítására van lehetőség abban az esetben, ha azok terjedési sebessége változik, mert különböző jellemzőkkel rendelkező rendszeren/rendszereken haladnak keresztül. (*In: Pásztor Marcell et al.: Regionális zivatarok azonosítása és követése infrahanghullámok segítségével*)

hideg-típusú időjárási helyzet: a hideg-típusú időjárási helyzetekben a ruházati termikus ellenállás értéke nagyobb, mint nulla. (*In: Ács Ferenc et al.: Esszé az emberi hőterhelésről és hőérzékelésről*)

izentróp: azonos potenciális hőmérsékletű pontok. (*In: Kurcsics Máté et al.: Szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél a Bakony-Balaton térségben*)

lee-oldal: domb, hegy vagy bármely más, a légáramlás útjában álló akadály azon oldala, amely a szélárnyékban fekszik. (*In: Kurcsics Máté et al.: Szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél a Bakony-Balaton térségben*)

luv-oldal: domb, hegy vagy bármely más, a légáramlás útjában álló akadály azon oldala, amely a széllel szemben fekszik. (*In: Kurcsics Máté et al.: Szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél a Bakony-Balaton térségben*)

Sievert (Sv): dózisegyenérték, az SI származtatott egysége, amely az ionizáló sugárzás mennyiségét annak biológiai hatása alapján értékeli. A sievert extenzív mennyiség, időderiváltja a Sv/s, illetve a Sv/h, illetve prefixumokkal kifejezve például a fent említett nSv/h. (*In: Pátkai Zsolt: A Hungaromet Zrt. szerepe a katasztrófák elleni védekezésben*)

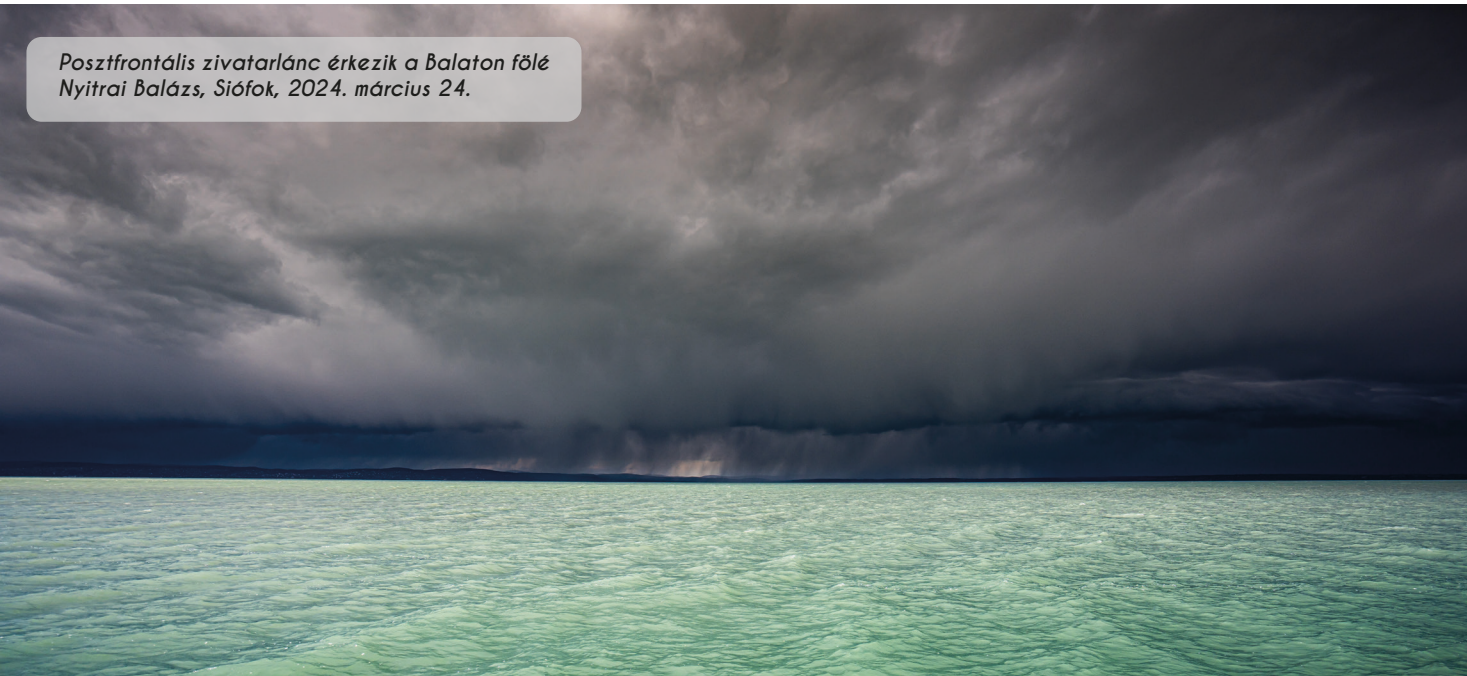
szomatotípus: az emberi test alakja, a testalkat. (*In: Ács Ferenc et al.: Esszé az emberi hőterhelésről és hőérzékelésről*)

talajgenerátor: a hazai jégesőelhárításhoz használt eszköz. A talajgenerátor acetonos ezüst-jodid oldatot (hatóanyagot) éget el, majd az így keletkező ezüst-jodid molekulák feláramlással a felhők felsőbb rétegeibe jutnak. Jégképző magként működnek, a felületükön kezdődik meg a kondenzáció. Ha több ilyen szemcse kerül a légkörbe, a kondenzáció több jégképző magon indulhat meg. A kialakult jégszemeket már nem tudja megszüntetni, de csökkenti a további kialakuló jégszemcsék méretét és kialakulását. (*In: Hetedik szezonját kezdi a jégkármérséklő rendszer*)

vízközépi platform: a víz középen elhelyezett mérőállomáson a Balaton vízminőségét monitorozó műszerek mellett meteorológiai műszerpark is helyet kap. A platformokat a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság telepítette, s többek között a nyíltvízi időjárási viszonyokról adnak tájékoztatást. Jelenleg négy ilyen működik a Balatonon, amelyek a viharjelző rendszernek is részei, azaz mindegyik fel van szerelve viharjelző lámpával is. Az áramellátást napelem biztosítja. (*In: Indul a tavi viharjelzési szezon*)

Altocumulus és Cirrus fibratus homomutatus
Kovács Krisztina, METÉSZ, Gárdony, 2024. április 5.
A szétterülő, átalakuló kondenzcsíkok erős magassági szélnyírásra utalnak.

Altocumulus stratiformis translucidus cavum (lyukfelhő)
Csitkovics Balázs, MET ÉSZ, Sopronhorpács, 2024. március 22.
A melléknap a túlhűlt vízcseppek jegesedése nyomán kialakult hullósávon jelenik meg.



Posztfrontális zivatarlánc érkezik a Balaton fölé
Nyitrai Balázs, Siófok, 2024. március 24.

HungaroMet
Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.

ÁPRILIS 1-TŐL VIHARJELZÉS A TAVAINKON

KÖVESSE A VIHARJELZÉST

A **WWW.MET.HU/IDOJARAS/TAVAINK** OLDALON.

TÖLTSE BIZTONSÁGOSAN IDEJÉT A BALATONON,
A VELENCEI-TAVON ÉS A TISZA-TAVON!

MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG
MMT
ALAPÍTVA 1925

Magyar Meteorológiai Társaság

A Társaság várja tagjai közé mindazokat, akik érdeklődnek a meteorológia iránt, részt kívánnak venni a Társaság rendezvényein, szívesen bekapcsolódnának tevékenységébe.

www.mettars.hu

METEOROLÓGIAI INFORMÁCIÓK ÉS ÉRDEKESSÉGEK

ELŐREJELZÉS

AKTUÁLIS, MÉRT ADATOK

ÉGHAJLAT

VESZÉLYJELZÉS, RIASZTÁS

LÉGSZENNYEZETTSÉG

HungaroMet
Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.

www.met.hu

Minden információ egy helyen az időjárásról és a meteorológiáról

HUNGAROMET NONPROFIT ZRT.