

LÉGKÖR

70. ÉVFOLYAM I. SZÁM

**A FORRÓSÁG METEOROLÓGIÁJA
ESETTANULMÁNY EGY TORNÁDÓRÓL
A FOTOVOLTAIKUS VILLAMOSENERGIA-
POTENCIÁL VÁLTOZÁSÁNAK TRENDJE
A KLIMATIKUS ENERGIA- ÉS VÍZMÉRLEG
VÁLTOZÁSA A DUNÁN
AZ AROME MODELL ADATASSZIMILÁCIÓJÁNAK
FEJLESZTÉSE
150 ÉVES A METEOROLÓGIAI VILÁGSZERVEZET**

2025. JANUÁR

22 fokos haló
Miklós Kálmánné, FelhőNézők, Szank, 2025. március 1.



Zúzmarás zalai dombok
Takács Ákos, MetNet, Zalaszabar, 2025. január 2.



LÉGKÖR

70. évfolyam 1. szám
2025. január

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:
Hlinka Károly

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, Dr. Leelőssy Ádám,
Péliné Dr. Németh Csilla, Dr. Sarkadi Noémi,
Dr. Somfalvi-Tóth Katalin, Dr. Szépszó
Gabriella, Dr. Szintai Balázs, T. Puskás Márta

Tervezőszerkesztő, grafikus: Szabó Dorottya

HORVÁTH ÁKOS, BREUER HAJNALKA, SIMON CSILLA: A forróság meteorológiája - A 2024-es nyár időjárásai okai és okozatai
Meteorology of the heat - causes and effects of the summer weather of 2024

2

HÉRINCS DÁVID, KOMJÁTI KORNÉL, KUN SÁNDOR:

A 2024. június 9-ei nyugat-magyarországi tornádós helyzet elemzése
Case study of a tornado event in western Hungary on 9 June 2024

11

KRISTÓF ERZSÉBET, KALMÁR TÍMEA: A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál változásának várható trendjei a XXI. században, globális éghajlati modellek szimulációs eredményei alapján
Trends in photovoltaic power potential changes in the 21st century based on general circulation model simulations

20

BÁDER LÁSZLÓ, SZILÁGYI JÓZSEF: A klimatikus energia- és vízmérleg változásainak vizsgálata a Duna-medencében 1961-től klímadiagram segítségével
Analysis of the changes in climatic energy and water balance in the Danube river basin from 1961 with a climatic energy diagram

28

DUICS-KOROSECZ LILLA, TÓTH HELGA, KRISTÓF ERZSÉBET:

Az AROME modell adatasszimilációjának fejlesztése további SYNOP adatokkal
Extension of AROME/HU model data assimilation with additional SYNOP data

34

LÁBÓ-SZAPPANOS ESZTER, DOBI ILDIKÓ: A Meteorológiai Világszervezet 150 éves története - megemlékezés az ENSZ-hez való csatlakozás 75-dik évfordulója alkalmából
150 years of history of the World Meteorological Organization

42

ZSIKLA ÁGOTA, SZILÁGYI ESZTER, KURCSICS MÁTÉ:

A 2024. évi tavi viharjelzési szezonról

49

SZOLNOKI-TÓTIVÁN BERNADETT: 2024 őszének időjárása

56

ERDŐDINÉ MOLNÁR ZSÓFIA, KOVÁCS ATTILA VIKTOR: 2024 őszének időjárása agrometeorológiai szempontból

62

KÖNYVAJÁNLÓ

64

HÍREK

66

A MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG HÍREI

67

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.



A forróság meteorológiája - A 2024-es nyár időjárási okai és okozatai

Horváth Ákos, Breuer Hajnalka, Simon Csilla

HungaroMet Nonprofit Zrt. Siófoki Viharjelző Obszervatórium, horvath.a@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2025.1.1

Globális skálán tekintve 2024 nyara volt a mérések kezdete óta a legmelegebb nyár, és ez Magyarország időjárásában is szélsőségekben nyilvánult meg. A valaha mért ötödik legmelegebb júniust a legmelegebb július követte. 2024 augusztusa a mérések kezdete óta második legmelegebb volt, mindössze 0.01 fokkal lemaradva 1992 augusztusától. A júliusi és augusztusi forróságot hosszú száraz időszakok kísérték. A szeptemberbe áthúzódó nyarat Közép-Európában egy rendkívül csapadékos időszak zárta le, súlyos árvizeket okozva. A hosszú száraz és rövid nedves, de minden esetben az átlagosnál melegebb időjárási periódusokkal lefedett nyárnak jól kirajzolódó globális háttere van, amely a nagytérségű cirkulációban beállt anomáliákra vezethető vissza. Jelen írás egyrészt a szélsőségek mögött álló cirkulációs hátteret, másrészt annak tükrében a nyári hőhullámok időjárási sajátosságait próbálja bemutatni.

Meteorology of the heat - causes and effects of the summer weather of 2024

On the global scale, the summer of 2024 was the hottest summer since measurements began, and this contained extremes in Hungary's weather, too. The fifth warmest June on record was followed by the warmest July ever. August 2024 was the second warmest, just 0.01 degrees behind August 1992. The heat in July and August was accompanied by long dry periods. The summer in Central Europe, which lasted into September, ended with an extremely rainy period, causing severe floods. The summer, covered by long dry and short wet, but warmer than average weather periods in all cases, has a well-defined global background, which can be traced back to anomalies in the large-scale circulation. This paper presents the circulation background behind the extremes on the one hand, and the weather characteristics of summer heat waves in light of it on the other.

A szárazság és a nagy csapadék közös háttere

A globális légköri cirkuláció egy hatalmas hőerőgépek tekinthető, amely az alacsonyabb szélességi övekben meghatározó napsugárzás (rövidhullámú besugárzás)

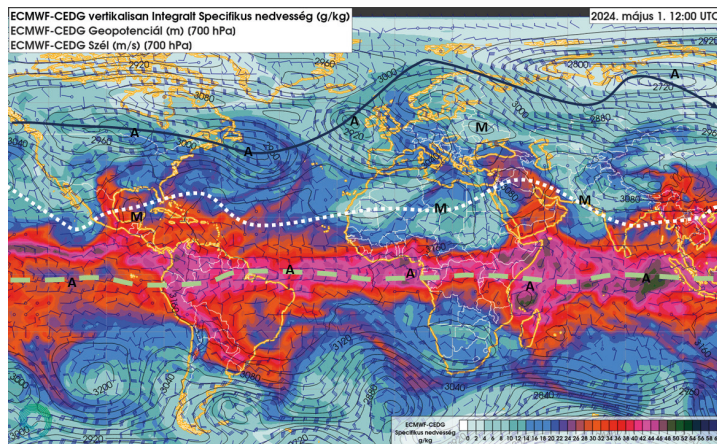
okozta energiatöbblet, illetve a magasabb szélességi körökön domináló kisugárzás (hosszúhullámú kisugárzás) hajt meg. Az így létrejövő hőmérsékletkülönbség kiegyenlítését szolgáló szélrendszereket azonban nagymértékben befolyásolja a légáramlásokkal együtt mozgó víz jelenléte, illetve annak fázisváltozása

(Holton and Hakim, 2013) A déli óceánokról elpárolgó víz – gőzzé alakulva – maga is energiát szállít, amely a magasabb földrajzi szélességeken koncentráltan kicsapódva látens hő formájában felfűti a légkört, ilyen módon többek között hozzájárul a ciklonok erősödéséhez (Robert Houze, 2014; Demirdjian et al., 2023). A víznek viszont meghatározó szerepe van a rövidhullámú besugárzás szabályozásában, hiszen a kondenzáció nyomán létrejövő felhőzet a napsugárzás egy jelentős részét visszaveri a világűrbe. A felhőképződéshez azonban a vízgőz kondenzációja szükséges, és minél melegebb a légkör, annál több vízgőzt képes felvenni telítődés nélkül (Wan et al., 2024). A térségünkben tapasztalt szélsőségesen száraz időjárásban nagy szerepe van annak, hogy a melegedő levegő több nedvességet tud felvenni, mint amennyit a felszín párologtatni képes. A párologás mértéke ugyanis közel lineárisan változik a hőmérséklettel, míg a légkör vízgőz megtartó képessége tízes hatvány szerint növekszik (Holton and Hakim, 2013) [1]. Mindez azzal jár, hogy melegebb légtömegben nehezebben alakul ki a felhőzet, illetve a meleg, száraz levegő nagyon gyorsan kiszárad a felszínt. A nyári időszakban a telítetlen meleg levegőben felhőzet hiányában növekszik a besugárzás, amely tovább növeli a levegő hőmérsékletét, így még nehezebben alakul ki a felhőzet, beindul egy pozitív visszacsatolás [2] (Schumacher et al., 2022) Ugyanakkor ez fordítva is működik, mivel, ha egyszer mégis hűlni kezd a nagy nedvességgel rendelkező meleg légtömeg – legkésőbb ősszel –, akkor jóval több csapadékot képes produkálni. A csapadékképződés látens hő felszabadulásával is jár, segítve a ciklonok kialakítását, a ciklonokban létrejövő összeáramlás pedig még több nedves levegőt koncentrálnak egy kisebb területre, így könnyebben létrejönnek az árvíz okozó ciklonok (Rotunn and Emanuel, 1987). Mindez kisebb skálán, a zivatarok skáláján is megmutatkozik: melegebb levegőben nehezebben jönnek létre a konvektív rendszerek, azonban, ha egyszer kialakulnak, akkor nagyobb energiával rendelkeznek, vagyis hevesebbek lesznek.

2024 nyarán a globálisan felmelegedett légkör kevesebb felhőzetet produkált az északi féltekén, ami tovább növelte a besugárzás mértékét. Részben ennek hatására is Európában jelentős hőhullámok alakultak ki, a tengerek felszíne is jobban felmelegedett és egyidejűleg megnövekedett a telítetlen légkörben a vízgőz mennyisége. Az ősszel kezdődő lehűlés során az így felgyülemlett légköri energia felszabadulása segítette a mérsékelt égövben létrejövő ciklonok, illetve a trópusi hurrikánok kialakulását (Shapiro and Keyser, 1990). A magasabb hőmérsékleten zajló vízkörforgás egyaránt felelős a szárazsáért és a heves csapadékért (Kim et al., 2024).

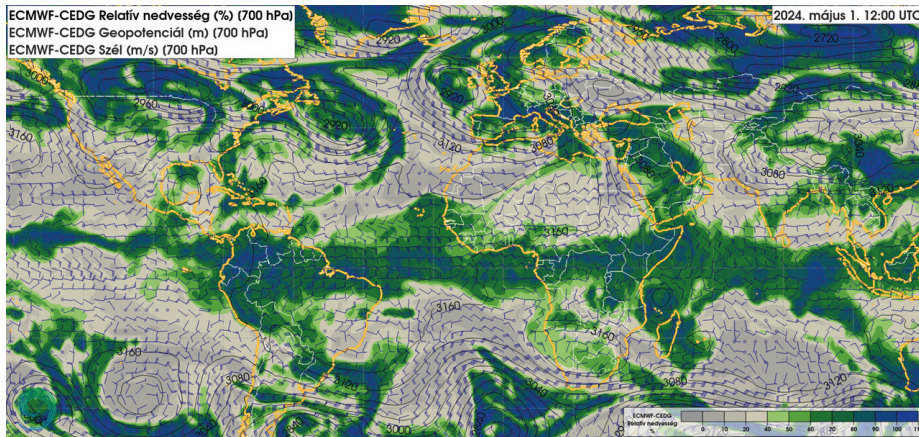
A globális cirkulációs körülmények

A globális cirkuláció oldaláról tekintve Európa időjárását döntően a nyugati szelek övének (vagy más néven a Rossby-övének) az áramlási körülményei határozzák meg. Ebben a zónában a periodikusan átvonuló ciklonok, illetve a hozzájuk tartozó időjárási frontok, illetve a köztük felépülő anticiklonok a legjellemzőbb légköri rendszerek. Ettől délre elterülő mérsékelt övi sivatagi zóna már a Hadley-cella cirkulációs rendszeréhez tartozik, vagyis a trópusi feláramlási zóna, illetve a sivatag feletti leáramló mozgások áramlási rendszeréhez (Wallace et al., 2023).

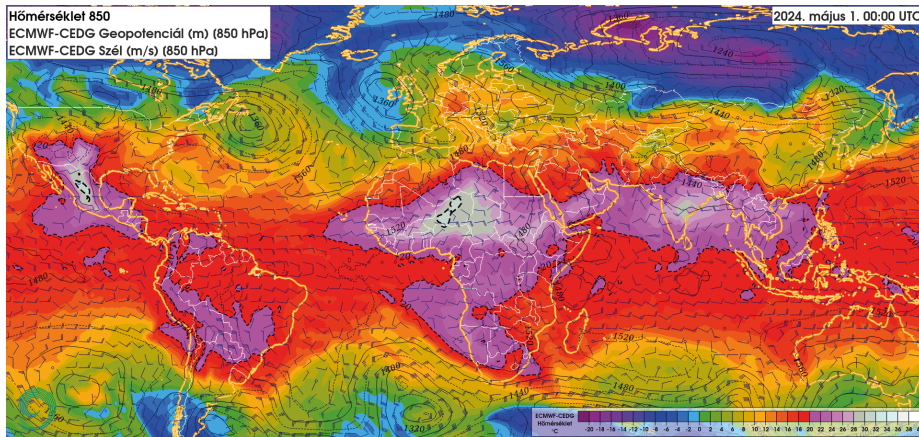


1.a. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.05.01. 12 UTC-
kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek az integrált specifikus nedvesség eloszlását, a folytonos vonalak a 700 hPa geopotenciál értékeit, a szélvonalak a 700 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szürke szaggatott vonal az ITCZ hozzávetőleges helyzetét, a fehér pontozott vonal a tartós, nagy területet érintő leáramlás középvonalát, a fekete vonal a Rossby öv tengelyét jelzi.

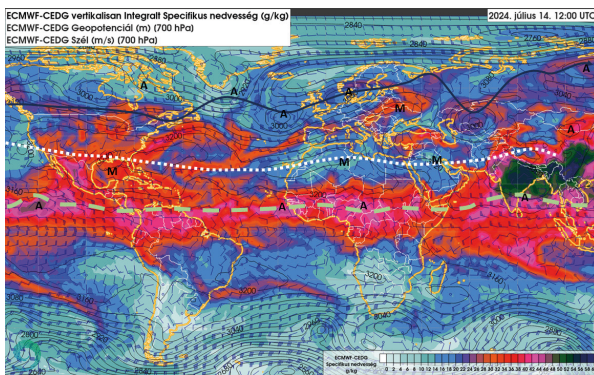
Mindez jól látható az alsó troposzféra nedvesség eloszlásból a trópusok feletti erősen nedves, illetve a sivatagok feletti erősen száraz területek szerint (1.a. ábra). Az ábrán a trópusi összeáramlási zóna (ITCZ) kijelölése a 850 hPa nyomásszinti konvergencia alapján történt. A leszálló mozgások övének tengelye ugyancsak a 850 hPa-os nyomási szint trópusokat övező divergens területei alapján került meghatározásra. A Rossby-öv tengelye a mérsékelt égövi alacsony nyomású területek, illetve ciklonok összekötésével lett kijelölve. Az alkalmazott ábrázolási mód azonban csak nagyvonalú, vannak területek, ahol az egyes zónák nem határozhatóak meg egyértelműen. A légkör egyfajta integrált nedvességi eloszlását a 850, 700 és 500 hPa nyomásszintek specifikus nedvességének összegével lehet szemléletesen bemutatni. A vezető áramlást a 700 hPa szél és áramlási viszonyai mutatják.



1.b. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.05.01. 12 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek a 700 hPa relatív nedvességét mutatják, a folytonos vonalak a 700 hPa geopotenciál mezőjét, a szélászlók a 700 hPa szint szélviszonyait ábrázolják.



1.c. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.05.01. 00 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek a 850 hPa hőmérsékletét, a folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciál mezőjét, a szélászlók a 850 hPa szint szélviszonyait ábrázolják.

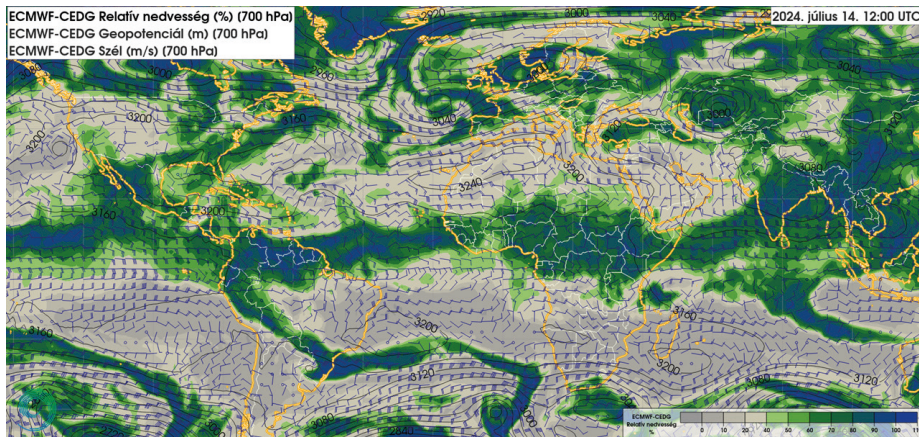


2.a. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.07.14. 12 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek az integrált specifikus nedvesség eloszlását, a folytonos vonalak a 700 hPa geopotenciál értékeit, a szélászlók a 700 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szürke szaggatott vonal az ITCZ hozzávetőleges helyzetét, a fehér pontozott vonal a tartós, nagy területet érintő leáramlás középvonalát, a fekete vonal a Rossby-öv tengelyét jelzi.

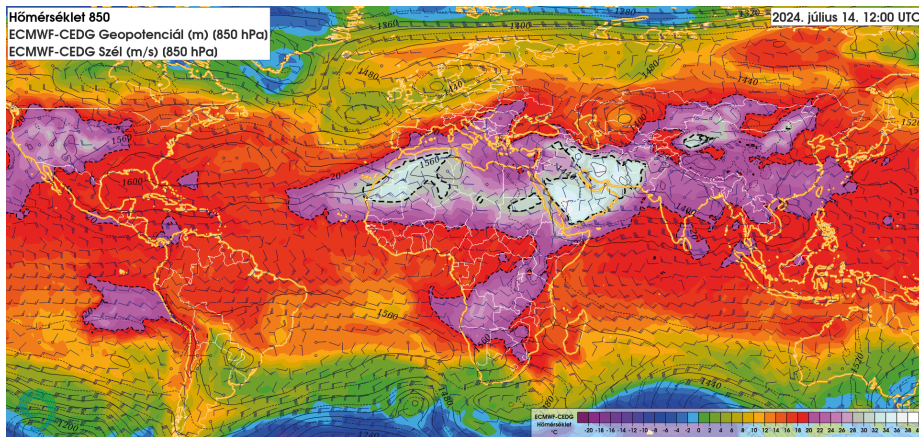
Az 1.a. ábra alapján a nyári félév elején a Rossby-öv, illetve a trópusi öv abszolút nedvességi mezői leginkább a Szahara felett válnak szét erősen. Ugyanakkor látható, hogy a Rossby-övben jóval kevesebb az abszolút nedvesség a trópusi területekhez képest, ami az alacsonyabb hőmérséklet egyenes következménye. A relatív nedvesség eloszlását tekintve (1.b. ábra) már az egész északi hemiszférán látható a nyugati áramlási öv és az ITCZ körüli térség elkülönülése. A Rossby-övben a párolgás hosszabb időtartamot tekintve nem tudja pótolni a kihulló csapadékot, ezért időnként a trópusokról kap "betáplálást". Ilyen trópusokról induló nedves szállítószalag figyelhető meg leggyakrabban az Atlanti-óceán közepén (Gimeno Presa et al., 2020). Az 1.a. és 1.b. ábrán is látható az Arab-félsziget felett északra felnyúló nedvességi híd, amely rendkívülinek számít és kapcsolatba hozható a pár nappal korábbi Perzsa-öböl menti árvizekkel. A globális hőmérsékleti viszonyokat tekintve látható, hogy az északi féltekén az alsó troposzférában a legmelegebb területek a Szahara fölött találhatók. A keleties passzátszéllel a forró sivatag felett áramló levegő nyugat felé haladva egyre melegebbé vált (1.c. ábra). A forró levegő ilyen módon

való felhalmozódása hozzájárult a későbbiekben Európát is elérő hosszán tartó hóhullámok kialakulásához.

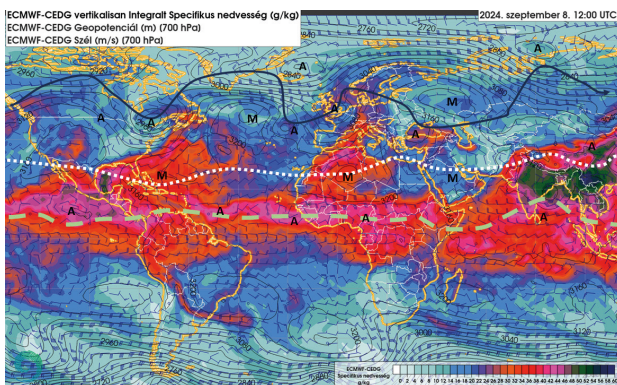
A nyár közepére a trópusi összeáramlási öv északra toltódott, ennek megfelelően a Hadley-cella leszálló ága is a Földközi-tengerig terjeszkedett (2.a. ábra). Az északi féltekén a magasabb hőmérséklet hatására a párolgás mértéke is növekedett, azonban az egyre melegedő légkör ezt a nedvességet telítetlen formában képes volt felvenni, így az alacsony relatív nedvességű területek nagysága egyre nagyobb lett (2.b. ábra). Ez főként a Földközi-tenger medencéjét érintette, ahol a délről terjeszkedő sivatagi áramlások mellett a felhőzet hiányában zavartalan napsütés is növelte a forróságot (2.c. ábra). A földközi-tengeri hőség a Kárpát-medence időjárására is erős hatással volt, ebből a térségből jövő hóhullámok voltak a közvetlen kiváltói a magyarországi forró és száraz időjárás



2.b. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.07.14. 12 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek a 700 hPa relatív nedvességét mutatják, a folytonos vonalak a 700 hPa geopotenciál mezőjét, a szélzászlók a 700 hPa szint szélviszonyait ábrázolják.



2.c. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.07.14. 12 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek a 850 hPa hőmérsékletét, a folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciál mezőjét, a szélzászlók a 850 hPa szint szélviszonyait ábrázolják.



3.a. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.09.08. 12 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek az integrált specifikus nedvesség eloszlását, a folytonos vonalak a 700 hPa geopotenciál értékeit, a szélzászlók a 700 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szürke szaggatott vonal az ITCZ hozzávetőleges helyzetét, a fehér pontozott vonal a tartós, nagy területet érintő leáramlás középvonalát, a fekete vonal a Rossby-öv tengelyét jelzi.

periódusoknak. A globális hőmérséklet területi eloszlásában ugyancsak megfigyelhető a nyáron szokásos kettős maximum kialakulása: a saharai mellett az Arab-félsziget és Perzsa-öböl térsége is rendkívül felmelegedett. A hosszan tartó hazai augusztusi hőhullámban ez a második meleg centrum is szerepet játszott, így Európa a két sivatag forró harapófogójába került.

A nyár végén az északi félteke hőmérséklete is csökkenni kezdett, ami jelentős fordulatot eredményezett a cirkulációs viszonyokban. Az egész nyáron növekvő abszolút nedvesség mellett a hűlés miatt a légkör kezdett telítetté válni. A Hadley-cella leszálló ága Afrika felett erősen meggyöngült és felhalmozódott meleg, trópusi levegő a Szahara felett feláramlott Európa-főlé (3.a. és 3.b. ábrák). Ez a nedves meleg szállítószalag jelentős csapadékot okozott a Száhel-övezetben is, valamint meghatározó szerepet játszott a Közép-Európában rendkívüli árvíz okozó Boris-ciklon kialakulásában. A hurrikán szezon beindulásával a trópusi viharok is számottevő nedvességet kezdtek szállítani a nyugati szelek övébe, aminek következtében az atlanti ciklonok aktivitása is megnövekedett.

Az alsó troposzféra (850 hPa), hőmérsékleti mezőjének globális alakulását a nyár folyamán az 1. videón, az integrált nedvességet a 2. videón lehet követni. A fenti paraméterek részletesebb, euro-atlanti kivágaton a 3. videón illetve a 4. videón láthatóak.

Hőhullámok a Kárpát-medencében

A térség hőhullámjainak alakulása jól követhető a felszín közeli szabad légkör, a 850 hPa (kb. 1500 m) magassági szint hőmérsékletének ábrázolásával (4. ábra). Amennyiben nyáron a 850 hPa hőmérséklete 16 fok fölé emelkedik, akkor nagy valószínűséggel sokfelé 30 fok fölött alakul a legmagasabb nappali hőmérséklet, azaz teljesül a hőségnap kritériuma.

1. videó



2. videó

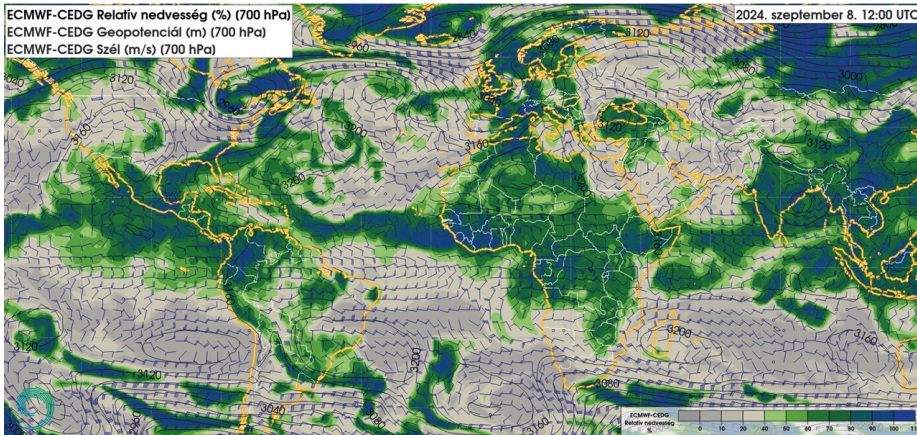


3. videó



4. videó





3.b. ábra. Globális cirkulációs helyzet 2024.09.08. 12 UTC-kor az ECMWF analízise alapján. A színezett területek a 700 hPa relatív nedvességet mutatják, a folytonos vonalak a 700 hPa geopotencial mezőjét, a szélzászlók a 700 hPa szint szélviszonyait ábrázolják.

egy nagyon hosszú, augusztus 11-től szeptember 10-ig tartó meleg periódus alakult ki.

Az első hőhullám júniusban (június 18–23.)

Az első jelentősebb hőhullám június közepén érkezett az országba. Sok tekintetben klasszikus meleg időjárás helyzetnek számított az atlanti partoknál lévő ciklon előoldalában feláramló afrikai eredetű légtömeg (5.a. ábra). A mediterrán térség zavartalan napsütésének hatására Nyugat-Afrikától Közép-Európa fölé sodródó levegő nem vesztett a magas

hőmérsékletéből, a magyarországi területeket a 20 fokos izoterma is elérte. A Nyugat-Európa felett hullámzó hidegfront több napig szinte egy helyben maradt, így a délnyugati áramlási rendszer is tartósan fennmaradt, nagy mennyiségű sahari eredetű port szállítva a Kárpát-medence térségébe. A légszennyezési küszöbértéket is meghaladó por a Napot is elhomályosította, ami az 5. videón is jól követhető.

5. videó



Az első hőhullámot június 22-én megérkező hidegfront zárta (5.b. ábra), amely a keleti országrészben pusztító zivatarrendszereket okozott, helyenként rendkívül intenzív csapadékkal (6. videó).

6. videó



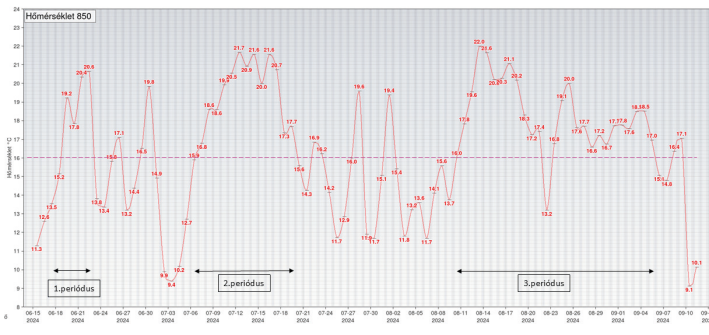
A hidegfront előterében a déli és a keleti ország-részben – ahová a lehűlés csak később érkezett meg a nap folyamán – a hőmérséklet még 30 °C fölé emelkedett, ezáltal új napi legmagasabb maximum-hőmérsékleti rekordot regisztráltak: Derekegyháza 37,7 °C-ig melegedett a levegő hőmérséklete, ami 0,1 °C-kal haladta meg a korábbi rekord értékét. A hidegfront érkezésével kialakuló intenzív csapadékterékenység hatására június 22-én új napi csapadékrekord is született, Tokaj állomáson 121,3 mm-t mértek [7].

Meg kell még említeni a június utolsó napján kialakult rendkívüli meleget, amit rövid életű, de nagyon intenzív Szahara felől jövő áramlás hozott létre. Ezúttal egy gyorsan áthelyeződő frontrendszer előtt sodródott az afrikai forró levegő viszonylag keskeny sávja Közép-Európa fölé és a 20 fokos 850 hPa hőmérséklete ismét elérte Magyarország területét (6. ábra). A dinamikus zajló időjárási folyamatok során az ismét megjelenő sahari port a fronttal érkező heves zivatarok söpörték ki (7. videó).

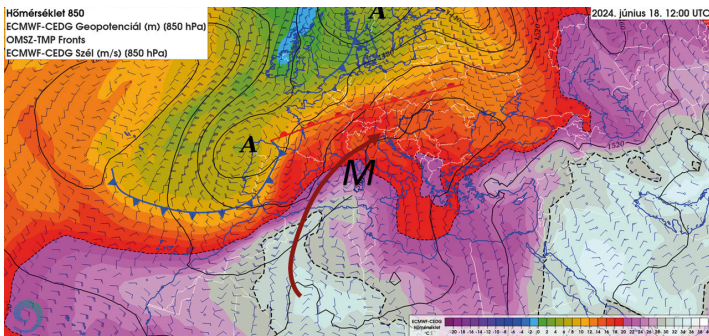
7. videó



A rövid ideig tartó, de intenzív melegadvekiótiót jól tükrözi, hogy június 30-án a napi középhőmérséklet országos átlaga 26,73 °C lett, ami 5,87 °C-kal meghaladja

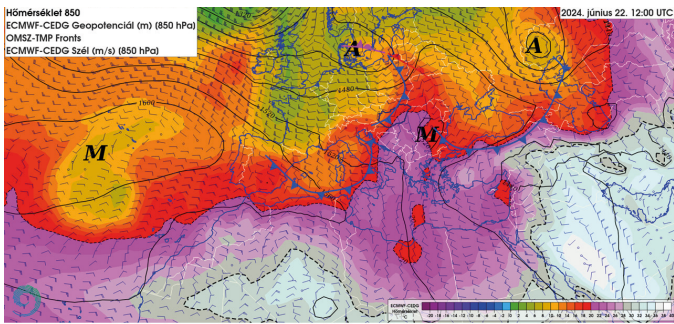


4. ábra. A 850 hPa nyomásszint hőmérséklete Baja felett az ECMWF analízise alapján. A hőségperiódusok a 16 fok feletti értékek alapján lettek definiálva.

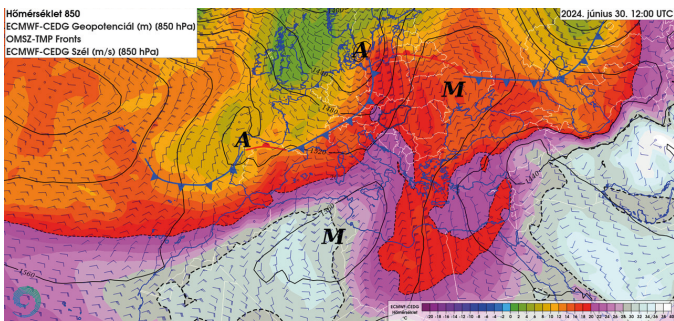


5.a. ábra. Időjárási helyzet 2024.06.18. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotencialis magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélzászlók a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermákat jelölik.

Ha az egy-két napos rövid időszakoktól eltekintünk, akkor 3 fő periódust különböztethetünk meg. Az első hőhullám június 18–22. között zajlott, majd ezt követte a több hőmérsékleti csúccsal rendelkező július 7–20. közötti forró időszak, végül a nyár második felében



5.b. ábra. Időjárási helyzet 2024.06.22. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélvonalak a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermát jelölik.

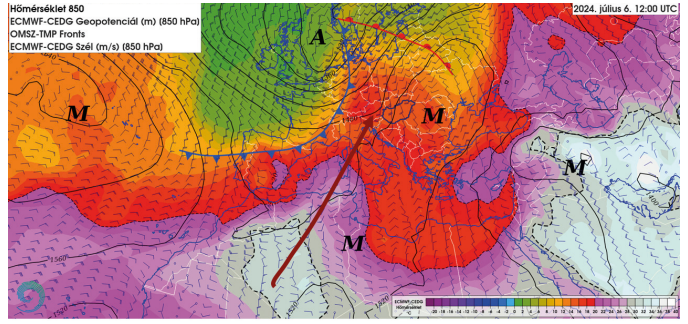


6. ábra. Időjárási helyzet 2024.06.30. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélvonalak a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermát jelölik.

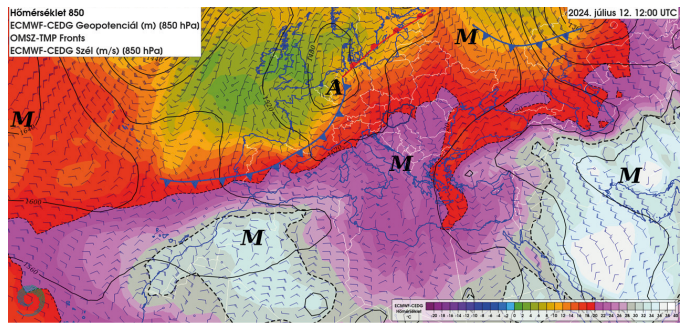
az ugyanerre a napra vonatkozó, 1991–2020-as klíma-átlagot. Budapest belterület állomáson a júniusi hóhulám az alkalmazott (Simon Cs., 2021) definíció alapján 13 napig (június 18-tól 30-ig) tartott, amely épp június 30-án tetőzött 28,6 °C-os középhőmérséklettel. A nyár folyamán korán megjelenő hőségperiódusok hozzájárultak ahhoz, hogy a 2024-es június a HungaroMet mérései alapján az ötödik legmelegebbnek adódott 1901 óta: országos átlagban 21,6 °C-os középhőmérséklete 1,8 °C-kal haladta meg az 1991–2020-as éghajlati normál értékét [8].

A júliusi legmelegebb periódus (július 6–17.)

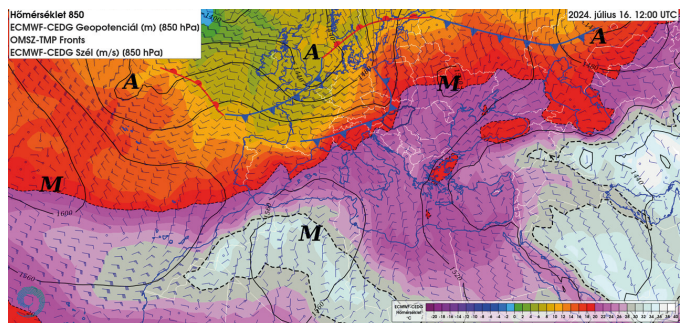
A magas napállás és a már felmelegedett légkör együttes hatására általában júliusban alakul ki a nyár legforróbb periódusa, és ez történt 2024-ben is. Egyrészt a száraz, felhőmentes légkörben Észak-Afrikában, majd a mediterrán térségben különösen felmelegedett a levegő. Másrészt a Rossby-öv légörvényei,



7.a. ábra. Időjárási helyzet 2024.07.06. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélvonalak a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermát jelölik.



7.b. ábra. Időjárási helyzet 2024.07.12. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélvonalak a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermát jelölik.



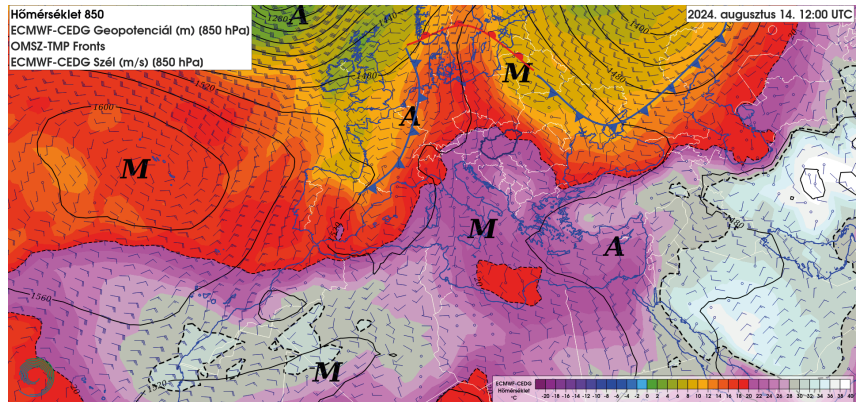
7.c. ábra. Időjárási helyzet 2024.07.16. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélvonalak a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermát jelölik.

illetve a hidegfrontok nem tudtak a déli területek felé betörni, mivel a száraz levegővel keveredve gyorsan kiszáradtak, a napsütés hatására pedig rövid időn belül felmelegedett az alsó légrétegekben beszívargó hideg levegő. Ennek az lett a következménye, hogy a ciklonok öve északabbra húzódtott, és a légörvények előoldali

áramlásaival az afrikai és mediterrán légtömegek folyamatosan sodródtak Közép-Európa fölé (7.a. ábra). Ez a nyitott melegszektor okozta délies áramlás jellemezte az egész időszakot, amikor a 850 hPa hőmérséklete több napon keresztül 20 fok fölött volt a magyarországi területek felett (7.b. ábra). A meleg időszak azonban egyáltalán nem volt eseménymentes, több alkalommal is előfordult, hogy egy-egy gyenge hidegfront elérte a Kárpát-medence északnyugati területeit, azonban legfeljebb néhány zivatart, vagy átmenetileg északnyugatra forduló szelet tudott produkálni. A Németország, illetve a Baltikum térségében hullámozó frontrendszer előtt kialakult az ilyenkor szokásos viharzóna, az a terület, ami a korábbi években tőlünk délre, majd tavaly többször felettünk jött létre és okozott heves konvektív viharokat [3][4][5]. A rendkívül meleg időszaknak végül egy betörő hidegfront vetett véget, amely főleg az ország déli és keleti területein okozott heves zivatarokat, zivatarrendszereket (7.c. ábra).

A júliusi hóhullámos időszak alatt sorra dőltek meg nem csak a napi legmagasabb maximum-, hanem a napi legmagasabb minimum-hőmérséklet rekordjai is. Július 9. és 17. között minden nap történt rekorddöntés; hét új napi országos és két fővárosi melegrekord született. Érdemes kiemelni, hogy nyolc napon a legmagasabb minimum-hőmérsékletre vonatkozóan is új rekordokat jegyezhetünk fel – tehát ebben az időszakban a délutáni forróságot követően az éjszakák sem hoztak érdemi felfrissülést. A hóhullám során a legmagasabb napi maximum-hőmérsékletet (41,6 °C-ot) Kelebián mérték július 16-án, míg a legmagasabb hajnali értéket, 27,4 °C-ot Pécs Egyetem állomáson regisztrálták július 17-ére virradó éjszaka. A teljes hónap középhőmérsékletének országos átlaga 24,53 °C volt, ami szintén rekordot jelentett, hiszen a mérések kezdete óta az ideiglett a legmelegebb július Magyarországon, 3 °C-kal meghaladva az 1991–2020-as átlagot. A forrósághoz aszály is társult, ugyanis országos átlagban vett 22,2 mm-es csapadék összegével a hetedik legszárazabb július lett 1901 óta [9].

A hónap folyamán hóhullám sújtotta a Mediterráneumot is, az Ibériai-félsziget középső táján napokon keresztül 40 °C feletti csúcsertékek fordultak elő. Magyarországon kívül Görögországban,

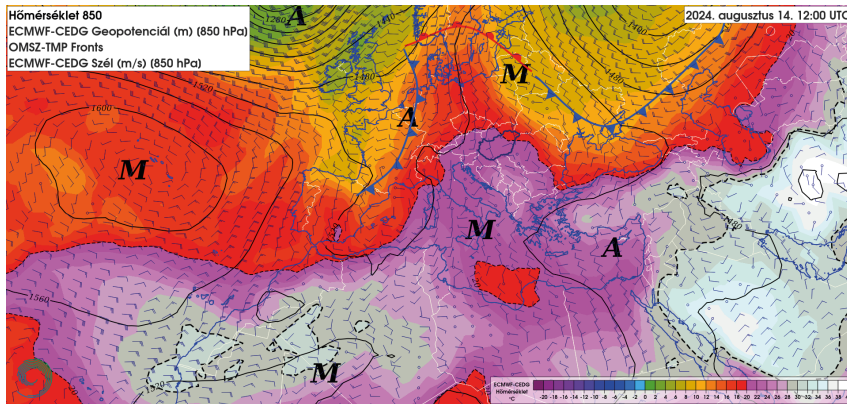


8. ábra. Időjárási helyzet 2024.08.14. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélászlók a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokos izotermákat jelölik.

Szlovéniában, Horvátországban és Bulgáriában is rekordmeleg júliust regisztráltak [10]. Európa északi részén, Finnországban az északi szélesség 70. fokán fekvő Utsjoki Kevo állomáson több napon keresztül 30 °C feletti maximum-hőmérsékletet mértek, ezáltal a déli, part menti területek helyett Lappföldön volt a legmelegebb az országban.

Az augusztusi hosszú meleg periódus (augusztus 6. – szeptember 4.)

A nyár harmadik jelentős meleg periódusa rendkívül hosszú ideig tartott, és a meteorológiai háttér is sokban különbözött az előzőektől. Egy rövid időszaktól (augusztus 21–22.) eltekintve végig 16 fok felett volt a 850 hPa nyomási szint hőmérséklete, azonban ezúttal nem csak a saharai eredetű levegő szerepe volt a meghatározó. A hóhullám csúcán (augusztus 14.) a meleg gerinc kialakulásánál a nyugatról közeledő hidegfront előtt sodródó meleg levegő mellett az északkeletről jövő hidegfront előtt torlódó és Kis-Ázsia irányából jövő légtömegek is szerepet játszottak (8. ábra). Átmeneti rövid lehülés és egy – augusztus 20-t is meghatározó – zivataros időszakot követően a Kárpát-medencében ismét gyorsan visszamelegedett a levegő. Az időszak második felében a hőség elhúzódásában egyre nagyobb szerepet kapott a kelet-délkeletről jövő meleg levegő, amely az Arab-félsziget, illetve Szíria térségéből, a felforrósodott Kis-Ázsián keresztül érkezett a Kárpát-medence fölé (9. ábra). A szeptember első napjaiig elhúzódó melegnek egy markáns lehülés vetett véget, amely a meleg levegőben tárolt nedvesség kondenzációjához és a rendkívüli árvizet okozó Boris ciklon kialakulásához vezetett [6].



8. ábra. Időjárási helyzet 2024.08.14. 12:00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa geopotenciális magasságát, a színezett területek a 850 hPa nyomási szint hőmérsékletét, a szélvonalak a 850 hPa nyomási szint szélviszonyait mutatják. A szaggatott vonalak a 20, illetve 30 fokal izotermákat jelölik.

Az augusztus elején kezdődő hőségperiódus során is sok új hőmérsékleti rekord született. Négy napon dőlt meg a legmagasabb maximum-hőmérséklet országos rekordja, ezek közül a legmagasabb értéket, $40,7\text{ °C}$ -ot augusztus 13-án, Kelebián mérték. Ennek a hőhullámnak a jelentősége abban rejlett, hogy éjszakánként egyre kevésbé tudott felfrissülni a levegő – 12 napon regisztráltak új országos legmagasabb napi minimum-hőmérsékleti rekordot, amelyek közül a legmagasabb értéket ($27,7\text{ °C}$ -ot) Pécs Egyetem állomáson mérték augusztus 17-ére virradó éjszaka [11]. Az augusztusi középhőmérséklet a Dél-Alföldön néhol a 26 °C -ot is meghaladta, az országos átlag pedig $24,53\text{ °C}$ -nak adódott (vagyis megegyezett a júliusi középhőmérséklettel). Ezzel az idei augusztus a második legmelegebb lett 1901 óta, mindösszes $0,01$ fokkal lemaradva 1992 augusztusától, $3,4\text{ °C}$ -kal meghaladva az 1991–2020-as átlagot [12]. A szeptember elejére is átnyúló hőhullám Szeged külterület állomáson az alkalmazott kritériumok alapján időtartamát és intenzitását (utóbbit a napi középhőmérsékletek 25 °C feletti hőösszegével fejezzük ki) tekintve is rekordot döntött: 32 napig tartott, és $68,5\text{ °C}$ -os intenzitás értékkel rendelkezett.

Következtetések

A 2024-es hazai forró nyár kialakulásának 3 fő okát lehet megjelölni.

Egyrészt szerepet játszott az az öngerjesztő folyamat, amely során a már kezdetben is meleg, majd tovább melegedő levegő több nedvességet képes felvenni, mint amennyi a felszíni párolgás során rendelkezésre áll. Ennek következtében a nyár kezdetén a gyorsan melegedő légkörben csökken a felhőzet, még több

lesz a napsugárzás és ez tovább melegeíti a légkört.

Másrészt a fenti folyamat elsősorban a trópusi és sivatagi övet meghatározó Hadley-cellára is hatással volt, azaz arra a cirkulációs rendszerre, amely a trópusokon a levegő feláramlását, a sivatagi övben pedig a kompenzáló leáramlást hozza létre. A gyorsuló kiszáradás, illetve melegedés a cella sivatagi, azaz leszálló ágát erősítette. A Hadley-cella leszálló ágára jellemző magasnyomású területek a Földközi-tenger térségébe húzódtak, a sivatag irá-

nyából nem csak vissza a trópusok felé, hanem északi irányba is gyakran elmozdultak a légtömegek, létrehozva Európában a hőhullámokat.

A harmadik okként a nyugati szelek övének, a Rossby-övények az északabbra húzódását lehet megjelölni, ami ugyancsak következménye az első két hatásnak. A Hadley-cella megerősödő leáramlási öve erőteljesen elszigetelte a trópusi és a nyugati szelek övét, így a trópusi nedvesség a kontinens fölött nem tudott északra feljutni, ezzel jelentősen csökkent a ciklonok aktivitása.

A nyár folyamán a légkörben felhalmozódott, de telítetlen állapotban lévő nedvesség alacsonyabb hőmérsékletű légtömeg érkezésével (pl. hidegbetörés) gyors kicsapódásnak indul, amely jelentősebb csapadékhulláshoz vezet. Erre volt példa a szeptember elejei közép-európai árvíz okozó ciklon is.

Végső következtetésként elmondható, hogy a magasabb hőmérsékleten zajló légköri vízforgalom a hosszan tartó forró és száraz, valamint a rövidebb, de intenzív csapadékos időjárási helyzetek kialakulásának egyaránt kedvez. Az ilyen jellegű szélsőséges időjárásra 2024 nyara jó például szolgál.

Irodalomjegyzék

- Demirdjian R., Doyle J.D., Finocchio P.M. and Reynolds, C.A., 2023. Preconditioning and Intensification of Upstream Extratropical Cyclones through Surface Fluxes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 80(6), 1499-1517. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0251.1>
- Gimeno Presa, L., Vázquez, M., Eiras Barca, J., Sorí, R., Stojanovic, M., Algarra, I., Nieto, R., Ramos, A.M., Durán Quesada, A.M. and Dominguez, F., 2020: Recent progress on the sources of continental precipitation as revealed by moisture transport analysis. *Earth-Science Reviews*, 201,

103070. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103070>
- Holton J., and G. Hakim, 2013: An Introduction to Dynamic Meteorology, *International Geophysics Series*, Vol. 88. 5th ed., Elsevier Science, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374266-7.00011-1>
- Houze R. J., 2014: Cloud Dynamics, *International Geophysics Series*, Vol. 104. 2nd ed., Elsevier Science, 496 pp., <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374266-7.00011-1>
- Kim S., Wasko C., Sharma A. and Nathan R., 2024.: The role of regional water vapor dynamics in creating precipitation extremes. *Journal of Hydrology X*, 24, p.100181. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2024.100181>
- Rotunno R., and K. Emanuel, 1987: An air–sea interaction theory for tropical cyclones. part ii: Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *J. Atmos. Sci.*, 44, 542–561, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<0542:AA-ITFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<0542:AA-ITFT>2.0.CO;2)
- Shapiro 0. M. A., and D. Keyser, 1990: Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical cyclones, *Springer*, 167–191.
- Schumacher, D.L., Keune, J., Dirmeyer, P. and Miralles, D.G., 2022: Drought self-propagation in drylands due to land–atmosphere feedbacks. *Nature Geoscience*, 15(4), 262–268. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00912-7>
- Simon Cs., 2021: Höhullám kategóriák és trendek Magyarországon. Diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Budapest (témavezető: Lakatos Mónika, Kis Anna), https://nimbus.elte.hu/tan-szek/docs/MSc/2021_2/Simon_Csilla_2021.pdf
- Wallace J. M., Battisti D. S., Thompson D. W. J., Hartmann D. L., 2023: Atmospheric General Circulation, Cambridge University Press, március 2023.
- Wan N., Lin X., Pielke Sr R.A., Zeng X. and Nelson A.M., 2024. Global total precipitable water variations and trends over the period 1958–2021. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(9), 2123–2137. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2123-2024>
- [3] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3351
- [4] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3057&hir=Julius_9-i_zivataros_hidegfront_idojarasi_hattere
- [5] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3186&hir=Szupercellak_jegesovel&gl=1*1ir0txu*_ga*ODA5NTk4MzQ4LjE3MDkzMDgzMTU.*_ga_7LBGNNHF2R*MTcyOTc3NzM2MC4zOS4xLjE3Mjk3Nzc2MzguMC4wLjA
- [6] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3476&hir=A_2024_szeptemberi_rendkivuli_dunai_arviz_meteorologiai_hattere
- [7] [https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=5820&m=2&hir=Rekord_elotte_rekord_jott_vele_\(2024.06.22.\)](https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=5820&m=2&hir=Rekord_elotte_rekord_jott_vele_(2024.06.22.))
- [8] https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=3451&hir=Az_otodik_legmelegebb_junius_es_a_legmelegebb_első_felev
- [9] https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=3461&hir=A_legmelegebb_es_a_hetedik_legszarazabb_julius_1901_ota
- [10] <https://wmo.int/media/news/july-sets-new-temperature-records>
- [11] [https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=5909&m=2&hir=Orszagos_es_fovarosi_rekordok_\(2024.08.17.\)](https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=5909&m=2&hir=Orszagos_es_fovarosi_rekordok_(2024.08.17.))
- [12] https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=3467&hir=A_masodik_legmelegebb_augusztus_1901_ota

Videók

- <https://youtu.be/w97ZhM-RHsA>
- <https://youtu.be/0ixDTiAtXb8>
- <https://youtu.be/RAXyMgdfcgM>
- <https://youtu.be/b1KyGi5KOGc>
- <https://youtu.be/BGA181a9yoQ>
- <https://youtu.be/MtbQSZKD-kQ>
- <https://youtu.be/vNj3Hlw9UY8>

Internetes hivatkozások

- [1] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3200&hir=A_2022-es_rendkivuli_szarazsag_fizikai-meteorologiai_hattere
- [2] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3212&hir=A_viz_korforgalma_a_legkorben_%E2%80%93_a_rendkivuli_aszaly_idojarasi_hattere



A 2024. június 9-ei nyugat-magyarországi tornádós helyzet elemzése

Hérincs Dávid, Komjáti Kornél, Kun Sándor

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., herincs.d@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2025.1.2

2024. június 9-én késő délután két, részben összeolvadt szupercella érte el a nyugati határvidéket Ausztria felől, melyek közül az elülső, a keletebbi góc egy viszonylag hosszabb életű tornádót okozott. Ez a tornádó mind az osztrák, mind a magyar területeket érintette, és főként lakatlan területeken okozott jelentősebb károkat. Jelen tanulmányban elemezzük a szupercellák és a tornádó kialakulását elősegítő szinoptikus helyzetet, továbbá vizsgáljuk a két cella összeolvadásának szerepét a tornádógeneszis folyamatában. Emellett bemutatjuk a magyar oldalon elvégzett részletes kárfelmérések eredményeit, valamint osztrák viharvadászok és szemtanúk beszámolóit, hogy átfogó képet nyújtsunk a tornádó pusztításáról.

Case study of a tornado event in western Hungary on 9 June 2024

On 9 June 2024, a partially merged pair of supercells reached the western border of Hungary from Austria, from which the leading cell produced a relatively long-lived tornado. The vortex affected both Austrian and Hungarian areas, causing significant damage, predominantly in uninhabited regions. This study analyzes the synoptic processes that facilitated the development of the supercells and the tornado, including the role of the supercell merging in the tornado genesis. Additionally, we present the results of detailed damage surveys conducted in Hungary and incorporate reports from Austrian storm chasers and eyewitnesses to provide a comprehensive overview of the tornado's impacts.

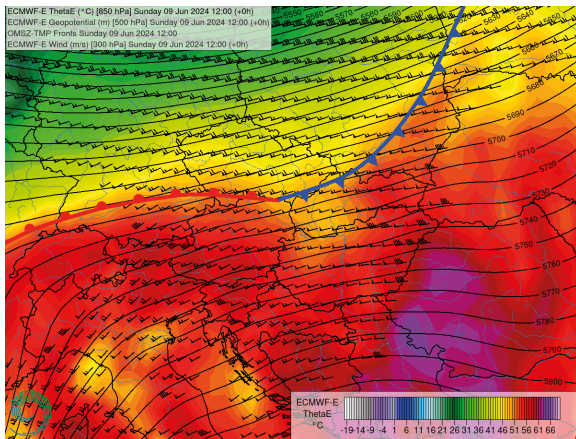
Szinoptikai helyzet

A szövegben dőlten, aláhúzással megjelölt meteorológiai fogalmak, jelenségek magyarázata megtalálható a Viharvadászok Egyesületének [1] és a MetNet [2] weboldalán.

2024. június 9-én a szupercella.hu weboldal és a Viharvadászok Egyesületének története során harmadszor sikerült Magyarországon mezociklonális

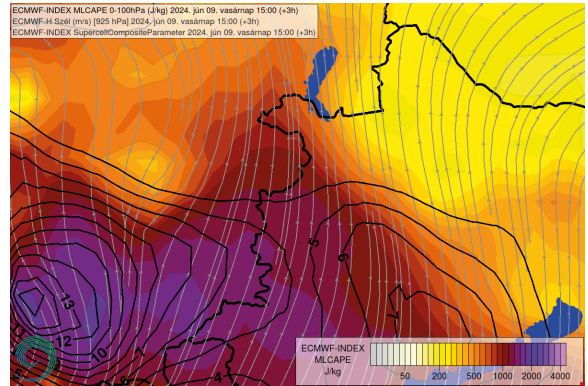
(szupercellához kapcsolódó) tornádót dokumentálni szervezett viharvadászat keretében, a 2008. május 20-ai gátéri és a 2010. augusztus 16-ai mezőkövesdi esetet követően. A légköri feltételek az ország északnyugati szegletén már előzetesen is különösen alkalmasnak látszottak erősebb szupercellák és akár tornádó(k) kialakulásához, amit jól reprezentált, hogy az európai konvenció események előrejelzésével foglalkozó European

Storm Forecast Experiment (ESTOFEX) szervezete a legmagasabb, 3-as fokozatot adta ki az osztrák-magyar határvidék térségére, nagyméretű jég, károkozó szellőkések és tornádópotenciál miatt [3]. A Viharvadászok Egyesülete nevében Tiszavölgyi Dávid által készített konvektív előrejelzésben a második legmagasabb, 2-es előrejelzési kategória került kiadásra, a mezociklonális tornádóra vonatkozóan szintén a második legmagasabb, T2-es valószínűségi fokozattal, mely közepes kialakulási esélyt jelent. Ezek a fokozatok ugyanakkor magukban hordozták azt a bizonytalanságot is, hogy a hevesebb zivatarok az országnak csak kis részét érinthetik, esetleg teljesen határainkon kívül maradnak. Idézet az előrejelzésből: „Tornádó: Az esti órákban az északnyugati, északi megyékben a viszonylag alacsony emelési kondenzációs szint, valamint a nagy 0–1 km-es szélnyírás (15 m/s) és az ehhez társuló magas helikalitás (200–250 m²/s², az északnyugati határnál néhol ez feletti értékek is felbukkannak az ECM-en), valamint erős szélfordulás az alsóbb szinteken támogatja mezociklonális tornádó létrejöttét is.” [4].



1. ábra. A közép-európai szintoptikus helyzet 2024. június 9-én 12 UTC-kor az ECMWF modell azonos futtatási idejű analízise alapján. A színezés a 850 hPa-os ekvivalens potenciális hőmérsékletet (°C-ban), a fekete vonalak az 500 hPa-os geopotenciált (m-ben), a fekete nyilak pedig a 300 hPa-os szélmezt (m/s-ban, 25 m/s felett) mutatják. Az ábrán szerepel továbbá a hullámzó frontálzóna aktuális pozíciója is.

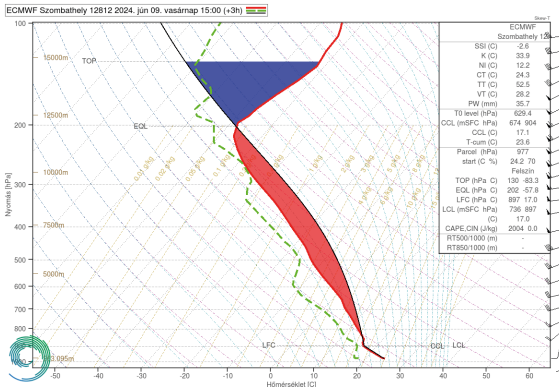
Az időjárási helyzet fő mozgatórugója ekkor egy északnyugat felől közeledő, lassú mozgású, az Alpok északi oldalán már hullámot vetett hidegfront volt (1. ábra). A hullám mentén az Alpok nyugati részén egy magassági teknő fűződött le, ami az 500 hPa-os geopotenciál izovonalai által is kirajzolódott az ábra bal alsó szélén. A teknő előoldalán délnyugat felől egy



2. ábra. Néhány konvektív paraméter az osztrák-magyar határvidék térségében 2024. június 9-én 15 UTC-kor az ECMWF modell 12 UTC-s futtatású, +3 órára vonatkozó előrejelzése alapján. A színezés a kevert rétegű konvektív hasznosítható potenciális energiát (MLCAPE, J/kg-ban), a fekete vonalak és számok a szupercella kompozit paraméter (SCP) értékeit, a szürke vonalak pedig a 925 hPa-os szélmezt mutatják.

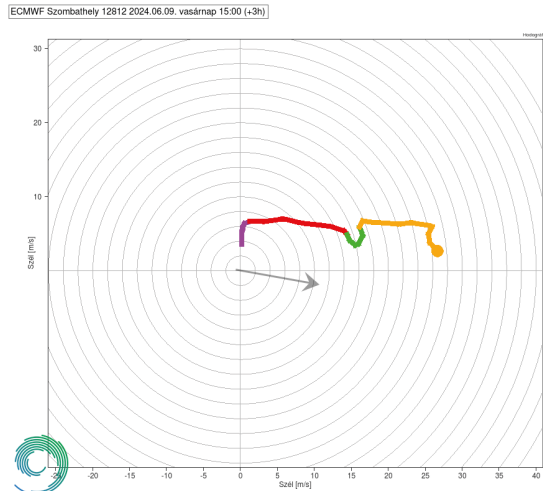
meleg, nedves szállítószalag (MNSZ) húzódott fölénk, kedvező feltételeket biztosítva zivatarok kialakulásához. A 850 hPa-os ekvivalens potenciális hőmérséklet (EPH) értékei térségünkben sokfelé meghaladták az 50 °C-ot, az Alpok déli részén helyenként a 60 °C-ot is megközelítették. A szupercellák kialakulásához szükséges szélnyírást pedig egyrészt az alacsony szinteken tapasztalható erőteljes szélfordulás, másrészt a magasban a teknő előoldalán felettünk húzódó futóáramlás biztosította, mely hatására a 400 hPa-os magassági szint felett már 25-35 m/s között alakult a szélereősség (3.a-b ábra). A front előterében már az előző napokban is képződtek zivatarok, zivatarrendszerek az Alpok felett, melyek többször elérték hazánkat. 9-ére virradó éjszaka például egy kiterjedt, intenzív zivartömb sokfelé okozott 40–50 mm körüli csapadékot a térségben, több helyi vízfolyáson jelentős árhullámot indukálva. A csapadékból eredő többletpárolgás pedig minden bizonnyal további táptalajt biztosított a délutáni szupercellák számára.

A 2. ábra néhány konvektív paraméter alakulását szemlélteti az osztrák-magyar határvidéken a Középtávú Időjárás-előrejelzések Európai Központjának (a továbbiakban ECMWF) 12 UTC-s modellfuttatása alapján, 15 UTC-kor, hozzávetőlegesen az első szupercellák kipattanásának idején. Ekkorra a térségben jelentős mértékű, 1000–2500 J/kg kevert rétegű konvektív hasznosítható potenciális energia (angol rövidítéssel MLCAPE – Mixed Layer Convective Available Potential Energy) halmozódott fel. Szemben az úgynevezett talajalapú labilitási mutatóval (angol rövidítéssel SBCAPE – Surface-Based Convective



3.a ábra. Szombathelyi Skew-T diagram 2024. június 9-én 15 UTC-kor az ECMWF modell 12 UTC-s futtatású, +3 órára vonatkozó előrejelzése alapján. A piros vonal a környezet hőmérsékletét, míg a zöld szaggatott vonal a harmatpontját (a kettő közötti különbség utal a nedvességre, minél nagyobb, annál szárazabb az adott légréteg), míg a vastag fekete vonal a felszínről indított légréteg hőmérsékleti viszonyait mutatja. A piros terület reprezentálja a konvektív hasznosítható potenciális energiát (CAPE), a kék az egyensúlyi szint (EQL) feletti stabil légállapotot jelenti a felhőzet magasságáig (TOP), míg az ábra jobb szélén az egyes légköri szintekre vonatkozó szélzászlók láthatóak.

Available Potential Energy), ez a paraméter a légkör alsó 100 hPa-os rétegének kevert hőmérsékleti és nedvességi viszonyaiból számítja a labilitást, ezáltal jobban figyelembe veszi a nappali órákban az átkeverést a határretegben. Ez a réteg pedig kulcsfontosságú a tornádóképződés szempontjából. A 3.a ábrán látható, 15 UTC-re és Szombathelyre vonatkozó Skew-T diagram alapján a labilis terület viszonylag egységes szélességű volt és nagy magasságig (~200 hPa) felnyúlt, különösebb inverziós (záró)réteg pedig nem volt azonosítható, illetve a nedvességi viszonyok is megfelelőek voltak a teljes labilis rétegben. Vagyis a légköri helyzet kedvezett az erős feláramlások létrejöttének, és a modell magas, 14–15 km-es felhőzetével számolt, mely a radaros mérések alapján meg is valósult. A konvektív kondenzációs-, vagy más néven gomolykiváltó szint (CCL – Convective Condensation Level), az emelési kondenzációs szint (LCL – Lifted Condensation Level), illetve a szabad konvekció szintje (LFC – Level of Free Convection) pedig egymáshoz nagyon közel, egységesen a 900 hPa-os szint környékén helyezkedett el, mely alacsony felhőalakok megjelenésére utalt, ami szintén kedvezhet a tornádógenesishoz. A nyírási, labilitási és nedvességi viszonyok összhangjaként a szupercella kompozit paraméter (SCP – Supercell Composite Parameter) értéke nagy területen meghaladta az 5-öt, a Grazi-medencében pedig a 10-15 közötti tartományt



3.b ábra. Szombathelyi hodográf 2024. június 9-én 15 UTC-kor az ECMWF modell 12 UTC-s futtatású, +3 órára vonatkozó előrejelzése alapján. A lila szakasz 0-1 km-re, a piros 1-3 km-re, a zöld 3-5 km-re, a sárga 5-9 km-re vonatkozik, míg a szürke nyíl a jobbra térülő (ciklonális forgású) szupercellák mozgásának megfelelő Bunkers mozgásvektor.

is elérte, ami térségünkben ritkán tapasztalható. (Megjegyzendő, hogy az amerikai GFS (Global Forecast System) modell egyes futásaiban Vas vármegye területén is jelentkezett 10 körüli értékű SCP.)

Az erőteljes alacsony szintű szélfordulás a 3.b ábrán látható, szintén 15 UTC-re és Szombathelyre vonatkozó hodográf is markánsan megmutatkozott, jellegzetes kampós alakot létrehozva. A szélviszonyoknak megfelelően a helikalitás a 0-3 km-es rétegben helyenként 400–500 m²/s², de még a 0-1 km-es rétegben is 250–300 m²/s² körül alakult. Ezek az értékek, illetve a hodográf alakja alacsony szinten intenzív örvénylő mozgás, esetleg tornádó létrejöttére utalhat szupercellákban. A térségben egy összeáramlási zóna is létrejött (az ECMWF modell ezt kissé északabbra jelezte előre), és e mentén alakultak ki az első zivatargócok az Alpok keleti-, valamint Vas vármegye középső és északi részén, melyek közül több is szupercellává fejlődött. Az Alpokat kelet felé elhagyva két, szorosan egymást követő góc megerősödött és részbe össze is olvadt, és végül ezek közül az első, keletebbi cella volt az, ami a tornádót produkálta.

A következőkben előbb a szupercellák összeolvadásának lehetséges hatásait, majd az aktuális esetről jelenlévő viharvadászok beszámolóit felhasználva az események lefolyását, végül a tornádó által okozott károkat mutatjuk be.

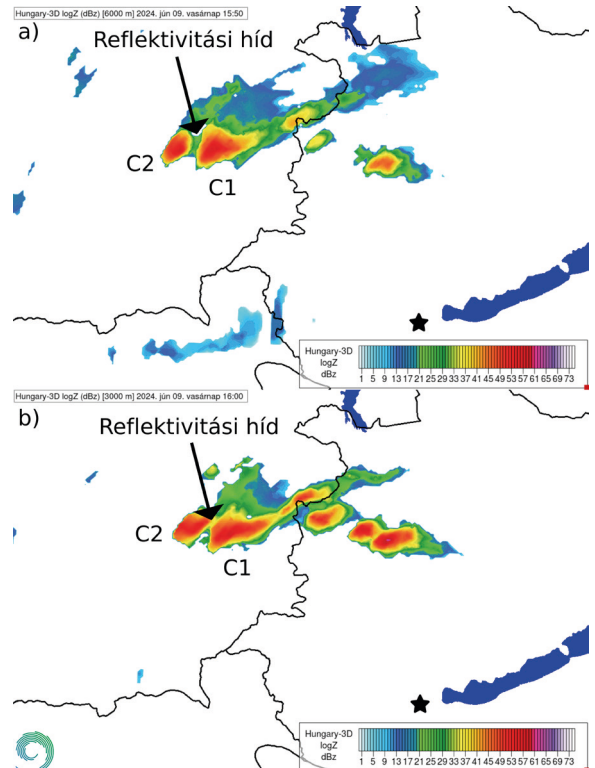
Szupercellák összeolvadása

A természetben nem ritka, hogy a szupercellák életük során interakcióba lépnek egymással. Ilyen jelenséget nemegyszer már a Kárpát-medence területén is megfigyeltek (Kun et al., 2017; Komjáti et al. 2022). Az ilyen interakciók következménye lehet a szupercella méretének növekedése, feláramlásának erősödése, haladási irányának változása, valamint hevesebb kísérőjelenségek megjelenése rövid időn belül (Lemon, 1976; Barnes, 1978; Kogan and Shapiro, 1996; Finley, 2001, 2002; Lee et al. 2006; Rogers and Weiss, 2008; Kun et al. 2017; Komjáti et al., 2022; Nixon et al., 2024). A szupercellák egyik legpusztítóbb kísérőjelensége a tornádó. A tornádók kialakulása dinamikailag rendkívül összetett folyamat, amelyet a szupercellán belüli áramlások – különösen a zivatar forgó feláramlása és leáramlási régiói –, valamint a felszín közeli örvényességi viszonyok határoznak meg (Fischer et al., 2024). Megfigyelések és modellszimulációk igazolják, hogy a tornádók kialakulásához szükséges örvényességi viszonyokat külső tényezők is befolyásolhatják, elősegítve a tornádógenézist (Maddox et al., 1980; Markowski et al., 1998; Atkins et al., 1999; Fischer and Dahl, 2023). Ilyen tényező lehet például a szupercellák összeolvadása. Az összeolvadás során azonban az interakció szöge kulcsfontosságú, mert kedvezőtlen esetben az éppen gyengítheti a szupercellát ahelyett, hogy intenzívebbé tenné (Jaret et al., 2008). Ez leggyakrabban akkor fordul elő, amikor az egyik cella leáramlási régiója elzárja a másik cella beáramlásának meleg, nedves levegő utánpótlását.

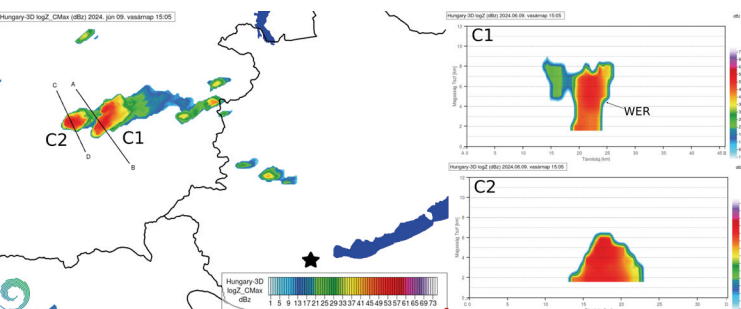
A következőkben megvizsgáljuk, hogyan zajlottak le ezek a folyamatok június 9-én az Ausztria felől érkező szupercella környezetében. A cellák összeolvadását három magassági szinten vizsgáljuk meg: 1000, 3000 és 6000 m-es magasságban, a magyarországi

kompozit radar reflektivitási metszeten. (Megjegyzés: a szövegben szereplő időpontok inntől kezdve helyi időben – UTC+2 óra – értendők.) 17:05-kor Ausztria területén két, egymástól még elkülönülő zivatarcella figyelhető meg. A 4. ábrán a keletebbre található fejlettebb cella (C1) keresztmetszetén már kezdetlegesen megjelenik a szupercellákra jellemző gyenge reflektivitású terület (WER – Weak Echo Region), míg a nyugatabbra elhelyezkedő kisebb cellánál (C2) ekkor még nem láthatók ezen radaros karakterisztikák.

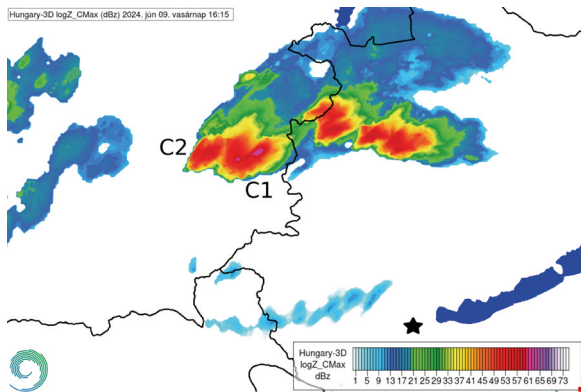
A cellaösszeolvadás 17:50-kor kezdődik. Először a cellák magasabb rétegeiben (6000 m) indul meg a folyamat, majd 18:00-ra fokozatosan a középső (3000 m) szinten is, amit az úgynevezett reflektivitási híd megjelenése jelez (5.a-b ábra). A reflektivitási híd, vagy hídcella a két zivatar kiáramlási területeinek találkozásánál jön létre, ahol összeáramlás alakul ki, jelezve a cellaösszeolvadás kezdetét (Westcott and Kennedy, 1989; Westcott, 1994). A fő reflektivitási magok, vagy feláramlási csatornák összeolvadása azonban hosszú ideig nem figyelhető meg; a folyamat lassan halad előre. 18:15-re, hozzávetőlegesen fél órával a Narda



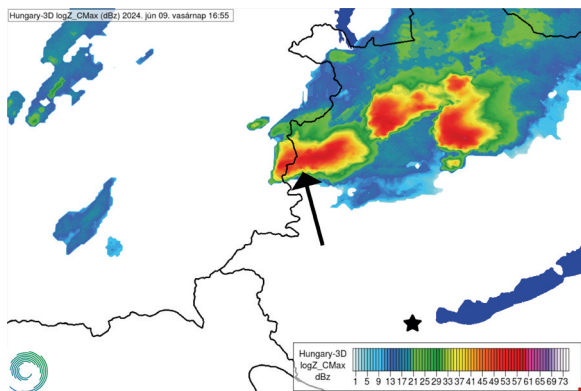
5. ábra. Kezdődő összeolvadási folyamat a C1 és C2-es cella között a magyarországi 3D reflektivitási metszeten. 17:50-kor 6000 m-es magasságban (a), majd 18:00-kor már 3000 m-es magasságban is (b). A fekete csillag a pogányvéri radar elhelyezkedését reprezentálja.



4. ábra. Ausztria felett kialakuló zivatarcellák a magyarországi 3D kompozit reflektivitási radarképen és a róluk készült vertikális keresztmetszetek 17:05-kor. A fekete csillag a pogányvéri radar elhelyezkedését reprezentálja.



6. ábra. Részlegesen összeolvadó cellák 18:15-kor a magyarországi 3D kompozit reflektivitási radarképen. A fekete csillag a pogányvári radar elhelyezkedését reprezentálja.



7. ábra. Zivatarcellák teljes összeolvadása 18:55-kor a magyarországi 3D kompozit reflektivitási radarképen. A fekete csillag a pogányvári radar elhelyezkedését, míg a fekete nyíl a tornádó pozícióját reprezentálja ebben az időpontban.

térségében észlelt tornádó előtt, a két cella még csak részlegesen kapcsolódik egymáshoz (6. ábra). A teljes összeolvadás csak 18:55-re következik be, amikor a C1-es cella eléri Magyarországot, és lelassul. A cellaösszeolvadás után nem sokkal a C1-es cella fokozatosan gyengül, és beolvad a C2 előoldali leáramlási régiójába (7. ábra). Ezt követően, 19:10-től a szupercella gyorsan veszít erejéből. A radarmérések alapján nem dönthető el egyértelműen, hogy a cella gyengülése közvetlenül az összeolvadás következménye volt-e, vagy már eleve olyan életstádiumban járt, amikor természetes módon kezdett volna gyengülni. Az ECMWF modell előrejelzett labilitási térképén (2. ábra) látható, hogy keletebbre haladva a labilitás csökken, ami szintén hozzájárulhatott a cella gyengüléséhez.

Bár az összeolvadás nem a leoptimalisabb szögben történt, a reflektivitási híd vagy hídcella megjelenése arra utal, hogy a cellák kifutófrontjai kapcsolo-

latba léptek egymással. Ahogyan a bevezető részben olvasható, a légköri feltételek adottak voltak szupercellák, esetleg tornádók kialakulásához is. A cellainterakció során a C1-es cella hátoldali kifutófrontja (RFD – Rear-Flank Downdraft) többlet örvényességet szerezhetett, amely a tornádógenezis felszín közeli folyamatait erősíthette. Továbbá a radarmérések alapján az úgynevezett Fujiwhara-hatás is jól azonosítható, hiszen az egymástól nem túl nagy távolságra haladó szupercellák mezociklonjának szélmezője is kölcsönhatásba lépett egymással. Ez utóbbi jelenség leginkább az ezen időszakban készült, egymást követő radarképeken érhető tetten (mely a HungaroMet YouTube csatornáján tekinthető meg, a QR kódot beolvassva), ahol az elülső, C1-es domináns cella fokozatosan lelassul, miközben a mögötte haladó C2-es cella haladási sebessége megnő és iránya egyre inkább délkeletibe fordul. A külföldi megfigyelések és tanulmányok is alátámasztják, hogy ideális esetben a Fujiwhara-hatás akár mindkét interakcióba lépő szupercella esetében is komoly tornádópotenciált hordozhat magában [5]. Figyelemre méltó, hogy csak az az egy cella produkált tornádót, amely kölcsönhatásba lépett egy másik cellával; más szupercellák környezetében nem figyeltek meg tornádót. Ez arra utalhat, hogy az interakció fontos szerepet játszott a tornádó kialakulásában. Megjegyezzük, hogy hasonló Fujiwhara-kölcsönhatást mutató szupercella-páros 2015. május 13-án is előfordult a nyugati országgrészben, melyet szervezett viharvadászat keretében dokumentált a Viharvadászok Egyesületének 4 tagja (Kovács Krisztina, Sebestyén Ádám, Bondor Gyula, illetve e cikk szerzői közül Kun Sándor), és az elülső cellán rövid időre akkor is kialakult egy felhőtölcsér-szerű nyúlvány, mely nem érte el a talajt [6].

A hatás tényleges kimutatásához azonban több adatra lenne szükség. Vizsgálni kellene a kifutófrontok helyzetét és esetleges kapcsolatát, valamint, hogy kialakult-e másodlagos, RFD kifutófront. Ezek mind olyan tényezők, amelyek segíthetnének megválaszolni a kérdést, ám ehhez sajnos nem állnak rendelkezésre megfelelő mérések. A legközelebbi radarállomás (Pogányvár) közel 90 km-es távolságra volt, így a legalacsonyabb radarnyalábbal végzett mérések is magasan a felszín felett történtek, nem téve lehetővé a felszín közeli folyamatok mélyebb elemzését.

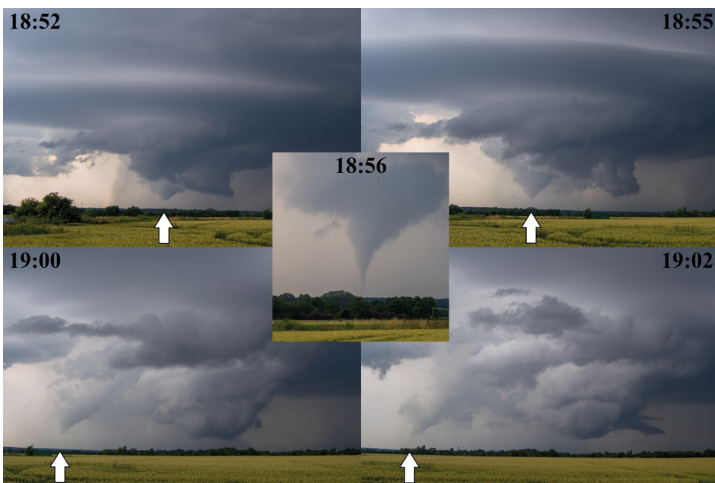
A tornádó életútja és az okozott károk

A Viharvadászok Egyesületéhez kapcsolódóan ketten vettek részt aznap viharvadászaton a térségben (külön-külön), Pintér István Szombathely keleti [7],

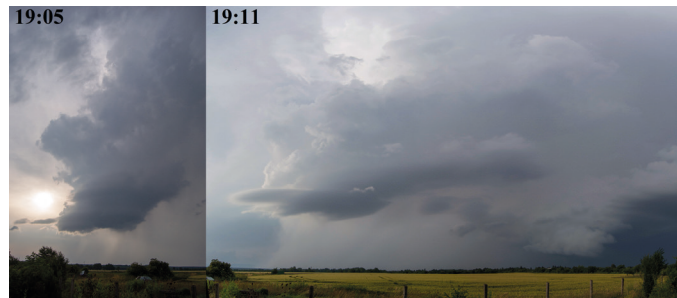


míg Hérincs Dávid a délnyugati határában követte végig a szupercellát és a tornádót. Vizuálisan az elülső, keletebbi cella sokáig kitakarta a másikat, de osztrák viharvadászok beszámolója alapján Stájerország és Burgenland határvidékén még az is erősebb, klasszikus jellegű volt [8]. A Szombathely felé közeledő elülső góc strukturálisan szintén *klasszikus szupercella* volt, nagy, lencseszerű feláramlási alappal, és a mezociklonban már fél 7-től kezdve erős rotáció látszott, erősen forgó, „szipkázó” *falfelhővel*. Osztrák szemtanúk által a különböző közösségi médiafelületeken közzétett fotók és videók alapján utólag kiderült, hogy a szupercella már ebben az időben, hozzávetőlegesen 18:30-tól kezdve is produkált tornádót Nagyszentmihálytól (Großpetersdorf) délre. Ekkor határozottabb kondenzációs tölcser ugyan még nem, vagy csak egy-egy röpké pillanatra alakult ki, de egyértelműen beazonosítható volt a felszínen örvénylő forgatag, mely az előző éjszakai zivatarrendszer nyomán kiáradt Pinka árterén haladt át. A már említett Skywarn-os viharvadász csapat is utólag értesült a tornádóról, és a Nagyszentmihálytól két faluval keletebbre lévő Sámfalva (Hannersdorf) délkeleti, keleti határában kárfelmérést is végeztek, ahol 3 helyszínen találták meg a tornádó nyomait, mely fatörésekben nyilvánult meg. Pintér István 18:45 körül figyelt meg először egy határozottan lenyúló felhőtölcsért a mezociklon központi részéből, és bár a nagyobb távolság miatt nem tudta megállapítani, hogy leért-e, az utólagos kárelemzések alapján kijelenthető, hogy igen, és ekkor érintette a forgószelet Narda térségét. Néhány perc szünet után 18:52-től Hérincs Dávid is megfigyelt egy kezdetben vastagabb felhőtölcsért, ami

18:55-kor elkeskenyedve elérte a felszínt, és mindezt István is dokumentálta a város másik széléről – illetve több városbéli szemtanú szintén. A tornádó 1,5–2 perc múlva gyorsan visszahúzódott, de a mezociklonból lógó tuba ezt követően is megfigyelhető maradt. Végül az utolsó életfázisában, 19:00 után ismét jelentősen lenyúlt a felhőtölcsér, valószínűsítve egy újabb földetérést. Ekkorra azonban a szupercella hátoldali leáramlásának (RFD) csapadéka teljesen betekeredett már köréje, rontva a láthatóságát és elvágva a tápláló meleg beáramlás utánpótlását, így a tölcser szerkezete egyre szakadozottabb lett, és 19:04-re végleg fel is oszlott, miközben a mezociklon és a falfelhő is szervezetlenebbé vált. A 8. ábra a tornádó ezen életfázisait mutatja be, és a 18:52-kor készült fotó bal szélén, a bokrok felett a mögötte érkező másik szupercella feláramlási alapjának legszéle is látható. A tornádó feloszlásával egy időben ez utóbbi is elérte az országhatárt, de ekkorra már úgynevezett *kis csapadékú (LP – Low-Precipitation)* karakterisztikát öltött, mely jelezte a gyengülését. Ugyanakkor még látványosan csavarodó feláramlási alappal vonult el Szombathely felett, keletebbre helyeződve viszont gyorsan legyengült. A 9. ábra e második szupercellát, valamint a két gócot együttesen mutatja, már a gyengülésük idején. Ebben az időben az elől haladó szupercella átmenetileg ismét határozottabb mezociklont és falfelhőt fejlesztett, de már nem alakult ki belőle újabb felhőtölcsér.



8. ábra. A szupercella és a belőle lenyúló felhőtölcsér (a nyilakkal jelölve) életfázisai 18:52 és 19:02 között, Szombathely délnyugati határában, délkeleties irányból fotózva.



9. ábra. A második, LP karakterisztikájú szupercella, valamint a két góc együtt már távolodóban és gyengülőben Szombathely délnyugati határában, délkeleties irányból fotózva.

A tornádó távolról is egyértelműen látható földetérésének Torony melletti helyszíne az Időkép ottani webkamerája alapján [9] jól beazonosítható volt, és a tornádó előtti és utáni képkockákat összehasonlítva kisebb károk is látszottak a falutól északra lévő fás-bokros területeken. Még aznap este kárjelentések érkeztek Nardából is, ahol a falu déli felét keresztezte a forgószelet, illetve néhány régebbi – így statikailag már feltehetőleg gyengébb állapotú – pajta is nagymérték-

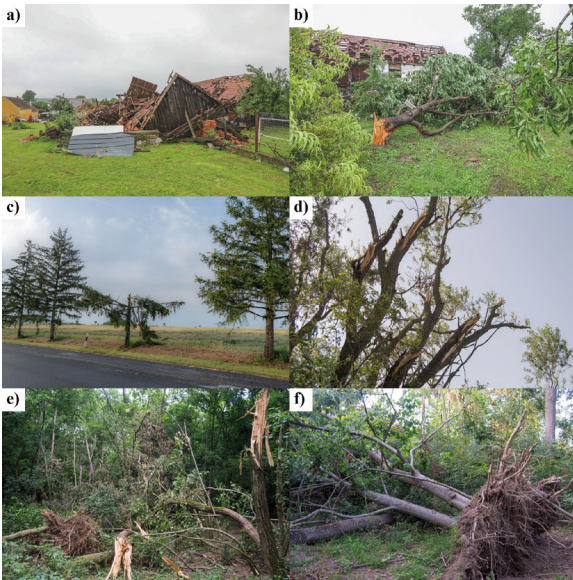
ben károsodott, némelyik teljesen összedőlt. A károkról másnap a helyi vaol.hu hírportál is tudósított, részletes fotódokumentációval [10]. A falutól körülbelül 2 km-rel nyugat-délnyugatra, már az osztrák Csémhez (Schandorf) tartozó erdőkben is okozott károkat a tornádó, melyekről Zag Líviának helyszíni bejárása nyomán a Kőszegi Időjárás Előrejelzés oldal számolt be [11]. Itt több kettétört vagy gyökerestől kicsavart fát is találtak, és nardai jelentések szerint kisebb ágakat egészen odáig elrepített a szél. Mindezen adatok tükrében már előzetesen is viszonylag jól rekonstruálható volt a tornádó útvonala, melyek segítségével a Viharvadászok Egyesülete képviselőiben e cikk szerzői közül Hérincs Dávid az esemény után 2–3 héttel, június 22-én, 29-én és 30-án részletes kárfelmérést végzett a magyar oldalon. Ennek helyszíneit az osztrák káreseményekkel együtt a 10. ábra szemlélteti, melyen jól kirajzolódik a tornádó nyomvonala. Bár sajnálatos módon Nardán lakó- és melléképületekben is jelentős károkat okozott a forgószelel, az ábra alapján belátható, csak a szerencsén múlt, hogy nem történt nagyobb tragédia, ugyanis ha kicsivel délebbre halad végig, Nardát ugyan elkerülte volna, de az osztrák oldalon a Sámfalvához tartozó Pinkaóvár (Burg), a magyar oldalon pedig Dozmat, Torony és Sé nagy részét letarolhatta volna.



10. ábra – A tornádó által okozott beazonosított károk Sámfalvától Szombathely északnyugati határáig (térkép: Google Earth).

A kárfelmérés eredményeit a tornádó haladási irányának megfelelően nyugatról kelet felé haladva ismertetjük, a károk rögzítése azonban nem ilyen sorrendben történt, ezek időpontjai zárójelben szerepelnek a helyszínek mögött. Nardán (június 30-án) a legtöbb háztetőt már helyreállították, de a ledőlt pajták és néhány fatörés még megfigyelhető volt, melyek alapján sikerült meghatározni, hogy a Kossuth utcát keresztszelve egy körülbelül 300 m hosszú és 50–100 m széles, nyugatról kelet felé szélesedő sávban volt a legnagyobb a pusztítás, de kisebb károkat ettől északra és délre is

lehetett azonosítani. A következő kárnyom Nardától 2,5–3 km-re kelet-északkeletre, a Dozmatól északnyugatra elterülő erdőfolt déli szélén, valamint az azt keletről határoló Arany-patak mentén lévő fás területen volt megfigyelhető (június 30-án), de a nagyobb távolság részben annak lehetett köszönhető, hogy a köztes területen nagyrészt szántók vannak, és az azokat elválasztó földutak mellett kevés a növény. Az erdőfoltban és a patakparton több helyen előfordultak különböző irányokban történt ág- és fatörések, illetve az erdőtől délre fekvő ligeten három kisebb fát gyökerestől kidöntött a szél. Ettől a helyszíntől 200–300 m-rel északkeletre, a Toronyból Narda felé vezető út mentén Pintér István már rögtön a tornádót követően (június 9-én) azonosított károkat: egy fenyőfát kettétört, egy másiktól ágakat tört le, egy harmadiknak pedig a felső részét tépte le a forgószelel, és utóbbit az északkeletre lévő gabonátáblában – ahol a tornádó nyomvonala is megfigyelhető volt – körülbelül 100 m-re dobta le. A toronytól északnyugatra és északra húzódó, észak-déli irányú mezőgazdasági utak mentén (június 22-én és 30-án) szintén különböző irányokban történt fa- és bokortörések voltak jellemzőek, akárcsak a falutól északkeletre lévő Nyeste-Nyár-patak menti fasorban (június 22-én). Az utóbbi területen azonban a tornádó nyomvonala a pataktól északkeletre fekvő gabonátáblában is követhető volt 150–200 m hosszan, majdnem a Szombathelyt Bucsuval összekötő útig, az út másik oldalán, illetve a keletebbre lévő Szinesei-patak menti fasornál viszont (távolabbról megfigyelve) nem látszottak kárnyomok. Utóbbi pataktól 400–500 m-rel kelet-északkelet felé, a Sétől északra lévő kiterjedtebb erdő délnyugati részén és az azt határoló gabonátáblában azonban ismét egyértelműen azonosítható volt a tornádó károsítása (június 22-én). Az erdő szélén egy 100–120 m széles, de befelé egyre keskenyedő sávban több vastagabb fát kettétört vagy gyökerestől kicsavart a forgószelel, emellett még több helyen előfordultak ágtörések, 130–150 m-t beljebb haladva viszont megszűntek a károk. Az erdőt nem volt módunk teljesen végigjárni a tornádó feltételezett útvonala mentén, ugyanakkor a keleti, Szombathely felőli szélén (június 29-én) hasonló jellegű és mértékű károkat találtunk, és a károk kiterjedtsége is nagyjából megegyezett a másik helyszínével. Néhány káresemény fotója a 11. ábrán látható. A teljes kárjelentés az egyes helyszínek részletesebb leírásával és fotódokumentációjával, valamint külön térképes szemléltetésével a Viharvadászok Egyesületének weboldalán tekinthető meg [12]. Az észlelt károk alapján valószínűsíthető, hogy az első és utolsó megfigyelési időpont közötti,



11. ábra – A tornádó által okozott károk néhány fotón. a-b) Összedőlt pajta, károsodott tető és kitört gyümölcsfák Nardán. c) A tornádó által kettétört fenyőfa a Torony#1 kárhelyszínén, melynek felső részét körülbelül 100 m-rel arébb dobta le a forgószelel. d) Ágkárosodás a Torony#2 helyszínén lévő fán. e-f) Kettétört, kidöntött fák a Sé és Szombathely határán lévő erdő délnyugati és keleti oldalán. Fotók: a-b) Unger Tamás, VAOL (Vas Vármegyei Hírportál) [10 - vaol], c) Pintér István [7 - szupercella], d-f) Hérics Dávid.

kissé több, mint fél óras időszakban nagyrészt leért a felszínre a tornádó, noha határozott kondenzációs tölcser csak az élettartama végén jelent meg. Átmeneti visszahúzódások azonban feltehetőleg előfordultak, illetve a több helyen észlelt elkülönülő kárnyomok arra utaltak, hogy a fő örvény körül kisebb szívótölcserrek is kialakulhattak. Ugyanakkor az sem zárható ki, hogy egyes kisebb ágtöréseket a hátoldali leáramlás kifutószele okozott. A károk alapján a tornádó erőssége az Amerikai Egyesült Államokban használt módosított Fujita-skálán többnyire az EF0-s és az EF1-es fokozat között ingadozhatott, mely 100–150 km/h körüli maximális szélességnek felel meg, de időnként megközelíthette, esetleg elérhette az EF2-es erősséget is (180–200 km/h-s maximális szélesség). Az Európában jellemző építkezési módok alapján kifejlesztett nemzetközi Fujita-skálán (Groenemeijer et al., 2023) pedig IF0.5 és IF1.5-ös fokozat közötti lehetett a tornádó.

Összefoglalás

Cikkünkben a 2024. június 9-én az osztrák-magyar határvidéken bekövetkezett tornádós helyzetet elemeztük. A szinoptikai felételek kifejezetten kedvezőnek mutatkoztak szupercellák kialakulásához, illetve a szokásosnál nagyobb esély mutatkozott tornádó létrejöttére is, melyet a Viharvadászok Egyesülete által üzemeltetett szupercella.hu weboldal aznapra szóló konvektív előrejelzésében is jelzett az aktuális előrejelző. Délután az Alpok délkeleti lábánál két, szorosan egymást követő szupercella fejlődött ki, melyek ezt követően részlegesen össze is olvadtak. Észlelői beszámolók alapján ez éppen egybeesett az elülső cellából lenyúló tornádó első megjelenésével, és korábbi esetek, illetve szakirodalmi példák alapján valószínűsíthető, hogy az összeolvadásnak ezúttal is lehetett szerepe a kialakulásában – bár több szupercella is kialakult aznap a térségben, azokból nem érkezett tornádóészlelés. A tornádó kelet-északkelet felé haladva Narda közelében lépte át az osztrák-magyar határt, majd a falu déli részét érintve Toronytól és Sétől északra haladt tovább, végül Szombathely északnyugati határában oszlott fel. Élettartama jelentős részében inkább csak az alul felkavarodó törmelékfelhő „festette meg” az örvényt, de Toronytól és Sétől északra határozott kondenzációs tölcser is kifejlődött. A forgószelel jelentős károkat okozott Nardán, több lakóház tetejét megromgálta, illetve melléképületeket is összedöntött, de emberéletben szerencsére nem esett veszteség. Emellett útja során több helyen voltak megfigyelhetőek fatörések és -dőlések, melyeket szervezett kárfelmérés során is sikerült azonosítani a magyar oldalon, pontosan feltérképezve ezáltal a tornádó útvonalát. A kárinformációk alapján a tornádó erőssége a módosított Fujita-skála szerint többnyire az EF0 és EF1 fokozat között váltakozhatott, de időnként elérhette az EF2-es fokozatot is. Az eset megmutatta, hogy a napjainkban az interneten már nagy számban elérhető információk (pl. webkamerák, szemtanúk fotói és videói), illetve a viharvadászok és meteorológusok helyszíni megfigyelései és kárfelmérései együttesen fontos szerepet játszhatnak a szupercellák és tornádók tudományos vizsgálatában.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a HungaroMet Nonprofit Zrt-nek az ECMWF modelladatok és a radaradatok, valamint a megjelenítésükhöz használt HAWK rendszer rendelkezésre bocsátásáért! A tanulmány elkészítésében nagy segítséget jelentettek továbbá az eseményről és a károkról publikált fotók, szakmai leírások, melyekért köszönettel tartozunk Pintér Istvánnak, Unger Tamásnak és a VAOL Vas Vármegyei Hírportálnak, Zag Líviának és a Kőszegi Időjárás Előrejelzés Facebook oldalnak, továbbá az osztrák Skywarn meteorológiai közösség viharvadász csoportjainak!

Irodalomjegyzék

- Atkins, N. T., Weisman, M. L. and Wicker, L. J., 1999: The influence of preexisting boundaries on supercell evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2910–2927. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127%3C2910:TIOPO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127%3C2910:TIOPO%3E2.0.CO;2)
- Barnes, S. L., 1978a: Oklahoma thunderstorms on 29–30 April, 1970. Part II: Radar-observed merger of twin hook echoes. *Mon. Wea. Rev.*, 106, 685–696.
- Finley, C. A., Cotton, W. R. and Sr: Pielke, R. A., 2001: Numerical simulation of tornadogenesis in a high precipitation supercell. Part I: Storm evolution and transition into a bow echo. *J. Atmos. Sci.*, 58 (13), 1597–1629. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1597:NSO-TIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1597:NSO-TIA>2.0.CO;2)
- Finley, C. A., Cotton, W. R. and Sr: Pielke, R. A., 2002: Tornadogenesis in a simulated HP supercell. Preprints, 21st Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, *Amer. Meteor. Soc.*, 531–534.
- Fischer, J., and Dahl, J. M. L., 2023: Supercell-External Storms and Boundaries Acting as Catalysts for Tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 151 (1), 23–38. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-22-0026.1>
- Fischer, J., Dahl, J. M. L., Coffey, B., Houser, J. L., Markowski, P. M., Parker, M. D., Weiss, C. C. and Schueth, A., 2024: Supercell Tornadogenesis: Recent Progress in Our State of Understanding. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 105 (7), E1084–E1097. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0031.1>
- Groenemeijer, P., Bock, L., Soriano, J. D., Dutkiewicz, M., Gutiérrez-Rubio, D., Holzer, A. M., Hubrig, M., Kaltenberger, R., Kühne, T., Müller, M., van der Ploeg, B., Púčik, T., Schreiner, T., Šinger, M., Strommer, G. and Xhelaj, A., 2023: "The International Fujita (IF) Scale" (PDF). European Severe Storms Laboratory. Letöltve 2023. 07.30-án. https://www.essl.org/cms/wp-content/uploads/IF-scale_v1.0c.pdf
- Kogan, Y. L., and Shapiro, A., 1996: The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger. *J. Atmos. Sci.*, 53, 2525–2545. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1996\)053<2525:T-SOACC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<2525:T-SOACC>2.0.CO;2)
- Komjáti, K., Varga, Á. J., Méri, L., Breuer, H., Csirmaz, K. and Kun, S., 2022: Investigation of a supercell merger leading to the Czech Republic EF4 2 tornado (24 June 2021) using radar data and numerical model output. *Időjárás*, 126 (4), 457–480. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.4.2>
- Kun, S., Bondor, Gy. és Csirmaz, K., 2017: A 2015. május 6-i heves konvekció és egy szupercella összeolvadás vizsgálata. *Léggör*, 62 (1), 5–16. <https://www.met.hu/ismetret-tar/kiadvanyok/legkor/index.php?id=549>
- Lee, B. D., Jewett, B. F. and Wilhelmson, R. B., 2006: The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell Mergers and associated tornado incidence, *Wea. Forecasting*, 21 (4), 449–446. <https://doi.org/10.1175/WAF943.1>
- Lemon, L. R., 1976: The flanking line, a severe thunderstorm intensification source. *J. Atmos. Sci.*, 33 (4), 686–694. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<0686:T-FLAST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<0686:T-FLAST>2.0.CO;2)
- Maddox, R. A., Hoxit, L. R. and Chappell, C. F., 1980: A study of tornadic thunderstorm interactions with thermal boundaries. *Mon. Wea. Rev.*, 108 (3), 322–336. [https://dx.doi.org/doi:10.1175/1520-0493\(1980\)108%3C0322:ASOTTI%3E2.0.CO;2](https://dx.doi.org/doi:10.1175/1520-0493(1980)108%3C0322:ASOTTI%3E2.0.CO;2)
- Markowski, P. M., Rasmussen, E. N. and Straka, J. M., 1998: The occurrence of tornadoes in supercells interacting with boundaries during VORTEX-95. *Wea. Forecasting*, 13 (3), 852–859. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013%3C0852:TOOTIS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013%3C0852:TOOTIS%3E2.0.CO;2)
- Nixon, J. C., Allen, J. T., Wilson, M. B., Bunkers, M. J. and Taszarek, M., 2004: Cell Mergers, Boundary Interactions, and Convective Systems in Cases of Significant Tornadoes and Hail. *Wea. Forecasting*, 39 (10), 1435–1458. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-23-0117.1>
- Rogers, J. W. and Weiss, C. C., 2008: The association of cell mergers with tornado occurrence. Poster Presentation. 24th Conference on Severe Local Storms. Savannah, Georgia.

Internetes hivatkozások:

- [1] <https://szupercella.hu/kislexikon>
- [2] <https://www.metnet.hu/kislexikon>
- [3] https://www.estofex.org/cgi-bin/polygon/showforecast.cgi?text=yes&fcstfile=2024061006_202406082314_3_stormforecast.xml
- [4] <https://szupercella.hu/konvektiv/hullamzo-front-mnsz-heves-esemenyek-lehetosegevel>
- [5] <https://cameronj Nixon.wordpress.com/research/storm-interactions/>
- [6] https://szupercella.hu/viharvadaszat_20150513
- [7] <https://szupercella.hu/blog/eredmenyes-vadaszat-3-szupercella-1-tornado>
- [8] <https://www.skywarn.at/forum/viewtopic.php?f=6&p=443026#p443026>
- [9] <https://www.idokep.hu/webkamera/isiscom3>
- [10] <https://www.vaol.hu/helyi-kozelet/2024/06/tornado-okozott-iszonyu-pusztitast-nardan>
- [11] <https://www.facebook.com/idojaraskoszeg.hu/posts/782176233897416>
- [12] <https://szupercella.hu/blog/2024-junius-9-ei-osztrak-magyar-tornado-karfelmerese>



A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál változásának várható trendjei a XXI. században, globális éghajlati modellek szimulációs eredményei alapján

Kristóf Erzsébet, Kalmár Tímea

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, ekristof86@staff.elte.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.1.3

Az elmúlt évtizedben a naperőművek beépített teljesítménye világszerte jelentősen bővült, a növekedés pedig várhatóan a jövőben is folytatódni fog. A napenergiából előállítható villamosenergia mennyisége azonban jelentősen függ a meteorológiai viszonyoktól, ezért a globális napenergia-potenciál – éghajlatváltozás hatására bekövetkező – jövőbeli változásának számszerűsítése a klimatológiai kutatások népszerű témaköre. Az alábbiakban a napenergia-potenciál XXI. század végéig várható változásainak szakirodalmi áttekintésére kerül sor, globális éghajlati modellek szimulációs eredményei alapján.

Trends in photovoltaic power potential changes in the 21st century based on general circulation model simulations

Over the past decade, the installed capacity of solar power plants has increased significantly worldwide, and this growth is expected to continue in the future. However, the amount of electricity generated from solar energy largely depends on meteorological conditions. Consequently, quantifying future changes in photovoltaic power output due to climate change has become a popular topic in climatological research. This paper provides an overview of projected changes in photovoltaic power output by the end of the 21st century, based on simulation results from general circulation models.

A fosszilis tüzelőanyagok drágulása és a forrásaik kimerülése miatt, illetve a klímavédelmi célok elérése érdekében egyre fontosabbá válik a megújuló energiaforrásokból származó energia (Holeček *et al.*, 2022). Globálisan a legnagyobb mennyiségben rendelkezésre álló megújuló energiaforrás a napenergia, amely a Föld minden térségében kiaknázzható valamilyen mértékben, még a pólusok felett is (Edenhofer *et al.*, 2012; Frimannslund *et al.*, 2021).

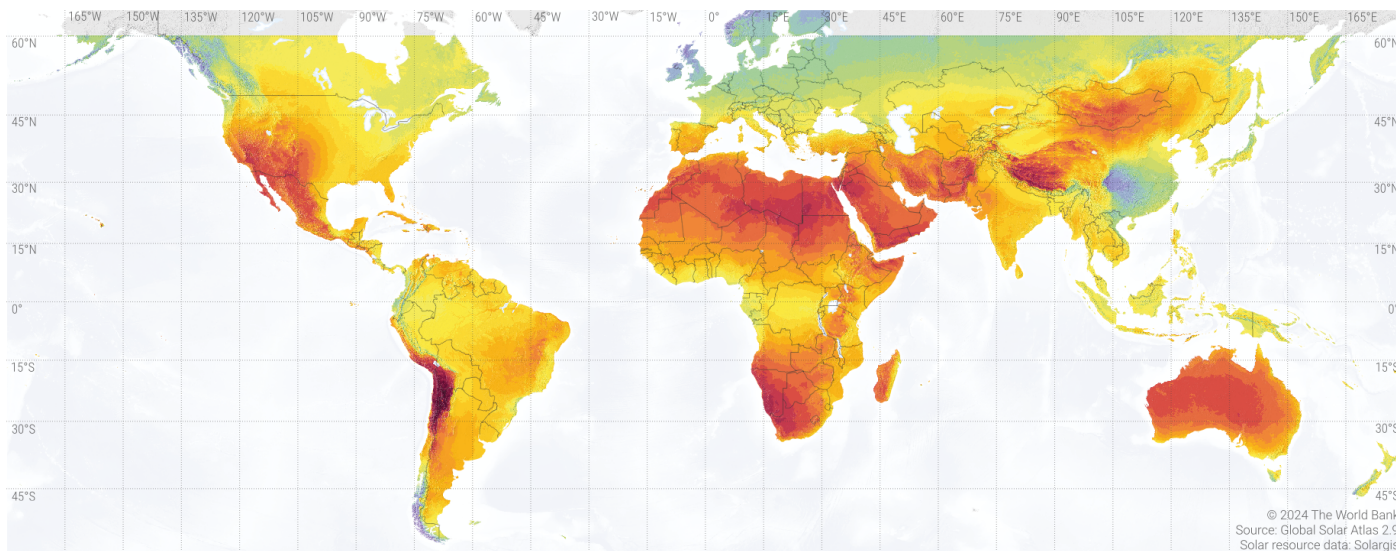
A napenergia-potenciál jövőbeli változásainak becslése széleskörű szakirodalommal rendelkezik világszerte. A potenciál azonban többféleképpen értelmezhető. Nagyság szerint csökkenő sorrendben megkülönböztethető például a napenergia elméleti, műszaki és gazdasági potenciálja, amelyek meghatározása az energiatervezés alapeleme (Brown *et al.*, 2016; Munkácsy, 2018). Tanulmányunk középpont-

SOLAR RESOURCE MAP

FOTOVOLTAIKUS VILLAMOSENERGIA-POTENCIÁL



WORLD BANK GROUP



© 2024 The World Bank
Source: Global Solar Atlas 2.9
Solar resource data: Solargis

	Átlagok												
Napi teljes:	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	6.4	
Éves teljes:	730	876	1022	1168	1314	1461	1607	1753	1899	2045	2191	2337	kWh/kWp

1. ábra. A fotovoltaikus villamosenergia-potenciált jellemző fajlagos hozam értékek [kWh/kWp] a szárazföldek felett, az é. sz. 60° és a d. sz. 60° közötti térségben [1].

jában a Nap villamosenergiatermelő-képességének műszaki potenciálja áll, méghozzá a napelem rendszerek potenciáljának, azaz a fotovoltaikus (photovoltaic, PV) villamosenergia-potenciál (a továbbiakban: PV_{pot}) becslése. Ennek keretében a XXI. századra vonatkozó, legfontosabb szakirodalmi megállapításokat foglaljuk össze, amelyek általános cirkulációs modellek, más néven globális éghajlati modellek (General Circulation Models, GCM-ek) szimulációs eredményein alapulnak. Kézenfekvőnek tűnhet a GCM-ek helyett a finomabb felbontású, regionális éghajlati modellek (Regional Climate Models, RCM-ek) szimulációs eredményeinek elemzése. Azonban a GCM-hibák átöröklődhetnek a GCM szimulációs eredményeinek dinamikus leskálázása során a durvább felbontású rácsról a finomabb felbontású rácsra (Sørland et al., 2018). Célszerű ezért a GCM-ek futtatási eredményeiből meghatározott trendeket, tendenciákat vizsgálni.

A tanulmányunkban a GCM-projekciókból meghatározott, a PV_{pot} értékében várható változások globális trendjeinek összefoglalására kerül sor az elmúlt néhány évben szakfolyóiratokban publikált tanulmányok alapján.

A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál földrajzi eloszlása

A napenergia a legnagyobb mennyiségben a trópusok mentén áll rendelkezésre (1. ábra).

Magyarországon a napenergia fajlagos hozama évente átlagosan 1050 és 1250 kWh/kWp között változik (Pintér et al., 2020), azaz egy 1 kW csúcsteljesítményű [kWp] napelem rendszer, egy év alatt átlagosan 1050–1250 kWh (3780–4500 MJ) elektromos munkát végez. Hazánk közepes fajlagos hozamú országnak tekinthető, míg globálisan a legjobb adottságú területeket 2000 kWh/kWp feletti értékek jellemzik. Érdeemes megfigyelni a fajlagos hozam területi eloszlásának eltéréseit Kína északnyugati és délkeleti régiói között (1. ábra). Az elmúlt években Kínában hajtották végre a legnagyobb, napenergiához kapcsolódó fejlesztéseket (REN21, 2024). Az északnyugati térségben a besugárzás azonban jelentősen nagyobb a délkeleti területekéhez képest, az utóbbi területekre vonatkozó értékek inkább a magasabb földrajzi szélességekre jellemzők. Ez nagyrészt a két régió eltérő tengerszint feletti magasságával és felhőborítottságával

magyarázható (Li et al., 2017). A besugárzást módosítja az aeroszolkoncentráció is (Streets et al., 2006), így a szálló por növekvő koncentrációja csökkentheti a villamosenergia termelésére hasznosítható napenergia mennyiségét, amely kimutatható például Kína keleti, sűrűn lakott területein (Li et al., 2017).

GCM-generációk

Napjainkban a legmodernebb GCM-ek szimulációs eredményei a Csatolt Modelleket Összehasonlító Projekt (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) keretében érhetők el. A projekt legutóbbi, egymást követő fázisaiban – a 2000-es években a harmadik fázisában (CMIP3; Meehl et al., 2007), a 2010-es években az ötödik fázisában (CMIP5; Taylor et al., 2012), majd a hatodik fázisában (CMIP6; Eyring et al., 2016) – mind több, illetve nagyobb tér- és időbeli felbontású, az éghajlati rendszer folyamatait egyre komplexebb módon leíró GCM szimulációs eredményeit tették közzé a meteorológiai állapothatározók bővülő körére, kutatási célokra szabadon felhasználható módon. Napjainkban a GCM-ek megfelelő felbontással rendelkeznek a szubkontinentális léptékű PV_{pot} -becsléshez (pl. Dutta et al., 2022), habár a domborzat kevésbé részletes leírása miatt korlátozottan alkalmasak a hegységek mentén jellemző PV_{pot} -értékek valóságghú visszaadására (Ha et al., 2023).

A GCM-ekkel folytatott vizsgálatok fontos lépése a validáció (Gleckler et al., 2008), vagyis a GCM-ek szimulációs eredményeiből meghatározott trendek összehasonlítása a megfigyelésekkel. A validációhoz referenciaként mérési és reanalízis adatbázisok alkalmazhatóak. A reanalízisek adatait a múltbeli földfelszíni és magaslégköri mérésekből, illetve rövidtávú időjárás-előrejelzésekből asszimilálják, légköri általános cirkulációs modell (Atmospheric General Circulation Models, AGCM) meghajtásával. A reanalíziseket – bár modellezett értékekből állnak – számos kutatásban a valóság megbízható leképezéseként kezelik (Stryhal and Huth, 2017).

Alternatív jövőképeken, ún. társadalmi-gazdasági forgatókönyveken (Special Report on Emission Scenarios, SRES; Nakicenovic et al., 2000) alapuló, jövőre vonatkozó modellszimulációkat először a CMIP3 keretében végeztek. A CMIP5 és CMIP6 GCM-ek jövőre vonatkozó szimulációi a légköri CO₂-koncentráció sugárzási kényszerét leíró scenáriókra épülnek, még hozzá a CMIP5 modelljei esetén a reprezentatív koncentráció pályákat leíró (Representative Concentration Pathways, RCP; Moss et al., 2010) forgatókönyveket,

míg a CMIP6 modelljei esetén a megosztott társadalmi-gazdasági pályákat leíró (Shared Socioeconomic Pathways, SSP; O'Neill et al., 2016) forgatókönyveket alkalmazzák. A scenáriók között az antropogén eredetű üvegházhatású gázok kibocsátását csökkentő célok elérését illetően optimistább (pl. a SRES B2) és pesszimistább (pl. a SRES A1B) forgatókönyvek is megtalálhatók. A továbbiakban az RCP2.6 és az SSP1-2.6, az RCP4.5 és az SSP2-4.5, valamint az RCP8.5 és az SSP5-8.5 scenáriókat rendre optimista, közepes kibocsátást feleltető és pesszimista forgatókönyveknek nevezzük.

A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál meghatározása

Az áttekintett tanulmányok a világviszonylatban legelterjedtebb monokristályos napelem cellák (Ha et al., 2023) fotovoltaikus villamosenergia potenciálját (PV_{pot}) az (1) formulával határozzák meg (Mavromataki et al., 2010). Ez a formula lehetővé teszi a PV_{pot} környezeti állapothatározóktól való függésének elemzését is:

$$PV_{pot} = P_R \frac{I}{I_{STC}}, \quad (1)$$

ahol PV_{pot} mértékegység nélküli mérőszám, azaz nem teljesítményt fejez ki közvetlenül, hanem egy relatív potenciált. Az I a Nappól a földfelszínre irányuló rövidhullámú sugárzás tényleges energia áramsűrűsége (besugárzás) [Wm^{-2}], míg I_{STC} a napelem cellát érő sugárzás áramsűrűsége az ideális, ún. Standard Teszt Körülmények (Standard Test Conditions, STC) között ($1000 Wm^{-2}$). Ez azt jelenti, hogy a napelem cella hőmérséklete $25\text{ }^{\circ}C$, a napelem cellát érő besugárzás áramsűrűsége pedig $1000 Wm^{-2}$ AM1,5 légtömeg-spektrum, azaz $41,81^{\circ}$ -os napmagasság mellett (lásd pl. Matusz-Kalász, 2023). A P_R dimenziótlán teljesítményarány a (2) formulával számolható ki:

$$P_R = 1 - \gamma (T_{cell} - T_{STC}), \quad (2)$$

ahol T_{cell} a napelem cella tényleges hőmérséklete, míg T_{STC} a napelem cella STC szerinti hőmérséklete ($25\text{ }^{\circ}C$). A γ a hőmérsékleti hatékonysági tényező (Tonui and Tripanagnostopoulos, 2007), melynek értéke a monokristályos szilícium napelemre $0,005\text{ }^{\circ}C^{-1}$ (pl. Feron et al., 2021; Dutta et al., 2022; Ha et al., 2023).

A T_{cell} értéke a (3) formulával számítható ki:

$$T_{cell} = c_1 + c_2 T + c_3 I - c_4 v, \quad (3)$$

ahol a T_{cell} függ az I besugárzástól, a T léghőmérséklet-től [$^{\circ}C$] és a v szélsebességtől [$m\text{ s}^{-1}$]. A monokristályos

Tanulmány	Vizsgált GCM-ek száma	Referencia adatbázis	Referencia időszak	Vizsgált jövőbeli időszak	Vizsgált térség	Vizsgált forgatókönyvek
Crook et al. (2011)	2 (CMIP3)	-	1980-1999	2010-2080	globális	SRES A1B
Goetani et al. (2014)	1 (CMIP3)	-	1996-2005	2000-2030	Európa, Afrika	SRES B2
Feron et al. (2021)	7 (CMIP5)	ERA-Interim reanalízis	1961-1990 1971-2000	2036-2065	globális	RCP4.5, RCP8.5
Dutta et al. (2022)	5 (CMIP6)	ERA5 reanalízis	1981-2014	2015-2040 2041-2100	globális	SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5
Ha et al. (2023)	7 (CMIP5) 7 (CMIP6)	ERA5 reanalízis	1971-2005 (GCM) 1979-2008 (ERA5)	2071-2100	globális	RCP2.6, SSP1-2.6, RCP8.5, SSP5-8.5
Niu et al. (2023)	7 (CMIP6)	mérési adatok	1980-1999	2023-2100	Kína	SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP5-8.5

1. táblázat. A jövőbeli fotovoltaikus villamosenergia-potenciált (PV_{pot}) a 4. fejezetben leírt összefüggések alapján becsült tanulmányok, a tanulmányokban vizsgált GCM-ek száma, a referencia adatbázis, a vizsgált időszakok és térségek, továbbá a GCM-ek szimulációs eredményei alapjául szolgáló forgatókönyvek megnevezése.

szilícium napelem cellákra az együtthatók értékei $c_1 = 3,9^\circ\text{C}$, $c_2 = 0,942$, $c_3 = 0,028 \text{ m}^2\text{CW}^{-1}$ és $c_4 = 1,509 \text{ }^\circ\text{Csm}^{-1}$ (TamizhMani et al., 2003).

Az (1)-(3) formulák alapján tehát az alábbi összefüggések állapíthatók meg a PV_{pot} és a légköri állapot-határozók között. A PV_{pot} értéke annál nagyobb, minél nagyobb az I besugárzás és a P_R teljesítményarány. Az I értékét a csökkenő felhőborítottság és a csökkenő aeroszolkoncentráció növeli. A P_R értéke maximális, ha T_{cell} a T_{STC} értékével, azaz 25°C -kal egyenlő. A P_R értéke tehát csökkenthet az I értékének növekedése mellett akkor, ha T_{cell} értéke egyre inkább eltér 25°C -tól. A ν növekedésével ugyanakkor csökken a T_{cell} értéke, amely a T az I , valamint a ν környezeti állapot-határozókon kívül a relatív nedvesség [%] értékétől is függ. Utóbbi hatását azonban gyakorta figyelmen kívül hagyják a számítások során (pl. Dutta et al., 2022, Feron et al., 2021, Jerez et al., 2015).

Összefoglalóan, a besugárzás növekedésével – így a nappalok hosszának növekedésével, valamint a felhőborítottság és az aeroszolkoncentráció, a természetes és antropogén eredetű szálló por koncentrációjának csökkenésével – nő a monokristályos napelem cella villamosenergia-termelő képessége. A növekvő léghőmérséklettel azonban nő a napelem cella hőmérséklete, amely csökkentheti annak teljesítményét. A szél viszont hűti a napelem cellát, tehát pozitívan hathat az energiatermelésre, növelve a PV_{pot} értékét.

A fotovoltaikus villamosenergia-potenciál globális trendjei

Az alábbiakban az 1. táblázatban felsorolt tanulmányokban meghatározott PV_{pot} -trendeket összegezzük kontinensenként, azon régiókat és évszakokat megnevezve, amelyekben a legjelentősebb változások várhatók. A GCM-ek magasabb földrajzi szélességekre vonatkozó szimulációs eredményei kevésbé megbízhatók (Dutta et al., 2022), ezért a sarkkörön túli térségeket kihagytuk az elemzésből.

Az áttekintett tanulmányok szerzői között konszenzus van arról, hogy a GCM-ek megfelelőek a PV_{pot} várható változásainak becsülésére, területi és időbeli eloszlásának vizsgálatára. A bemutatott vizsgálatok eltérnek a kiválasztott GCM-szimulációkat, illetve a vizsgálati időszakokat illetően (1. táblázat), ezért az ezekben meghatározott PV_{pot} számértékek kevésbé vethetők össze. A GCM-ek együttese, azaz GCM-ensemble alapján kimutatott trendek azonban meggyőzőek (pl. Feron et al., 2021), így a tanulmányok általában egyetértenek a kontinensek PV_{pot} -trendjeit illetően.

Európa

A XXI. század közepére általában a PV_{pot} növekedése várható egész évben Európa jelentős részén, mindhárom forgatókönyv szerint (Dutta et al., 2022). A közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv alapján a legjelentősebb, akár 5%-ot elérő növekedésre nyáron,

Közép-Európában számíthatunk (Feron et al., 2021). Magyarországon is hasonló mértékű növekedés várható. A PV_{pot} növekedése – a tavasz kivételével – valószínűleg a csökkenő felhőborítottság következménye (Dutta et al. 2022). Közép-Európában, nyáron a PV_{pot} növekedése a várhatóan csökkenő felhőborítottság mellett a csökkenő aeroszolkoncentrációval is magyarázható (Gaetani et al., 2014; Gutiérrez et al., 2020), amelyek felülmúlhatják a léghőmérséklet emelkedésének PV_{pot} -csökkentő hatását (Feron et al., 2021; Ha et al., 2023). Tavasszal pedig a PV_{pot} növekedése a relatív nedvesség várható csökkenésével együtt növekvő besugárzás következménye lehet (Dutta et al. 2022). Az Európa déli és nyugati területein a nyári és koraőszi hónapokra becsült PV_{pot} -növekedés háttérében a várhatóan erősödő Hadley-cirkuláció áll, amely felhőoszlató hatású (Gaetani et al., 2014). Az előbb felsorolt, várható változások összhangban vannak Bartók és mtsai (2017) megállapításaival, akik CMIP5 GCM-ek szimulációs eredményeiből kimutatták, hogy a XXI. század folyamán, különösen tavasszal és nyáron a besugárzás növekedése és a felhőborítottság csökkenése várható Európában. A besugárzás növekedése a mérési adat-sorokban is kimutatható az 1980-as évektől (Sanchez-Lorenzo et al., 2015). Érdekes azonban kiemelni, hogy a GCM-ek a validációs vizsgálatuk alapján felülbecsülték a globálsugárzást és alulbecsülték a felhőborítottságot (Bartók et al., 2017).

Télen Európában kevésbé számíthatunk jelentős változásokra, amelyek irányát illetően sincs teljes konszenzus. Dutta és mtsai (2022) a PV_{pot} kismértékű (2% körüli) csökkenését mutatták ki a három forgatókönyv alapján, míg Feron és mtsai (2021) a PV_{pot} kismértékű (2% körüli) növekedésére következtettek. Észak-Európában a PV_{pot} jelentősebb csökkenésére számíthatunk a felhőborítottság várható növekedésével, ami különösen markáns lesz azokban a hónapokban, amikor a tengeri jég a legnagyobb ütemben olvad (Feron et al., 2021).

A XXI. század végi becslések alapján tavasszal, nyáron és ősszel Európa sarkkörűl délebbre eső területein a PV_{pot} növekedésére számíthatunk, aminek mértéke Közép-Európában elérheti a 6–8%-ot is. Télen azonban forgatókönyvenként jelentősen eltérők a becslések: a PV_{pot} kismértékű (2% körüli) növekedése vagy változatlansága várható az optimista forgatókönyv esetén, a PV_{pot} változatlansága vagy kismértékű (2% körüli) csökkenésére számíthatunk a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv alapján, valamint a PV_{pot} jelentősebb (akár 8–10%-os) csökkenése várható a pesszimista forgatókönyvet feltételezve (Dutta et al., 2022).

Ázsia

A XXI. század közepére Ázsiában, az európai trendekkel ellentétben, ősszel és télen várhatók a legjelentősebb változások. India vonatkozásában az áttekintett tanulmányokban becsült PV_{pot} -trendek irányai azonosnak mutatkoznak. Kína esetében a CMIP5 és CMIP6 modell-együttesek szimulációs eredményei árnyalják Crook és mtsai (2011) korábbi, CMIP3 modellgeneráció alapján tett megállapításait, miszerint Kínában általánosan a PV_{pot} növekedésére számíthatunk 2010 és 2080 között. Kínában egyidejűleg eltérő trendek valószínűsíthetők: míg az északnyugati területein várhatóan csökken, addig a délkeleti területein előreláthatólag növekszik a PV_{pot} (Dutta et al., 2022). Kína északnyugati régiójában és Indiában a PV_{pot} – forgatókönyvtől függően akár 5-10%-os – projektált csökkenése a Himalája térsége, India és Kína fölött a felhőborítottság várható növekedésével, így a besugárzás csökkenésével hozható összefüggésbe (Dutta et al., 2022). Ugyanakkor Niu és mtsai (2023) kimutatták, hogy Kína északnyugati területein, a Tibeti-fennsíkon, a felhőborítottság csökkenésére számíthatunk. A becsült PV_{pot} -csökkenés, tehát a nagymértékű antropogén eredetű kibocsátással, az aeroszolkoncentráció növekedésével és a hőmérséklet emelkedésével állhat kapcsolatban. Tavasszal és nyáron Dutta és mtsai (2022) mutattak ki hasonlóan jelentős mértékű csökkenést Kína északnyugati régióiban, ugyanakkor Ázsia más térségeiben kisebb mértékű (+/-2% körüli) változásokra számíthatunk. Kína délkeleti részein és Délkelet-Ázsiában a PV_{pot} csekély (2% körüli) növekedése, Közép-Ázsiában pedig ugyanekkora mértékű csökkenése projektálható a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv szerint (Feron et al., 2021; Dutta et al., 2022).

A XXI. század végére becsült PV_{pot} -trendek, Európához hasonlóan, a választott scenáriótól függenek. Ázsia közepes földrajzi szélességi körökre eső területei, valamint az indiai szubkontinens fölött az optimista forgatókönyv alapján a PV_{pot} növekedésére, míg a pesszimista forgatókönyv alapján a PV_{pot} csökkenésére számíthatunk (Dutta et al., 2022).

Afrika és az Arab-félsziget

A XXI. század közepéig Afrika területének nagy részén minden évszakban a PV_{pot} kismértékű (+/-3% körüli) változásait vetítették előre (Feron et al., 2021; Dutta et al., 2022). Az északi félgömb nyarán várható változások területi eloszlását illetően azonban nincs konszenzus az áttekintett tanulmányok között. Dutta és mtsai (2022) a PV_{pot} 8–10%-os csökkenését mutatták

ki a Kongói-medencétől délre eső, Atlanti-óceánhoz közeli területeken, míg *Feron* és *mtsai* (2021) tanulmánya szerint Afrika egyenlítői térségének keleti részén számíthatunk 3%-ot meghaladó PV_{pot} -csökkenésre a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyvek alapján. Konszenzus van azonban arról, hogy nyáron Észak-Afrikában a PV_{pot} csökkenése várható (*Gaetani et al.*, 2014; *Feron et al.*, 2021; *Dutta et al.*, 2022), ami kapcsolatban állhat a Hadley-cirkuláció globális felmelegedés hatására történő, a pólusok felé irányuló kiszélesedésével (*Hu and Fu*, 2007), így a felhőborítottság növekedésével (*Gaetani et al.*, 2014). *Dutta* és *mtsai* (2022) továbbá kimutatták, hogy Afrika keleti és északi térségében a téli hónapokban és márciusban a növekvő felhőborítottság okozhatja a PV_{pot} várható visszaesését.

A XXI. század végére Afrikában, forgatókönyvenként jelentősen eltérő PV_{pot} -becslések adhatók minden évszakban. Míg az optimista forgatókönyv esetén minden évszakban a XXI. század közepéhez hasonló trendek adódtak, a pesszimista scenárió alapján a PV_{pot} értéke szinte Afrika egész területén várhatóan csökkenni fog, amelynek mértéke elérheti a 10%-ot (*Dutta et al.*, 2022). Az Afrikára, különösen a Száhel-övezetre vonatkozó PV_{pot} -becslések azonban jelentős bizonytalansággal terhelték, amelyek a felhőborítottság becslésének bizonytalanságából eredeztethetők (*Feron et al.*, 2021).

A XXI. század folyamán az Arab-félszigeten, ősszel és nyáron a PV_{pot} csekély mértékű (2-4% körüli) csökkenése várható, aminek háttérében a hőhullámok gyakoribbá válása és a felhőborítottság változékonyságának növekedése állhat (*Feron et al.*, 2021; *Dutta et al.*, 2022).

Amerika

Észak-Amerikában a XXI. század közepére és végére várható PV_{pot} -trendek hasonlóak. Észak-Amerika nyugati és a keleti partjának térségében azonban ellentétes PV_{pot} -trendek figyelhetők meg. A XXI. század közepéig minden évszakban és mindhárom scenárió szerint a PV_{pot} kismértékű (4-5% körüli) csökkenésére számíthatunk a nyugati part felett, míg a PV_{pot} csekély (2% körüli) növekedése várható a keleti part felett (*Crook et al.*, 2011; *Dutta et al.*, 2022). Utóbbi régióban a becsült PV_{pot} -növekedés területi kiterjedése tavasszal a legnagyobb, majd ez a terület a nyár és az ősz folyamán csökken. A PV_{pot} nyugati parti csökkenése a felhőborítottság növekedésével magyarázható, azonban a keleti parti PV_{pot} -növekedés és a felhőborítottság változása között nem mutattak ki szignifikáns kapcsolatot. Télen pedig az előrevetített felhőborítottság-növekedés ellenére sem mutattak ki szignifikáns változást a PV_{pot} értékeiben (*Dutta et al.*, 2022).

Dél-Amerikában – az eddig áttekintett kontinensekhez képest – kisebb mértékű PV_{pot} -változásokra számíthatunk. A XXI. század közepéig Dél-Amerika szubtrópusi térségében a PV_{pot} csekély (2-4% körüli) növekedése várható a déli félgömb téli hónapjai kivételével, mindhárom forgatókönyv alapján (*Dutta et al.*, 2022). A PV_{pot} várhatóan kismértékű (3% körüli) növekedése a déli félgömb nyáron az Atacama-sivatagban is kimutatható, a közepes kibocsátást feltételező forgatókönyv alapján (*Feron et al.*, 2021). A déli félgömb telén szignifikáns PV_{pot} -változás azonban nem detektálható (*Dutta et al.*, 2022). Érdemes kiemelni, hogy *Dutta* és *mtsai* (2022) a felhőborítottság csökkenése és a PV_{pot} növekedése közötti kapcsolatot csak a déli félgömb őszen tudták kimutatni, a többi évszakban nem. *Ha* és *mtsai* (2023) megállapították, hogy Dél-Amerikában azért nem nő a PV_{pot} értéke a besugárzás mértékéhez hasonlóan, mert a lég-hőmérséklet emelkedésének PV_{pot} -csökkentő hatása ellensúlyozza a besugárzás PV_{pot} -növelő hatását.

A XXI. század végére Dél-Amerikában a PV_{pot} növekedése projektálható, amelynek mértéke a déli félgömb tavaszán és nyáron nagyobb, mint a déli félgömb telén. Ennek okaként a besugárzás várható növekedését és a felhőborítottság feltételezhető csökkenését nevezte meg (*Dutta et al.*, 2022).

Ausztrália

A XXI. század közepére Ausztráliában általában csekély mértékű változások várhatók. A PV_{pot} értékének kismértékű (2-4% körüli) növekedésére számíthatunk a déli félgömb nyáron és őszen, például Ausztrália északnyugati térségében, míg hasonló mértékű (2%-nál kisebb) csökkenés várható a déli félgömb telén és tavaszán, például Ausztrália délkeleti régióiban (*Feron et al.*, 2021; *Dutta et al.*, 2022). *Dutta* és *mtsai* (2022) kimutatták, hogy a déli félgömb őszeré előrevetített PV_{pot} növekedés kapcsolatba hozható a felhőborítottság csökkenésével.

A XXI. század végére a PV_{pot} kismértékű csökkenése várható a déli félgömb tavaszán, nyáron és őszen, amely azonban nem magyarázható a besugárzás csökkenésével vagy a felhőborítottság növekedésével (*Dutta et al.*, 2022).

Konklúzió

A tanulmányunkban a PV_{pot} XXI. század végéig várható változásainak szakirodalmi áttekintését végeztük el GCM-ek szimulációs eredményei alapján, amelyek szerint az alábbi megállapítások tehetők.

A PV_{pot} változásai a környezeti állapotváltozók, így a léghőmérséklet, a felhőborítottság, az aeroszol-koncentráció, a szárelbesség és a relatív nedvesség várható változásaival magyarázhatók, azonban ezek térségenként és évszakonként eltérő mértékben befolyásolhatják a PV_{pot} értékét, egymás hatását felerősíthetik vagy csökkenthetik. A PV_{pot} értékek azonban a napelem-technológia fejlődésével is módosulhatnak, ezért időről-időre való újraszámításuk elengedhetetlen.

A XXI. század közepére vonatkozóan a különböző forgatókönyvek többnyire megegyeznek a PV_{pot} változásának irányát illetően, míg a XXI. század végéhez közeledve egyre inkább eltérnek egymástól. A PV_{pot} értékeiben bekövetkező, látszólag kismértékű, pár százalékos változások is nagy jelentőséggel bírhatnak, többek között jelentősen növelhetik vagy csökkenthetik adott térségben a napenergia hasznosítására alkalmas napok számát (Feron et al., 2021).

Az áttekintett tanulmányok alapján kiemelhető legjelentősebb PV_{pot} -változások a XXI. század folyamán a következők: Közép-Európában a PV_{pot} várhatóan növekszik nyáron, míg Kína északnyugati területén és India térségében a csökkenése várható ősszel és télen. Afrikában és Észak-Amerika nyugati partjának térségében a PV_{pot} csökkenésére számíthatunk, míg Észak-Amerika keleti partjának térségében, Dél-Amerikában és Ausztráliában inkább a PV_{pot} növekedése valószínűsíthető.

Irodalomjegyzék

- Bartók, B., Wild, M., Folini, D., Lüthi, D., Kotlarski, S., Schär, C., Vautard, R., Jerez, S. and Imecs, Z., 2017: Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. *Clim. Dyn.* 49, 2665–2683. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3471-2>
- Brown, A., Beiter, P., Heimiller, D., Davidson, C., Denholm, P., Melius, J., Lopez, A., Hetteringer, D., Mulcahy, D., and Porro, G., 2016: Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States: Methodology and Initial Results (No. NREL/TP-6A20-64503). National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64503.pdf>
- Crook, J.A., Jones, L.A., Forster, P.M., and Crook, R., 2011: Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy Environ. Sci.*, 4, 3101–3109. <https://doi.org/10.1039/C1EE01495A>
- Dutta, R., Chanda, K., and Maity, R., 2022: Future of solar energy potential in a changing climate across the world: A CMIP6 multi-model ensemble analysis. *Renew. Energy* 188, 819–829. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.023>
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., von Stechow, C., and Matschoss, P. eds., 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Feron, S., Cordero, R.R., Damiani, A., and Jackson, R.B., 2021: Climate change extremes and photovoltaic power output. *Nat. Sustain.* 4, 270–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00643-w>
- Frimannslund, I., Thiis, T., Aalberg, A., and Thorud, B., 2021: Polar solar power plants—Investigating the potential and the design challenges. *Sol. Energy*, 224, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.069>
- Gaetani, M., Huld, T., Vignati, E., Monforti-Ferrario, F., Dosio, A., and Raes, F., 2014: The near future availability of photovoltaic energy in Europe and Africa in climate-aerosol modeling experiments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 706–716. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.041>
- Gleckler, P.J., Taylor, K.E., and Doutriaux, C., 2008: Performance metrics for climate models. *J. Geophys. Res.* 113, D06104. <https://doi.org/10.1029/2007JD008972>
- Gutiérrez, C., Somot, S., Nabat, P., Mallet, M., Corre, L., van Meijgaard, E., Perpiñán, O., and Gaertner, M.A., 2020: Future evolution of surface solar radiation and photovoltaic potential in Europe: investigating the role of aerosols. *Environ. Res. Lett.* 15, 034035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6666>
- Ha, S., Zhou, Z., Im, E-S., and Lee, Y-M., 2023: Comparative assessment of future solar power potential based on CMIP5 and CMIP6 multi-model ensembles. *Renew. Energy*, 206, 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.039>
- Holeček, J.L., Geli, H.M.E., Sawalhah, M.N., and Valdez, R., 2022: A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? *Sustainability*, 14, 4792. <https://doi.org/10.3390/su14084792>
- Hu, Y., Fu, Q., 2007: Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 5229–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5229-2007>
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J.P., López-Romero, J.M., Thais, F., Bartók, B., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Nikulin, G., Kotlarski, S., van

- Meijgaard, E., Teichmann, C., and Wild, M., 2015: The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nat. Commun.* 6, 10014. <https://doi.org/10.1038/ncomms10014>
- Li, X., Wagner, F., Peng, W., and Mauzerall, D.L., 2017: Reduction of solar photovoltaic resources due to air pollution in China. *PNAS* 114, 11867–11872. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711462114>
- Mavromatakis, F., Makrides G., Georgiou G., Pothrakis, A., Franghiadakis, Y., Drakakis, E., and Koudoumas, E., 2010: Modeling the photovoltaic potential of a site. *Renew. Energy*, 35, 1387–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.010>
- Matusz-Kalász, D., 2023: Szilíciumkristályos napelemek működését befolyásoló tényezők vizsgálata és állapotfelmérésük módszertana. Doktori disszertáció. Miskolci Egyetem, Miskolc. https://geik.uni-miskolc.hu/intezetek/FEI/news_files/34_0.pdf
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., and Taylor, K.E., 2007: The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A New Era in Climate Change Research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 88, 1383–1394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-9-1383>
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., and Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Munkácsy, B., 2018: Energiaföldrajz és energiatervezés – egyetemi jegyzet. Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, Földrajztudományi Központ, Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék. https://munkacsy.web.elte.hu/energiaföldrajz_tankonyv.pdf
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenham, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z., 2000: Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge. 570 p. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions_scenarios.pdf
- Niu, J., Qin, W., Wang, L., Zhang, Wu, J., and Zhang, Y., 2023: Climate change impact on photovoltaic power potential in China based on CMIP6 models. *Science of the Total Environment*, 858, 159776. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159776>
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B.M., 2016: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Pintér, G., Zsiborács, H., Hegedűsné Baranyai, N., Vincze, A., and Birkner, Z., 2020: The Economic and Geographical Aspects of the Status of Small-Scale Photovoltaic Systems in Hungary—A Case Study. *Energies* 13, 3489. <https://doi.org/10.3390/en13133489>
- REN21, 2024: Renewables 2024 global status report: Renewables in Energy Supply, 137p. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_Supply.pdf
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M., Brunetti, M., Guijarro, J.A., Hakuba, M.Z., Calbó, J., Mystakidis, S., and B. Bartok., 2015: Reassessment and update of long-term trends in downward surface shortwave radiation over Europe (1939–2012). *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 9555–9569. <https://doi.org/10.1002/2015JD023321>
- Sørland, S.L., Schär, C., Lüthi, D., and Kjellström, E., 2018: Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environ. Res. Lett.* 13, 074017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aacc77>
- Streets, D.G., Wu, Y., and Chin, M., 2006: Two-decadal aerosol trends as a likely explanation of the global dimming/brightening transition. *Geophys. Res. Lett.* 33, L15806. <https://doi.org/10.1029/2006GL026471>
- Stryhal, J., Huth, R., 2017: Classifications of Winter Euro-Atlantic Circulation Patterns: An Intercomparison of Five Atmospheric Reanalyses. *J. Clim.* 30, 7847–7861. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0059.1>
- Tamizhmani, G., Ji, L., Tang, Y., Petacci, L., and Osterwald, C., 2003: Photovoltaic module thermal-wind performance: Long-term monitoring and model development for energy rating. NCPV and Solar Program Review Meeting 2003. <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/35645.pdf>
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., and Meehl, G.A., 2012: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tonui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y., 2007: Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renew. Energy*, 32, 623–637. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.03.006>

Internetes hivatkozás

[1] Solar resource map © 2021 Solargis

<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/world>

Kalmár Timeát az RRF-2.3.1-21-2022-00014 Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium támogatta.



A klimatikus energia- és vízmérleg változásainak vizsgálata a Duna-medencében 1961-től klímadiagram segítségével

Báder László, Szilágyi József

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vizgazdálkodási és Vízépítési Tanszék, laszlo.bader@edu.bme.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.1.4

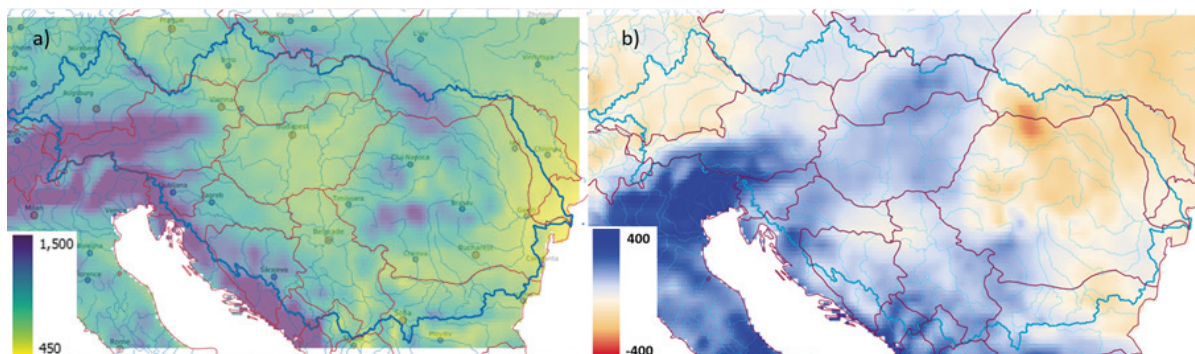
A Duna-medencében, a nettó sugárzás és párolgás adatai az 1961-1990-es és 1991-2020-as normálidőszakban összehasonlítva jelentős növekedést mutatnak. Az energia- és vízmérleg állapotát, annak változásait és az éghajlatváltozás hatásait egyszerűen be lehet mutatni grafikusán egy új módszerrel, az időszak energiaszállítását jellemző működési pontnak, azaz munkapontnak az ábrázolásával. Tulajdonságai alapján nevezhetjük a diagramot klimatikus energiamérleg diagramnak, röviden klímadiagramnak. Normalizált klímadiagramon felrajzolt munkapont segítségével eltérő éghajlatú területek állapota is összehasonlítható. A korábbi mérések adatai is ábrázolhatók. A párolgáshányad ismeretében kifejezhető a Bowen-arány, vagy fordítva, a Bowen-arány ismeretében kifejezhető a párolgáshányad.

Analysis of the changes in climatic energy and water balance in the danube river basin from 1961 with a climatic energy diagram

Net radiation and evapotranspiration data show a significant increase in the Danube river basin, when comparing the 1961-1990 and 1991-2020 normal periods. The state of the energy and water balance, its changes and the effects of climate change can be graphically represented using a new method of plotting an operating point or working point of the energy flow. Based on its properties, the diagram can be called a climatic energy balance diagram, or climate diagram for short. A normalised climate diagram can also be used to compare conditions under different climates. The available previously measured data can also be plotted. The evaporation fraction can be used to express the Bowen ratio, or conversely, the evaporation fraction can be expressed in terms of the Bowen ratio.

A 2022-ben tapasztalt, egész Európát sújtó aszály felveti a kérdést, hogy lehet-e hasonlóra számítani a következő években, és hogyan lehet azokra felkészülni, ha bekövetkezik. Várhatóan a gazdálkodóknak nem lesz elegendő minden évben passzívan várni és remélni, hogy megfelelő időben megérkezik a megfe-

lelő mennyiségű csapadék. Vizsgáljuk meg a problémát abból kiindulva, hogy Magyarországon a csapadék legnagyobb része – a 2001-2010 időszak éves átlagában közel 90%-a – elpárolog (Szilágyi és Kovács, 2011; Szilágyi, 2012; Kocsis, 2018), és közben az éghajlati energiák szállításával létfontosságú természeti szolgál-



1. ábra. a) A csapadék éves átlaga a Duna vízgyűjtőjén az 1991-2020 közötti normálidőszakban mm-ben. b) A csapadék éves mennyiségének változása 30 év alatt (a rácspontonként meghatározott trendvonalak által mutatott különbség) ERA5-Land adatok alapján.

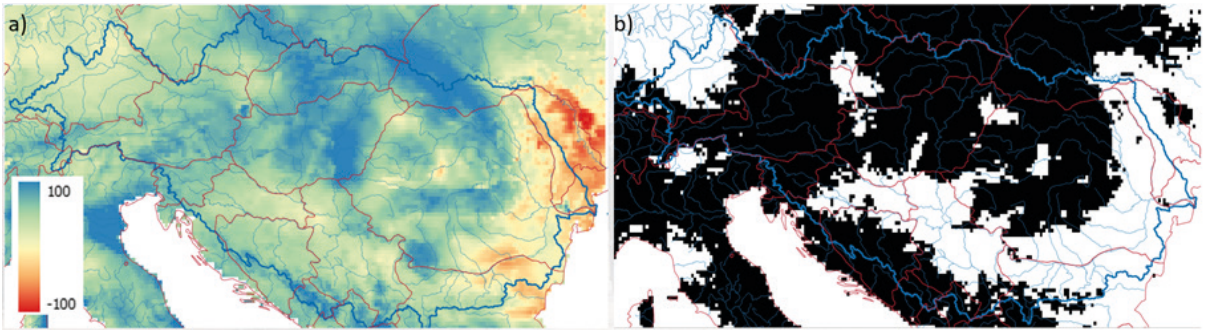
tatást végez. A csapadéknak csak kis részét használjuk fel lakossági, mezőgazdasági vagy ipari célokra. A légköri és vízközi egy egységes éghajlati energia szállító – elosztó rendszert alkotnak, amelynek a felépítését, és működésének megértését az általános rendszerelmélet alkalmazása segítheti (Báder, 2023).

A felmelegedés hatására a párolgási kényszer megnő, a párolgáshoz szükséges nedvesség elérhetősége kritikussá válhat a Föld számos pontján (Jung et al., 2010), pedig a párolgásnak az éghajlati energiák elosztását végző szerepe nélkülözhetetlen a kiegyensúlyozott éghajlati viszonyok fenntartásában (Eiseltová et al., 2012). A felszínen rendelkezésre álló nettó energiamennyiség legnagyobb része (a rövidhullámú és hosszuhullámú sugárzás egyenlege) a párolgás során felvett látens hővel távozik a felszínről (Ellison et al., 2024). A párolgás nagyobb hányada – globálisan mintegy 60% – a növények párolgotatásán (transpiráción) keresztül történik (Schlesinger and Jasechko, 2014). Több szerző hangsúlyozza, hogy a víz körforgásának fenntartásához a fizikai folyamatok mellett a biotikus elemek funkciójának jobb ismeretére, azok működésének megőrzésére, sőt javítására is szükség van (Ripl, 2003; Agócs, 2018). A párolgás-párolgotatás (evapotranspiráció) az élő táj elemi szükséglete, amelynek napi és évi ritmusa van, fontos funkciója a hőkiegyenlítés, éghajlatunkon a többlethő elvezetése (Kravcik et al., 2007; Hurina and Pokorný, 2016). A bemutatott közép-európai adatok, a hazai és külföldi kutatások egybevégezően megerősítik, hogy a párolgás és vízkörforgás folyamata kulcsszerepet játszik a táj működőképességének megőrzésében. Összefoglalva ez azt jelenti, hogy nemcsak a növények vízigényének biztosítása fontos azok fenntarthatóságáért, hanem a növények párolgotatása is nélkülözhetetlen a víz körforgásának kiegyensúlyozottságához.

A párolgáshoz szükséges víz legfontosabb forrása a csapadék, ezért annak áttekintéséből indulunk ki. A Duna-medencében, az 1991–2020 közötti normálidőszakban mért csapadék mennyiségének területi eloszlását mutatja be az 1a. ábra. Felismerhető, hogy a csapadék mennyisége csökken kelet felé, az Atlanti-óceántól és Földközi-tengertől távolodva. Délnyugaton és a magasabban fekvő területeken a csapadék 30 éves átlaga nagyobb és növekvő tendenciát mutat. Az alföldi jellegű területen kevesebb csapadék esik, azonban azt is érdemes megfigyelni, hogy ott a mennyisége is tovább csökken, főként a vízgyűjtő észak-keleti és észak-nyugati területein (1b. ábra). Magyarország területét nézve, nem láthatók jelentős változások a csapadéokban.

Fontos kérdéseket vehet fel azonban a csapadék változását tágabb térségben bemutató 1b. ábra. Miért csökken egyes térségekben jelentősen a csapadék, például a Tisza vízgyűjtőjének az országhatáron kívül eső részén (élénk sárga terület)? Milyen hatással lehetnek Magyarországra a környezetünkben felismerhető változások? Milyen következménye lehet az eloszlásában tapasztalható változásoknak az energiaszállító rendszer működésére?

A csapadék mennyiségének vizsgálata mellett – amely a vízbiztonságunkat jelentő legnagyobb tényező a bevételi oldalon – fontos megvizsgálni a kiadási oldalon jelentkező legnagyobb tagnak, a párolgásnak alakulását is. Az 1991–2020 közötti időszakban a 2a. ábrán a legtöbb területen a párolgás éves átlagában bekövetkezett növekedést látjuk, amely a kényszerítő körülmények szignifikáns erősödésével magyarázható (Báder et al., 2023). A 2b. ábra azt mutatja be, hogy a párolgás trendjét rácspontonként vizsgálva a Mann-Kendall teszttel elkülöníthetők azok a területek, ahol a változás szignifikánsan nő vagy csökken (feketével jelölve), a párolgás növekedése vagy csökkenése nem szignifikáns a fehéren hagyott területeken.



2. ábra. A párolgás éves átlagos értékének változása a Duna-medencében az 1991–2020 közötti időszakban, (Báder et al., 2023 alapján), a) Változás mm-ben (ERA5-Land adatok). b) A Mann-Kendall teszt szignifikáns változást (növekvő vagy csökkenő párolgás trendet) mutat a feketével jelölt területeken ($p < 0,05$).

Módszer

A párolgás mértékének és területi eloszlásának alakulása a bevezetőben bemutatott adatok alapján fontos információt adhat az éghajlati energia- és vízmérleg változásairól. A tanulmány az energia- és vízmérleg elemzéséhez egy újszerű, könnyen elkészíthető és grafikusán ábrázolható módszert javasol a Duna-medence példáján keresztül.

A vizsgálathoz az ECMWF ERA5-Land reanalízis adatait használtuk fel (Muñoz, 2019). A letöltött havi átlagolt adatok térbeli felbontása $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (kb. 9×11 km), amelyeket a $8.0^\circ - 29.9^\circ$ K hosszúsági és $42.0^\circ - 50.3^\circ$ É szélességi körök közötti területre töltöttük le. A Duna vízgyűjtő területét QGIS-ben létrehozott maszk segítségével határoltuk le. Az adatok éves összesítése, átlagolása, az ábrák szerkesztése és a Mann-Kendall teszt MATLAB-ban történt.

Az energia- és vízmérleg elemzéséhez és a változások vizsgálatához az éghajlati energia mérlegegyenletéből indulunk ki, amelynek egyszerűsített változata így írható fel:

$$R_n = ET + H \quad (1)$$

ahol R_n a felszíni nettó energiamennyiség, ET (Evapo-Transpiráció) a párolgással felvett és felszínről elszállított energia, H pedig a párolgási energia levonása után a felszínen maradó összes egyéb hőenergia. (A teljes hőenergiát szokásos H^* -gal jelölni, itt az egyszerűség kedvéért végig a " H " jelölést használjuk helyette). Az energiamérleg kisebb tagjait, mint a talajhőáramot, tárolt energiákat stb. első közelítésben elhanyagoljuk, mert azok változásai éves átlagban jól kiegyenlítik egymást. A felszíni nettó sugárzási energia két részből tevődik össze, a rövidhullámú és a hosszuhullámú (hő-) sugárzás nettó egyenlegéből:

$$R_n = S_n + L_n \quad (2)$$

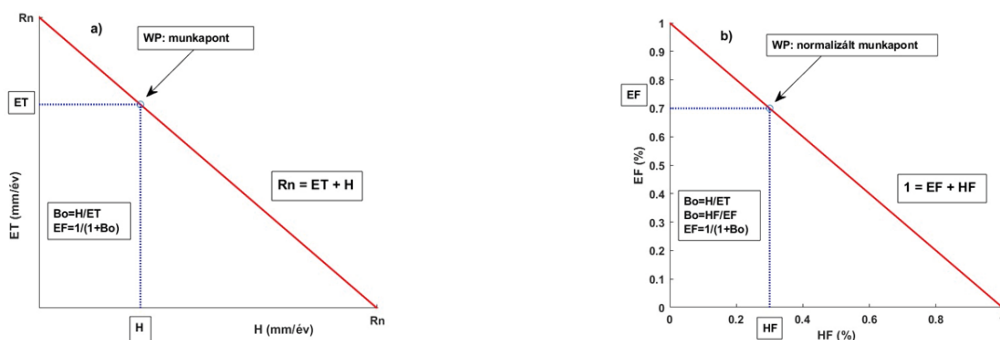
ahol S_n a rövidhullámú nettó sugárzás (napsugárzás), L_n pedig a hosszuhullámú nettó sugárzás (hősugárzás).

Az ERA5-Land adatbázisból letöltött " ssr ", " str " paraméterek havi átlagokat adnak meg J/m^2 -ben. A mérlegegyenlet valamennyi tagjának a mértékegysége azonos kell, hogy legyen. A leggyakrabban használt területegységre megadott energia mértékegységek mellett (J/m^2 , MJ/m^2 , $Watt/m^2$, kW/m^2) a vízegyenértékre átszámított energiamennyiség használata is elterjedt (m-ben, vagy mm-ben megadva). A tanulmányban minden adatot mm vízegyenértékben adunk meg, ahol $1 m^2$ -re számított $1 mm$ vízborításnak $2,48 MJ$ felel meg, amely $1 kg$ víz ($1 liter$) elpárolgásához szükséges $2,48 MJ/kg$ párolgáshő értékkel van átszámolva. A párolgáshő értéke kis mértékben függ a hőmérséklettől is, ezt itt a számításoknál nem vesszük figyelembe.

A letöltött ERA5-Land havi párolgás adatokból (" e " paraméter) éves értékeket számoltunk, csak a méter mértékegységet kellett átváltani milliméterre. A H értéke az így előállított R_n és ET adatok különbsége.

Egy adott évre vagy időszakra kapott párolgás (ET) és hóáram (H) értékeket felrajzoljuk egy olyan diagramra, ahol a vízszintes tengelyen a H értéke, a függőleges tengelyen az ET értéke szerepel. Olyan pontot kapunk az $ET-H$ síkon, amely a vizsgált időszak időjárására jellemző, és annak klimatikus energiaszállítását foglalja össze (3a. ábra). Nevezzük el a pontot az időszak energiaszállítását jellemző működési pontnak, vagy munkapontnak, a diagramot pedig klimatikus energiamérleg diagramnak, vagy röviden klímadiagramnak (Báder, 2025). Mivel az $R_n = ET + H$ mérlegegyenletből kiindulva rajzoljuk fel az $ET-H$ pontot, ezért a pont mindig egy olyan egyenesen fekszik, amely a tengelyek R_n értékeit köti össze (az $x=0$, $y=R_n$ pontot az $x=R_n$, $y=0$ ponttal). Ez az R_n átló.

Figyeljünk azonban arra, hogy a nettó sugárzási energia mennyisége az egymást követő években nem pontosan egyforma, a párolgást befolyásoló körülmények is eltérőek, ezért a munkapont minden évben kerülhet egy kicsit eltolt R_n átló vonalra.



3. ábra. Klimatikus energiamérleg diagram (klímadiagram). a) Diagram éves párolgás (ET), hőáram (H) és nettó sugárzás (R_n) értékekkel, párolgási vízegyenértékben megadva. b) Normalizált klímadiagram, párolgáshányad (EF) és szenzibilis hőáram hányad (HF) megadásával.

Eltérő földrajzi adottságú területek esetén (domborzat, távolság a tengertől, növényzet stb.) és eltérő szélességi körön fekvő területek esetén mind a nettó sugárzás, mind a párolgás értéke jelentősen eltérhet. Célszerű ezért a klímadiagram normalizált változatát is bevezetni, ahol minden tagot a nettó sugárzáshoz viszonyítunk. Ehhez az (1) jelölésű mérlegegyenletben szereplő minden tagot elosztunk R_n -nel.

$$\frac{R_n}{R_n} = \frac{ET}{R_n} + \frac{H}{R_n} \quad (3)$$

Az így átrendezett kifejezés azt jelenti, hogy az (egységnyi tekintett) teljes nettó sugárzás mely része fordítódik párolgásra, illetve alakul át érezhető (szenzibilis) hővé:

$$1 = EF + HF \quad (4)$$

ahol EF (Evaporation Fraction) a párolgáshányad, annak az aránya, hogy a párolgáshő által felvett és elszállított látens hő mekkora része a teljes nettó sugárzásnak. Hasonlóan definiálhatjuk az HF jelölésű tagot (Heat Fraction) amely a normalizált H/R_n arányt jelenti, azaz a szenzibilis hőáram mekkora része a teljes nettó sugárzásnak. Ekkor a függőleges tengelyen a párolgáshányad (EF), a vízszintes tengelyen a hőáram hányad szerepel (3b. ábra).

Az (1) mérlegegyenletből a Bowen-arány is közvetlenül kifejezhető, a mérlegegyenletet osztva ET -vel, kapjuk:

$$\frac{R_n}{ET} = \frac{ET}{ET} + \frac{H}{ET} \quad (5)$$

Mivel ET/R_n -t EF -nek jelöltük, ezért az (5) egyenlet bal oldalán szereplő R_n/ET megegyezik $1/EF$ értékével. A jobb oldalon az $ET/ET = 1$ tagot, és a $H/ET = Bo$ tagot (ez maga a Bowen- arány) behelyettesítve az (5) egyenletből következik:

$$\frac{1}{EF} = 1 + Bo \quad (6)$$

$$EF = \frac{1}{1 + Bo} \quad (7)$$

$$Bo = \frac{1 - EF}{EF} \quad (8)$$

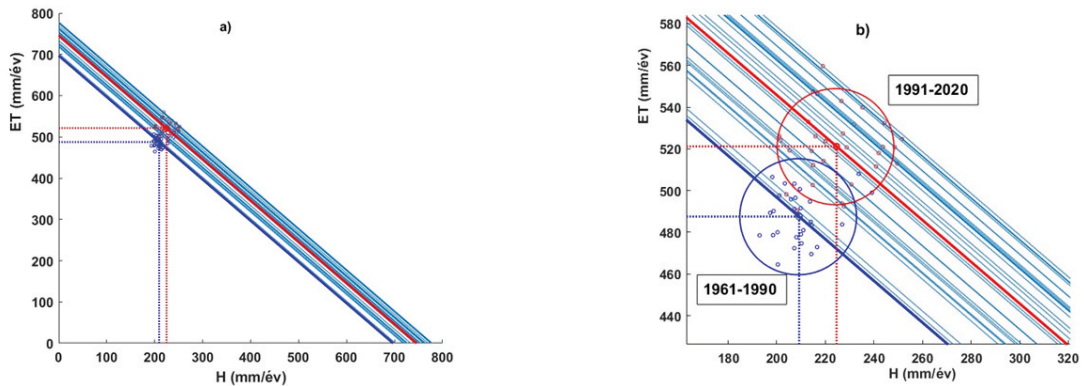
Tehát a párolgáshányad ismeretében kifejezhető a Bowen-arány, vagy fordítva, a Bowen-arány ismeretében kifejezhető a párolgáshányad.

Eredmények

A Duna vízgyűjtőre elkészített klímadiagram H - ET munkapontjait és az R_n egyeneseket mutatja be a 4. ábra az 1961–1990 időszakra és az 1991–2020 időszakra. A területre és évekre átlagolt adatok az ECMWF ERA5-Land reanalízis adatbázisból származnak. Valamennyi pont és vonal feltüntetése egy ábrán megnehezítené az áttekintést, ezért a két időszak adatait eltérően ábrázoltuk.

Az 1961–1990 időszak 30 db H - ET értékpárja meghatározza minden adott évre jellemző pontot a klimatikus energiamérleg diagramon, amelyeket kék színű kis körök jelölnek (4a. ábra). A 30 éves időszak H és ET értékeinek átlagát pedig a telt kék pont jelöli, amelynek H , illetve ET értékeit a tengelyig meghúzott kék pontozott vonal segít leolvasni. Az R_n értékek 30 éves átlagát a telt kék ponton átmenő vastag kék vonal mutatja (az egyes évekhez tartozó R_n vonalak az áttekinthetőség érdekében nincsenek jelölve).

Az 1991–2020 időszak 30 db H - ET értékpárjai által meghatározott pontokat piros színű kis körök jelölik. Ennek a 30 éves időszaknak a H - ET átlagát telt piros pont jelöli, a H és ET értékeit a tengelyig meghúzott piros pontozott vonal mutatja. Az 1991–2020 időszak 30 db R_n értékét jelölő vonalai is be vannak egyenként rajzolva az ábrára vékony kék vonallal. Az R_n értékek átlagát pedig vastag piros vonal mutatja.



4. ábra. a) A Duna-medence klímadiagramja 1961–2020 között az éves munkapontok, és az éves R_n átlók ábrázolásával 1991–2020 között b) A Duna-medence klímadiagramja az 1961–1990 (kék) és 1991–2020 (piros) normálidőszakok éves munkapontjaival (felhagyított részlet).

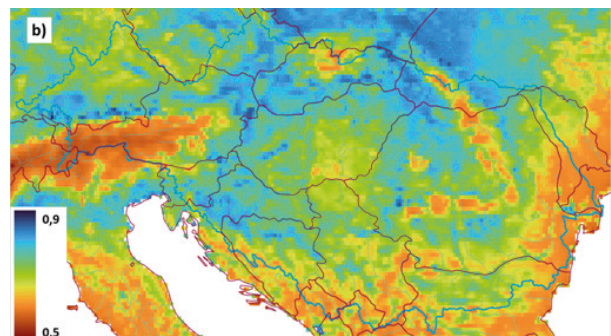
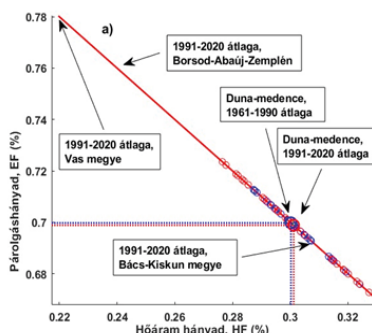
Az 1961–1990-os időszakhoz képest az 1991–2020-as időszakra 697 mm/év vízegyenértékről 745 mm/év-re nőtt a nettó sugárzás átlaga a Duna-medencében (a 4a. ábrán a vastag kék ill. piros vonalak végpontjai a tengelyen). A sugárzás adatokat a Módszer fejezetben leírtak szerint számoltuk át párolgási vízegyenértékre, hogy valamennyi adat azonos mértékegységben legyen megadva. A 4b. ábrán kinagyítva láthatóak az $ET-H$ értékpárok, ahol megfigyelhető, hogy az 1961–1990-os időszakhoz képest az 1991–2020-as időszakra mind a párolgás értéke nőtt (488 mm-ről 521 mm-re), mind pedig a hóárak értéke (210 mm-ről 223 mm-re) növekedett.

Normalizált klímadiagram az 1961-1990 és az 1991-2020-as időszak összehasonlítására

Az éghajlati víz- és energiamérleg éves adatait normalizált diagramon is ábrázolhatjuk. Ekkor a (4) egyenlet miatt az $R_n/R_n=1$ egységátlóra kerülnek a munkapontok (5a. ábra). A függőleges tengelyhez

tartozó párolgáshányad (EF) érték azt mutatja, hogy az adott évben vagy időszakban a nettó sugárzás mekkora részét (100-zal szorozva hány százalékát) szállította el a felszínről a párolgás. A jobb vízháztartású területek esetében balra felfelé, a kevésbé jó vízháztartású területeken jobbra lefelé tolódik el a munkapont. A Duna-medencében az éves sugárzási mérleg mintegy 70%-át szállítja el a párolgás (látens hő). A szenzibilis hő aránya a vízszintes tengelyről olvasható le.

Az egyes évekre jellemző munkapontok egy tágabb tartományban helyezkednek el, mutatva az évek közötti különbségeket. A 30 éves normaidőszakra jellemző munkapontok azonban viszonylag közel vannak egymáshoz, jelezve, hogy egy vizsgált térség meghatározott klímájú területen helyezkedik el, és csak kicsinek tűnik az eltolódás. A párolgáshányad értéke a Duna-medencében az 1961–1990 évek átlagában 0,6998. Az 1991–2020 évek átlaga pedig 0,6988. Ne feledjük azonban, hogy akár csekély átlagos elmozdulás mögött is óriási energiamennyiségekről van szó. Egy tízed százalék eltolódás egy normálidőszak alatt



5. ábra. a) A Duna-medence normalizált klímadiagramja éves munkapontokkal (piros és kék körök az átlón), és a 30 éves normálidőszakok 0,7 körüli átlagaival (pontozott vonallal jelölve). b) A párolgáshányad átlagos éves értékének területi eloszlása a Duna vízgyűjtőjén az 1991–2020 időszakban ERA-5 Land párolgás és sugárzás adatok alapján számolva.

azt jelenti, hogy minden évben a terület teljes nettó sugárzásának egy tized százalékával több (vagy kevesebb) lesz a szenzibilis vagy látens hő mennyisége!

A feldolgozott adatok további elemzésekre is lehetőséget adnak, például az 5b. ábrán, a párolgáshányad (EF) területi eloszlása látható a Duna-medencében az 1991–2020 közötti időszakban. A különböző régiókban lévő területek között jelentős eltérés van. Nyugat-Dunántúlon, az Északi-Középhegységben és északkeleten a legmagasabb, 0,8 körüli az érték (ami azt jelenti, hogy a nettó sugárzás közel 80%-a párolgással távozik a felszínről), miközben a Délalföldön ez az érték mintegy 15%-al kisebb. Az 5a. ábra bemutat néhány vármegyére lehatárolt értéket: Vas vármegye: átlag 0,78 (min: 0,74, max: 0,82); Borsod-Abaúj-Zemplén vármegye: átlag 0,76 (min: 0,71, max: 0,82); Bács-Kiskun vármegye: átlag 0,69 (min: 0,63, max: 0,76).

Összefoglalás

A vízkörzés energiaszállításban betöltött szerepét egyszerűen be lehet mutatni egy klímadiagram ábrán. Az energia- és vízmérleg főbb adatait grafikonon ábrázolva minden évre vagy kiválasztott időszakra fel tudunk rajzolni egy munkapontot. Egy adott terület éghajlatának változékonyságát jól érzékelteti a munkapontok éves változása. Az éghajlatváltozás hatásait a két harmincéves normálidőszak átlagát bemutató munkapontok eltolódása mutatja, ahol látható a Duna-medence nettó sugárzásának növekedése, amelynek hatására a látens és szenzibilis hő mennyisége egyaránt nőtt. Normalizált klímadiagram segítségével a munkapont helyének értelmezése, vagy eltérő éghajlatú területek állapotának összehasonlítása is megkísérélhető.

A víznek és párolgásának rendkívüli szerepe van a globális hőforgalomban, amelyhez a táj-növényborítás-vízkör rendszer kiegyensúlyozott működése szükséges. Az éghajlatváltozás kezelése soha nem látott kihívás elé állítja az emberiséget. A nedvesség „újra-hasznosításának” kutatása (Ent et al., 2014), vagy a párolgás és potenciális párolgás alakulásának vizsgálata (Báder és Szilágyi, 2023) azt mutatja, hogy a vízkörzés stabilitásának megőrzéséhez ezen folyamatokat már törekszünk jobban megismerni. A víz- és energiamérleg főbb összetevőinek arányait tudatosítva és a párolgás közben elvégzett energiaszállítás jelentőségét elismerve a víz körforgásának rendszerszemléletű értelmezését és annak terjedését segíthetjük.

Köszönetnyilvánítás: A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta. Köszönjük Sándor Balázs észrevételeit és a klímadiagram normalizált változatának kidolgozására tett javaslatát.

Irodalom

- Agócs, J., 2018: Rendkeresés. Ekvilibrium Kiadó, Budakeszi. ISBN 978-963-88213-3-1
- Báder, L. and Szilágyi, J., 2023: Widening Gap of Land Evaporation to Reference Evapotranspiration Implies Increasing Vulnerability to Droughts in Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. <https://doi.org/10.3311/PPci.21836>
- Báder, L., 2023: Magyarország vízmérlege és az éghajlatváltozás. *Hydrologiai Közlemények 2023* 1. <https://doi.org/10.59258/HK.10410>
- Báder, L., Szilágyi, J., Négyesi, K., Nagy, E., Földváry, L., 2023: Changes and trends in the climatic water balance of the Danube river basin based on meteorological, hydrological, and gravimetric data for the period 1961–2020. *HydroCarpath Conference, 9. Nov. 2023*. <https://doi.org/10.35511/978-963-334-505-4>
- Báder, L. 2025: The Climatic Energy Balance Diagram (CEBD) highlights changes in the hydrological cycle of the Danube River basin, *J. Hydrol. Hydromech.*, 73, 2025, 1, 24-33 doi.org/10.2478/johh-2025-0001
- Eiseltová, M., Pokorný, J., Hesslerová, P., Rípl, W., 2012: Evapotranspiration – A Driving Force in Landscape Sustainability. *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling, Ayse Irmak, IntechOpen*, <https://doi.org/10.5772/19441>.
- Ellison, D., Pokorný, J., & Wild, M., 2024: Even cooler insights: On the power of forests to (water the Earth and) cool the planet. *Global Change Biology*, 30, e17195. <https://doi.org/10.1111/gcb.17195>
- R.J. van der Ent, Wang-Erlandsson L., Keys, P.W., and Savenije, H.H.G., 2014: Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 2: Moisture recycling. *Earth Syst. Dynam.*, 5, 471–489
- Hurina, H., Pokorný, J., 2016: The role of water and vegetation in the distribution of solar energy and local climate: a review. *Folia Geobotanica* 51, 191–208.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P. et al., 2020: Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467, 951–954, 2010. <https://doi.org/10.1038/nature09396>
- Kocsis, K., 2018: Magyarország Nemzeti Atlasza. II. kötet: Vizek. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, Budapest, 70
- Kravcik, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kovac, M., Tóth E., 2007: Water for the Recovery of the Climate. A New Water Paradigm. *People and Water NGO*, Kosice, Slovakia
- Muñoz Sabater, J., 2019: ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>, Adatok letöltése: 2024.02.21.
- Rípl, W., 2003: Water, the bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 358 (1440), 1921–1934.
- Schlesinger, W. H., and Jasechko, S., 2014: Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011>
- Szilágyi, J., Kovács, Á., 2011: A calibration-free evapotranspiration mapping technique for spatially-distributed regional-scale hydrologic modeling. *Hydrol. Hydromech.*, 59, 118–130 <https://doi.org/10.2478/v10098-011-0010-z>
- Szilágyi, J., 2012: Párolgásmérés műhoddal és lavórral. *Élet és Tudomány* 2012(26), 806–809.



Az AROME modell adatasszimilációjának fejlesztése további SYNOP adatokkal

Duics-Koroscecz Lilla, Tóth Helga, Kristóf Erzsébet

HungaroMet Nonprofit Zrt., koroscecz.l@met.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.1.5

Az utóbbi egy-két évben jelentősen bővült a környező országok szinoptikus állomásairól származó SYNOP (surface synoptic observation) adatok elérhetősége, lehetővé téve ezek beépítését a hazai AROME (Applications of Research to Operations at Mesoscale) modell adatasszimilációs rendszerébe. A tanulmány áttekinti a bővítés eredményeit, amely során megállapítottuk, hogy az újonnan – kétoldalú megállapodások keretében – érkezett adatok ugyanúgy felhasználhatók az adatasszimiláció során, mint a GTS-en (Global Telecommunication System) keresztül elérhető adatok, mivel hasonló minőségűek. Továbbá, hogy a rendszer fejlesztése az előrejelzések minőségének kismértékű javulásával járt együtt.

Extension of AROME/HU model data assimilation with additional SYNOP data

Recently a significant amount of extra SYNOP (surface synoptic observation) data became available from the surrounding countries of Hungary, and it makes possible to include them into the AROME (Applications of Research to Operations at Mesoscale) data assimilation system. The study reviews the results of the expansion, during which it was concluded that the new observations – obtained via bilateral agreements – can be used in the data assimilation just as the data available through the GTS (Global Telecommunication System), since they have a similar quality. Furthermore, the development of the system was accompanied by a minimal improvement in the forecast quality.

A légköri kormányzó egyenletek megoldásához szükséges kezdeti feltételek minél pontosabb ismerete elengedhetetlen a minőségi időjárás előrejelzés készítéséhez, mivel az egyenletek rendkívüli érzékenységet mutatnak a kezdeti feltételekre (Lorenz, 1993). Ezek optimális előállításával foglalkozik az adatasszimiláció (Harms *et al.*, 1992). Az adatasszimiláció során a méréseket és a korábbi időpontból indított néhányórás előrejelzéseket (háttérmezőt) statisztikai értelemben optimális módon ötvözik, figyelembe

véve az egyes információk megbízhatóságát. Ennek eredménye az analízis, amelyet kezdeti feltételként alkalmaznak (Pu and Kalnay, 2018). A HungaroMet Zrt.-nél alkalmazott AROME modell adatasszimilációs rendszerébe öt forrásból kerülnek megfigyelési adatok, mégpedig a SYNOP táviratokból, rádiószondáktól (TEMP távirat), repülőgépekről (AMDAR, Mode-S MRAR távirat), a globális műholdas navigációs rendszer (GNSS; Global Navigation Satellite Systems) adataiból; továbbá az AMV (Atmospheric Motion Vectors)

műholdas adatokból. A GNSS főleg integrált nedvességi paraméterrel szolgál, azaz megadja egy légszlopban lévő nedvesség mennyiségét. Az AMV pedig a különböző magassági szinteken található felhők mozgásából meghatározott szélvektorokat jelenti (Tóth et al., 2021). A SYNOP táviratokból a 2 méteres hőmérséklet, a 2 méteres relatív nedvesség, a 10 méteres szélsébség és a felszíni légneműságből származtatott geopotenciál kerül asszimilálásra.

Kísérleti jelleggel további, a környező országokból származó SYNOP adatokkal bővítettük a hazai meteorológiai szolgálatnál használt AROME modell adatasszimilációs rendszerét, így nagyjából kétszer annyi SYNOP adatot vettünk figyelembe az előrejelzés során, mint az operatív modellváltozatban. A kísérletre azért most került sor, mert az utóbbi időszakban jelentősen bővült a környező országok SYNOP adatainak elérhetősége, amelyeket bilaterális adatcsere keretében a HungaroMet Zrt. is felhasználhat az adatasszimilációban, illetve verifikáció céljára. A hozzáadott adatok az OPLACE (Observation Preprocessing System for Regional Cooperation for Limited Area modelling in Central Europe) rendszerből származnak, amelyben összegyűjtik a környező országokból – mint Románia, Szlovákia, Csehország, Lengyelország, Ausztria, Horvátország és Szlovénia – származó mérési adatokat. Az OPLACE elsődleges célja az adatcsere támogatása az érintett országok között, és a megfigyelések adatasszimilációhoz való előfeldolgozása (Trojáková et al., 2019). Megvizsgáltuk, hogy egyrészt a hozzáadott SYNOP adatok, másrészt az AROME modell beállításain ezzel kapcsolatban történt módosítások milyen hatással vannak az előrejelzések minőségére. A modellfuttatások egy-egy hónapra készültek, 2023 májusára és novemberére.

Kísérletek

Az AROME a Météo-France és az ACCORD (A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development) nemzetközi konzorcium meteorológiai szolgálatai által közösen kifejlesztett, konvektív skálájú numerikus időjárás-előrejelző modell (Seity et al., 2011; Brousseau et al., 2016), amelyet 2010 óta használ operatíván a magyar meteorológiai szolgálat rövidtávú (legfeljebb 48 órás) időjárás-előrejelzés készítésére. Jelenleg az előrejelzések egy Kárpát-medencét lefedő tartományon, 2,5 km-es horizontális felbontással és 60 vertikális szinttel készülnek (Tóth et al., 2021).

A hozzáadott SYNOP adatok előrejelzés pontosságára gyakorolt hatásának értékeléséhez 2023 májusára és novemberére végeztünk modellkísérleteket. A két

vizsgált hónapra kapott eredmények verifikációjától előzetesen más-más eredményt vártunk az eltérő időjárási helyzetek és az évszakos sajátosságok miatt. Tavasszal már több konvektív helyzet is előfordult, míg ősszel az Atlanti-óceánon néhány viharciklon is képződött, amelyek az AROME tartományát is érintették [1]. Verifikált változóként a 2 méteres hőmérsékletet, a 2 méteres relatív nedvességet, a 10 méteres szélsébséget és a 3 órás csapadékösszeget választottuk, mivel az időjárási helyzet ismerete alapján ezeknél számítottunk az előrejelzés legjelentősebb javulására.

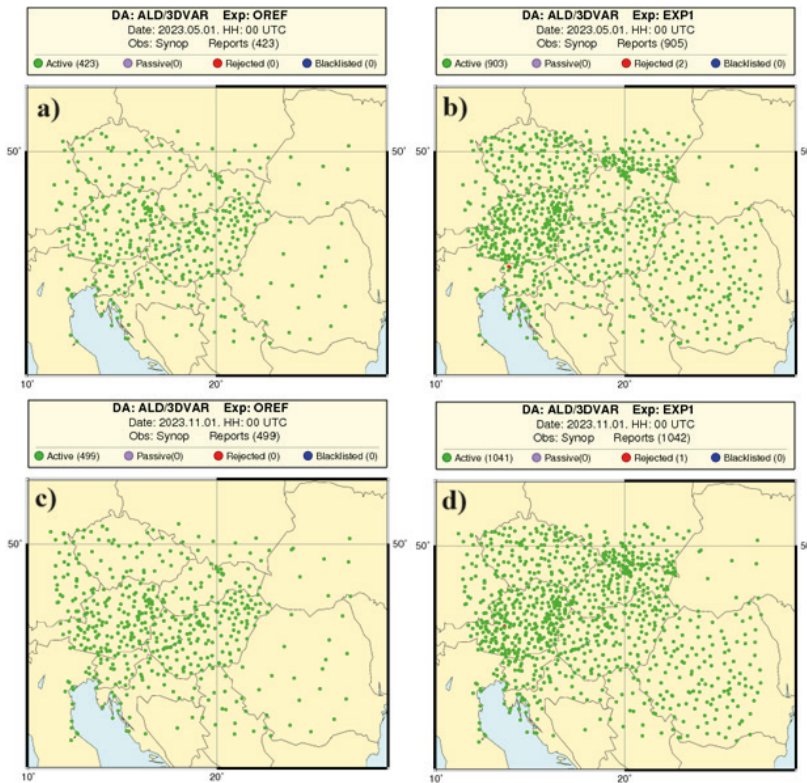
A hatás értékeléséhez három modellfuttatást végeztünk el 2023 májusára (a továbbiakban májusi vagy tavaszi időszak) és novemberére (a továbbiakban novemberi vagy őszi időszak) vonatkozóan: a referencia futtatást (OREF), az első kísérleti (EXP1) és a második kísérleti futtatást (EXP2). Az OREF az AROME operatíván használt beállításait tartalmazta. Az EXP1 modellbeállításai a referenciáéval azonosak voltak, azonban ebbe beleépítettük az új SYNOP adatokat is, s az analízis elkészítése során az operatív AROME modellhez hasonlóan, az adott rácspontról a 80 km-es távolságban lévő megfigyeléseket vettük figyelembe (Bouttier and Courtier, 2002). Az EXP2 esetén az analízis elkészítése során a megfigyelések hatókörét 40 km-re csökkentettük Bučánek (2020) eredményei alapján. Ezáltal a sűrűbb hálózatból a rácspontról közvetlen környezetben lévő megfigyeléseket használtuk fel, és figyelmen kívül hagytuk a távolabb eső méréseket, amellyel nagyobb pontosságra számíthattunk. Mindhárom modellfuttatás esetén csak a 0 UTC-s kiindulási időpontból készült előrejelzés, 30 órára előre, minden egyes nap.

Az 1. ábra a) és c) térképein a referencia futtatás által fölhasznált SYNOP jelentéseket láthatjuk május és november 1-jén 0 UTC-re vonatkozóan, és észrevehető, hogy ezek száma körülbelül feleakkora, mint az első kísérleti futtatásba bemenő adatok mennyisége (1. ábra b) és d) térképei). Ez alapján tudhatjuk, hogy a további környező adatok sikeresen beépültek a kezdeti feltételbe.

Eredmények

A vizsgált tavaszi és őszi időszak közül a tavaszra vonatkozó eredményeket mutatjuk be röviden, mivel ez esetben jobban kiütözköztek a futtatások közötti különbségek.

A 2. ábrán a három modellfuttatás 2 méteres hőmérséklethez tartozó adatstatisztikáinak szórása és átlaga látható május 1. és 31. között. Mindhárom szimuláció esetén a mérések háttérmezőtől, illetve analízistől vett eltéréseinek átlagai nulla körüli értékeket vesznek föl, ami azt jelenti, hogy megbízhatóak az adataink.



1. ábra. A referencia futtatás által felhasznált SYNOP jelentések száma a) 2023. május 1-jén 0 UTC-kor, illetve c) 2023. november 1-jén 0 UTC-kor. Az első kísérleti futtatás által felhasznált SYNOP jelentések száma b) 2023. május 1-jén 0 UTC-kor és d) 2023. november 1-jén 0 UTC-kor. A zöld pontok jelzik az adatasszimiláció során felhasznált adatok gyűjtési helyét („active”).

A három modellfuttatás adatstatisztikáinak szórásai is körülbelül azonos értékeket vesznek föl, noha az EXP2 szórásai valamivel kisebbek maradnak a másik két futtatáshoz képest, mivel ebben az esetben csak a rácspontok közvetlen környezetében lévő megfigyeléseket vettük figyelembe, ezáltal pedig kisebb különbség lépett föl a mérések és a háttérmező, illetve az analízis között. Míg a 2 méteres hőmérsékletnél a három modellfuttatás hasonlóan teljesített, addig a 10 méteres szél két vizsgált adatstatisztikája esetén jobban kiütököztek a futtatások közötti, illetve a két adatstatisztika közötti különbségek (3. ábra). Az analízisben lévő többlet adatok miatt elvárt, hogy a megfigyelésektől vett eltérése nullához közelebbi értékeket produkáljon, mint a megfigyelések és a háttérmező különbsége, és ebből is látszik az adatasszimiláció haszna: csökkenti az előrejelzésből fakadó hibákat a pontosabb kezdeti értékekkel. Az őszi futtatás esetén is hasonlókat figyeltünk meg.

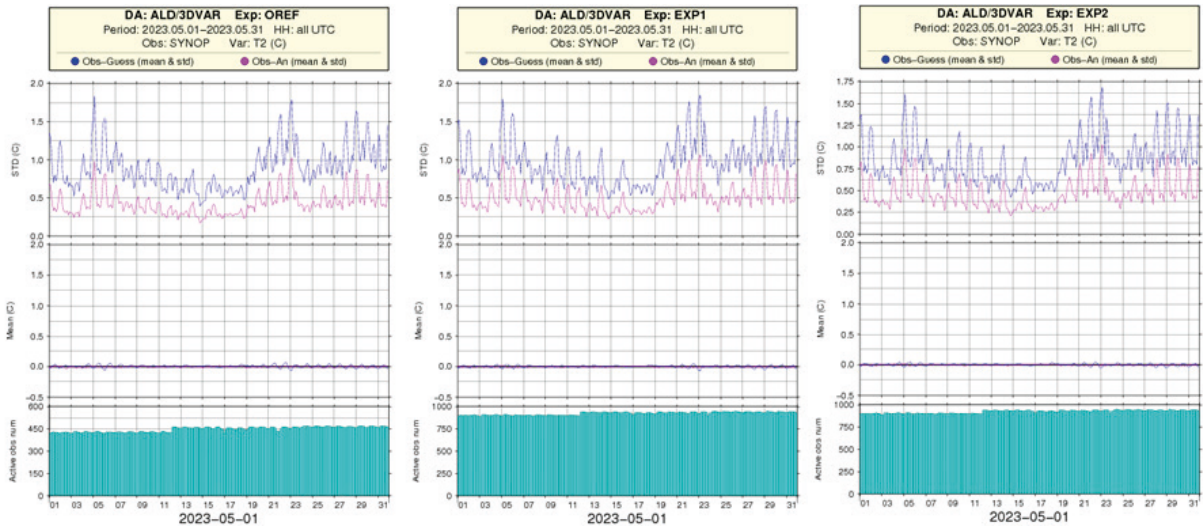
További, gyakran használt adatstatisztika az inkrementum, amely az analízis és a háttérmező különbségéből áll elő. A segítségével megmutatható, hogy az adatasszimiláció során felhasznált SYNOP adatok

nek mekkora a hozzáadott értéke a modell előrejelzéséhez. A három modellfuttatás 2 méteres hőmérsékletre vonatkozó inkrementuma a tavaszi időszak első analízisének időpontjára a 4. ábrán látható. Az időpont megválasztása nem véletlen, mert ezáltal látható, hogy már az első analízis elkészültekor észrevehető különbségek ütköztek ki a modellfuttatások analízisei között. Az OREF esetén az inkrementumok homogénebb mezőt mutatnak, mint az EXP1 és az EXP2 esetén, mivel az előbbi esetben kevesebb megfigyelést vettünk figyelembe. A tartomány keleti és nyugati határán megfigyelhetjük, hogy az analízis néhány ponton jelentősen eltért a modell előrejelzésétől. Ennek az lehet az oka, hogy a tartomány szélén, leginkább a hegyvidéki területeken, a modell előrejelzése pontatlanabb, mivel az AROME orográfiaja eltér a tényleges orográfiaétól a durvább térbeli felbontása miatt. Ennek okán nagyobb inkrementum értéket kapunk, vagyis az adatasszimiláció

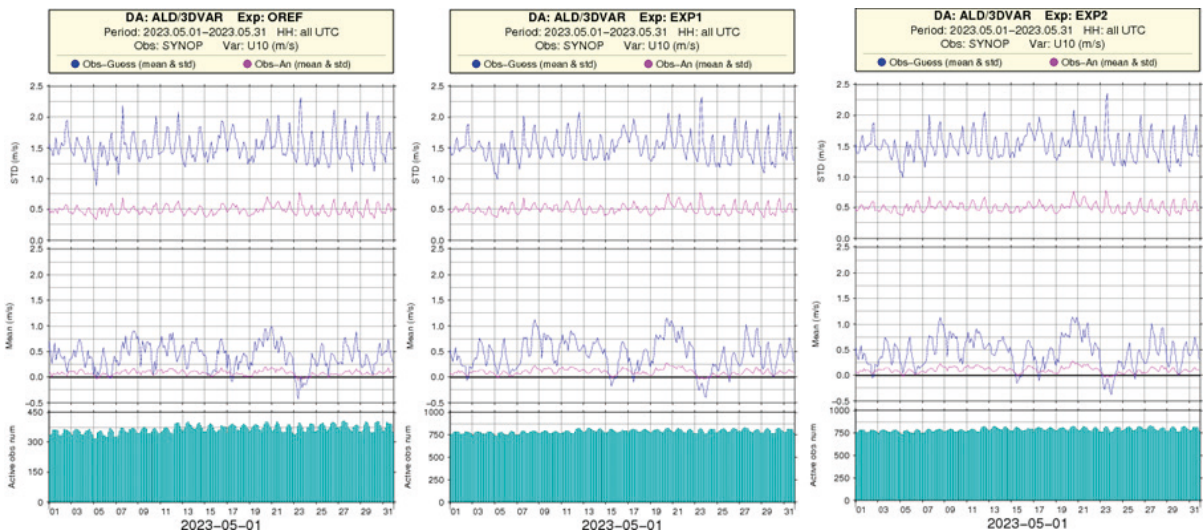
szórási értékei nagyobbak, mint a többi helyen. Az őszi időszak inkrementum vizsgálata során is hasonlókat figyeltünk meg.

A referencia és a kísérleti futtatások összehasonlítását több paraméterre is elvégeztük, amelynek alapját az átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke (root mean square error, RMSE) és az átlagos előrejelzési hiba (bias) adta. A bias egy adott paraméter becslésének – jelen esetben egy állapotváltozó előrejelzésének – és a megfigyelés átlagos eltérését veszi, míg az RMSE az előrejelzés és a megfigyelés átlagos négyzetes eltérésének négyzetgyöke. Az RMSE esetén a nullához közeli értékek jelentik a pontosabb becsléseket, maga a nulla pedig a tökéletes becslést jelenti, bias esetén ugyanakkor nem, mert a pozitív és negatív értékek kiejthetik egymást az átlagolás során. Míg az RMSE nem lehet negatív értékű, addig a pozitív bias értékek szisztematikus felülbecslést, a negatív bias értékek alulbecslést jelentenek (Harwell, 2018).

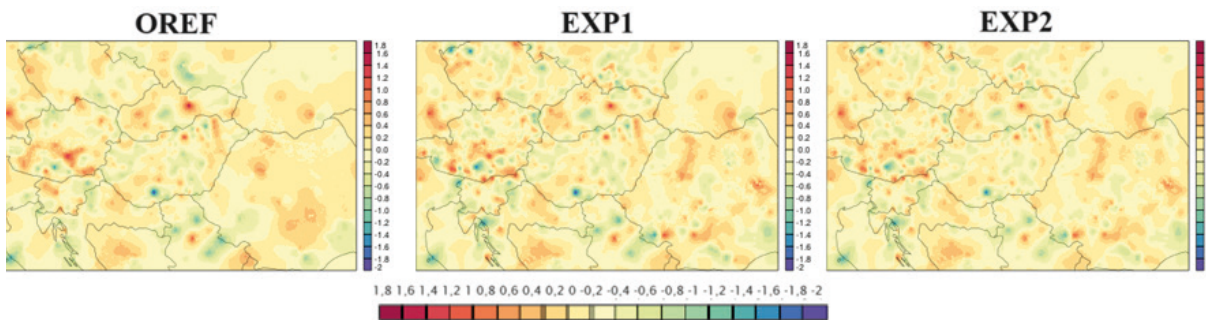
A verifikáció az OVISYS (Objective Verification System) és a HAWK-3 segítségével történt. Az OVISYS a HungaroMet Zrt. belső fejlesztésű



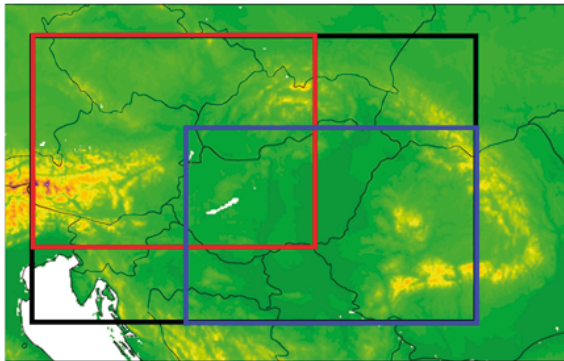
2. ábra. A megfigyelések háttérmezőtől vett különbsége (kék görbe), illetve a megfigyelések és az analízis eltérése (magenta görbe) a referencia futtatás (OREF) és a két kísérleti futtatás (EXP1, EXP2) esetén május 1. és 31. között, a 2 méteres hőmérsékletre. Az ábrán megtalálhatók az eltérések szórásai (standard deviation, STD) és átlagai (mean) °C-ban, illetve az asszimiláció során felhasznált megfigyelések száma (Active obs. num.).



3. ábra. A megfigyelések háttérmezőtől vett különbsége (kék görbe), illetve a megfigyelések és az analízis eltérése (magenta görbe) a referencia futtatás (OREF) és a két kísérleti futtatás (EXP1, EXP2) esetén május 1. és 31. között, a 10 méteres szélsősségre. Az ábrán megtalálhatók az eltérések szórásai (standard deviation, STD) és átlagai (mean) °C-ban, illetve az asszimiláció során felhasznált megfigyelések száma (Active obs. num.).



4. ábra. Az OREF, az EXP1 és az EXP2 2 méteres hőmérsékleteinek inkrementumai [°C] április 25-én 21 UTC-kor.



5. ábra. Az AROME operatív verifikációs tartományában (fekete) pirossal jelöljük a nyugati kivágatot, és késsel a keleti kivágatot.

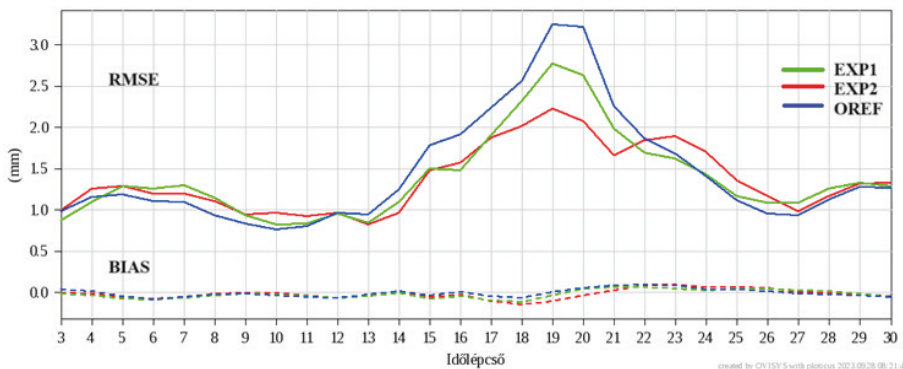
verifikációs rendszere (Szabó, 2011), míg a HAWK egy szintén belső fejlesztésű rendszer, amit megjelenítésre használnak (Rajnai et al., 2024).

Annak megfelelően, hogy mely területekre érkezett be több SYNOP adat, az AROME teljes verifikációs tartományában kijelöltünk további két, kisebb területet,

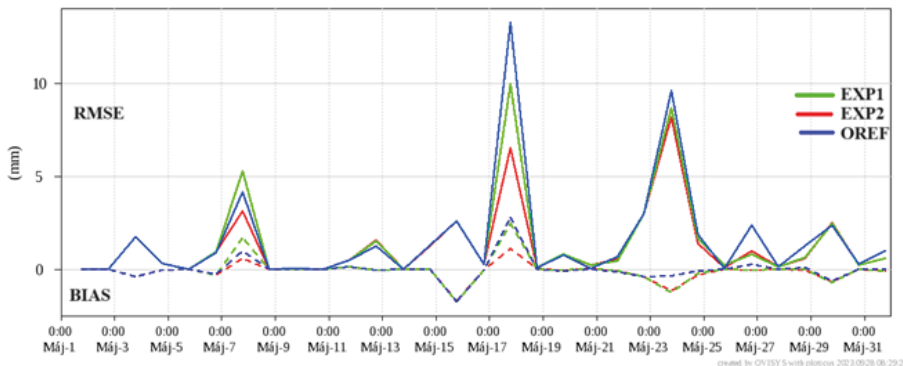
amelyek az 5. ábrán láthatók. Az egyszerűség kedvéért a két kivágatra az elhelyezkedésük alapján fogunk hivatkozni, mint keleti és nyugati kivágat.

A tavaszi időszakra vonatkozó 3 órás csapadékösszeg előrejelzések verifikációja látható a 6. ábrán a keleti kivágatra vonatkozóan. A legnagyobb eltéréseket a késő délutáni órákban, leginkább az RMSE értékeiben figyelhetjük meg, ami 19 UTC-nél éri el a maximumát, míg éjszaka a modellfuttatások nagyjából együtt mozognak. Ennek magyarázata a napközbeni csapadék-előrejelzésben rejlő bizonytalanság lehet, amely a konvekcióból fakad. Ebből adódóan a hibák alakulásában napi menet látható. Ezt az időjárási helyzet vizsgálata is alátámasztotta [1]. Amíg májusban kirajzolódott a napi menet, addig novemberben ezt nem figyeltük meg.

A 7. ábrán (technikai okok miatt a maximális értékhez tartozó 19 UTC-s időpont helyett) a 18 UTC-re vonatkozó 3-órás csapadékösszeg előrejelzéseket jeleltettük meg május minden napjára. Habár mindhárom futtatás a hónap folyamán nagyjából együtt változott, az RMSE értékeiben több napon is előfordultak szignifikáns különbségek, mégpedig május 7-én, 17-én, illetve 23-án. Ekkor frontátvonulások zajlottak. Ezekben a napokban a 2. kísérleti futtatás jobb előrejelzésekkel szolgált, mint az 1. kísérleti futtatás, vagy mint a referencia, mivel ekkor az RMSE értéke nullához közelebbi.



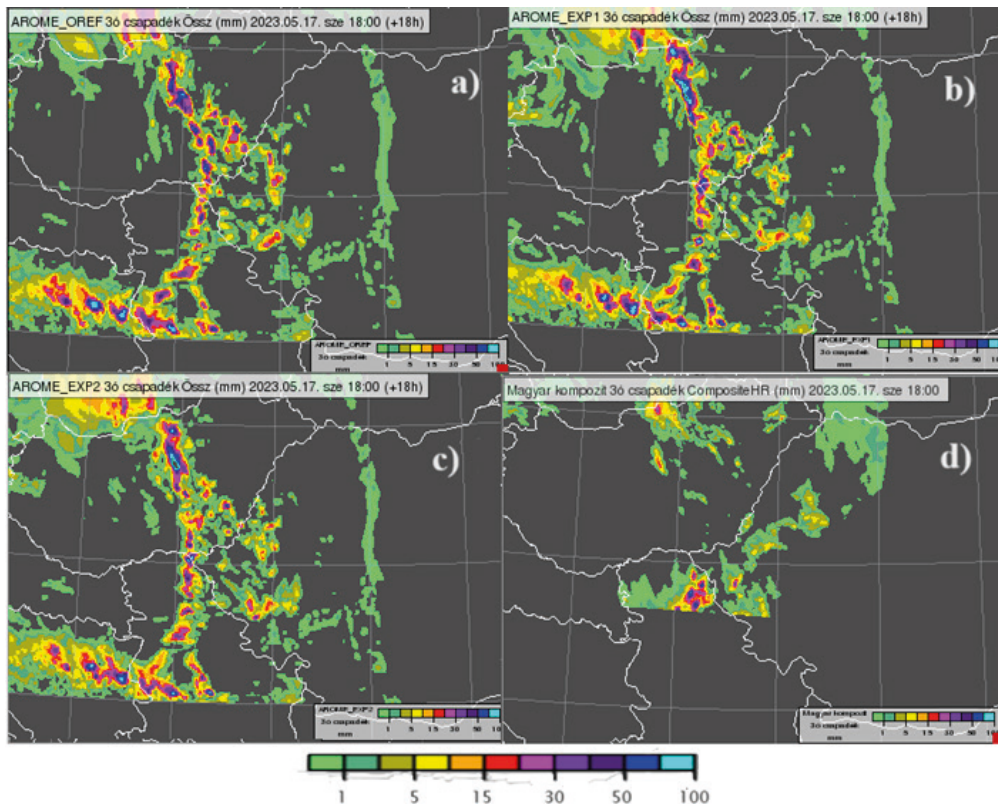
6. ábra. Az OREF (kék), az EXP1 (zöld) és az EXP2 (piros) 3 órás csapadékösszeg előrejelzéseinek hibája mm-ben kifejezve, az órában megadott időtől függvényében a keleti kivágaton, 2023 májusában. A hibát az RMSE (folytonos vonal) és a bias (szaggatott vonal) segítségével fejeztük ki.



7. ábra. Az OREF (kék), az EXP1 (zöld) és az EXP2 (piros) 3 órás csapadékösszeg előrejelzéseinek hibája 18 UTC-kor, 2023 májusának minden napjára vonatkozóan, a keleti kivágaton. A hibát az RMSE (folytonos vonal) és a bias (szaggatott vonal) segítségével fejezzük ki mm-ben.

A prognózisok javulása különösen jól látszik május 17-én, amikor az EXP2 hibája az OREF-hez képest nagyjából feleakkora. Ezen a napon Magyarország környezetében egy gyengülő mediterrán ciklon helyezkedett el, amelynek frontrendszere az esti órákban a modelltartomány keleti részén széles, csapadékos időjárást okozott, néhol zivatarokkal [1].

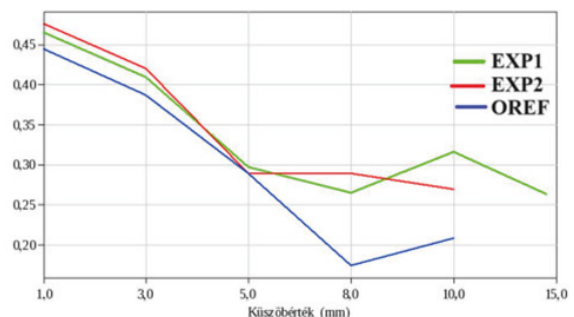
A május 17-én 18 UTC-re vonatkozó térképeken (8. ábra) megfigyelhetjük, hogy a csapadékösszeg elhelyezkedése a modellfuttatásokban viszonylag eltérő, valamint több csapadékot jeleztek előre a valóságnál. Az ehhez hasonló előrejelzések miatt nehéz szubjektív módon megítélni, hogy melyik futtatás előrejelzése sikerült jobban az adott időpontra vonatkozóan. Az alkalmazott metrikák – RMSE és bias (ld. 6., 7. ábra) – lehetővé teszik az objektív döntéshozatalt, miszerint az EXP2 előrejelzése a legpontosabb, mivel az kevésbé becsült felül.



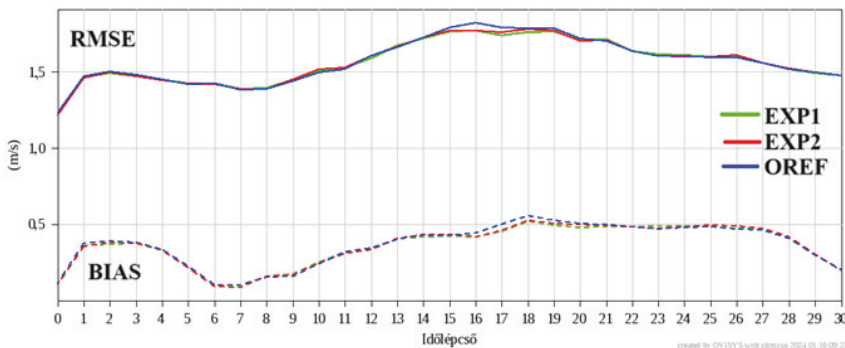
8. ábra. 2023. május 17-én 18 UTC-re vonatkozó 3 órás csapadékösszeg előrejelzések [mm] a) az OREF, b) az EXP1 és c) az EXP2 alapján, a keleti kivágaton. A d) ábrán a radaradatokból számított 3 órás csapadékösszeg látható. A radarkép kivágata kisebb, mint az előrejelzésekhez használt tartományok mérete.

A tavaszi időszak esetén nemcsak az RMSE és a bias, hanem az EDS (Extremal Dependence Score) (Stephenson et al., 2008), az EDI (Extremal Dependence Index) és a SEDI (Symmetric Extremal Dependence Index) (Ferro and Stephenson, 2011) mérőszámokat is megvizsgáltuk a délutáni csapadékra vonatkozóan. Mindhárom mérőszám a ritkán bekövetkező, szélsőséges időjárási események előrejelzésének verifikálására szolgál, és előnyük a korábbi mérőszámokhoz képest, hogy csapadékmennyiség alapján csoportosítják és értékelik az eseményeket, ezáltal a ritkán bekövetkező eseményekre is adnak értékeket. A kiértékelés -1 és 1 közötti skálán történik, ahol minél közelebb van az egyhez az adott mérőszám, annál közelebb van az előrejelzett érték a megfigyelésekhez, míg minél inkább közelít a nullához, annál pontatlanabb a prognózis (Sharma et al., 2017). A vizsgálattal a délutáni konvekcióból származó nagyobb mennyiségű csapadékkal járó események is kiértékelhetők. A mérőszámokat az AROME teljes tartományára vetítve elemeztük mindegyik modellfuttatásra, a 3 órás csapadékösszege. A kiértékelés a teljes májusi

hónapra, 18 UTC-re vonatkozik, tehát a 15–18 UTC közötti időszakra. Mindhárom mérőszám alapján megállapítható, hogy minél nagyobb mennyiségű csapadék hullik 3 óra leforgása alatt, annál pontatlanabb az előrejelzés. Az EDS-t bemutató 9. ábra alapján továbbá az is megmutatható, hogy a 8 vagy 10 mm fölötti 3 órás csapadékösszegek esetén az előrejelzések pontossága kis mértékben megnő. Ennek egyrészt az az oka, hogy



9. ábra. Az OREF (kék), az EXP1 (zöld) és az EXP2 (piros) EDS értékei az AROME teljes tartományán 2023 májusában, 18 UTC-kor.



10. ábra Az OREF (kék), az EXP1 (zöld) és az EXP2 (piros) 10 méteres szélesség előrejelzéseinek RMSE (folytonos görbe) és bias (szaggatott görbe) értékei m/s-ban kifejezve az órában megadott időtáv függvényében a keleti kivágaton, 2023 májusában.

a nagy területre kiterjedő nagyobb mennyiségű csapadékok előrejelzése pontosabb, mint a kisebb mennyiségű, mivel a nagy mennyiségű csapadékok általában jól definiált frontrendszerek csapadékszónáihoz, vagy konvektív rendszerekhez kötődnek, míg a kis mennyiségű csapadékok ebben az időszakban (szitálás, helyi záporok) sokkal inkább a lokális hatások eredményeképpen keletkeznek. Másrészt az adatstatisztikák alapján gyakrabban fordultak elő ebben az időszakban a 8 vagy 10 mm feletti 3 órás csapadékösszegek, ezért a beválási arányuk is nagyobb. A referencia futtatás mérőszámai szinte mindig kisebbek a két kísérleti futtatásénál, ez egyet jelent azzal, hogy minél nagyobb mennyiségű csapadék hullott 3 óra alatt, a referencia futtatás annál pontatlanabb volt a két kísérleti futtatáshoz képest. Az EXP1 és az EXP2 azonban kevésbé különböztek egymástól, és az esetek nagy részében a második kísérleti futtatás szolgált jobb előrejelzésekkel a három szimuláció közül. Az OREF és az EXP2 grafikonja nem haladja meg a 10 mm-es csapadékküszöböt, mert ebben az időintervallumban nem prognosztizáltak 10 mm fölötti 3 órás csapadékösszeget, míg az EXP1 igen.

A 10 méteres szélesség verifikálása során kisebb eltéréseket figyeltünk meg a modellfuttatások között. A keleti kivágatra vonatkozó 10. ábrán megmutatható, hogy a 30 órás időtáv alatt a szimulációk csak kissé, és leginkább a délutáni, kora esti órákban különböztek egymástól. A hibák alakulásában észrevehető egy napi menet,

amelynek minimuma a hajnali órákban van. Ez összefüggésben állhat a szélesség napi alakulásával, miszerint éjszaka a szél általában gyengébb, és kevésbé lökéses, mint nappal.

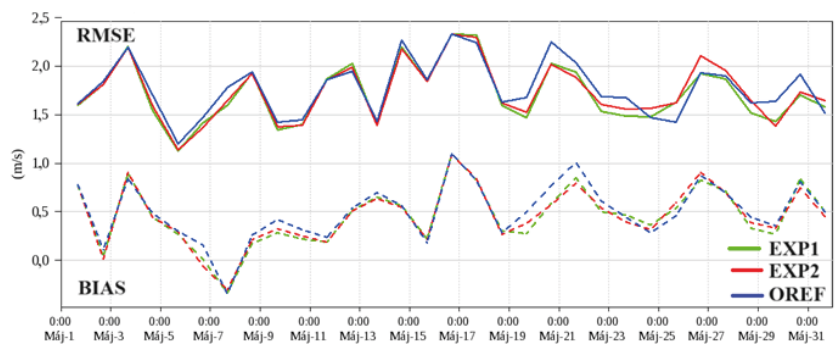
A 17 UTC-re vonatkozó RMSE és bias értékeket mutatja a 11. ábra, amelyen egyes időpontokban jól kivehetők a modellfuttatások közötti eltérések. A legnagyobb differencia május 19. és 25. között mutatható ki. Ennek az lehet az oka, hogy május 18-án egy okklúziós front

vonult át hazánk fölött, amit napokig tartó anticiklonális helyzet követett a május 23-án érkezett hidegfrontig. Az átmeneti időszakban, leginkább az ország keleti, délkeleti részén napközben sok helyen alakult ki zápor, zivatar, amelyeket erősebb széllesek kísértek [1]. Ebből következőleg a futtatások közötti eltérések a labilis légtömegben lezajlott, konvektív események miatti szélesség-változások előrejelzésében mutatkoztak meg.

Összefoglalás

Kísérleti jelleggel további, a környező országokból származó SYNOP adatokkal bővítettük az AROME modell adatasszimilációs rendszerét, így nagyjából kétszer annyi SYNOP adatot vettünk figyelembe a 2023 májusi és novemberi előrejelzés során, mint korábban.

A kísérletek alapján azt állapítottuk meg, hogy a hozzáadott SYNOP adatok, illetve a modell beállításain történt módosítások kissé javítottak



11. ábra. Az OREF (kék), az EXP1 (zöld) és az EXP2 (piros) szélesség előrejelzéseinek RMSE (folytonos görbe) és bias (szaggatott görbe) értékei [m/s] 17 UTC-re vonatkozóan, 2023 májusának minden napjára, a keleti kivágaton.

az előrejelzések minőségén, leginkább a bemutatott májusi időszakban. A csapadék szempontjából aktívabb tavaszi időszakban nagyobb eltérések mutatkoztak a futtatások között a 3 órás csapadékösszegre, mint az ősziben; az őszi időszakban viszont a három modellfuttatás relatív nedvesség előrejelzése jobban elkülönült, mint a tavaszi időszakban.

A 2,5 km-es horizontális felbontású operatív modellváltozat esetén a második kísérleti futtatás (EXP2) beállításait javasoljuk. A kutatás következő célkitűzése a kísérletek megismétlése az AROME modell finomabb, 1,3 km-es horizontális felbontású változatával, amellyel megvizsgálható, hogy milyen hozzáadott értéke van az újonnan asszimilált SYNOP adatoknak egy finomabb térbeli felbontáson. Az újabb futtatások elvégzése során a megfigyelések hatókörének további optimalizálása várható, valamint a finomabb térskálán a csapadék előrejelzésekre gyakorolt hatást is célszerű olyan verifikációs módszerekkel megvizsgálni, amelyek figyelembe futják venni ennek a változónak a térbeli jellemzőit.

Irodalomjegyzék

Bouttier, F. and Courtier, P., 2002: Data assimilation concepts and methods. *Meteorological training course lecture series*. ECMWF, 718, 59.

Brousseau P., Seity Y., Ricard D., and Léger J., 2016. Improvement of the forecast of convective activity from the AROME-France system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142, 2231–2243, <https://doi.org/10.1002/qj.2822>.

Bučánek, A., 2020: Progress report of data assimilation: Assimilation of surface observations (SYNOP, national data, private observation networks) for upper-air and soil data assimilation (40–44) https://www.relac.eu/media/files/Data_Assimilation/reports/DA_report2020_v20210323.pdf

Ferro, C. A. T. and Stephenson, D. B., 2011: Extremal Dependence Indices: Improved Verification Measures for Deterministic Forecasts of Rare Binary Events, *Weather and Forecasting*, 26, 699–713. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05030.1>

Harms, D., E., Raman, S. and Madala, R., V., 1992: An Examination of Four-Dimensional Data-Assimilation Techniques for Numerical Weather Prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society* 73, 425–440, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1992\)073<0425:A-EOFDD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1992)073<0425:A-EOFDD>2.0.CO;2)

Harwell, M., 2018: A Strategy for Using Bias and RMSE as Outcomes in Monte Carlo Studies in Statistics, *Journal of Modern Applied Statistical Methods* 17, 2, 5, 3 pp. <https://doi.org/10.56801/10.56801/v17.i.991>

Lorenz, E., N., 1993: The Essence of Chaos, *University of Washington Press*, 106–107 pp.

Pu, Z. and Kalnay, E., 2018: Numerical Weather Prediction Basics: Models, Numerical Methods, and Data Assimilation, In: *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting* (Szerk.: Duan Q., Pappenberger F., Thielen J., Wood A., Cloke H., Schaake J.), Springer, Berlin, 22–24. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40457-3_11-1

Rajnai M., Tajti D., Vörös M., 2024: HAWK-3. Felhasználói kézikönyv

Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson, 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.* 139, 976–991, <https://doi.org/10.1175/2010MWR3425.1>.

Sharma, K., Ashrit, R., Bhatla, R., Mitra, A. K., Iyengar, G. R. and Rajagopal, E. N., 2017: Skill of Predicting Heavy Rainfall Over India: Improvement in Recent Years Using UKMO Global Model, *Pure and Applied Geophysics*, 174, 4241–4250. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1640-9>

Stephenson, D. B., Casati B., Ferro C. A. T. and Wilson C. A., 2008: The extreme dependency score: A non-vanishing measure for forecasts of rare events. *Meteor. Appl.*, Vol. 15, Issue 1, 41–50. <https://doi.org/10.1002/met.53>

Szabó, L., 2011: OVISYS. OMSZ belső dokumentáció

Tóth, H., Homonnai, V., Mile, M., Várkonyi, A., Kocsis, Zs., Szanyi, K., Tóth, G., Szintai, B., and Szépszó, G., 2021: Recent developments in the data assimilation of AROME/HU numerical weather prediction model. *Időjárás* 125, 4, 521–553, <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.1>

Trojáková, A., Mile, M., and Tudor, M., 2019: Observation Preprocessing System for RC LACE (OPLACE), *Adv. Sci. Res.*, 16, 223–228, <https://doi.org/10.5194/asr-16-223-2019>

Internetes hivatkozások

[1] https://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/napijelentes/ (2024.03.25.)



A Meteorológiai Világszervezet és jogelődjének 150 éves története – megemlékezés az ENSZ-hez való csatlakozás 75-dik évfordulója alkalmából

Lábó-Szapponas Eszter, Dobi Ildikó

HungaroMet Nonprofit Zrt., labo.e@met.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.1.6

A Meteorológiai Világszervezet (WMO – World Meteorological Organization) 2023-ban ünnepelte jogelődje, az 1873-ban létrehozott Nemzetközi Meteorológiai Szervezet (IMO – International Meteorological Organization) megalapításának 150 éves évfordulóját; 2025-ben pedig az ENSZ szakosított intézményeként való működésének 75 éves évfordulóját ünnepli. A WMO az ENSZ-hez történő csatlakozása óta viseli a Meteorológiai Világszervezet nevet, és azóta látja el a meteorológiai tevékenységek világméretű koordinációját. Összeállításunkban a szervezet történetéről és tevékenységéről szóló eddig megjelent magyar nyelvű publikációkat kiegészítve átfogó áttekintést adunk arról, hogy az időjárás megfigyelése iránt elhivatott elődeink kezdeményezéséből hogyan jött létre a meteorológiai Megfigyelési Világhálózat, majd azt követően a Világszervezet. Ezen túlmenően bemutatjuk a WMO 21. századi mai működését, és azt, miként kapcsolódik a legfontosabb globális kihívásokhoz.

150 years of history of the World Meteorological Organization

In 2023, the World Meteorological Organization (WMO) celebrated the 150th anniversary of the founding of its predecessor, the International Meteorological Organization (IMO) established in 1873; while 2025 commemorates the 75th anniversary of WMO becoming the specialised agency of the United Nations. WMO was renamed at that time, and fulfils its mission of the worldwide coordination of meteorological activities since then. In this paper we provide a broad overview of the history and activities of these two organisations, complementing former relevant Hungarian publications. We give an insight of how the meteorological Global Observation Network, and later the World Organisation, was born from the ambitions of our predecessors. We also explain how the WMO operates today in the 21st century and how it relates to key global challenges.

A jogelőd IMO létrejötte és működése (1873-1950)

Az IMO az egyik legrégebb nemzetközi szervezet, amely létrejötte után mintegy háromnegyed évszáz-

adon keresztül szolgálta a nemzetközi meteorológia ügyét. 1873-as megalakulását a meteorológia évszázadokra visszavehető eredményei tették lehetővé (Sallai és Dobi, 2010), amelynek hatására 1850-től kezdtek elterjedni a hálózatba szervezett felszíni

meteorológiai megfigyelések, ezzel együtt pedig sorra alakultak meg a nemzeti meteorológiai szolgálatok (Sarukhanianand *Walker*, 1973) is. A Nemzetközi Meteorológiai Szervezet megalakulásának előzményeit különböző korszakokba sorolhatjuk.

Előkészítő konferenciák (1853–1872)

Az időjárás-előrejelzés és ezzel összefüggésben a meteorológiai mérések szabványosítása iránti igény az amerikai tengerészet oldaláról merült fel először. Matthew Fontaine Maury, az amerikai haditengerészet hadnagya saját érdeklődéséből adódóan kilenc éven át végzett a szélre és áramlásokra vonatkozó megfigyeléseket az Atlanti-, a Csendes- és az Indiai-óceánon. Kezdeményezésére került megrendezésre 1853 augusztusában Brüsszelben az „első Nemzetközi Meteorológiai Konferencia”, ahol a tizenkét résztvevőből tíz tengerészeti tiszt volt. A meteorológiát Lambert-Adolf-Jacques Quetelet statisztikus, a belga szolgálat vezetője képviselte (*WMO*, 1973). A rendezvény fő célja a meteorológiai és óceáni adatok gyűjtésének fejlesztése és egységesítése volt.

Közel húsz évvel később 1872 augusztusában Lipcsében már 52 meteorológus találkozott, hogy megvitatassák egy nemzetközi meteorológiai együttműködés létrehozásának lehetőségét. Olyan technikai problémákat kellett megoldaniuk, mint az időjárás-jelentések továbbítása. Samuel Morse elektromos távirója akkorig még nem felelt meg a nagy területekről származó adatokat felhasználó, egységes meteorológiai megfigyelési rendszer iránti igényeknek. 1873-ban Bécsben az első Nemzetközi Meteorológiai Kongresszusra már 20 ország kormánya 32 hivatalos delegáltat küldött. Itt született meg az IMO koncepciója és az állandó titkárság ötlete (*WMO*, 1973). Az IMO első elnöke Prof. Buys Ballot, a holland meteorológiai intézet igazgatója volt. Vezetése alatt (1873-1879) lassan, de folyamatosan fejlődött a meteorológiai állomások világméretű hálózata.

Az IMO működése (1879–1950)

A Második Nemzetközi Meteorológiai Kongresszusra 1879 áprilisában Rómában került sor. Döntés született arról is, hogy az IMO a Meteorológiai Szolgálatok Igazgatói Konferenciájának irányítása alatt civil szervezetként fog működni, feladata pedig a nemzetközi meteorológiai együttműködés előmozdítása, a meteorológiai kutatás ösztönzése és az operatív gyakorlatok egységesítése lesz. A krónikák szerint az IMO történetét alakító vezetőket az elkötelezettség, szakértelem és a lelkesedés jellemezte [1]

A római kongresszus úttörő döntése értelmében megszületett az IMO első jól szervezett nemzetközi tudományos programja, ami az "1882-1883-as nemzetközi sarki év" néven vált ismertté. Mindkét félteke magas szélességein a meteorológia és a földi mágnesesség szisztematikus tanulmányozását tűzte ki célul. A kezdeményezés sikerét mutatja, hogy azóta is szerveznek a pólusok változásait kutató nemzetközi expedíciós programokat.

Sorra alakultak meg a különböző területeket lefedő Technikai Bizottságok is (Földmágnességgel és a légköri elektromossággal foglalkozó bizottság; felhőkkel foglalkozó bizottság; Légelhajzási Bizottság; Sugárzási és Besugárzási Bizottság; Viharjelző és Tengeri Meteorológiai Bizottság és a Világhálózat Bizottság).

A nemzetközi meteorológiai együttműködések irányítására létrehozott struktúra olyan hatékonynak bizonyult, hogy egészen az első világháborúig fennmaradt. A harcok idején az IMO több, mint négy évre gyakorlatilag beszüntette a működését.

1919-ben az IMO újjáélesztése után a katonai, a megnövekedett polgári repülés és léghajók navigátorai egyaránt új paramétereket (látótávolságot, felhőmagasságot és a repülési magasságokra vonatkozó adatokat) igényeltek. Az 1920-as évek elején felismerték, hogy szükség van a Nemzetközi Felhőatlasz új kiadására, és ugyanígy a meteorológiai szakkifejezések nemzetközileg elfogadott meghatározására is. A Regionális Szövetségek (RA - Regional Association) létrehozása az 1935-ös varsói ülés egyik fontos döntése volt. Az elkövetkezendő 12 év alatt megalakult mind a hat – ma is működő – régió azzal a céllal, hogy az IMO-határozatok jobb végrehajtása világszerte biztosított legyen.

Az IMO vezetése egyre inkább azt az álláspontot képviselte, hogy a nemzetközi meteorológiai együttműködésnek kormányközi tevékenységként kellene megvalósulnia. Létrehozták a titkárságot, amely De Biltben kezdte meg működését, majd Lausanne-ba, 1939-be pedig Genf-be költözött. 1939-re elkészült az új Meteorológiai Világegyezmény tervezete is (ún. berlini tervezet), a jóváhagyásával kapcsolatos további lépéseket a második világháború késleltette. A meteorológiai mérési adatok hadititokká váltak, a szervezet tevékenységét ismét fel kellett függeszteni.

Az Igazgatói Konferencia ezután 1947 szeptemberében Washingtonban ülésezett újra, melynek napirendjén már mintegy 400 határozat szerepelt. Egyre több szakember érezte úgy, hogy az intenzíven növekvő együttműködésnek új kereteket kell adni, valamint biztosítani kell a kormányok hathatós pénzügyi támogatását, illetve a kötelező érvényű nemzetközi előírásokat és szabványokat az időjárási és egyéb meteorológiai adatok gyűjtéséhez [1].

A Meteorológiai Világszervezet alapítása

A washingtoni 12-ik IMO konferencián 31 kormány képviselője által aláírt Meteorológiai Világegyezményt 1947. október 11-én ratifikálták. Magyarország részéről az aláíró Aujeszky László, a Meteorológiai Szolgálat jogelődjének egykori megbízott igazgatója volt. A megállapodás 1950. március 23-án lépett hatályba. Ezt a napot tekintjük a WMO „születésnapjának”, melyet a tagországok a Meteorológiai Világnap keretében minden évben világszerte megünnepelnek. Ugyanezen év december 20-án az Egyesült Nemzetek Közgyűlése elfogadta azt a határozatot, amellyel a WMO az Egyesült Nemzetek Szervezetének meteorológiára szakosított, nagyfokú önállósággal bíró kormányközi szervezetévé vált (Zách, 1975; WMO, 1990). Ennek az eseménynek a 75 éves jubileumát ünnepeljük 2025-ben.

A Meteorológiai Világszervezet tevékenysége (1950-től napjainkig)

A WMO 1951-ben elfogadott Alapokmányban rögzített céljai röviden (Békeffy, 1960): „megkönnyíteni az egész világra szóló együttműködést egységes meteorológiai állomáshálózat létesítésével, támogatni olyan központok kifejlesztését, amelyek képesek meteorológiai szolgáltatást ellátni, elősegíteni az időjárásjelentések cseréjét, a meteorológiai észlelések szabványosítását és publikálását, előmozdítani a meteorológiának az emberi tevékenység legkülönbözőbb területein való alkalmazását, és ösztönözni a meteorológiai képzést, kutatást”. A WMO 21. századi működésének alapelveit a tizenharmadik Kongresszus során elfogadott Genfi Nyilatkozat (Kaba, 1999) így fogalmazta meg: a cél egyrészt a természeti katasztrófák által, az emberi életben és vagyontárgyakban okozott károk csökkentése; másrészt a globális éghajlat és a környezet védelme a következő generáció számára; illetőleg a már meglévő eszközök, szolgáltatások fenntartásához szükséges anyagi feltételek biztosítása, elsősorban a nemzeti kormányzatok részéről.

Az Alapokmány értelmében a WMO Állandó Képviselőinek (a diplomácia nyelvén PR-Permanent Representative) feladata a saját országuk területén a meteorológiai mérési adatok WMO telekommunikációs hálózatára (GTS) történő továbbítása, az időjárással és éghajlattal kapcsolatos figyelmeztetések megbízható forrásból (a nemzeti meteorológiai szolgálattól) történő biztosítása, a meteorológiai megfigyelő rend-

szer üzemeltetése, továbbá az említett Meteorológiai Világnapra történő ünnepélyes megemlékezés. Ezek a feladatok mind a mai napig változatlanul megmaradtak, és alapkövét képezik a tagállami részvételnek. A tagországok állandó képviselői szerepét a WMO jogi szabályozása értelmében az adott ország nemzeti meteorológiai szolgálata (állami meteorológiai feladatokat ellátó intézménye) élén álló vezető tölti be.

A WMO régi és új Bizottságai

A szakmai munka egészen a közelmúltig a nemzeti delegáltakat tömörítő nyolc szakmai Bizottságban folyt, lefedve a meteorológia legfontosabb területeit (Békeffy, 1960; WMO, 2000):

- Légekörtudományi Bizottság (CAS);
- Repülésmeteorológiai Bizottság (CAeM);
- Agrometeorológiai Bizottság (CAgM);
- Alaprendszerek Bizottsága (CBS);
- Műszerügyi és Megfigyelés-módszertani Bizottsága (CIMO);
- Hidrológiai Bizottság (CHy);
- valamint a kilencvenes években létrehozott Éghajlati Bizottság (CCI), amely a bizottságok sorában a még az '50-es években működő Tengerészeti Meteorológiai Bizottságot váltotta fel.

Ezek mindegyikében – a Hidrológiai Bizottságot kivéve, amely kezdetektől a vízügyhöz tartozott – az Országos Meteorológiai Szolgálat képviselte Magyarországot, a képviselők és delegáltak rendszeresen részt vettek a 4 évente megrendezett bizottsági és döntéshozó kongresszusi üléseken (Ambrózy, 1975; Kaba, 1998; Lábó, 2019; Dobi, 2023). A bizottságok feladata volt az iránymutatások, összefoglaló kiadványok készítése a meteorológiai tevékenységek legfontosabb elemeiről, biztosítva ezzel a megfelelő színvonalú, a szükséges mértékben harmonizált meteorológiai tevékenységeket a világ összes országában.

Az évszázad végére az informatika példátlan gyors fejlődése, az éghajlatváltozás hatásai, illetve megelőzése, a hiteles meteorológiai információk iránt megnövekvő társadalmi és gazdasági igények szükségessé tették a Szervezet megújítását is. A WMO 18-dik Kongresszusa 2019-ben a hatékonyabb működés érdekében „történelmi reformról” döntött (Lábó, 2019; WMO, 2019). Két új bizottság jött létre. A Szolgáltatási Bizottság (SERCOM) koordinálja az összes ágazati igényre specializálódó szolgáltatás fejlesztését, ennek értelmében a korábbi Bizottságok közül a vízügy, a mezőgazdaság, a repülés és az éghajlatváltozás (CHy, CAgM,

CAeM, CCL) tevékenységeit. A másik testület az Infrastruktúra Bizottság (INFCOM) amely a szolgáltatások háttérét biztosító globális hidrometeorológiai infrastruktúra kialakításáért és felügyeletéért felelős, azaz minden méréssel, standardizálással, adatkezeléssel és előrejelzéssel összefüggő feladatot koordinál. Működése a korábbi rendszerből a CBS, a CIMO és GCOS tevékenységeit összegzi.

Ezek mellett megalakult a Kutatási Testület (Research Board, RB), amely az időjárás, a légkör összetétele, az éghajlat és klímaváltozás témákban folyó fejlesztési tevékenységek összehangolásáért felel (WMO, 2019). A negyedik egységbe került minden, ami a tagállamokkal való kapcsolattartást segíti, ebbe beletartoznak a WMO hat földrajzi régiójának igazgatóságai (RAS- Regional Associations I-VI), továbbá a regionális képzés központok hálózata.

A WMO legfontosabb szakmai programjai

Az 1950-es évek óta a Bizottságok hatáskörében számos szakmai program működött (Zách, 1975, Kaba, 1998, Sallai és Dobi, 2010). Az idők során ezeket összevonták, átalakították, részben megszüntették, többnél megváltozott az elnevezés, de az alapvető „program-csoportok” megmaradtak (időjárás megfigyelések és -előrejelzések, kutatási programok, alkalmazott meteorológia és hidrológia). Az alábbiakban a jelenleg futók közül a legfontosabbak rövid ismertetésére szorítkozunk.

Az egész Földre kiterjedő időjárás-figyelő és elemző rendszereket átfogó globális infrastruktúrát lefedő az „Időjárás Világszolgálat” elnevezésű Program (WWW - World Weather Watch), amely 1968-ban indult (Ambrózy, 1975; Hasewaga, 2024). Működése a globális-, regionális- és nemzeti központok rendszerén és a gyors információcserén alapul. Ennek részei:

- A WMO Integrált Megfigyelési Rendszere a WIGOS (WMO Integrated Global Observing System) magába foglalja az összes légköri mérést. Részei a Globális Megfigyelő Rendszer (GOS), a Globális Légkör Megfigyelések (GAW), WMO Hidrológiai Megfigyelő Rendszere (WHOS), és a Globális Krioszféra Figyelő Rendszer (GCW) elemei, továbbá a Globális Alap Megfigyelő Rendszer (GBON) és a Regionális Alap Megfigyelő Rendszer (RBON) (<https://community.wmo.int/en/activity-areas/WIGOS>).
- a WIS 2.0 (WMO Információs Rendszer) a teljes globális telekommunikációs tevékenységeket biztosítja. Elődei az 1970-es évek óta működő zárt



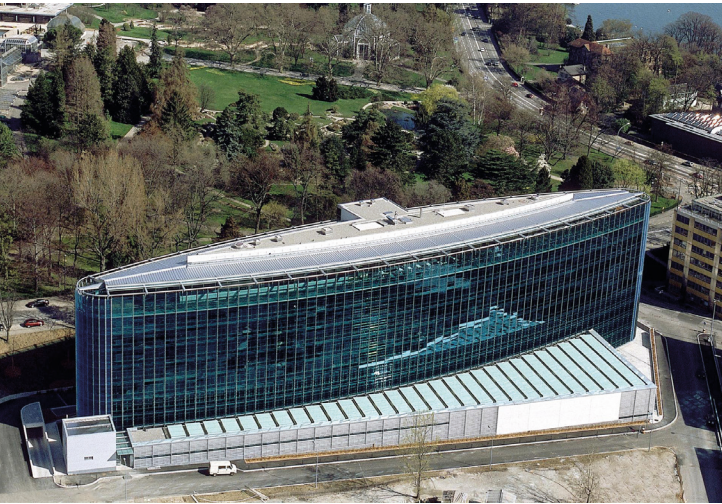
A WMO főtákkára, Dr. D.A. Davies (Egyesült Királyság) az Országos Meteorológiai Intézet (OMI) könyvtárában tett látogatása 1961-ben. A képen balról jobbra Dési F. (OMI igazgató), Dr. D.A. Davies (WMO főtákkár), Kleszky I. (OMI munkatárs) látható.

láncú, titkosított adatcserét végző Global Telecommunication System (GTS) – globális adatközlő rendszer, illetőleg az azt váltó korábbi webes alapú, nyílt WIS rendszer (WMO, 2010).

- a WIPPS a WMO Integrált Adatfeldolgozási és Előrejelző Rendszere, a meteorológiai előrejelzéseket és adatfeldolgozásokat biztosító nemzetközi, regionális és országos adatközpontokra alapuló rendszer (Richardson, 2024). Korábbi elnevezése Global Data-Processing and Forecasting System (GDPFS), amely a '90-es évek vége óta működött. Ehhez csatlakoznak a nemzeti meteorológiai szolgálatok saját tevékenységükkel is.

A kutatások néhány fő programja

- az éghajlatkutatásokat koordináló WCRP World Climate Research Program; Ennek alprogramja pl. a Globális Energia és Vízháztartás kutató GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) és a régióinkban folyó CORDEX (WMO, 2023d).
- a percestől a havi előrejelzések modellfejlesztéseinek programja a WWRP (World Weather Research Programme) (WMO, 2023c),
- továbbá a '60-as évek óta létező a légköri aeroszollok, üvegházhatású gázok, ózon megfigyelését végző GAW (Global Atmosphere Watch) (Sallai és Dobi, 2010).



A Meteorológiai Világszervezet (WMO) főépülete Genfben a) madártávlatból, illetve b) az utcai bejárat felől.

Éghajlatváltozás

A WMO a '80-as évektől kezdve az ózon, a '90-es évektől kezdve pedig a globális éghajlati megfigyelések és kezdeményezések felé fordult (Sallai és Dobi, 2010). Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC) 1988-as létrehozása óta aktívan részt vesz a nemzetközi éghajlati kezdeményezések munkájában,

mint az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), a Felek Konferenciájának ülésein (Conference of the Parties, COP), valamint az ENSZ fenntartható fejlődési célok (SDG-k) megvalósításának támogatásában. Nyomon követi a Kiotói Jegyzőkönyv és a Párizsi Megállapodás végrehajtását, ami a 21. század egyik legnagyobb kihívásává vált. Rendszeres jelentéseket készít az éghajlat és a légkör összetevőinek állapotáról, de az éghajlati paraméterek megfigyelésén és feldolgozásán túl a felhasználó központú szolgáltatások is előtérbe kerültek. Az Éghajlati Szolgáltatások Globális Keretrendszerét (GFCS - Global Framework of Climate Services) a WMO 2012 évi rendkívüli Kongresszusa indította el. A GFCS célja jelenleg öt gazdasági szektor (mezőgazdaság, vízügy, katasztrófavédelem, egészségügy és az energetika) számára célzott szolgáltatások kialakítása (WMO, 2023d), valamint ennek háttérét biztosító éghajlati adatcsere bővítése, ingyenességének biztosítása.

A legfontosabb kihívások napjainkban

- Kiemelkedő fontosságú volt 1995-ben a WMO 12-dik Kongresszusának ülésén elfogadott 40-dik Határozat (Resolution 40), amely alapvető meteorológiai adatok ingyenes és szabad cseréjéről állapodott meg. Ebben a hatóránkénti szinoptikus adatok cseréje tartozott bele, a felső légköri szonda adatok, a veszélyjelzések, illetve azok az éghajlati adatok, melyek szükségesek a földi éghajlat kellően pontos leírásához. Az informatika és információ-áramlás fejlődésével azonban a 2010-es évektől kezdve ezek az alapelvek elavulttá váltak, így a Res.40. felülvizsgálata sürgetővé vált. A 2021. évi soron kívüli WMO Kongresszus tárgyalta a sokkal szélesebb körű adatszeréről szóló javaslatot (Lábó, 2019). Az OMSZ ennek a javaslatnak tett eleget, amikor 2022. január 1-étől bevezette a nyílt adatpolitikát (353/2021. (VI. 24.) Korm. rendelet).
- 2014-ben a World Weather Open Science (WWOSC-2014) konferencián megalakult a globális időjárás-állományi vállalkozási szektor. Legfőbb céljuk, hogy egy működő modellt vezessenek be az állami és magán-szféra együttműködésére vonatkozólag. A WMO célkitűzése az időjárás-állományi szolgáltatások és megfigyelések piacán megjelent nagyvállalatokkal (IBM, Panasonic, Google) való együttműködés elősegítése. A 2019-es Kongresszus alkalmával fogadták el a 2019-es Genfi

Nyilatkozatot, amely a „Közösségépítés az időjárás, az éghajlat és a vízügy érdekében” elnevezést kapta (WMO, 2019). Ezzel új lendületet kapott az állami és magánszféra közötti együttműködés (PPE Public-Private Engagement) megvalósítása.

- A hidrológia, mint az éghajlatváltozás által leginkább érintett terület, az ENSZ-en belül szintén a WMO felügyelete alá tartozik. A 2019-ben létrejött új WMO struktúrában kiemelt szerepet kaptak a hidrológiai feladatok, melyeknek irányítására külön hidrológiai közgyűlés jött létre, és új hosszútávú vízügyi stratégiát fogadtak el (Lábó, 2019; Dobi, 2023). A szakemberek számos kezdeményezést tettek, melyek közül a legfontosabb a Globális Hidrológiai Állapotmegfigyelő Rendszer (Global Hydrological Status and Outlook System – HydroSOS), valamint a hidrológiai adatok fokozott megosztása és cseréje, különösen a szomszédos országok és a globális adatközpontok között. A WMO célja a vízkészletek pontos és naprakész globális felügyelete.
- Az informatikai és adatáramlási technológiák fejlődésével a meteorológiai számítógépes előrejelzési és mérési adatok (főként a műholdas mérésekből származó) mennyisége a következő évtizedben mintegy tízszeresére fog növekedni. Ezzel egyidőben pedig új lehetőségek jelennek meg az informatika területén, mint a mesterséges intelligencia, „Big data”, felhő-rendszerek, adatbányászat, közösségi médiák stb. (Lábó, 2019; Dobi, 2023). Ennek a kihívásnak fog megfelelni a WMO új informatikai rendszere (WMO Information System, WIS 2.0) (WMO, 2019).
- Az ENSZ 2022-ben bejelentett globális veszélyjelző hálózatok létrehozásáról szóló törekvései értelmében a WMO legfontosabb teendője a 2024–27 időszakra a „korai veszélyjelzés mindenkinek” (EW4All – Early Warning for All) rendszerek kiépítése lesz (Dobi, 2023; WMO, 2023b). 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.

Összességében megállapítható, hogy a WMO ma is hatékony szervezetként működik, mely egyszerre fogja össze a nemzeti meteorológiai szolgálatok és különféle szolgáltatók munkáját, valamint segíti az ENSZ globális kezdeményezéseinek megvalósulását. A nemzeti meteorológiai szolgálatok tekintetében a legfontosabb az egyre szélesebb körű operatív adatcsere biztosítása – melyre a vízügy területén is előrelépések történtek; valamint a nemzetközi technikai és képzési standardok megállapítása. Ugyanakkor a WMO 2030-ig szóló hosszú távú stratégiájának (LTG 1-5) célkitűzéseit az ENSZ fenntartható fejlődési célok (Millennium Development Goals, MDG-k) 17 pontja köré szervezték, a feladatok ütemezését pedig a katasztrófakockázatok csökkentésére irányuló Sendai Keretrendszerrel és a Párizsi Éghajlatváltozási Keretegyezménnyel is összehangolták (WMO, 2023a).

WMO főtitkári látogatások Magyarországon

Zárásként összefoglaljuk, hogy az ENSZ-hez való 1950-es csatlakozás óta a Meteorológiai Világszervezet legfőbb vezetői közül kik, és milyen célból jártak hazánkban. A WMO-nak 1952 óta hét főtitkára volt, ezek közül négyen jártak Magyarországon, mindegyikük több alkalommal is. Az is elmondható, hogy szinte mindegyik program magába foglalta a HungaroMet jogelődjeinél, az OMI-nál és az OMSz-nál tett közvetlen látogatást is.



Prof. Petteri Taalas WMO Főtitkár beszéde az Országos Meteorológiai Szolgálat 150 éves jubileumi ünnepségén a Várkert Bazárban, 2020-ban.

David Arthur Davies 1956 és 1979 között összesen 5 alkalommal, több ízben a Magyar Tudományos Akadémia meghívására, 1976-ban pedig a Baranyai Jégeső-elhárítási Rendszer bemutatása alkalmából is.

Godwin Olu Patrick Obasi 1984 és 2003 között három alkalommal, a WMO Hidrológiai Bizottság 25 éves jubileumára, a WMO Ifjúsági díj átadására, valamint a Tudomány világkonferenciára látogatott az intézetbe.

Michel Jarraud 2004-2015 között két alkalommal az Országos Meteorológiai Szolgálat és az MTA meghívásra, illetve a kormány meghívására a Budapesti Víz Világtalálkozó alkalmából.

Prof. Petteri Taalas pedig 2015-2023 között négy alkalommal, a budapesti Víz Világtalálkozóra, illetve a Planet2021-re a magyar kormány meghívásának eleget téve, illetve 2018-ban a European Meteorological Society éves konferenciájára, valamint 2020-ban az Országos Meteorológiai Szolgálat 150 éves jubileuma alkalmából járt Szolgálatunknál.

Irodalomjegyzék

- Ambrózy Pálné*, 1975: A Meteorológiai Világszervezet VII. Kongresszusa, *Légekör* 20(3) 61-63
- Békeffy Józsefné*, 1960: A Meteorológiai Világszervezet *Légekör* 5(4) 1-4
- Dobi, I.*, 2024: A Meteorológiai Világszervezet 19-ik Kongresszusának 2024–2027-es időszakra vonatkozó döntései, *Légekör* 69(2) 15-130
- Hasewaga, J.*, 2024: WMO Programmes, Third Session of the Infrastructure Commission (INFCOM-3), <https://meetings.wmo.int/INFCOM-3/SitePages/Presentations.aspx>
- Kaba, M.*, 1998: Beszámoló a Meteorológiai Világszervezet Európai Regionális Bizottságának XII. ülészakáról, *Légekör* 43(3) 29-32
- Kaba, M.*, 1999: Beszámoló a Meteorológiai Világszervezet XIII. Kongresszusáról, *Légekör* 44(2) 8-12
- Lábó, E.*, 2019: A WMO 18. Kongresszusa – milyen változásokat tapasztalhattunk a nemzetközi meteorológia világában? *Légekör* 64(2) 71-76
- Richardson, D.*, 2024: Overview of WIPPS and its session, Third Session of the Infrastructure Commission (INFCOM-3), <https://meetings.wmo.int/INFCOM-3/SitePages/Presentations.aspx>
- Sallai, M. és Dobi, I.*, 2010: A meteorológiai szolgáltatások fejlődése a Meteorológiai Világszervezet 60 éve alatt. *Légekör* 55, 15-22. http://epa.niif.hu/03900/03956/00018/pdf/EPA03956_legkor_2010_1.pdf
- Sarukhanian, E. I., and Walker, J.M.*, 1973. The International Meteorological Organization (IMO) 1879–1950. World Meteorological Organization, WMO-. No.345. https://web.archive.org/web/20210527015252/https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1226_en/DOCUMENTS_JCOMM_27/Session_2/2_2_Sarukhanian.pdf
- WMO*, 1973: One hundred years of international co-operation in meteorology (1873 - 1973), WMO – No. 345 https://library.wmo.int/records/item/54773-one-hundred-years-of-international-co-operation-in-meteorology-1873-1973?language_id=13&back=&offset=49
- WMO*, 1990: Forty years of progress and achievement: a historical review of WMO, WMO- No. 721, https://web.archive.org/web/20230605040259/https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=7740#.XpbEX-FMzZR6
- WMO*, 2000: WMO - 50 years of service, 1950-2000, WMO-No. 912 https://web.archive.org/web/20230502154302/https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8941
- WMO*, 2010: 60 years of service for your safety and well-being, WMO-No. 1051 <https://library.wmo.int/records/item/39652-60-years-of-service-for-your-safety-and-well-being>
- WMO*, 2019: WMO for the 21st Century, *WMO Bulletin*, Vol. 68 (1) – 2019
- WMO*, 2023a: WMO Strategic Plan 2024-2027, WMO-No. 1336, <https://library.wmo.int/records/item/68578-wmo-strategic-plan-2024-2027>
- WMO*, 2023b: Early Warnings for All, *WMO Bulletin*, Vol. 72 (1) – 2023
- WMO*, 2023c: The World Weather Watch Programme Achievements and Impacts (2016–2023); <https://filecloud.wmo.int/share/s/jfM79NuHR-Sx5wQq92eQQQ>
- WMO*, 2023d: A Paradigm Shift in Climate Modelling for Climate Services, *WMO Bulletin* Vol. 72 (2) – 2023
- Zách, A*, 1975: A Meteorológiai Világszervezet (World Meteorological Organization - WMO) és helye az Egyesült Nemzetek szervezete ENSZ keretében, *Légekör* 20(3), 59-61.

Internetes hivatkozás

- [1] History of IMO, web: <https://web.archive.org/web/20231218170901/https://public-old.wmo.int/en/about-us/who-we-are/history-IMO>



A 2024. évi tavi viharjelzési szezonról

Zsikla Ágota, Szilágyi Eszter, Kurcsics Máté

HungaroMet Nonprofit Zrt., zsikla.a@met.hu

2024 októberében a 90. balatoni viharjelzési szezon fejeződött be, melyről az 50. Meteorológiai Tudományos Napokon is történt megemlékezés. Jelen tanulmány a szezon főbb időjárás eseményeit tekinti át, kiemelve a nagy viharokat, a megvalósult szélsőséges csapadék és hőmérsékleti viszonyokat, megemlítve az ezzel kapcsolatos részletesebb szakmai elemzéseket. Összegezzük a szezonban kiadott tavi viharjelzéseket.

Október 31-én véget ért a tavi viharjelzési szezon, ami egyben a Balatonnál már a 90. viharjelzési szezont zárta le.

A 90. évfordulóról 2024. november 14-én az 50. Meteorológiai Tudományos Napokon történt visszatekintő megemlékezés Szilágyi Eszter előadásában „A Balatoni Viharjelzés első 90 éve” címmel. Ezen kívül két Balatonhoz kapcsolódó előadás is elhangzott a dinamikus – szinoptikus meteorológiai kutatások témaköréből: „Légköri veszélyek az atlanti viharciklonoktól a balatoni viharokig” (előadó: Horváth Ákos) és „Orografikus szélviharok a Balatonnál: a bakonyi „főszél” (előadó: Kurcsics Máté) [1].

A hazai meteorológia történetében ezen évfordulók mellett egy újabb mérföldkő lehet, hogy 2024. január 1-jétől hosszabb előkészületek után az Országos Meteorológiai Szolgálat állami vállalattá alakult és HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. néven folytatja működését. A szervezeti és szerkezeti átalakulás után a tavi viharjelzés továbbra is a Veszélyjelző Osztály keretein belül működik.

A viharjelzési szezon időjárásáról

A 2024. évi viharjelzési szezon összességében melegebb volt a megszokottnál. A nyári hónapok rendkívüli meleget hoztak, a szezon teljes, hét hónapos időszaka is

rekord melegnek bizonyult. Siófokon a szezon középhőmérséklete 20 °C-ra emelkedett, ami 1901 óta a legmagasabb érték. Emellett a lehullott csapadék mennyisége összességében átlag körülínek adódott. A nyári szárazságot követően az őszi kiadós csapadék pótolta a hiányt.

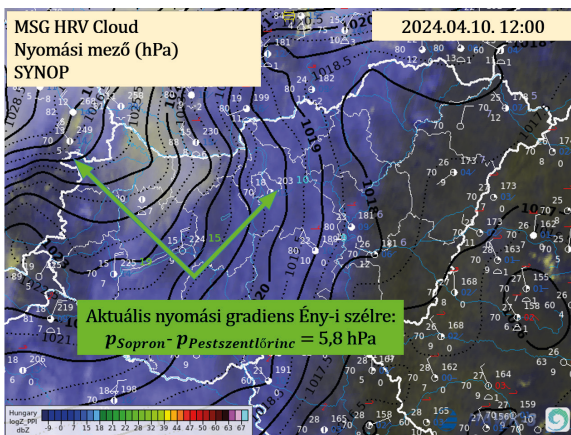
Az egyes hónapokat összegezve a **szélviszonyok** is az átlagosnak megfelelően alakultak, az eltérés az előző húsz év átlagától 2,5%-on belül maradt, a medence átlagot tekintve. A viharjelzési szezon különböző hónapjaiban azonban nagyobb eltérések is adódtak: májusban, júniusban és októberben a szél viszonylag gyengébb volt (átlagosan 10-15%-kal), míg szeptemberben 24-29%-kal erősebb szelek fújtak a megszokottnál. A szeptemberhez hasonlóan szeles hónapnak adódott az április is, ez azonban a hónap jellemzője, így nem számított kirívónak.

A 2024. évi viharjelzési szezonban **öt erős vihar** (90 km/h-t elérő vagy meghaladó szélsébség) érte el a Balatont és térségét, ami hárommal kevesebb, mint az elmúlt 20 év átlagos esetszáma. Áprilisban és júniusban egy-egy alkalommal, míg szeptemberben 3 napon mértek 90 km/h-t meghaladó széllelkéseket. Ezek között az északi part mérőhelyei idén nem voltak érintettek. A legerősebb vihar június 30-án érte el a tavat, amikor délnyugat felől egy zivatarlánc vonult

végig a Balaton felett. A vihar Balatonaligához érve 108 km/h sebességű szélrohamot okozott. Ezen kívül, kiemelten a szeptember 14-éről 15-ére virradó éjszaka fújt rendkívül erős szél, amikor a közép-európai Boris ciklon hátoldalára kerülve több helyen is meghaladták a 100 km/h-t az északnyugati irányú szellőkések.

Az erősen viharos napok jellemzése

Az idei viharjelzési szezon mozgalmas időjárás-sal vette kezdetét. Gyakoriak voltak a viharos széllel járó frontátvonulások, továbbá konvektív csapadék környezetében is előfordult időszakosan viharos szél. A szezonnyitó napon már szokatlanul meleg idő volt, országos viszonylatot tekintve hőségnapról beszélhetünk, hiszen az Alföldön néhol a 30 fokot is átlépte a hőmérséklet, a Balatonnál is 28–29 fokot mértek. A szezonnyitó másnapján egy hidegfront pár nap erejéig normalizálta a hőmérsékletet, majd április második hetében ismét visszatértek a sokéves átlagnál magasabb hőfokok. Április 9-én – az első erősen viharos napot megelőzően – is általában 27 fok köré emelkedett a hőmérséklet a tóparton. **Április 10-én** Nyugat-Európa felől egy legyengült hidegfront érkezett, hajnalban érte el a Balatont. A tónál kezdetben csak a sekélyebb légköri rétegekben (alsó 1300 méter) lehetett megfigyelni hidegadvekcziót, aminek jelenléte a hirtelen megerősödő, majd nyugatról kelet felé egyre többfelé viharossá fokozódó szélben volt érzékelhető. A megnövekvő, majd tartósan fennmaradó nyomási gradiens hatására (1. ábra) egész nap viharos szél fújt a Balatonnál, amely tekintélyes hullámokat korbácsolt.



1. ábra. 2024.04.10-én a hidegfront hátoldalán nagy nyomási gradiens épült ki, ami kora délután érte el maximumát. Ekkor Sopron és Budapest között már 5,8 hPa a légnyomás különbség, ez pedig a Balatonnál tartósan viharos északnyugati szelet indukált.

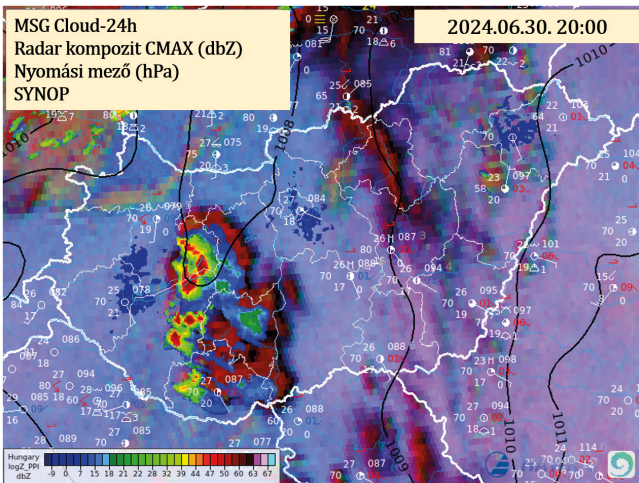


2. ábra. Május közepétől rendszeresen fejlődtek zivatarok a Balaton térségében. A konvektív események nem csak a nappali órákra korlátozódtak, többször az éjszakák is villámfenyesek voltak (fotók: Kurcsics Máté, Szilágyi Eszter).

Erősen viharos szél csak Balatonmáriafürdőn volt, 93 km/h szellőkést mértek. A front mögött jelentősen visszaesett a hőmérséklet, csapadék viszont egyáltalán nem kapcsolódott hozzá, szárazon vonult át.

Június végéig erősen viharos széllel járó front nem érkezett a Balatonhoz, de májustól határozottan megnövekedett a zivataros napok száma. A medárdi időjárás idén mintegy 2-3 héttel korábbra tolódott, már május közepétől kezdődően rendszeresen, csaknem napi szinten voltak zivatarok a térségben (2. ábra). A konvektív szezon legnagyobb csapadékát június 3-án regisztrálták a HungaroMet műszerei. Ekkor egy mediterrán ciklon áramlási rendszerébe kerülve több hullámban érték el zivatarok a Balatont. Ezeknek a céláknak a sajátossága a felhőszakadás volt, említésre méltó kifutószél nem kapcsolódott hozzájuk.

A szezon legerősebb viharja pár héttel később, **június 30-án** tört a Balatonra. A vihar kialakulását szinoptikus skálájú folyamatok támogatták [2]. Június utolsó napjaiban egy ciklon mélyült ki Nyugat-Európában, a centruma kezdetben Franciaország és a Benelux államok, majd Németország felett helyezkedett el. Itthon klasszikus prefrontális helyzet alakult ki, a ciklon előoldalán délkeleti áramlással forró levegő áramlott hazánk fölé. A délies széllel a magaslégtérben nagy mennyiségű saharai por is érkezett, amely jelentősen csökkentette a besugárzást. Ennek ellenére a Balaton parton általában 34–35 fok körül alakultak a maximumok. Az alacsonyabb légköri szinteken estére nedvesebb léghullámok érkeztek, a labilis légköri rétegződés pedig határozottan támogatta zivatarok kialakulását. Kora este délnyugat felől egy front előtti összeáramlási zóna, úgynevezett szlovén insta-

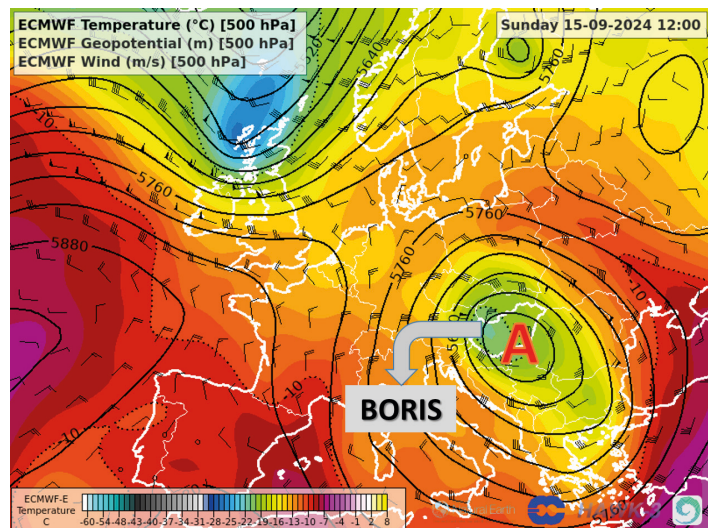


3. ábra. 2024. június 30-án délnyugat felől szlovén instabilitási vonal érte el a Balatont intenzív zivatarokkal. A keleti medencében már 100 km/h-t meghaladó kifutószél kapcsolódott a cellákhoz. Ez volt a szezon legerősebb vihára.

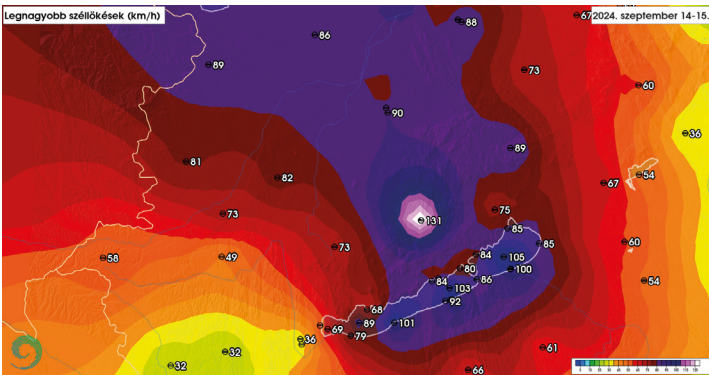
bilitási vonal érte el a Balatont, amely már a zivatarok kialakulásához szükséges emelőhatást is biztosította. Ezen a konvergencián jelentek meg az első zivatarok, amelyek a délnyugati áramlással a Balaton irányába helyeződtek át. A nyugati medencét még csak kisebb reflektivitású cellák érintették, majd az egyre erősödő zivataros rendszer kelet felé már intenzív villámtevékenység kíséretében vonult végig a Balaton tengelyén (3. ábra). A peremfelhős, szupercellás jegyeket viselő cellák az este folyamán a Balaton középső és keleti medencéjében több állomáson is erősen viharos kifutószél okoztak. Fonyódon 91 km/h-t mértek, Siófokon már 107 km/h-s széllal robogott át a zivataros rendszer, majd a tó délkeleti pontját, Balatonaligát elérve az egyre csak erősödő zivatarlánc 108 km/h-s szélrohamot eredményezett. Bár ez nem jelentett újabb országos napi szélrekordot, a mért érték nem sokkal maradt el a jelenlegi (szintén balatoni) napi szélmaximumtól (111,5 km/h, Siófok 1972). A zivatarzóna nem csak a Balatont érintette, az éjfél órára a Velencei-tóhoz is eljutott, ahol a legerősebb szellőkések kevéssel meghaladták a 70 km/h-t. A squall line nyomában éjfélét követően az említett ciklon hidegfrontja is megérkezett erős széllal a tavakhoz.

A nyár további része forró és az átlagnál szárazabb időt hozott [3]. Kis számban előfordultak ugyan zivatarok, de említésre méltó vihar nem volt a Dunántúlon, a hevesebb zivatarok az ország keleti felére korlátozódtak. A hosszan tartó aszályt végül szeptember közepén a Boris névre keresztelt légörvény szakította meg Közép-Európában. Ez nemcsak régóta várt csapadékot, hanem hűvösebb, őszi időt is hozott magával.

Bár a meteorológiai ősz már elkezdődött, a nyári forróság egészen szeptember 9-ig kitartott, ami jelentősen meghosszabbította a balatoni szezont. A markánsabb változást a Boris ciklon hozta meg, amelynek legjelentősebb hatása a csapadék volt, de a Balaton környékén tartós szélvihart is okozott [4]. A megnövekvő nyomási gradiens hatására Pápa és Siófok között létrejött egy keskeny szélsatorma, amelyben mintegy három napon keresztül viharos északnyugati szél fújt. A Balaton keleti és középső medencéjében már **szeptember 14-én** napközben is gyakoriak voltak a viharos szellőkések. **Szeptember 15-re** virradó éjszaka – a centrumával már a Duna-Tisza-közén mozgó – Boris ciklon tovább mélyült (4. ábra), így az egyre növekvő gradiens hatására az esti óráktól tovább fokozódott a szél. Késő estétől már többfelé erősen viharos (Balatonöszöd, Siófok platform, Szemes platform), az éjfél óráktól kevéssel 100 km/h-t meghaladó lökések is előfordultak a Balatonnál (Balatonöszöd, Fonyód, Siófok, Szemes platform). A térség volt az ország egyik legszelesebb területe, aminek háttérben egy posztfrenális időjárási helyzetekben a Balatonnál gyakran megfigyelhető állóhullám állt [5] [6]. A hullám leszálló ágában a gradiens szél a Bakonyon átbukva tovább fokozódik és egy lokális szélmaximum jelentkezik, míg a léghullám felszálló ágánál egy kevésbé szeles zóna figyelhető meg. Ez a hatás a Balaton keleti és középső medencéjében jellemző, nyugat felé általában Fonyódig érzékelhető, így nagy különbségek lehetnek a nyugati medence és a Balaton keleti fele között a mérési eredményekben. A szélmaximum mellett a leáramlás kiszárító (főns)



4. ábra. Az 500 hPa nyomási szint hőmérséklete (színezett terület), a nyomási szint magassága (folytonos vonalak), a nyomási szint szélviszonyai.



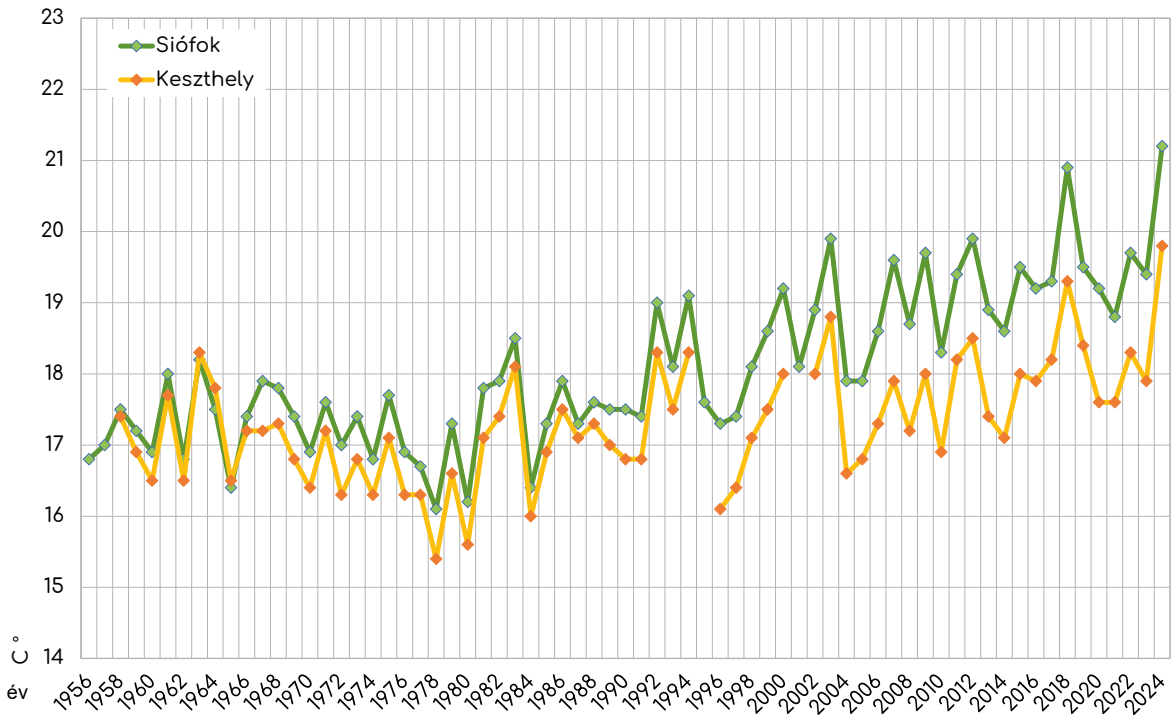
5. ábra. A legerősebb szellőkésékek eloszlása az Észak-Dunántúlon 2024.09.14-15-én. A Balatonnál, valamint tőle északnyugatra, egy viszonylag keskeny szélcsatornában erősen viharos szelek fújtak.

hatása is jelentős, ennek eredményeképp a Balatonnál lényegesen kevesebb csapadék hullott ezekben a napokban, mint a környezetében. Az erősen viharos napok sorozata tovább folytatódott **szeptember 16-án** is. Ez volt az idei szezonban az utolsó nap, amikor 90 km/h fölé erősödött a szél a Balatonnál. A légörvény ekkor már kelet felé távolodott, így hazánk egy nyugatról benyúló anticiklon és a ciklon köztes áramlási rendszerébe került. Késő délelőttig a Balatonnál még sokfelé kitartott a viharos szél (60-70 km/h). A távolodó ciklon hátoldalán bár sztratiform csapadék volt a meghatározó, beágyazott záporos góccok

elvértve előfordultak. Reggel egy-egy ilyen záporos góc környezetében a lekeveredő magassági szél lokálisan erősen viharos szellőkéséket is eredményezett (Balatonószöd 96 km/h, Szemes platform 91 km/h). Összességében a három nap alatt a legerősebb szellőkéséket a magasabb, hegyvidéki környezetben elhelyezett műszerek mérték. Kab-hegyen 131 km/h-s szellőkés is előfordult szeptember 14-ről 15-re virradó éjszaka, ezzel megdöntve a korábbi napi szélrekordot [4]. A Balatonnál a legerősebb szél szintén ezen az éjszakán fújt, ekkor a siófoki platformon 105 km/h-s szelet regisztrált a műszer [4]. Érdeklenség, hogy a szélcsatorna nagyon szűk volt, így a Balatontól keletre, Martonvásáron már csak 36 km/h-s, nyugatra, Nagykanizsán pedig mindössze 35 km/h-s szelet lehetett mérni (5. ábra).

Láthatjuk, hogy bár az idei szezonban az átlagosnál kevesebb volt az erősen viharos nap, ez a szezon is bővelkedett extrém időjárási eseményekben.

A Velencei-tónál a legerősebb szellőkését május 21-én és augusztus 18-án regisztrálták a szélmérők, egyaránt 78 km/h-t. A Tisza-tónál rögtön a szezon kezdetén, április 2-án a poroszlói szélmérő mérte a legnagyobb szelet, 74 km/h-t. Ezt meghaladó szél nem volt a következő 7 hónapban a tó partján, de a közel körzetben, heves zivatarokhoz kapcsolódóan előfordult orkán erejű szél is (117 km/h, Kunmadaras, 06.10.).



6. ábra. A nyári félév átlaghőmérséklete napi 8 mérésből Siófokon és Keszthelyen (1956-2024).

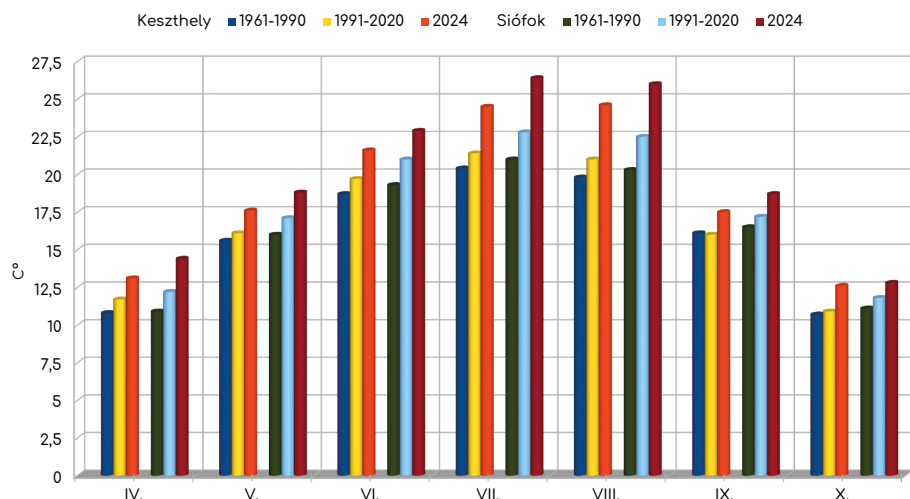
A hőmérsékleti viszonyokról

A 2024-es nyári félévben a Balatonnál és országosan is sorra dőltek a hőmérsékleti rekordok. A balatoni szezon összes hónapja a sokéves átlagnál melegebb időt hozott. A huszadik század kezdete óta ez volt a legmelegebb hét hónap a Balatonnál, Siófokon 20,0, Keszthelyen 18,8 °C középhőmérséklettel! A 6. ábrán a nyári félév középhőmérsékleteinek alakulását láthatjuk 1956 és 2024 között. Szembetűnő rajta a XXI. században létrejött változás. 2024 nyara, ahogy Európában és globális átlagban is, az eddigi legmelegebb volt a mérések kezdete óta [3]. A nyári hónapok középhőmérséklete (Keszthelyen 23,6 °C, Siófokon 25,1 °C) 3 fokkal haladta meg az éghajlati normál értéket (1991–2020). A 30 °C-t elérő, vagy meghaladó hőmérsékletű napok száma a fonyódi mérőhelyen volt a legalacsonyabb, itt 50 napot mértek. A tó többi mérőállomásán összességében közel két hónapnyi hőségnap, átlagosan 58 nap volt tapasztalható. A kisebb vízfelületű Velencei-tónál ez az érték 59 napot tett ki. 60 napot meghaladó érték egyedül Balatonlellén volt mérhető. A hőségnapok közül 6-7 már szeptember elejére esett. A szezon legmelegebb napja a Balaton nyugati felében augusztus 13., míg keleten július 12. volt. Balatoni viszonylatban a hőmérséklet csúcserőke 38,1 fok volt, amit a siófoki és a balatonlellei állomásokon mértek. (Ezen a nyáron országos viszonylatban július 11-től 16-ig, valamint augusztus 13,14 és 17-én is napi melegrekordok dőltek meg; egy nap kivételével 40 fok feletti maximum értékekkel. Az országos maximum-hőmérséklet 41,6 °C volt, amit Kelebián mértek). 2024 nyarának időjárásával több tanulmány is foglalkozott, amelyek elsőként a HungaroMet weboldalán jelentek meg. Szinoptikus meteorológia oldalról „A forróság meteorológiája – a 2024-es nyár időjárásai okai és okozatai” címmel Horváth Ákos és munkatársai írását [2], míg klimatológiai oldalról az Éghajlati osztály „A legmelegebb nyár 1901 óta – előzetes elemzés” című tanulmányát olvashatjuk a web-lapon [7].

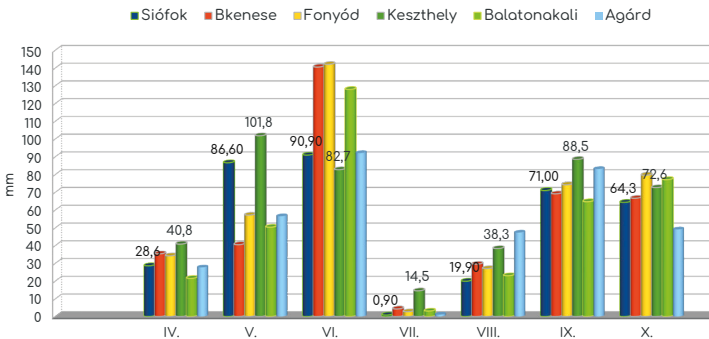
A legmelegebb nyár után az évszakváltás nem fokozatosan történt. A szeptember kilencedikétől kezdődött lehűlés fellélegzést jelentett az egész ország számára. A hónap közepén a Boris ciklonnal átmenetileg még hűvösebb, szeles, őszi idő érkezett (10-12 fokos maximum hőmérséklettel). A ciklon elvonultával tíz napra újabb felmelegedés következett be, 20 fok feletti maximumokkal. A Balatonnál szeptember 27-én, a következő front előtt még egy napra 27-28 °C-ig is emelkedett a hőmérséklet. A szélsőséges hőmérsékleti viszonyok következtében a napi maximumok között így egy hónapon belül 20-24 °C-os különbségek is kialakultak. A szeptember havi középhőmérsékletek összességében mindössze 1,5 °C-kal voltak magasabbak az 1991-2020-as klímanormához képest (7. ábra). Október első fele mozgalmas időjárást hozott, majd a hónap második felében egy-egy gyengébb, érintő fronttól eltekintve lényegében nyugodt, frontmentes időjárás volt a jellemző.

A csapadékviszonyokról

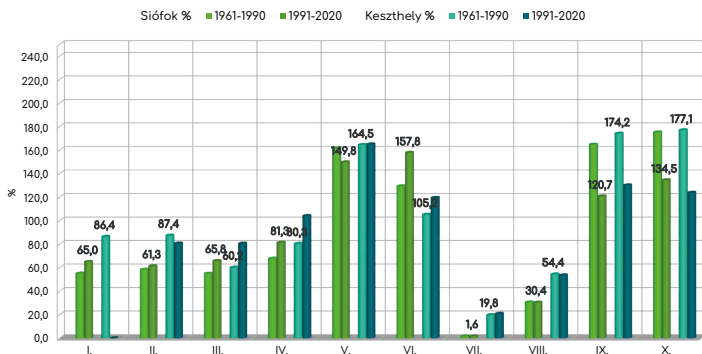
A szezon folyamán nagy változékonyság mellett állomásonként összesen 332 és 564 mm közötti csapadékmennyiség hullott a Balatonnál, míg a Velencei-tó környezetében 315 és 400 mm közötti mennyiséget mértek. Területi átlagban a csapadékmennyiség a sokévi átlag körül (95-105%) alakult a tavaknál. A szezonban mért legtöbb csapadék Balatonújlakon esett 564,3 mm, míg tőle 30 km-re keletre, Balatonlellén mindösszesen 354,9 mm hullott. A legkevesebb csapadékot, 332,6 mm-t Szóládon mérték. Az eltéréseket indokolja, hogy a konvektív csapadék volt túlsúlyban, így igen



7. ábra. A havi átlaghőmérsékletek (8 mérésből) alakulása a Balatonnál 2024-ben, összehasonlítva a különböző klímanormákkal Keszthely és Siófok állomásokon.



8.a ábra. A balatoni állomások havi csapadékösszegei 2024-ben.



8.b ábra. 2024 havi csapadékösszegei a sokéves átlagok százalékában Keszthelyen és Siófoknál.

különböző mennyiségek születtek az egyes medencékben belül is. A 8.a ábra is ezt szemlélteti néhány kiemelt balatoni állomás havi csapadékösszegeinél.

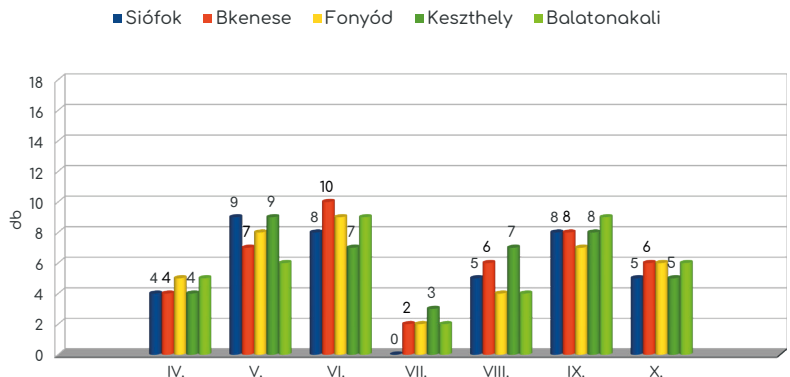
A legtöbb csapadék júniusban esett (75 és 142 mm közötti mennyiségben). A legnagyobb mennyiséget Balatonkenesén és Fonyódon mérték. Kenesén ez az érték már a sokévi átlag kétszeresének felel meg. A havi nagy csapadék jelentős része június 3-án hullott (kiemelten: Balatonkenese 69,2 mm, Fonyód 62 mm). Ekkor egy sekély ciklonhoz kapcsolódóan több hullámban vonultak át zivatarok.

A július és augusztus hónapokat nemcsak kánikula, hanem szárazság is jellemezte. E kettő gyakran jár együtt, mivel a forró levegő több nedvességet képes megtartani felhő- és csapadékképződés nélkül, ami önmagát erősítő folyamat, hiszen a kevesebb felhő pedig erősebb besugárzást, magasabb maximum-hőmérsékleteket eredményez. A frontok a forró, száraz levegőhöz érve általában gyorsan kiszárad-

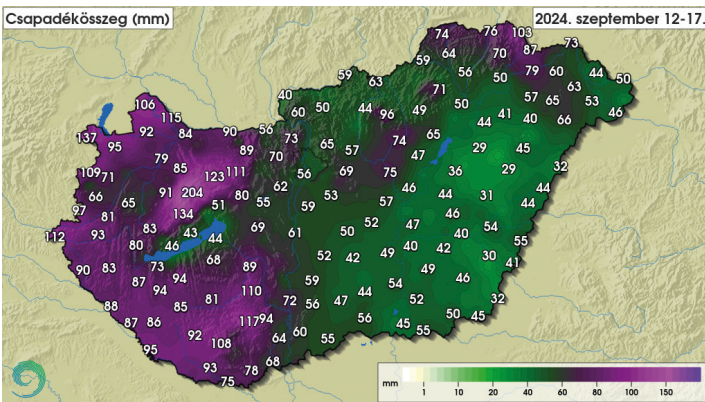
tak, és legyengültek. Nyáron több tényező is támogatta ezeket a folyamatokat, ahogy ezt „A forráság meteorológiája” című internetes tanulmányban [2] olvashatjuk.

A szárazság mértékét jól mutatja, hogy júliusban például a lehullott csapadék mennyisége a legtöbb helyen még az 5 mm-t sem érte el, és csupán néhány helyen mértek 10-15 mm-t elérő csapadékot. Augusztusban is csak az átlagos havi mennyiség felét regisztrálták a tavaknál. 10 mm-t elérő napi összeg mindössze 1-2 alkalommal fordult elő, de a kiszáradt talajnak ez sem sokat számított. A szezon során a csapadékösszeg az 1 mm-t havonta átlagosan 5-6 napon haladta meg (9. ábra).

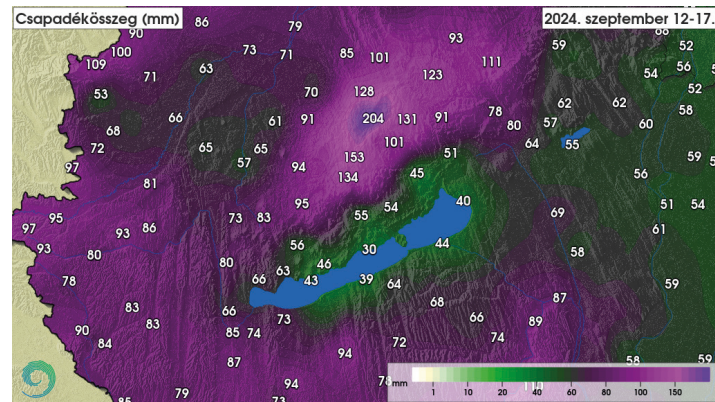
Ahogy már az erős viharokról szóló fejezetben olvashattuk, az aszályos nyarat követően a csapadék pótlódása csak szeptember 9-étől indult meg. Egy hullámozó frontrendszer környezetében, délnyugat felől több hullámban érkezett a nedves levegő, amelynek eredményeképp 24 óra alatt jellemzően 20 mm csapadék hullott. Szeptember 12-től több napon keresztül a Boris ciklon alakította az időjárást, amely az Alpok délkeleti oldalán mélyült ki. A légörvényhez a Balatonnál újabb 30-60 mm körüli csapadék kapcsolódott, míg a Dunántúl nagyobb részén 60 mm feletti csapadék áztatta a földeket (12-től 17-e reggelig). Elsősorban a Dunántúli-középhegységben, valamint Sopron, Mosonmagyaróvár környékén és helyenként az Alpok alján is 100 mm-t meghaladó mennyiségek estek (10.a, 10.b ábra). Boris Szlovéniában, Ausztria és Csehország területén, valamint Lengyelország délnyugati részén okozta a legtöbb csapadékot (jellemzően 200-300 mm, néhol 300 mm felett). Ez a hirtelen lezúduló mennyiség pedig árhullámot indított el a Dunán és más folyókon. A ciklon kialakulásáról és hatásairól részletesen olvashatunk a HungaroMet weboldalán [8]. A hónap hátralévő részében a lehullott csapadék mennyisége a Balaton térségében már jellemzően 10 mm alatt maradt.



9. ábra. A 2024-es szezon csapadékos napjai havonkénti bontásban (1 mm-t elérő, vagy meghaladó esetek).



10.a ábra. Az évszakváltó Boris ciklon által okozott csapadék Magyarországon (2024.09.12-17. reggelig).



10.b ábra. Csapadék mennyiség különbségek Veszprém megyében és a Balaton térségében (2024.09.12-17. reggelig) a Magas-Bakonyból leáramló fészél hatására.

Októberben a havi csapadékösszeg szintén rövidebb idő alatt, tizenegyedikéig hullott le, jellemzően 60-80 mm, amely átlagosan egyharmaddal haladta meg az 1991-2020-as éghajlati normál értéket (8.b ábra).

A csapadék és hőmérsékleti viszonyok alakulását a Balaton vízállása jól követi. A vízügyi szakemberek az év elejétől a tó vízszintjét magasan tartották (május derekáig nem is ment 120 cm alá), így még júniusban is 119 cm-ről tudott 125 cm-re emelkedni a vízállás a nagy csapadék következtében. Július 1. és augusztus 31-e között 20 centiméterrel csökkent az átlagvízszint, szeptemberben érve el a mélypontját 87 cm-rel, majd októberben már ismét 92 cm-ig emelkedett. A Balaton vize még szeptember első négy napján is 27 fok körüli csúcserőket mutatott, majd szeptember 16-án hajnalra átmenetileg 12,4 °C-ig csökkent, amilyen mértékű vízszalesésre valószínűleg még nem volt példa. (A Balaton vízhőmérsékletét Siófokon az Observatórium előtt a parttól mintegy 50 m távolságra 3 m-es vízben és kb. 1 m mélyen mérve) A szezon legalacsonyabb vízhőmérséklete 11,7 °C volt, és október 22-én állt be.

A 2024. évi szezonban kiadott balatoni viharjelzések statisztikája

2024-ben az első és másodfokú viharjelzések összesített fenntartási ideje a Balatonnál a szezon teljes időtartamának 33,7-36,8%-át tette ki. A Velencei-tónál ez az érték 20,5% lett (1055 óra). Ezzel mindkét tavunknál a viharjelzéssel lefedett idő az előző évinél kevesebb lett (a nyugati medencében 35, másutt több mint 100 órával). A másodfokú viharjelzés tekintetében a fenntartott órák a Balatonnál a teljes időszaknak mintegy 12, a Velencei-tónál 3,5%-át tették ki.

Az első- és másodfokú viharjelzések fenntartására legrövidebb ideig a Tisza-tónál volt szükség, mindösszesen 732 órára, ami az eddigi legalacsonyabb érték a Tisza-tavi viharjelzés indulása óta.

Irodalomjegyzék

- [1] https://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2024/50.meteorologiai_tudomanyos_napok_2024-osszefoglalo.pdf
- [2] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3499&hir=A_forrosag_meteorologiaja_%E2%80%93_a_2024-es_nyar_idojarasi_okai_es_okezatai
- [3] https://www.met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=3466&hir=Globalisan_es_Europaban_is_az_eddigi_legmelegebb_volt_2024_nyara
- [4] https://met.hu/ismeret-tar/meteorologiai_hirek/index.php?id=3470&hir=Egy_viharciklon_helyi_hatasai
- [5] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3399&hir=A_Karpat-medence_tersegegek_jellegzetes_helyi_szelei
- [6] https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2920&hir=Allo_leghullam_a_Balaton_felett_miert_fuj_erosebb_szel_a_Balatonnal_hidegfront_eseten?
- [7] https://met.hu/rolunk/hirek/index.php?id=3469&hir=A_legmelegebb_nyar_1901_ota_%E2%80%93_elozetes_elemez
- [8] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3476&hir=A_2024._szeptemberi_rendkivuli_dunai_arviz_meteorologiai_hattere



2024 őszenek időjárása

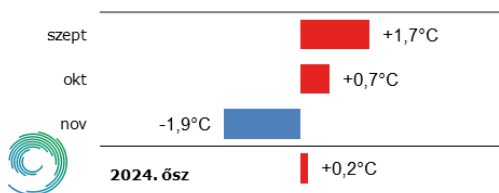
Szolnoki-Tótván Bernadett

HungaroMet Nonprofit Zrt., totivan.b@met.hu

Az előző, 2023-as rekordmeleg ősz után a 2024-es ősz hőmérsékleti és csapadék szempontból is átlagosnak tekinthető.

A hőmérséklet és csapadék időbeli alakulása

Országosan 10,9 °C volt az évszakos középhőmérséklet, mely 0,2 °C-kal haladta meg az 1991–2020-as normált (1. ábra). Az évszak egy meleg szeptemberrel indult, mely 1,7 °C-kal tért el a sokéves átlagtól. Az október már kisebb mértékben, 0,7 °C-kal volt melegebb a megszokottnál, a november viszont már 1,9 °C-kal hidegebbnek adódott, mint az éghajlati normál. Az 1901 óta számított legmelegebb időszakok között a szeptember a 12., az október a 33., a november a 89., míg az ősz a 39. lett a rangsorban. Csapadék szempontjából nagyon kétarcú volt az évszak; amikor volt csapadékhullás, akkor rendszerint nagy mennyiség érkezett, de ezen alkalmak között hosszú száraz periódusok alakultak ki. Országos átlagban 13%-kal többet



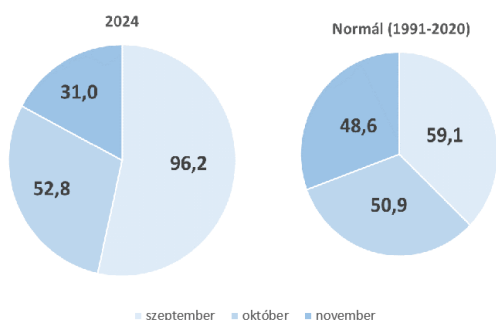
1. ábra. Az országos havi és az évszakos középhőmérséklet eltérése a sokévi (1991-2020-as) átlagtól 2024 őszén (interpolált adatok alapján).

mértünk, mint a sokéves érték, köszönhetően a nedves szeptembernek. Eközben október közepe és november közepe között egyáltalán nem volt csapadék.

A küszöbnapok alapján is egy átlagosnak mondható ősz rajzolódik ki (1. táblázat). A hőmérsékleti indexek közül a meleget leíró számok (forró, hőség és nyári nap) meghaladták a megszokott értéket, ahogyan a hideg időt jellemző fagyos napok száma is több volt, mint a sokéves átlag. Téli napot viszont nem

Éghajlati indexek értékei 2024 őszén és ezek sokévi átlagai		
	2024	1991-2020
Nyári nap ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$)	25	11
Hőség nap ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$)	7	1
Fagyos nap ($T_{min} \leq 0 \text{ °C}$)	18	13
Téli nap ($T_{max} \leq 0 \text{ °C}$)	0	1
Csapadékos nap ($r \geq 0,1 \text{ mm}$)	24	29
Havas nap	2	2
Zivataros nap	1	2

1. táblázat. A 2024-es ősz során jegyzett különböző éghajlati indexek és ezek 1991-2020-as sokéves értékei.

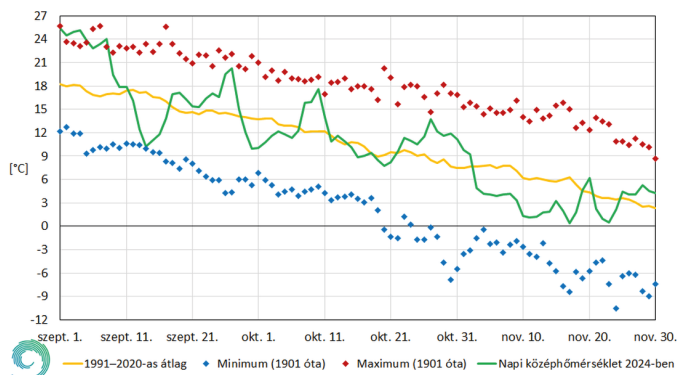


2. ábra. A 2024-es őszi havi csapadékösszegei és a normál területarányos kördiagramon (mértékegység: mm).

figyelhettünk meg 2024 őszén. A csapadékos napok száma országos átlagban kb. 17%-kal volt kevesebb, mint az 1991-2020-as normál időszakban. Zivataros napból eggyel kevesebb, havas napból pedig ugyanannyi nap fordult elő, mint a sokéves érték.

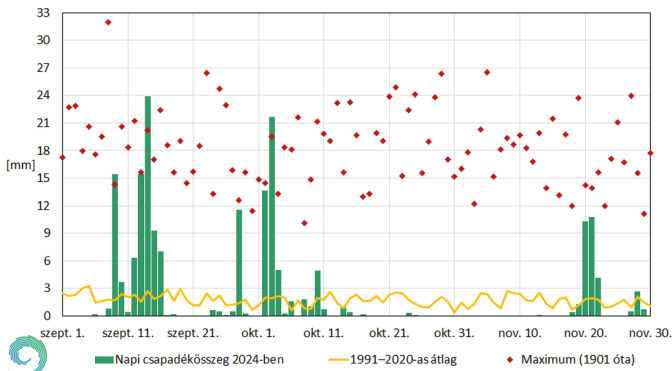
A 2. ábrán a kördiagram a 2024 őszi lehullott csapadék mennyiségét és évszakon belüli eloszlást hasonlítja össze az 1991–2020-as normálidőszakkal. Látható, hogy a sokéves átlag szerint a három hónap mindegyike közel az egyharmadát adja az évszakos összegnek. 2024-ben ez úgy alakult, hogy szeptemberben érkezett az őszi csapadékösszegnek több, mint a fele, októberben közel a harmada, novemberben pedig csak az egyhatoda. Az elmúlt 125 év éghajlati adatsorában 2024 novembere a 29. helyre került a legszárazabb időszakok sorában, míg az október a 77., a szeptember a 113., az őszi pedig 87. lett. Az ábrán – ahol a kördiagramok területei arányosak a havi és évszakos csapadékösszegekkel – látható, hogy az évszak csapadékösszege közel van a sokéves átlaghoz. 2024-ben a sokéves átlagnál 13%-kal több csapadék érkezett őszi.

A 3. ábra a 2024-es őszi napi középhőmérsékleteit, a sokéves átlagokat, valamint az 1901 óta tapasztalt szélsőértékeket mutatja be. Szeptember első napjaiban még előfordult, hogy a napi átlaghőmérséklet meghaladta az eddig mért legmagasabbat, de ezt követően a szélsőértékek között mozgott. Mivel az évszak egésze se extrém hideg, se meleg nem volt, így nem meglepő, hogy a napi középhőmérsékletek az őszi 47 napján haladták meg a sokéves átlag értékét és 44 napján maradtak alatta. Ez eltér a 2023-as ősztől (ahogyan 2024 nyarától is), amikor az időszak túlnyomó részén (pontosan 74 napon) volt melegebb, mint az 1991–2020-as időszak normálja. 2024-ben a megszokottnál melegebb és hidegebb napok tehát kb. egyenlően oszlottak el, időben pedig nagyjából hetente – 10 naponta követte egymást egy-egy hideg és meleg periódus.



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

Az augusztus végére jellemző hőség szeptemberben is folytatódott, több – napi legmagasabb maximum- és minimumhőmérsékleti – rekord is megdőlt a hónap első napjaiban (tartósan meleg hajnalokkal). Szeptember elején az átlagnál 7 fokkal melegebb idővel indult az évszak, és egészen szeptember 8-ig maradt a 6–7 fokok eltérés. Szeptember 9-től a szokatlanul meleg időjárás mérséklődött az érkező hidegfront miatt, és 10-én már a sokéves átlag közelében alakult az országos napi középhőmérséklet. Néhány nappal később a Boris nevű ciklon hidegfrontja szállított jelentős mennyiségű csapadékot és hideg légtömegeket hazánkba. Ezt követően egy nagy kiterjedésű anticiklon épült ki Skandinávia felett, országunk fölé ennek peremén fokozatosan szárazabb levegő áramlott, melynek következtében napsütéses időjárás vette kezdetét. A besugárzás hatására szeptember 18-tól tartósan a normál felett alakult a hőmérséklet. 24-én egy újabb frontrendszer is kialakult, de jelentős lehűlést nem hozott. Egy kiépülő ciklon áramlási rendszerébe kerülve 27-ig meleg, jobbra száraz levegő érkezett térségünkbe. Frontrendszere 28-án érte el térségünket, mely jelentős mennyiségű csapadékot és lehűlést hozott, hatására 29-től az átlag alatt alakultak a napi középhőmérsékletek. Október első hetéig még a megszokottnál hűvösebb maradt időjárásunk, a sokéves átlagnál 1–3 °C-kal volt alacsonyabb a napi középhőmérséklet. Ezt követően fokozatosan emelkedett a hőmérséklet, 8-án már meghaladta a sokéves átlagot. 10-én a hónap legmelegebb napját éltük át, 17,7 °C-os középhőmérséklettel, mely egyben októberben a legnagyobb eltérést mutatta a sokéves napi értéktől (5,6 °C-kal múlta felül azt). Ezen a napon késő délután egy hidegfront érkezett, és jelentős lehűlést okozott. Az ezt követő 10 napban időjárásunk nyugalmas volt, alapvetően anticiklonok alakították. A középhőmérséklet az ilyenkor megszokott



4. ábra. Országos napi átlagos csapadékösszegek 2024 őszén, a sokéves napi átlagok (1991-2020), illetve a maximumok 1901 óta homogenizált, ellenőrzött, interpolált adatsorok alapján.

közelében alakult. 21-től a hőmérséklet ismét elkezdett emelkedni, 27-én már 5 °C-kal volt melegebb, mint ezen a napon szokásos. A hónap végéig kitartott ez az enyhe időjárás, a sokéves átlagnál magasabb értékekkel zártuk a hónapot. Ez az enyhe időjárás november 2-ig tartott, majd 3-tól a szokásosnál hűvösebb napok köszöntöttek be, a középhőmérsékletek 2–5 °C-kal elmaradtak a sokéves átlagtól. A ködhajlam 10-től egyre erősödött, többfelé a hajnalra kialakult köd még nappal is megmaradt. 17-e lett november leghidegebb napja, országos átlagban 0,5 °C volt ekkor a középhőmérséklet, mely 5,8 °C-kal alacsonyabb az ilyenkor megszokottnál. 18-tól enyhe, nedvesebb levegő áramlott a Kárpát-medencébe, így 19-én elérte,

A hónap során mért legmagasabb hőmérséklet			
	Hőmérséklet	Állomás	Napja
szeptember	36,5 °C	Kőrösszakál	szeptember 3.
október	27,2 °C	Sellye	október 10.
november	19,8 °C	Sátothely Szekszárd Palánkpuszta	november 1.
A hónap során mért legalacsonyabb hőmérséklet			
	Hőmérséklet	Állomás	Napja
szeptember	-1,9 °C	Zabar	szeptember 30.
október	-4,4 °C	Zabar	október 18.
november	-10,0 °C	Hidvérgardó	november 24.

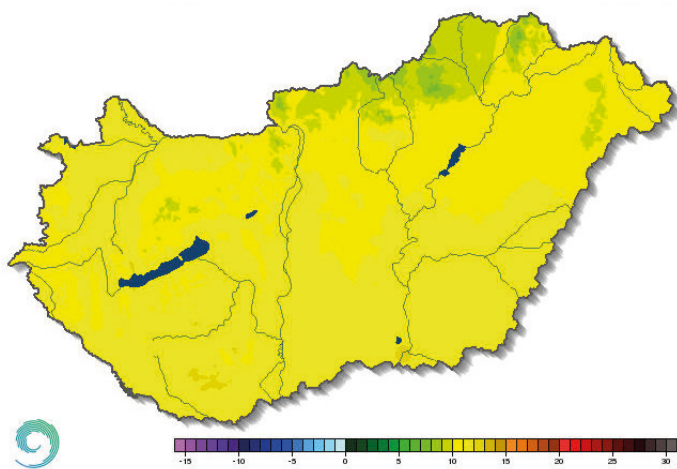
2. táblázat. Az őszi hónapok során mért legmagasabb és legalacsonyabb hőmérsékletek 2024-ben.

A hónap legnagyobb csapadékösszege			
	Csapadék	Állomás	
szeptember	239,3 mm	Bakonybél	
október	100,9 mm	Vasvár Mártírok útja	
november	71,3 mm	Pécs Egyetem	
A hónap legkisebb csapadékösszege			
	Csapadék	Állomás	
szeptember	49,7 mm	Hajdúsámson	
október	16,3 mm	Dombegyház Cátórház Lökősháza Arany János utca	
november	2,3 mm	Harka	
24 óra alatt lehullott maximális csapadék			
	Csapadék	Állomás	Napja
szeptember	87, mm	Bakonybél	szeptember 14.
október	47,2 mm	Mezőhek	október 3.
november	31,5 mm	Pécs Egyetem	november 20.

3. táblázat. Az őszi hónapok során mért legnagyobb és legkisebb havi csapadékösszegek, valamint a 24 órás maximumok 2024-ben.

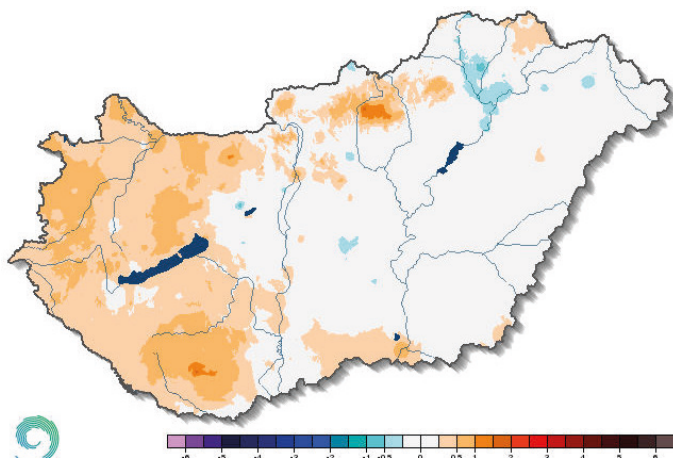
következő nap pedig már 2 °C-kal meg is haladta a sokéves átlagot a napi középhőmérséklet. 20-án egy markáns hidegfront haladt át hazánk felett, újabb lehülést hozva, ismét a sokéves érték alá csökkent a napi átlaghőmérséklet. 24-től megkezdődött az enyhülés; 25-től egészen a hónap végéig a sokéves átlag felett alakult a napi középhőmérséklet.

A 4. ábra a csapadék időbeli alakulását mutatja az ősz folyamán. Legszenbetűnőbb az október közepétől november közepéig tartó száraz időszak, amikor 31 napig nem volt csapadékhullás. A három hónap közül a szeptember volt a legnedvesebb. 9-én nyugat felől egy frontrendszer érte el az országot, jelentős mennyiségű csapadékkal. Majd néhány nappal később az Alpok térségében lévő frontrendszer hullámot vetett, így a déli ágán a Kárpát-medence felett egy ciklon mélyült ki, mely a Boris nevet kapta. Tartós, kiadós esőzessel járt 13-16-a között, több napon keresztül rendkívül nagy mennyiségű csapadék hullott a Duna felső vízgyűjtőjére, ami árvízhelyzetet okozott



5. ábra. A 2024-es őszi középhőmérséklete (°C).

Magyarországon. Az ezután kiépülő anticiklon szárazabb levegőt szállított fölénk, pár napra elfelejthettük a csapadékhullást. 24-én ismét egy frontrendszer érte el térségünket, melyet kisebb esők, záporok kísértek, és egy-egy zivatar is kialakult. 28-án egy újabb front érkezett a Kárpát-medence térségébe, és jelentős mennyiségű csapadékot hozott. Október első napjai a Cassandra mediterrán ciklon miatt bővelkedtek csapadékban. 2-án a Budapest-Nagykanizsa vonaltól északra fekvő országrészben mértünk 20 mm feletti csapadékösszegeket, ezen belül pedig a magasabban fekvő tájakon 30 mm felett alakult a napi összeg. 3-án már országsszerte kiadós csapadékhullást jelentettek észlelőink. A napi összeg többfelé meghaladta a 35 mm-t, 4-én is többfelé – főként az északi területeken – esett eső, de már sokkal kevesebb, mint az előző napokban. 5-től csökkent a csapadékhajlam, 6-án, 8-án és 9-én csak az ország egy-egy térségében hullott kisebb mennyiség. 10-én egy hidegfront érkezett térségünkbe, sokfelé – főként a Dunántúlon – csapadék kísérte. Az ezt követő 31 napban számottevő csapadékhullás nem történt. November 18-tól már nedvesebb levegő érkezett fölénk, mely következtében aznap főként északon, 19-én pedig már többfelé volt csapadékhullás. 20-án egy markáns hidegfront haladt át, több napos országos esőzést okozva. 20-án és 21-én jelentős mennyiségű csapadék érkezett: első nap többnyire eső esett, másnap vegyes halmazállapot fordult elő (többfelé alakult ki havazás, havas eső). 22-én már kevesebb területen esett, alakja ekkor is vegyes volt: eső, hó, havas eső. Csapadékból az évszak utolsó napjaira is jutott még: november 27-én érte el az országot egy hidegfront. Ekkor még csak délen, délnyugaton, másnap pedig



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

már országsszerte volt csapadékhullás, eső formájában. 29-én a Tiszántúl kivételével többfelé esett, sőt még zápor, a hegyekben pedig hózápor is előfordult.

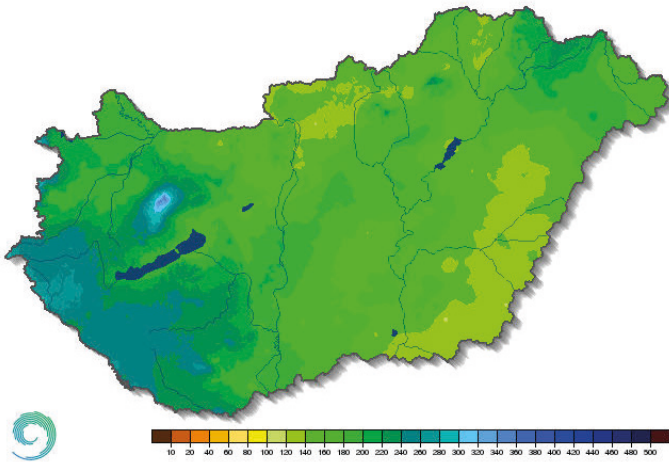
A hőmérséklet térbeli eloszlása

Hazánk legnagyobb részén az őszi középhőmérséklete 10–12 °C között alakult (5. ábra). Ennél alacsonyabb évszakos átlagot a középhegységeken, illetve a Nyírségben figyelhettünk meg. Az ország déli és nyugati területei voltak kissé melegebbek (11 °C felett), míg a középső tájak hűvösebbek (10–11°C között). Az Északi-középhegységben pedig 10 °C alatt maradt a háromhavi átlag. A legalacsonyabb évszakos érték is e térségben, Kékestetőn adódott (7,5 °C), a legmagasabb őszi átlagot pedig Szeged belterület állomáson rögzítettük (12,9 °C).

A 6. ábrán a hőmérsékleti anomáliát ábrázoltuk, negatív érték alig jelenik meg rajta (a Sajó és Hernád folyók térségében). Hazánk nagyobb részén (a Dunától keletre) a sokéves átlagnak megfelelően alakult a hőmérséklet, míg a Dunántúlon és az Északi-középhegységben a megszokottnál melegebb volt. A legnagyobb pozitív anomália a Mecsekben és a Mátrában jelentkezett (1–2 °C).

A csapadék térbeli eloszlása

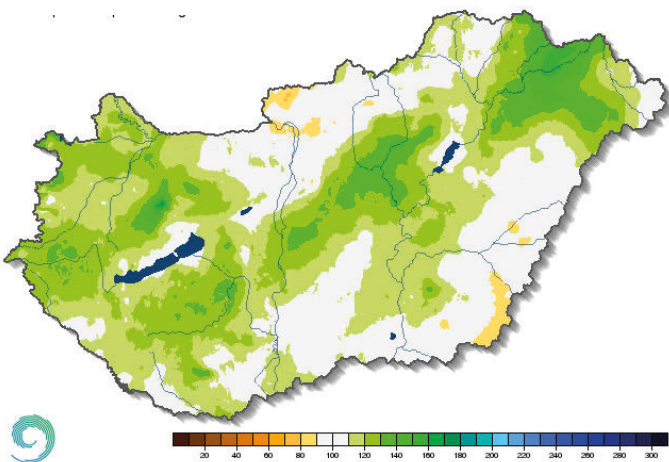
A legszárazabb tájakat az őszi folyamán az Alföld keleti felén, valamint az Északi-középhegységben találjuk (7. ábra). Ezekben a tájakon a jellemző háromhavi összeg 110-140 mm közt alakult.



7. ábra. A 2024-es őszi csapadékösszege (mm).

A legkevesebb csapadékot, 110,7 mm-t Békéssámon állomáson összegeztük. Az ország délnyugati és északkeleti területei voltak csapadékban gazdagabbak, északkeleten (a Bodrogtó köz tágabb környezetében) már 200 mm feletti volt az évszakos összeg, délnyugaton még ennél is magasabb, 230 mm-t meghaladó értékek adódtak. A Mecsekben 250 mm-nél, a Bakonyban pedig 300 mm-nél több csapadék hullott az évszak folyamán. A legnagyobb háromhavi értéket Bakonybél Somhegypuszta állomáson regisztráltuk: 348,3 mm.

A hőmérséklethez hasonlóan a csapadék esetén is inkább pozitív anomália dominált ősszel (8. ábra). A sokéves átlagnál alacsonyabb értékek

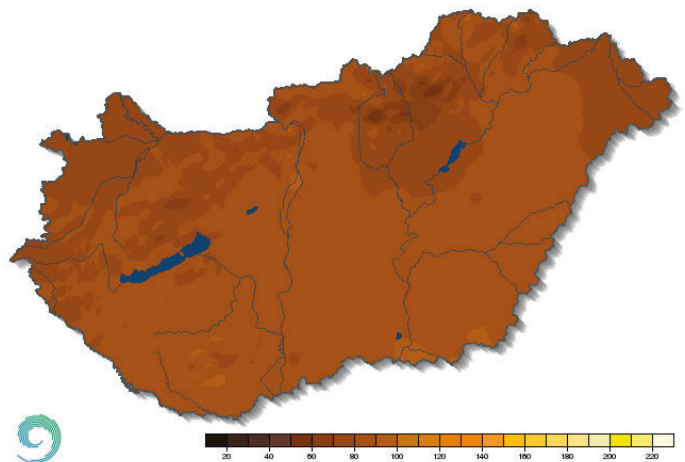


8. ábra. A 2024-es őszi csapadékösszege a sokévi (1991–2020-as) átlag százalékos arányában kifejezve.

csak kisebb területeken (az Északi-középhegység nyugati részén, valamint a Körös-Maros közén) figyelhetők meg. Ezeken a tájakon a sokéves átlag 80-90%-a hullott. Az Észak-Alföldön, a Bakonyban és a Bodrogtó közben viszont csapadéktöbblet jelentkezett: az 1991–2020-as normálnak a 130-160%-a érkezett. A legmagasabb őszi csapadékösszeget jegyző állomáson, Bakonybél Somhegypusztán a sokéves átlag 170%-át mértük 2024-ben.

A globálsugárzás térbeli eloszlása

Ősszel hazánk legnagyobb részén 70–90 kJ/cm² globálsugárzás volt jellemző – kb. 20 kJ/cm²-vel kevesebb, mint 2023-ban ilyenkor. 2024-ben az északi tájakon mértük az alacsonyabb értékeket (70–80 kJ/cm²), míg délen a magasabbakat (80–90 kJ/cm²). Egerben rögzítettük a legalacsonyabb (55 kJ/cm²), Szeged belterület állomáson pedig a legmagasabb (91 kJ/cm²) évszakos összeget (9. ábra).

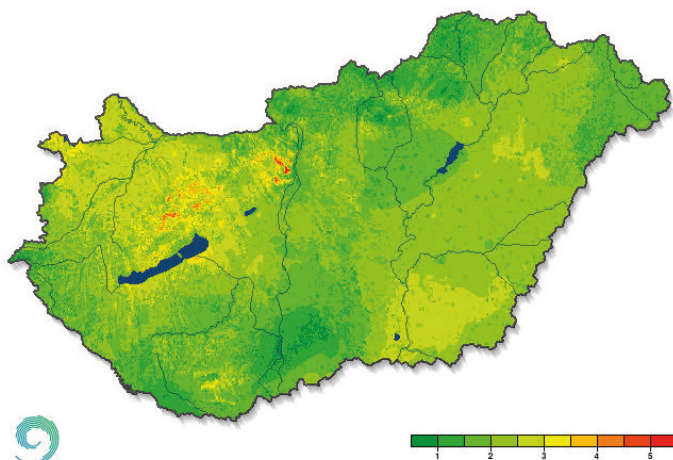


9. ábra. A 2024-es őszi globálsugárzás összege (kJ/cm²).

A szélsébség térbeli eloszlása

Ahogy az év többi részében jellemző, úgy alakultak a szélviszonyok 2024 őszén is (10. ábra). Hazánk legnagyobb részén 1 és 3 m/s közötti volt az átlagos szélsébség, az alacsonyabb szélsébségeket a Duna-Tisza-közének nyugati felén, valamint az Északi-középhegységben mértük. Győr-Moson-Sopron és Csongrád-Csanád vármegyékben 2,5–3 m/s-os átlagszél uralkodott. 3 m/s-nál magasabb értékek a Dunántúli-középhegységben és a Balaton környezetében láthatóak a térképen.

Az átlagszél mellett fontos megemlítenünk a szellőkéseket, melyek többnyire zivatarokhoz, intenzívebb frontátvonulásokhoz kapcsolódtak. Szeptember közepén a Boris ciklonnak köszönhetően (14-én és 15-én) született új országos legmagasabb napi szél-lökés rekord. Majd a hónap végén (26-án és 29-én), valamint október 10-én új fővárosi szélrekordokat is regisztráltunk.



10. ábra. A 2024-es ősz átlagos szélessége 10 m-es magasságban (m/s).

2024. ősz időjárási adatainak összesítője

Állomás	Sugárzás, kJ/cm ²	Hőmérséklet, °C						Csapadék, mm			Szél
	évszakai összeg	évszaki közép	eltérés	max	napja	min	napja	évszakai összes	átlag %-ában	r ≥ 1 mm napok	viharos nap (f _s ≥ 15 m/s)
Szombathely	79	10,9	0,4	34,2	2024.09.04	-4,6	2024.11.23	192	117	20	7
Nagykanizsa	81	10,7	0,3	34,9	2024.09.04	-4,8	2024.11.23	231	108	18	2
Pér		10,9		34,6	2024.09.03	-4,6	2024.11.10	155	98	19	11
Siófok	82	12,2	0,4	32,3	2024.09.08	-0,8	2024.11.17	162	105	16	10
Pécs		12,2	0,6	35,0	2024.09.03	-2,8	2024.11.18	183	101	18	4
Budapest	85	11,5	0,1	34,0	2024.09.04	-3,0	2024.11.24	145	102	14	2
Miskolc	73	10,3	-0,1	33,9	2024.09.03	-5,4	2024.11.24	173	115	23	0
Kékestető		7,5	0,9	25,6	2024.09.03	-6,4	2024.11.22	234	116	19	17
Szolnok		11,4	-0,0	35,1	2024.09.03	-4,0	2024.11.16	151	114	15	0
Szeged	91	11,8	0,3	35,7	2024.09.03	-4,3	2024.11.09	132	101	18	5
Nyíregyháza	82	10,9	0,4	33,8	2024.09.03	-3,3	2024.11.24	185	136	20	5
Debrecen	86	11,0	0,1	34,3	2024.09.03	-4,3	2024.11.16	130	101	15	5
Békéscsaba		11,4	0,1	35,0	2024.09.03	-5,7	2024.11.17	117	85	14	4



2024 őszenek időjárása agrometeorológiai szempontból

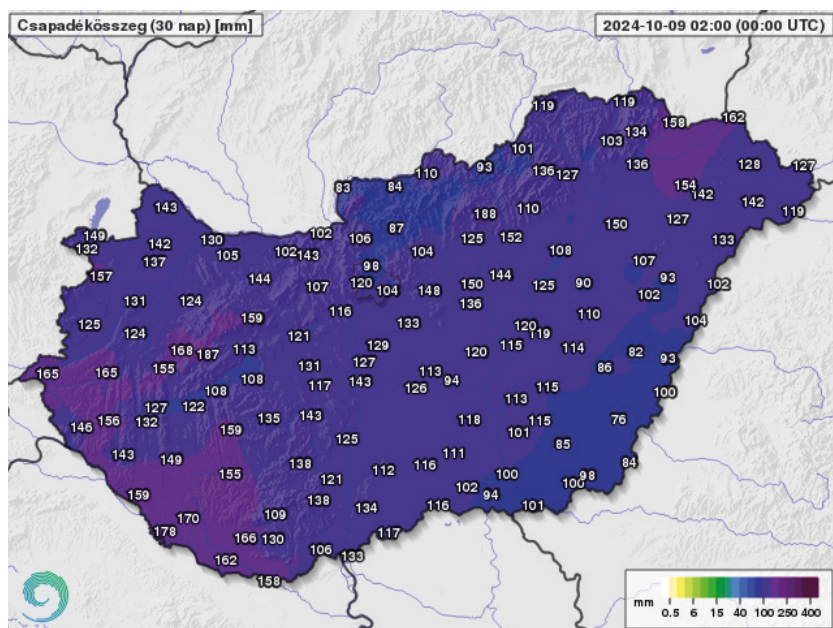
Erdődiné Molnár Zsófia, Kovács Attila Viktor

HungaroMet Nonprofit Zrt., molnar.zs@met.hu

2024 őszenek időjárásában mind a négy évszakunk jellegzetességei megjelentek. Volt részünk forró száraz nyáron, napsütéses, tavasziasan enyhe napokban, kellemes vénasszonyok nyarában, ködös, nyirkos késő őszben és havas télen egyaránt.

A meteorológiai ősz első hetében még a júliusra és augusztusra jellemző igen meleg, nagyrészt száraz időjárás folytatódott. A nyári aszály ekkor tetőzött, hazánk túlnyomó részén nagyfokú vagy súlyos aszály volt megfigyelhető, és a szárazság hatásait a hőség is súlyosbította. Nagy, helyenként a 20 fokot is elérő napi hőingás mellett 23 és 28 fok között alakult a napi középhőmérséklet. A vegetáció körülbelül három héttel előrébb járt a fejlődésben a szokásosnál, amihez a szántóföldi kultúráknál még az aszály is hozzá tett a kényszerérés miatt. A napraforgó és kukorica állományok ekkorra már teljesen beérették, és betakarításuk is elkezdődött. Az őszi káposztarepce vetéséhez a talaj nedvességviszonyai azonban csak kevés helyen voltak kielégítőek, hazánk döntő részén igen száraz, poros talajba történt a vetés. A változás szeptember második hetében kezdődött. Előbb a Dunántúlon és a déli országrészben fordult csapadékosra az idő, és esett vissza a hőmérséklet, majd az ország többi részén is beköszöntött az ősz. A hőmérséklet április második fele óta először csökkent több napon át a sokéves átlag alá. Szeptember második felében volt egy szárazabb, naposabb időszak, amikor jól lehetett haladni az őszi eleji munkákkal, és a hőmérséklet is a nyarat idézte,

de összességében az esős időjárás kisebb megszakításokkal egy hónapon át tartott. Ez alatt a harminc nap alatt a sokéves átlag többszöröse hullott le, jellemzően 100–150 mm, a délkeleti országrészben 80–100 mm (*1. ábra*). A talaj felszín közeli rétege többnyire sáros volt, de a felső fél méter is csaknem országszerte telítetté vált. A Dunántúlon a fél méternél mélyebb rétegbe is jutott a nedvességből, azonban az Alföldön még október közepén is jelentős volt a nedvességhiány ebben a rétegben. Ezek az esők már nem javítottak a kukorica és napraforgó terméskilátásain, a csapadék a betakarítást gyakran hátráltatta, és rontott a termés minőségén is. A repce számára azonban ideálissá váltak az időjárási körülmények a kezdeti fejlődéshez. Az őszi kalászosok vetését október első felében szintén hátráltatta a sok csapadék és a sáros talaj. Az NDVI műholdas vegetációs index szeptember második felére vonatkozó térképein jól kivehető, hogy a megszokottól eltérően, jelentősen nőtt a zöld tömeg mennyisége ebben az időszakban, főként a rétek, legelők sarjadtak újra. Az idej első fagyok a fagyuzagos helyeken elég korán, szeptember-október fordulóján jelentek meg, és a talajmenti fagyok ekkortól már többé-kevésbé rendszeressé váltak. Október második dekájától

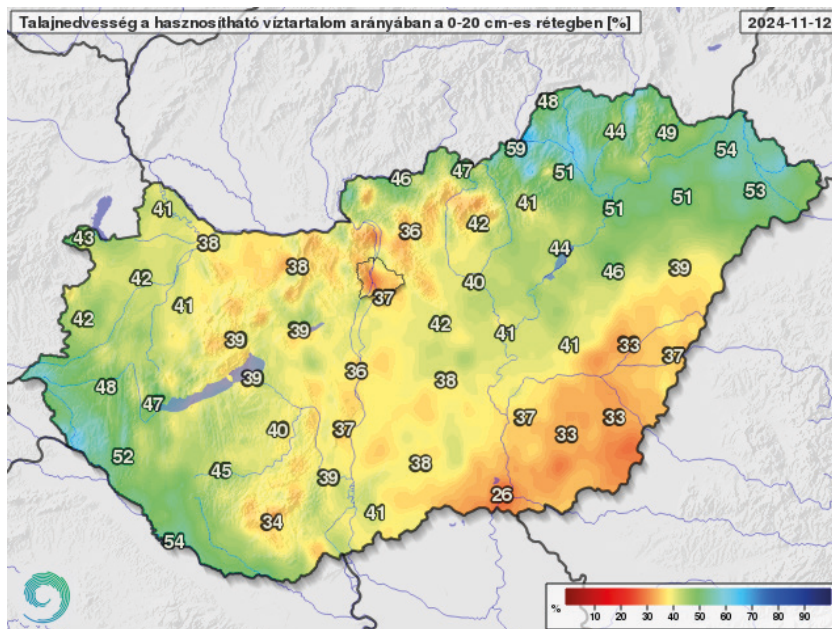


1. ábra. 30 napos csapadékösszeg 2024. október 9-ig (Celsius fok).

azonban csak a hónap közepén következett be. Először csak az északi és a keleti országrészben esett, majd 20-án országos, a Kisalföld kivételével kiadós eső érkezett, amit két nappal később hazánk jelentős részén havazás követett. Síkvidéken is 2–8 cm közötti hóréteg alakult ki. A felszínközeli talajréteg alaposan átnedvesedett, és a mélyebb rétegekbe is jutott a nedvességből, de az Alföldön a fél méternél mélyebb talajrétegben még november végén is jelentős nedvességhiány mutatkozott. A csapadék rendkívül jól jött az őszi kalászosoknak, az átlagosnál hűvösebb idő azonban nem segítette az állományok erősödését.

beköszöntött a vénasszonyok nyara, tartósan szárazabbra, naposabbra fordult az idő, és ez a száraz időszak egy hónapon át kitartott. Előbb a felszínközeli talajréteg kezdett száradni, szikkadni, majd a nedvességvesztés egyre mélyebben is megjelent. A csendes, őszi időjárás kedvezett a talajmunkák elvégzésének, november elejére azonban egyre jobban kiszáradt a talaj felső, az őszi gabonák gyökérzete által érintett rétege (2. ábra). A még október elején elvetett kalászosok elegendő nedvességet találtak az optimális korai fejlődéshez, a későbbi vetések alatt azonban kiszáradt a talaj, és nehezen, egyenetlenül keltek, elmaradtak a fejlődésben. A november beköszöntével egyre gyakoribbá és tartósabbá váltak a pára- és ködfoltok, és egyre nagyobb területen lett jellemző a szürke, nyirkos idő, valamint a hőmérséklet is visszaesett. Gyakorivá váltak az éjszakai fagyok, és az október végén még többfelé 20 fok körüli maximumok is több fokkal visszaestek. A fordulat a csapadékban

Összességében az idei őszi csapadékosabb volt a sokéves átlagnál, a hőmérséklet pedig az átlagosnál melegebb szeptembert és októbert követő hideg novembernek köszönhetően az átlag közelében alakult. Napsütésből országsszerte több volt a szokásosnál.



2. ábra. Talajnedvesség a talaj felső 20 centiméteres rétegében a növények számára hasznosítható vízmennyiség arányában 2024. november 12-én (%).

KÖNYVAJÁNLÓ

Érdekes könyvek, időjárás vonatkozással

Tibor Faragó, 2024: Our common environment and globalization: Shadows and Hopes

Faragó Tibor több évtizedes környezetpolitikai tapasztalata alapján írta meg ezt a minden részletre kiterjedő könyvet. A mű, mely korábban magyar változatban is megjelent*, a modern környezeti kihívások és a globalizáció kölcsönhatásának mélyreható elemzését nyújtja. Szerző, mint a környezeti tudományok és a fenntarthatóság elismert szakértője, egyedülálló perspektívából közelíti meg a témát.

A könyv elsődleges témái között szerepelnek a környezeti problémák globális aspektusai és azok hatásai a lokális közösségekre. Átfogóan tárgyalja a következő kérdéseket:

- környezeti degradáció és klímaváltozás: Részletes elemzést nyújt a globális felmelegedés okairól és következményeiről, valamint a szükséges intézkedésekről.
- biodiverzitás csökkenése: Megvitatja a biológiai sokféleség csökkenésének okait és a megőrzés fontosságát.
- fenntartható fejlődés: Bemutatja a fenntartható gazdálkodási és életmódbeli gyakorlatokat, amelyek hozzájárulhatnak a globális és helyi problémák enyhítéséhez.
- szociális és gazdasági egyenlőtlenségek: Rávilágít a globalizáció okozta egyenlőtlenségekre, és javaslatokat tesz azok mérséklésére.

A könyv logikusan felépített szerkezetben vezet végig az olvasót a témákon. Az első fejezetekben az alapvető fogalmak és elméletek ismertetésével kezd, majd fokozatosan tér át a részletes elemzésekre és esettanulmányokra. Különös figyelmet fordít arra, hogy a bonyolult tudományos kérdéseket érthetővé tegye a laikus olvasók számára is.

Ez a könyv elsősorban a környezetvédelem iránt érdeklődő olvasóknak szól, de hasznos lehet a tudományos közösség, a politikai döntéshozók és az oktatók számára is. Rámutat egy alapvető ellentmondásra, mely szerint a megfelelő környezetvédelmi politikai intézkedések nem mindig tartanak lépést a tudományos ismeretek mentén lecsapódó tényszerű figyelmeztetésekkel, nincs meg teljesen

a közös nevező a két „világ” között, sőt, még a környezettudomány művelői között sem. Ennek hátterében valószínűleg elsősorban az az ellentmondás rejlik, hogy míg a tudomány globális és oszthatatlan, addig a környezetpolitika kontinensről-kontinensre, országról-országra, sőt még régiók szerint is változó.

Emellett azoknak is ajánlott ez a tanulmány, akik mélyebb megértésre vágnak a globalizáció és a környezeti kihívások összefüggései terén. Faragó Tibor könyve elengedhetetlen olvasmány mindazok számára, akik megértést keresnek a 21. századi környezeti kihívások komplexitásában. A mű a felsőoktatásban, elsősorban nemzetközi jogi, illetve a környezettudományi területen is hasznos tananyag lehet, és bibliájává válhat a környezetpolitikával foglalkozó szakembereknek. Ebben segít a rengeteg hivatkozás is, ahol még részletesebben elmerülhetnek a témában az érdeklődők.

Dr. Faragó Tibor a környezet és a társadalom globális szintű kölcsönhatásainak, a nemzetközi környezeti kormányzás folyamatának, a multilaterális környezeti megállapodások fejlődésének vizsgálatával foglalkozik. A szerző c. egyetemi tanár, matematikus, környezetkutató, humán ökológus, a korábbi Környezetvédelmi Minisztérium Nemzeti Környezetvédelmi Programjának koordinátora, nemzetközi és EU-együttműködésért felelős főosztályvezetője, majd a környezetpolitikai és klímapolitikai ügyekért felelős államtitkára volt. Több nemzetközi szervezet koordinátora, képviselője, főtárgyalója is volt, többek között az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezmény tudományos tanácsadó testületének első választott elnöke és a Fenntartható Fejlődés Bizottság alelnöke.

Tibor Faragó, 2024: Our common environment and globalization: Shadows and Hopes, Akadémiai Kiadó 236 p.

*Faragó Tibor - Közös Környezetünk és a Globalizáció: Árnyak és Remények, Akadémiai Kiadó, 2022.

KÖNYVAJÁNLÓ

Érdekes könyvek, időjárás vonatkozással

Gelencsér András: Ábrándok bővületében - A fenntartható fejlődés korlátai

Gelencsér András levegőkémikusnak, a Magyar Tudományos Akadémia tagjának könyve kiméletlen és provokatív szembenézés a globális fenntarthatóság kérdésével, célja nem más, mint leleplezni azokat az illúziókat és mítoszokat, amelyekkel a politikai és gazdasági elit elhiteti velünk, hogy a fenntartható fejlődés lehetséges és megvalósítható.

A könyv egyik fő mondanivalója, hogy ábrándok bővületében élünk, abban a hitben, hogy az üvegház hatású gázok kibocsátásának csökkentésével fejlődésünk fenntartható és elkerülhető a globális összeomlás. Azonban a csökkentésre való törekvés, az intézkedések, hogy a globális átlaghőmérséklet ne haladjon túl a másfél fokot, csak rózsaszín álom.

A globális éghajlatváltozás csak egy kis szelete azoknak a problémáknak, amelyekkel szembe kell néznie az emberiségnek. A kulcsmondat: „véges rendszerben nem lehetséges végtelen növekedés” és az erőforrások közeli jövőben várható kimerülése miatt a jelen állapot még akkor sem lenne fenntartható, ha korlátlan, zöld energiaforrások állnának rendelkezésünkre. Azonban a megújuló energia – ami valójában nem megújuló, ahogy azt a későbbiekben kifejti – is zsákutca. Ha a fosszilis energiahordozóktól való függőséget meg akarjuk szüntetni, akkor azt egy másik függőséggel helyettesítjük, mivel a nem fosszilis energia termeléséhez korlátozott mértékben hozzáférhető nyersanyagokra van szükség.

A „jól befűtöttünk” című fejezetben részletesen beszél az üvegházhatásról és az éghajlatváltozásról. Ennek a fejezetnek a fő üzenete, ha meg is szűnne az üvegházhatású gázok emberi kibocsátása, a felmelegedés akkor sem állna meg, több pozitív visszacsatolási folyamat hatása miatt. Az éghajlatot szabályozó fizikai rendszer ugyanis rendkívül bonyolult, sok bizonytalanság van ezek megismerésében, ami melegágya a – „gazdasági lobbicsoportok érdekei mentén” – létrejövő, ideológiát is termelő klímaszkeptícizmusnak. „Minek kell történnie ahhoz, hogy az éghajlatváltozást tagadókkal szembejöjjön a valóság?” teszi fel a kérdést a szerző, jogosan.

A „Végtelen energia mítosza” fejezetben sorba veszi az alternatív, nem fosszilis alapú, megújulóknak nevezett energiaforrásokat. Sajnos ezekkel is csak baj van, elsősorban a tárolás, az életciklusra vonatkoztatott negatív energiaméreg, a nyersanyagigény, és a járulékos környezeti károk stb. miatt.

A „Teremtett anyag” című fejezetben leírja, hogy anyag nem terem és nem is fogy el, csupán a nyersanyagok egyre korlátozottabb hozzáférhetőségének terén vannak gondok. Az elemek közül számos olyan van, amelyek a megújuló energiaforrások előállításához szükségesek, így pl. a napelemek, a szél erőművek, és tárolókapacitásuk gyártásához. A viszonylag könnyen kitermelhető nyersanyagforrások, ásványok kimerülőfélben vannak, és egyre nagyobb energia-, víz-, anyag- és költségfordítással termelhetők ki. Még az olyan hétköznapi anyagból, mint a homok is előbb-utóbb hiány mutatkozik, ugyanis a sivatagi homok nem alkalmas beton készítéséhez.

Az emberiségnek hamarosan szembe kell néznie a „Hamupipőke-effektussal”, miután a koncentrált forrásokból kinyert anyagok felhasználás után szétszóródnak, azaz nő az entrópia. A millió, sőt akár milliárd évekkel ezelőtt létrejött könnyen hozzáférhető források nem termelődnek újra, „a természet ajándékkonzervjeinek nincs alternatívája.” A megújulóenergia-felhasználással egyre több energiát használunk fel kevésbé energiatékony berendezések gyártására, emiatt a megújuló források hatékonysága negatív lesz, azaz több befektetett energiát igényelnek, mint amit életciklusuk során termelnek, ami a „róka fogta csuka” tipikus esete.

Az „Ábrándos szép napok” című fejezetben említi, hogy „megújuló energiaforrások” nincsenek, mivel energia nem újulhat meg, nem keletkezhet, tulajdonképpen csak energiaátalakításról van szó. Ráadásul a megújulóknak tekintett energiaátalakítók és tárolók jelentős mennyiségű fosszilis energia felhasználását igénylik.

A 20. századra a fogyasztói társadalmak a homo sapiensből fogyasztógépet, „homo shopienst” csinált. A korlátlan fogyasztásnak azonban van egy korlátja, mégpedig egy „betonfal a globálissá terebélyesedett túlfogyasztói társadalom száguldó vonata előtt”. Mivel ezen a vonaton nincs fék, úgy tűnik, hogy az eddig sikeres „turbókapitalizmus” veri be az utolsó szöveget a modern civilizáció koporsójába.

A mű ideális olvasmány mindazok számára, akiket érdekel a fenntarthatóság kérdésköre, legyen szó egyetemi hallgatókról, döntéshozókról vagy egyszerűen csak a téma iránt érdeklődő laikusokról. A könyv különösen ajánlott azoknak, akik nyitottak a kritikai gondolkodásra és készek szembenézni a kényelmetlen igazságokkal is.

Hírek

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

Hetedszer találkoztak a MET-ÉSZ-esek

2024.10.26. ■ Két év szünet után a HungaroMet idén újra megrendezte a MET-ÉSZ találkozót, immár hetedik alkalommal, melyre idén is a Marczell György Főobszervatóriumban került sor, mintegy 40 fő részvételével. A délelőtt szakmai előadásokkal indult, ahol szó esett a siófoki és a paksi állomások mun-

kájáról, illetve a mérések rejtelmeibe is bepillantott a hallgatóság. Az időjárás ismét kegyes volt, így ebéd után az érdeklődők megnézhettek egy szondafelszállást, illetve a műszerkerttel is megismerkedhettek közelebbről. Az egésznapos program kötetlen beszélgetéssel zárult.

Ha november, akkor Meteorológiai Tudományos Napok

2024.11.14-15. ■ A Magyar Tudomány Ünnepe rendezvénysorozat keretében a Magyar Tudományos Akadémia Földtudományok Osztálya Meteorológiai Tudományos Bizottsága 2024. november 14-én és 15-én rendezte meg az 50. Meteorológiai Tudományos Napokat, aminek témája: Meteorológia a társadalom szolgálatában: a kutatástól az alkalmazásig.

A Meteorológiai Tudományos Napokat (MTN) első alkalommal 1975 novemberében rendezték meg a Magyar Tudományos Akadémián. Ebben az évben ünnepelhetjük tehát a MTN 50. születésnapját. Az MTN rendezvényeinek sorozata egyúttal a hazai légkörtudományi, sőt az előadódulések szakmai horizontját tekintve a környezettudományi intézményhálózat fejlődésének, mindenkori kutatási és fejlesztési célkitűzéseinek is történeti tükre.

Az 50. Meteorológiai Tudományos Napok központi témája a meteorológia a társadalom szolgálatában. A légkörben lejátszódó folyamatok jelentős hatással vannak a társadalomra, a mindennapi éle-

tünkre éppen ugyan úgy, mint a gazdaság különböző területeire. A meteorológiai kutatások hozzájárulnak ahhoz, hogy jobban megértsük az időjárási rendszereket, és ezáltal egyre pontosabb előrejelzések készülhessenek mind rövidtávon, mind pedig hosszabb távon. A kutatás és az alkalmazás terén elért fejlődés révén a meteorológia számos területen támogatja a társadalmat, hozzájárulva a lakosság életkörülményeinek javításához, az energia biztonságához, de akár a szélsőséges időjárási események által generált katasztrófák negatív hatásainak csökkentéséhez is. A folyamatos fejlődés és az új technológiák alkalmazása tovább növeli a meteorológiai szolgáltatások hatékonyságát és pontosságát, ami hozzájárul a társadalmi jóléthez és biztonsághoz. Az előadások bemutatták az éghajlatváltozás, az időjárás előrejelzés, a légkörfizika, a levegőkémia és az agrometeorológia területén elért olyan kutatási eredményeket, amelyek hatékonyan hozzájárulnak a közjó szolgálatához.

Átadták a Dévényi Dezső Numerikus Prognosztikai Emlékéremet

2024.12.05. ■ A Dévényi Dezső kollégánk - aki sokaknak tanítómestere és barátja volt, s 2009. november 26-án, 15 éve váratlanul távozott el a körünkből - emlékére alapított Numerikus

Prognosztikai Emlékérem díjátadóóját és a kapcsolódó angol nyelvű (hibrid) előadást 2024. december 5-én tartották. A 2024-es díjazott: Varga Ákos János, akinek ezúton is gratulálunk.

A MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG HÍREI

Elhunyt dr. Hirling György

Szomorú szívvel tudatjuk, hogy Dr. Hirling György, a Magyar Meteorológiai Társaság tiszteleti tagja életének 91. évében hosszú szenvedés után elhunyt. Végső búcsúztatása 2025. január 6-án volt a Farkasréti temetőben.

Hirling György az ELTE TTK meteorológia szakát 1956-ban végezte el. Diplomamunkájának címe: „A direkt napsugárzás értékének változása az Erdőháton kialakított mesterséges domb lejtőin mért adatok alapján”. Részt vett az 1965. évi szovjet déli-sarki expedícióban, ahol magaslégkör kutatással foglalkozott. Meteorológus kollégáival az antarktisi szakmai

tapasztalatairól ismeretterjesztő könyv jelent meg: Titkos Ervin, Hirling György, Barát József, Rockenbauer Pál, Szabados Tamás, Vissy Károly: Magyarok az Antarktison címmel (Kossuth Kiadó, 1976).

Egyetemi doktori fokozatát 1970-ben „A légkör vertikális szerkezete a kelet-antarktisi „Mirnij” kutatóállomás fölött 1965-ben” című dolgozat megvédésével szerezte meg. Később, nyugdíjazásáig a VITUKI-ban dolgozott, mint meteorológus. A Magyar Meteorológiai Társaság 2014-ben tiszteleti taggá választotta.

Emlékét szeretettel és tisztelettel őrizzük.

100 éves a Magyar Meteorológiai Társaság

2025.01.25. ■ 1925. január 25-én a Meteorológiai és Földmágnassági Magyar Királyi Központi Intézet tanácsstermében az intézet vezető munkatársai, valamint a honvédség, a mezőgazdaság, az orvostudomány, a fizika, a csillagászat, a talajtan jeles képviselői, kutatói megalapították a Magyar Meteorológiai Társaságot, amely e jeles esemény 100. évfordulója alkalmából 2025. január 30-án, csütörtökön 14 órától ünnepi közgyűlést tart.

Az ünnepség programja:

14:00 Köszöntők (Raisz Anikó, államtitkár, Energiaügyi Minisztérium; Szanka Gábor, vezérigazgató, HungaroMet)

14:10 Lakatos Mónika: Az MMT 100 éve

14:25 Liz Bentley: Az Európai Meteorológiai Társaság 25 éve

14:35 Pódiumbeszélgetés az MMT múltjáról, jelenéről, jövőjéről (magyarul, résztvevők: Tóth Boglárka, Breuer Hajnalka, Lakatos Mónika, Gál Tamás, Haszpra László, Major György, moderátor: Kocsis Zsófia)

15:00 Pódiumbeszélgetés nemzetközi társasági tapasztalatokról (angol nyelven, résztvevők: Liz Bentley, Valova Paulina, Pavol Nejedlik, Zbigniew Ustrnul, moderátor: Breuer Hajnalka)

15.20 A HungaroMet kórus előadása

15:30 Állófogadás

Helyszín: HungaroMet Zrt. földszinti díszterem (1024 Budapest Kitaibel P. u. 1.)

Első alkalommal került megrendezésre a Róna Lounge – Komjáti Kornél és Guth Réka beszámolója

2024.12.03. ■ 2024. december 3-án sikerrel zajlott le a Magyar Meteorológiai Társaság és a HungaroMet Nonprofit Zrt. közös szervezésében megvalósult Róna Lounge, amely a Róna Zsigmond Ifjúsági Kör új kezdeményezéseként jött létre. Az esemény célja az volt, hogy platformot teremtsen az egyetemi hallgatók és fiatal szakemberek közötti kötetlen beszélgetésekre, szakmai kapcsolatok építésére.

A rendezvényen 19 hallgató vett részt, akik több évfolyamot képviseltek, az első éves BSc-hallgatóktól egészen a diplomázás előtt álló MSc-hallgatókig. A szakmai oldalt a HungaroMet, a Magyar Honvédség és az ELTE ifjú meteorológusai képviselték, akik tapasztalataikkal, tanácsaikkal támogatták az érdeklődőket.

Az esemény lehetőséget nyújtott a résztvevők számára, hogy bepillantást nyerjenek a meteorológia különböző területein dolgozó szakemberek mindennapi munkájába. A beszélgetések során szó esett a szakma aktuális kihívásairól, a különböző karrierlehetőségekről, valamint a résztvevők egyéni érdeklődési területüknek megfelelő gyakorlati tanácsokat is kaptak.

A Róna Lounge egy új típusú találkozási formát kíván meghonosítani a meteorológus közösségen belül, amely elősegíti a szakmai utánpótlás és az ifjúsági közösségépítés megerősítését. De hogy mindez hogyan is élték meg a fiatalok, azt egy másodéves MSc meteorológus hallgatótól, Guth Rékától kérdeztük

meg, aki az alábbiak szerint nyilatkozott az első Róna Lounge eseményről:

Tanulmányaim végéhez közeledve bennem is ott motoszkál a gondolat, hogy milyen is lesz valójában meteorológusként dolgozni. Ennek okán különösen vártam ezt a programot, hogy a már szakmában dolgozók által kicsit én is beleláthassak mi is vár rám a diploma megszerzése után.

A fiatalos társaságnak köszönhetően, mindenki hamar feloldódott és egy igazán kötetlen beszélgetés alakult ki a jelenlévők között. A szervezők színes feladatokkal készültek számunkra, ami szintén hozzájárult ahhoz, hogy kicsit mindenki jobban megismerje a másikat. Betekintést nyerhettünk, hogy a meteorológián belül ki, milyen szakterületen dolgozik, mi iránt érdeklődik leginkább és milyen elhelyezkedési lehetőségeink vannak. Mindezt játékos formában. Ami a legjobb, hogy a saját kérdéseinket a bennünk lévő kételyeket is bátran feltehattük, megoszthattuk és megértő fülekre találtuk, hisz mindannyian jártak már ebben a cipőben.

Véleményem szerint az ilyen jellegű esemény mindenki számára rendkívül hasznos és tanulságos, legyen az a képzés elején vagy már a diplomaszerezés közepében járó hallgató. Örülök, hogy részt vehettem ezen az eseményen és a jövőben is szívesen csatlakozok hasonló alkalmakhoz.



A résztvevők a HungaroMet disztermében.

Misztikus téli ködbe veszve
Somogyi Csaba, ViharVonal, János-hegy, Erzsébet-kilátó, 2025. január 2.



Alkonyati fények
Homoki Nikolett, FelhőNézők, Szekszárd, 2025. január 27.



klimavaltozas.org



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 ÉRDEKESSEGEK
ELŐREJELZÉS, VESZÉLYJELZÉS, RIASZTÁS
AKTUÁLIS, MÉRT ADATOK, ÉGHAJLAT
LÉGSZENNYEZETTSÉG
KÖRNYEZETVÉDELEM



www.met.hu

Minden információ egy helyen az időjárásról és a meteorológiáról

HUNGAROMET NONPROFIT ZRT.