

LÉGKÖR

69. ÉVFOLYAM KÜLÖNSZÁM



**A MÚLT ÉS A JELEN ÉGHAJLATA
A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSA
FOLYÓINKRA**

**MEGFIGYELT ÉGHAJLATVÁLTOZÁS
SZELES ÉS CSAPADÉKOS
IDŐJÁRÁSI HELYZETEK
VIZSGÁLATA**

**ÉGHAJLATVÁLTOZÁSI
INFORMÁCIÓS RENDSZER**

**ÓCEÁNI ÁRAMLÁSI VISZONYOK
VÁLTOZÁSA**

2024. JÚLIUS

LÉGKÖR

69. évfolyam
2024. Különszám

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

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

A kiadásért felel:
a HUNGAROMET NZRT. vezérigazgatója

Készült:
PREMIER Nyomda

Felelős vezető:
Király Attila

ISSN 0133-3666

Készült 500 példányban

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



Főszerkesztő: Fejes Edina

Főszerkesztő-helyettes: Tóth Róbert

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

ELNÖK:
Dr. Haszpra László

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

Tervezőszerkesztő, grafikus: Szabó Dorottya

TARTALOM

KÖSZÖNTŐ	2
IZSÁK BEATRIX, SZENTES OLIVÉR, BIHARI ZITA, BOKROS KINGA, LAKATOS MÓNIKA: Reprezentatív meteorológiai adatok bizto- sítása a múlt és a jelen éghajlatának megismerésére <i>Providing representative meteorological data to understand past and present climate</i>	4
BIHARI ZITA, SZENTES OLIVÉR: Megfigyelt éghajlatváltozás 30 éves klímanormálok és egy készülő éghajlati atlasz tükrében <i>Examination of observed climate change based on 30 years climate normals and in the light of a forthcoming climate atlas</i>	12
BORDI SÁRA, SZABÓ PÉTER, PONGRÁCZ RITA: Összetett extrém események vizsgálata – szeles és csapadékos időjárás Magyarországon <i>Analysis of compound events – extreme wind and precipitation in Hungary</i>	18
SZÉPSZÓ GABRIELLA, ALLAGA-ZSEBEHÁZI GABRIELLA, BORDI SÁRA, MEGYERI-KOROTAJ OTÍLIA, SCHUCHNÉ BÁN BEATRIX, ZEMPLÉNI ZSUZSANNA: Az éghajlatváltozás hatásainak komplex vizsgálatát támogató információs rendszer fejlesztése <i>Development of an information system supporting the complex examination of the effects of climate change</i>	23
LIPTAY ZOLTÁN, ENGLONER ATTILA: A klímaváltozás lehet- séges hatásai a nagy folyóink vízminőségére – a vízminőségi modellezés peremfeltételeinek klímamparaméterezése <i>The possible effects of climate change on the water quality of our large rivers - climate parameterization of the boundary conditions of water quality modeling</i>	30
BORDI SÁRA, SZÉPSZÓ GABRIELLA: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra <i>Impact of changes in the circulation system of the Atlantic Ocean on the climate</i>	37
KISLEXIKON	43
PROJEKTBE MUTATÓ	44

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.



Kedves Olvasó!

Globális világunk fenntarthatóságának (helyesebben fenntarthatatlanságának) ikonikus kihívása, és talán egyik legsúlyosabb tünete a globális éghajlatváltozás. Amit az emberiségnek több évszázados kitarító tevékenységével sikerült berúgnia, az utóbbi évtizedekben pedig a kontrollvesztett gazdasági növekedéssel a gázkart is felcsavarnia, gigantikus léptékű és mára már letagadhatatlan globális folyamatokat szabaddítva el. Ezek már a globális politika ingerküszöbét is átütötték, és nagyjaink jó szokásuk szerint kézbe is vették a probléma „megoldását”. Ez azonban sajnos nem a természeti rendszerek komplexitását figyelembe vevő tudományos eredmények alapján történik, hanem a politikára jellemző faék egyszerűségű egybités kommunikációs üzenetek mentén, amelyek sajnálatos módon köszönő viszonyban sincsenek a megkerülhetetlen természeti törvények által uralt kélhetetlen valósággal. A rossz hír, hogy az éghajlatváltozást, miképp minden más természeti (sőt társadalmi) folyamatot is a valóság, nem pedig a politika irányítja. A mágikus és módfelett jól hangzó, erőltetett ütemű, egyébiránt technológiailag és globális léptékben tökéletesen kivitelezhetetlen dekarbonizáció, a globális szén-dioxid kibocsátás vágyvezérelt lenullázása nem fogja megállítani az éghajlatváltozást sem a bűvös +1,5, sem +2, sem +akárhány Celsius fokon belül. Azt legfeljebb a természet fogja tudni megállítani, ha tudja és akarja, csak éppen egyre kevésbé valószínű, hogy még a 8 (vagy 10 milliárd) ember számára kényelmes jólétet biztosító kellemes éghajlati tartományon belül. A fősodorban domináns nézettel ellentétben a közelmúltban publikált, a Föld sugárzási mérlegének több mint húsz éves műholdas megfigyelésének adatai szerint az utóbbi évtizedek felmelegedésének oka kétharmad részben a planetáris albedó csökkenése (elsősorban a csökkenő felhőborítottság okán), és mindössze egyharmad (!) részben a politika által fetiszizált üvegházhatás. Aminek, valljuk be, ráadásul csak egyik összetevője a szén-dioxid, jelentősebb a felmelegedés miatt ugyancsak megnövekvő vízgőz, a sokkal kényelmetlenebbül szabályozható többi üvegházhatású gázzal (metán, dinitrogén-oxid, ózon) nem is beszélve. Amit például ideig-óráig lehet kozmetikázni olcsó könyvelési trükkökkel, például azzal, hogy a metán szén-dioxid ekvivalens koncentráció növekményét még mindig 100 éves időskálára vonatkoztatjuk (ahol az csak 25-szörös, szemben a 20 éves időskálára vonatkozó 80-as szorzóval). De az is megérne egy misét,

miért nem veszi még mindig figyelembe a politikailag jól fésült, ámde mégis szakmai zsinórmértéknek tekintett IPCC jelentése azt a letagadhatatlan tudományos tény, hogy a fosszilis tüzelőanyagok égésének megszüntetésével az antropogén kén-dioxid kibocsátás jó részétől is megszabadulunk, ami jelenleg – a planetáris albedóra gyakorolt hatásán keresztül – a felmelegedést mérséklő geomérnökösödésünk egyik akaratlanul is hasznos eszköze. Egy közelmúltban megjelent rangos tanulmány szerint a kén-dioxid kibocsátás megszüntetésével azonnal +0,8 °C-os többlet felmelegedés szabadulna el az üvegházhatás-indukált folytatólagos felmelegedésen felül.

Nyilvánvaló tehát, hogy bőven akad teendője a tudománynak, amikor a Magyarországra ténylegesen várható éghajlati változások trendjeivel foglalkozik, nem szabad az IPCC politikailag korrekt, de a valóságtól egyre inkább elrugaszkodó és vágyvezérelt előrejelzéseire hagyatkoznia. Az Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium boszorkánykonyhájában éppen valami ilyesmi történik, a Magyarországon várható éghajlatváltozásról és annak következményeiről éppúgy, mint az alkalmazkodási lehetőségeiről a valóság talaján folyik az együttgondolkodás különböző tudományterületek képviselői között. A Légekör jelen különszáma egyfajta gourmet válogatás a Nemzeti Laboratórium keretrendszerében megvalósított kutatások a 2023. évi Meteorológiai Tudományos Napokon elhangzott előadásokban is bemutatott, a meteorológia tudományterületéhez legszorosabban kapcsolódó eredményeiből. Jelen különszám írásait olvasva benyomást szerezhetünk az éghajlati rendszerünk roppant bonyolultságáról, visszacsatolásairól, és talán megérthetjük belőle, hogy miért tökéletesen reménytelen a globális felmelegedést faék egyszerűségű egybités jelszavak segítségével „megállítani”. E kifejezetten provokatív-nak szánt bevezetővel felelős virtuális együttgondolkodásra hívok minden kedves olvasót!

Veszprém, 2024. július 11.

Gelencsér András

az MTA levelező tagja, egyetemi tanár,
az Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti
Laboratórium szakmai vezetője



Reprezentatív meteorológiai adatok biztosítása a múlt és a jelen éghajlatának megismerésére

Izsák Beatrix, Szentés Olivér, Bihari Zita, Bokros Kinga, Lakatos Mónika

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., izsak.b@met.hu

DOI: 10.56474/legkor.2024.K.1

A jelen és a múlt éghajlatának megismerése, a változás, változékonyság számszerűsítése csak a meteorológiai mérések, megfigyelések elemzésével lehetséges. Az éghajlati adatbázis forrásai a meteorológiai mérőállomások mérései, ami az utóbbi évtizedekben jelentősen átalakult, köszönhetően az automatizálásnak. A HungaroMet klimatológiai adatbázisa ennek megfelelően a mérések kezdetétől napjainkig, gyakoriságában és minőségében folyamatosan változó adatokat tartalmaz. Emellett a mérések digitalizálása napjainkban is folyamatos. Ezek következtében az adatok ellenőrzése és homogenizálása, szükség esetén pótlása kulcsfontosságú a klíma megismerésével és a megváltozásával kapcsolatos vizsgálatoknál. A homogenizálás során az a cél, hogy az állomások áthelyezéséből és a mérési módszerekben történt változásokból adódó indokolatlan töréseket kiszűrjük az adatsorokból, az éghajlatváltozás jelének megőrzése mellett. A homogenizálás adekvát matematikai statisztikai alapokon történő alkalmazása lehetővé teszi, hogy egy-egy állomás adatsorait úgy vizsgálhassuk, mintha a mérések mindig a jelenlegi helyen, azonos körülmények között folytak volna. Térben reprezentatív adatokhoz matematikailag is megalapozott interpolációval juthatunk.

Providing representative meteorological data to understand past and present climate

Understanding the present and past climate, quantifying change and variability is only possible by analysing meteorological measurements and observations. The source of the climate database is the measurements from meteorological stations, which have changed significantly in recent decades thanks to automation. Accordingly, the HungaroMet climatological database contains data that has been constantly changing in frequency and quality from the beginning of the measurements to the present day. In addition, the digitalization of measurements is still ongoing. As a consequence, data verification, homogenization and, if necessary, completion are crucial for studies on climate understanding and change. The aim of homogenization is to remove unreasonable breaks in the data series due to station relocations and changes in measurement methods while keeping the climate change signal. The application of homogenisation on an adequate mathematical statistical basis allows the data series of a given station to be examined as if the measurements had always been taken at the same location and under the same conditions. Spatially representative data can be obtained by mathematically based interpolation.

1. Bevezetés

Magyarország éghajlatának megismerése és az éghajlatváltozás detektálása csak jó minőségű, térben és időben reprezentatív adatbázist vizsgálva lehetséges. Egy adott térség éghajlatának jellemzésére az események valószínűségi eloszlásait kell megismerni. Amennyiben a matematikai statisztika oldaláról közelítjük meg az éghajlatot, akkor úgy fogalmazhatunk, hogy ha az adott helyen ismerjük a meteorológiai (vektor) változók eloszlását, akkor ismerjük az éghajlatát. Amennyiben ezek a valószínűségi eloszlások változnak, akkor beszélünk éghajlatváltozásról (*Szentimrey, 2011; WMO, 2018; Izsák és mtsai., 2021*). Tehát a statisztikus megközelítésben az éghajlatváltozást a meteorológiai adatokból, vagyis a mérésekből tudjuk becsülni, ezekből lesz a statisztikai minta a vizsgálatokhoz. Ebből következik, hogy csak olyan matematikai statisztikai modellek, módszerek alkalmazhatók, amelyek képesek figyelembe venni a valószínűségi eloszlás, azaz az éghajlat változását (*Izsák és Szentimrey, 2020*). Továbbá az is következik, hogy ezekből az adatokból minden hibás információt el kell távolítani mielőtt vizsgálatoknak vetjük alá (*WMO, 2020*). Ahhoz, hogy a jelen és az elmúlt időszakok éghajlatát vizsgálni tudjunk, elkerülhetetlen a nyers műszeres mérések feldolgozása, az úgynevezett adatszervezés, ami az adatellenőrzést, az esetleges hiányok pótlását, a homogenizálást és az adatok térbeli interpolálását jelenti. Az így előállított homogenizált állomási és rácsponti idősorok alapján történhet a múlt és a jelen éghajlatának térbeli és időbeli vizsgálata, elemzése. Ami a jövő éghajlatának vizsgálatát, előrejelzését illeti, a múltra és jelenre vonatkozó reprezentatív adatbázisnak fontos szerepe van egyrészt a klímamodellek validálásában, másrészt a projekciós eredmények matematikai statisztikai értelmezésében.

Jelen cikkünkben bemutatjuk az alkalmazott szoftvereket és matematikai statisztikai módszereket, hangsúlyt fektetve az Éghajlatváltozás Multidisziplináris Nemzeti Laboratóriumhoz kapcsoló feladatainkról, és ismertetjük a létrehozott adatbázisainkat.

2. Az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatához szükséges éghajlati adatsorok előállítása

Az Éghajlatváltozás Multidisziplináris Nemzeti Laboratórium céljaihoz, azaz az éghajlatváltozás jellemzőinek vizsgálatához és az éghajlatváltozás elemeinek az emberi egészségre, természeti, gazdasági

rendszerre és a társadalomra gyakorolt hatásainak tanulmányozásához térben és időben reprezentatív éghajlati adatbázis szükséges. Az elmúlt időszakok méréseken alapuló éghajlati adatbázisának előállítása a HungaroMet Éghajlatkutató Osztályán valósul meg.

Feladatainkhoz tartozik a digitalizált archív adatok ellenőrzése, a napi rácsponti adatbázis frissítése évente és az óraértékek (hatóránkénti hőmérséklet és csapadék rácsponti adatok) előállítása. Feladatunk tehát jó minőségű, reprezentatív meteorológiai adatokat biztosítani, mégpedig térben és időben egyaránt.

Az adatsorok előállításához két statisztikus klimatológiai módszert alkalmazunk. A MASHv3.03 (Multiple Analysis of Series for Homogenization; *Szentimrey, 2017*) szoftver az adatok homogenizálásán kívül elvégzi az adatpótlást és ellenőrzést is, valamint automatikusan használja az állomástörténeti ún. META adatokat. A MISHv1.03 (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis; *Szentimrey és Bihari, 2014*) szoftverrel lehet az éghajlati statisztikai paramétereket modellezni, elvégezni a meteorológiai adatok interpolációját vagy a rácsálózatra történő griddingelését, legvégül pedig itt is lehetőségünk van adatpótlásra. Mivel rendelkezésünkre állnak hosszú adatsorok, így a pótlást és ellenőrzést a MASHv3.03 szoftverrel végezzük, ugyanis így pontosabb adatokat tudunk szolgáltatni.

2.1 MASH

Röviden összefoglaljuk a **MASHv3.03** programrendszerrel kapcsolatos legfontosabb részeit.

Havi adatsorok homogenizálása

- Relatív homogenizálási eljárás.
- Lépésről lépésre történő iterációs eljárás: a sorozat (jelölt, referencia) szerepe lépésről lépésre változik az eljárás során.
- Az adott meteorológiai elem eloszlásától függően additív vagy multiplikatív modell használható.
- Elvégzi a hiányzó adatok pótlását és az adatellenőrzést is.
- Az éves és évszakos adatok homogenizálása.
- Automatikusan használja a metaadatokat (mint lehetséges töréspontok).

A homogenizálás eredményéről és a metaadatokról verifikációs statisztikákat készít.

Napi adatsorok homogenizálása

- A detektált havi inhomogenitásokon alapuló homogenizálás a napi adatokra.
- Tartalmaz adatellenőrzést és adatpótlást a napi adatokra is.

2.2 MISH

Röviden összefoglaljuk a **MISHv1.03** programrendszerrel kapcsolatos legfontosabb tudnivalókat. A rendszer tulajdonképpen két részre bontható, nevezetesen modellező és interpolációs részre. Az interpolációs rendszer a modellező rendszer eredményei alapján működik.

Modellező programrendszer (az éghajlati statisztikai paraméterekre)

- Hosszú homogenizált adatsorok és determinisztikus modellváltozók (pl. topográfia) alapján működik.
- A modellezést csak egyszer kell elvégezni az interpolációs alkalmazások előtt.

Interpolációs programrendszer

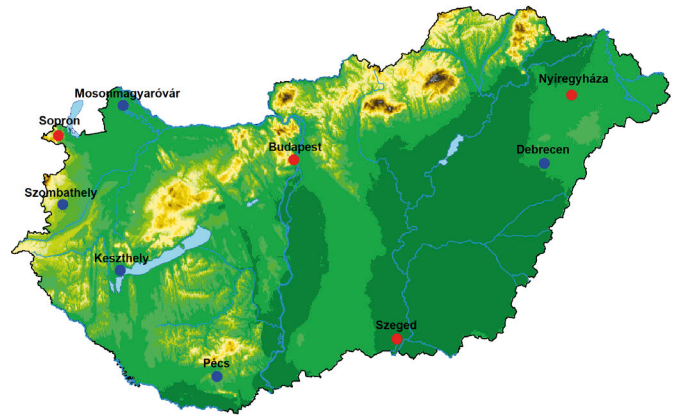
- Napi, havi értékek és sokévi átlagok interpolálhatók.
- Kevés prediktor is elegendő, tekintettel a korábbi modellezésre.
- Becslés az interpolációs hibákra, pontosabban a reprezentativitás értékekre.
- Lehetőség háttérinformáció használatára, pl. műhold, radar, előrejelzés.
- Képesség adatsorok rácspontra való interpolációjára.

3. Archiv adatok ellenőrzése

Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratóriumhoz kapcsolódóan 2023-ban öt magyarországi mérőállomás 1901 előtti sorát digitalizálták kollégáink, és a mérések vagy a rögzítés során keletkező esetleges hibák kiszűrését végeztük el. Már 2020-ban közzétettünk négy (Budapest, Sopron, Szeged és Nyíregyháza) magyarországi adatsort, melyeket az *1. ábrán* pirossal jelöltünk, és ehhez kapcsolódóan még öt állomás (Mosonmagyaróvár, Szombathely, Keszthely, Pécs, Debrecen) újonnan rögzített adatsorában végeztük el az adatok minőségellenőrzését. Ezek az *1. ábrán* a kékkel jelölt állomások.

3.1 Adatellenőrzés MASH szoftverrel

A napi adatok ellenőrzése a MASH szoftverrel automatikusan történik. Az adatellenőrzés a standardizált hibasorokon alapul, majd hipotézis vizsgálattal döntünk az adat minőségéről. Több standardizált hibasort készítünk az egyes állomásokhoz, melyekben nincs közös referencia állomás, hogy a vizsgált állomáshoz tartozó hibákat egyértelműen szeparálni

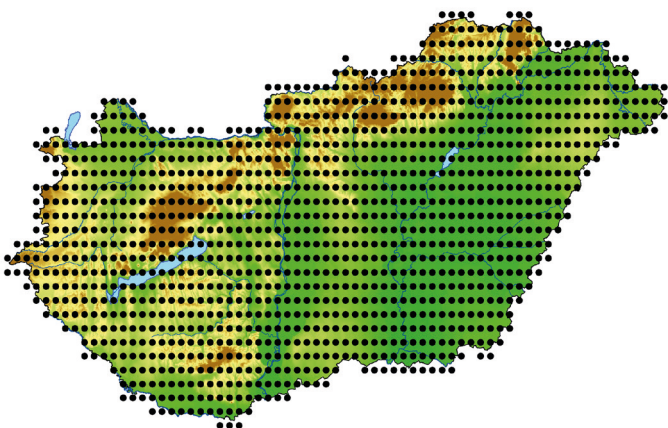


1. ábra. Adatsorok 1871-től.

tudjuk. A hibás adatok korrekciójához konfidencia intervallumot adunk meg. A matematikai leírás a *Szentimrey* (2017) munkájában található. A MASH szoftver által gyanúsnak jelölt adatokat ellenőrizzük az évkönyvek és az egyéb meteorológiai információk birtokában. Fontos megjegyeznünk, hogy a hibás és az extrém értékek között statisztikailag nem lehet (más egyéb információ nélkül) különbséget tenni! A leggyakoribb rögzítési hibák például a tizedesvesztő elhagyása, előjel hiánya, oszlopok felcserélése, de akár a XIX. századi kézírás értelmezése is hibához vezethet (*Szalai és Szentimrey*, 2001). Nem sorolunk fel minden hibatípust, mely méréskor és rögzítéskor keletkezett, de azt mindenképpen megjegyezzük, hogy a MASH szoftver alkalmazása nagyon hatékonyan bizonyult a rögzítési és mérési hibák kiszűrésére. Hőmérséklet esetén átlagosan 50, míg csapadék esetén 10 gyanús adatot ellenőriztünk manuálisan állomásonként. Ezek közül csupán 1–1 olyan esetet találtunk, mely alapján a kilógó érték elfogadható, hiszen az állomáshálózat sűrűsége az időszak elején még nem elegendően nagy. Keszthely esetén például a hőmérséklet értékek akár 2–3 °C-kal eltérhetnek a szombathelyi értéktől bizonyos időjárási helyzetekben, hiszen a Balaton hatását nem lehet figyelmen kívül hagyni. A többi gyanús adat bizonyítottan mérési vagy rögzítési hiba volt.

4. Rácspontra adatsorok évenkénti frissítése

Jelenleg a HungaroMet Meteorológiai Adattárában (odp.met.hu) kilenc meteorológiai elem napi rácspontra adatsora érhető el, Magyarország területére 0,1°-os szabályos rácshálózatra interpolálunk, mely 1233 rácspontra jelent (2. ábra). Évenkénti frissítéssel, 1971-től a napi maximum-, közép- és minimumhőmérséklet,



2. ábra. Az 1233 magyarországi rácspont földrajzi elhelyezkedése.

csapadékösszeg, relatív nedvesség és a műszerszínti légnomás, 2001-től a napi szélátlag, szélmaximum és a globálsugárzás adatsorok tölthetők le a HungaroMet adattárából.

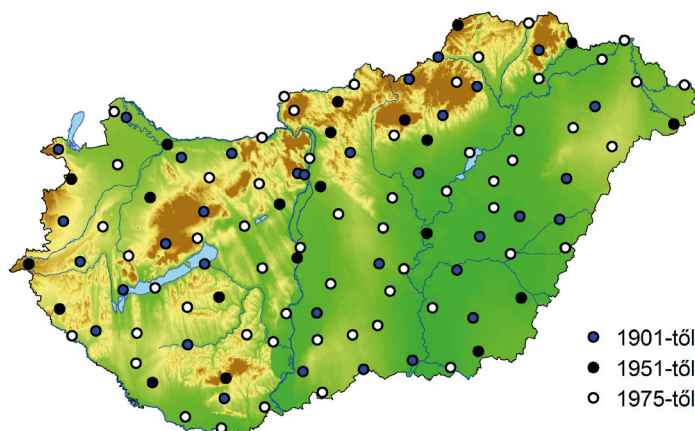
Az így elkészült adatbázis nemcsak az éghajlatváltozás tanulmányozására alkalmas, hanem inputként szolgál a jövőbeli projekciók elkészítéséhez, alkalmas a klímamodell eredmények verifikálására (Allaga-Zsebeházi *et al.*, 2022). Ezekre alapulnak a legújabb, 1991–2020-as klímanormálok, ezáltal Magyarország éghajlati atlaszának megújításához előállt egy reprezentatív éghajlati adatbázis. Azt is meg kell jegyeznünk, hogy a különböző állomáshálózatok reprezentativitás értékei, melyek a MISH eljárás alkalmazása során automatikusan előállnak, hasznos információkat hordoznak a jövőbeli állomások telepítéséhez, azaz optimalizálni tudjuk a tervezéskor a teljes magyarországi állomáshálózatot.

Ezeket a rácsponti adatsorokat minden évben frissítjük az elmúlt év adataival. A MASH szoftver kiválóan alkalmazható a feladatra, mely annak köszönhető, hogy az elméleti háttere klasszikus matematikai statisztikai tételeken, összefüggéseken alapul (Szentimrey, 2023). Relatív homogenizálási elven működik, azaz a környező állomások idősorával veti össze az adott állomás idősorát, ezen kívül adekvát matematikai modell biztosítja annak feltételét, hogy csak olyan töréspontokat detektáljunk az adatsorokban, amelyek nem az éghajlat változékonyságából erednek. Az egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy hipotézisvizsgálaton alapul, ez teszi lehetővé, hogy – a korábbi eredményekre alapozva – frissíteni tudjuk a homogenizált adatbázisunkat (Izsák és mtsai., 2022) anélkül, hogy a homogenizálást az egész adatsorra el kellene végeznünk.

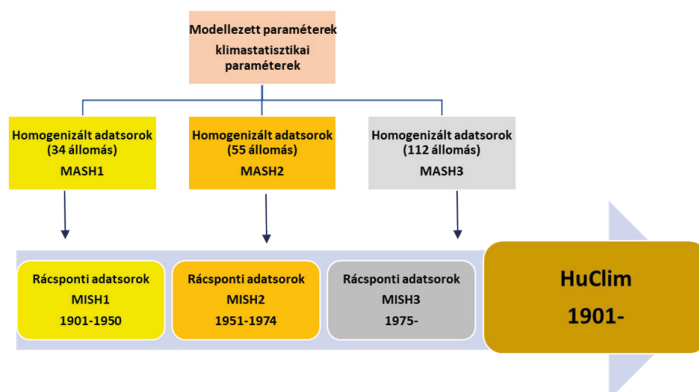
4.1 Hőmérséklet

Napi maximum-, minimum- és középhőmérséklet adatsorainkat azonos állomáshálózat adatainak felhasználásával készítjük el. Alapelvünk, hogy a lehető legtöbb meteorológiai állomás adatsorát, a mérésekben rejlő legtöbb információt használjuk fel.

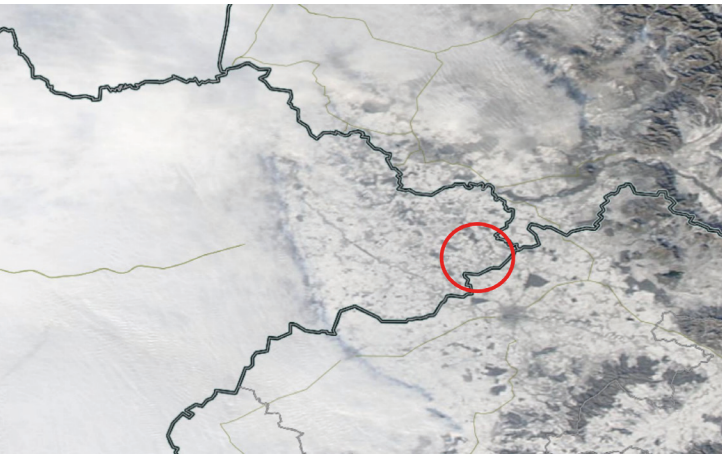
Mivel az állomások száma nőtt az évek során, a vizsgált időszakot 3 részre osztottuk: 1901-től 34, 1951-től 55 és 1975-től 112 állomás napi adatsorait homogenizáljuk, pótoljuk és ellenőrizzük (3. és 4. ábra). Ehhez a három különböző állomáshálózat alapuló homogenizált rendszert egymáshoz harmonizáljuk, így biztosítjuk, hogy mind a közös rész, mind önmagukban a különböző állomásrendszerek homogének legyenek. Természetesen a MASH szoftverrel történő adatellenőrzést is végrehajtjuk, és a hibás adatokat korrigáljuk (Izsák és mtsai, 2022). Vannak olyan helyzetek is, amikor az eredeti érték egyértelműen jó adat.



3. ábra. Az állomások földrajzi elhelyezkedése hőmérsékletmérő állomások esetén.



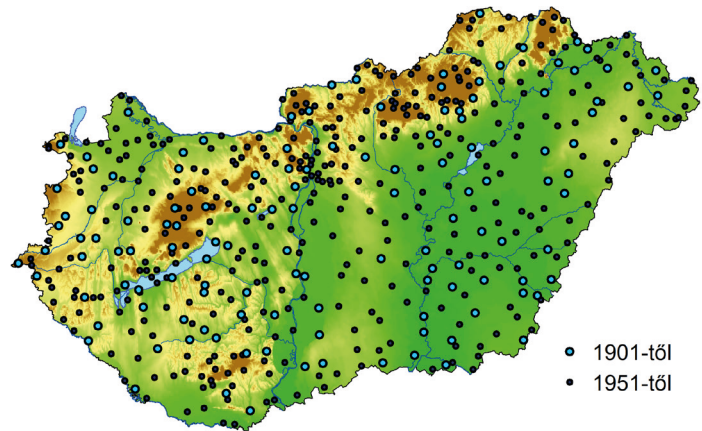
4. ábra. Hőmérséklet rácsponti adatbázis előállításának folyamata.



5. ábra. Műholdfelvétel, 2019.12.05., a piros körrel jelölt területen a legközelebbi állomásokhoz képest nagyon alacsony napi közép-hőmérsékletet mértek.

Például az 5. ábrán bemutatott esetben egy mérési pont jóval alacsonyabb hőmérsékletet mutat, mint a legközelebbi állomások. A műholdképet nézve jól látható, hogy ez a felhőzet és hótakaró hiánya miatt alakult így, így az adat a hibafájlból valódi szélsőség, és nem hiba. Az utófeldolgozás során még megvizsgáljuk az inverziós helyzeteket is, melyeket a szoftver automatikusan gyanús értéknek detektál, majd ezeket korrigáljuk.

Ahhoz, hogy az állomási adatsorokat a MISH szoftverrel interpoláljuk, bizonyos klímastatisztikai paramétereket kell modelleznünk. Ugyan ezt csak egyszer kell végrehajtani, és ezeket a továbbiakban felhasználhatjuk, mégis érdemes újra végig csinálni a modellezés lépéseit akkor, ha az állomás hálózat jelentősen bővült. Ezt történt 2021-ben, hiszen az addigi 58 helyett már 112 állomás adatait felhasználva tudtuk modellezni mindhárom hőmérséklet klímastatisztikai paramétereit (Izsák és mtsai, 2022). Az évi frissítés során már nem kell modellezni, hiszen ameddig nem bővül jelentősen az állomás hálózat, addig ezek a segédfájlok felhasználhatóak. A végső griddingelt adatbázis úgy áll elő, hogy minden időpontban a legtöbb állomási adatsorból interpolált értékek kerülnek be az adatbázisunkba (4. ábra). Ezt a homogenizált, ellenőrzött, pótoltt állomási adatsorokon alapuló, 0,1°-os felbontású, magyarországi rácspontokat tartalmazó griddingelt adatbázist nevezzük HuClim-nek. A három hőmérsékleti adatbázist összevetjük, hogy konzisztens rácsponti adatbázisokat kapjunk. Az interpolálással ugyanis kaphatunk az átlagnál magasabb minimumhőmérséklet értéket vagy az átlagnál alacsonyabb maximum értékeket. Ezek főként az októbertől márciusig tartó időszakban előforduló hideg légpárnás esetekben fordulhatnak elő (Izsák és mtsai, 2023).



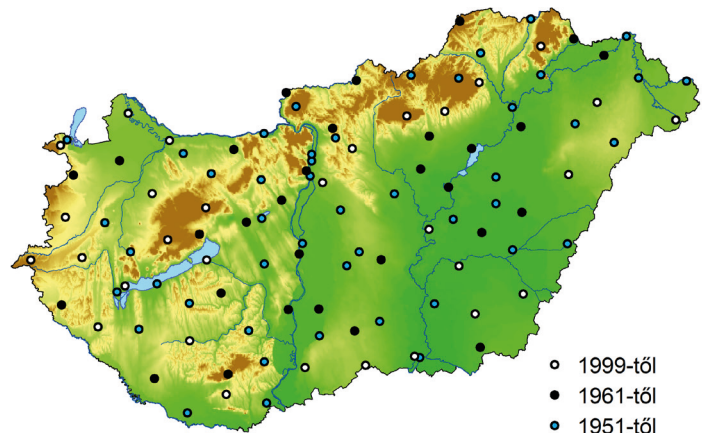
6. ábra. Csapadékmérő állomások földrajzi elhelyezkedése.

4.2 Csapadék

Csapadékösszeg adatsorainkat 1901-től 131, 1951-től 500 állomás méréseinek felhasználásával készítjük el (6. ábra). Ezen adatsorok homogenizálásával készül el. Az adatellenőrzés, pótlás és homogenizálás után állomási adatsorainkat a MISH szoftverrel interpoláljuk. A hőmérséklet adatsorokhoz hasonlóan a rácsponti adatbázist úgy állítjuk elő, hogy minden időpontból a lehető legtöbb állomás felhasználásával interpolálunk a 2. ábrán látható rácspontokba (Szentés, 2023; Izsák és mtsai, 2022).

4.3 Relatív nedvesség

A napi átlagos relatív nedvesség adatbázisunk az elmúlt évben jelentősen megújult. A korábbi állomásrendszer (1961-től 41 állomás) helyett (Izsák, 2023) 1951-től kezdődően 30, 1961-től 60 és 1999-től 107 állomás méréseit használjuk fel (7. ábra). Hasonlóan a hőmérséklet

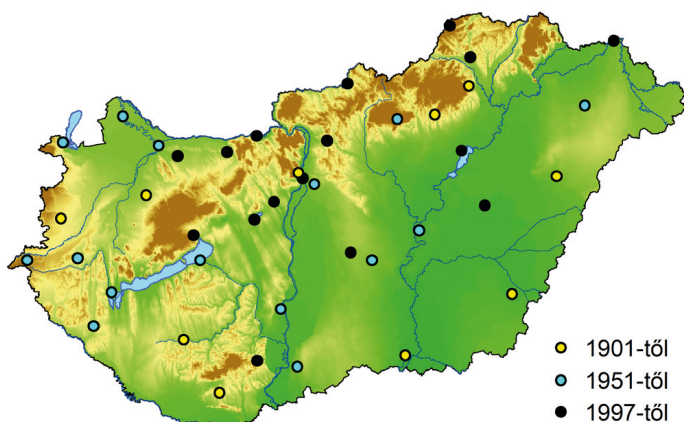


7. ábra. Relatív nedvesség esetén a mérőállomások földrajzi elhelyezkedése.

mérésekhez a relatív nedvesség adatokat is három MASH rendszerrel harmonizáljuk, és az adatellenőrzés részeként az inverziós helyzeteket is megvizsgáljuk.

4.4 Műszerszíni légnyomás

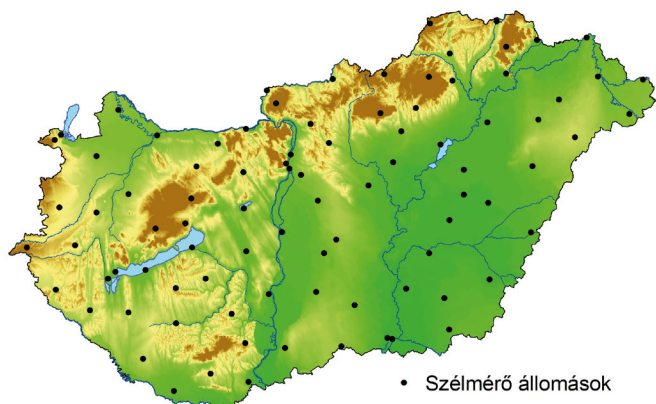
Klimatológiai célú adatbázisunk ezen meteorológiai elem esetében is jelentősen megújult 2024-ben. A korábbi állomásrendszer (1961-től 22 állomás) helyett 1901-től kezdődően 10, 1951-től 25 és 1997-től 41 állomás méréseit használjuk fel (8. ábra). Hasonlóan a hőmérséklet mérésekhez az állomási műszerszíni légnyomás adatokat is három MASH rendszerrel harmonizáljuk.



8. ábra. Légnyomás mérő állomások földrajzi elhelyezkedése.

4.5 Napi szélátlag, szélmaximum, szélirány

A napi szélátlag, szélirány és maximális szélkérés rácsponti adatbázis előállításához 89 szélmérő állomás adatait használjuk fel (9. ábra). Mivel a szélmérő

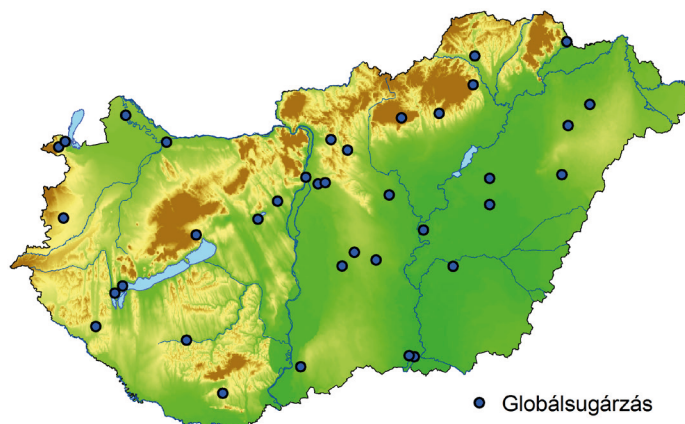


9. ábra. Szélmérő állomások földrajzi elhelyezkedése.

állomások száma nagy mértékben nőtt az elmúlt évtizedben: terveink között szerepel az állomáshálózat kibővítése. Hasonlóan a hőmérséklet, csapadék, relatív nedvesség és műszerszíni légnyomás adatbázishoz, a MISH modellezést is megújítjuk.

4.6 Globálsugárzás

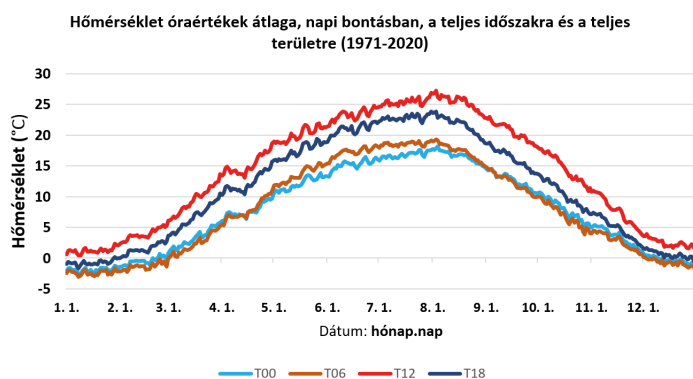
2001-től kezdődő globálsugárzás rácsponti adatbázisunkhoz 37 mérőállomás adatait homogenizáljuk, pótoljuk, ellenőrizzük (10. ábra) és interpoláljuk a HuClim rácsra (2. ábra). A jövőben tervezzük az állomásrendszer megújítását, hiszen az elmúlt években a globálsugárzás-mérő állomások száma is megnőtt.



10. ábra. Globálsugárzás mérő állomások.

5. Hatóránkénti rácsponti adatbázis

A klímamodellek fejlődésével egyre nagyobb igény merült fel a hőmérséklet és a csapadék napon belüli jellemzőinek vizsgálatára, amihez a napi rácsponti



11. ábra. Hőmérséklet óraértékek éves menete.

megfigyelési adatbázist időben finomítani kellett. A hőmérséklet esetén 1970-től 58 állomásra, a csapadék esetén 1997-től 89 állomásra áll rendelkezésünkre napi 4 mérési eredmény. Ezeket felhasználva, a MASH (Szentimrey, 2017) és MISH (Szentimrey és Bihari, 2014) szoftverek továbbfejlesztésével hatórás (0, 6, 12, 18 UTC időpontbeli) rácsponti megfigyelési adatbázist állítottunk elő a Magyarországot 1233 rácsponttal lefedő területre (2. ábra). A hőmérséklet esetén (11. ábra) 1970-től, csapadék esetén az 1997-től kezdődően frissítjük minden évben az elmúlt év adataival az óraértékek homogenizált, rácsponti adatbázisát (Szentimrey, 2019).

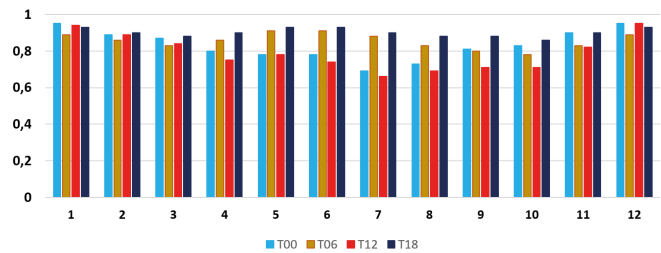
5.1 Homogenizáláshoz és interpoláláshoz kapcsolódó módszertani fejlesztések

A hatóránkénti hőmérséklet adatsorok homogenizálása során azt tapasztaltuk, hogy egyrészt az óras adatsorok igen inhomogének, másrészt inhomogenitásaik nem azonosak a napi sorokéval, azaz az inhomogenitásoknál nem tekinthetünk el a napi menettől. Következésképpen az óras adatsorokat kénytelenek vagyunk külön-külön homogenizálni, a szokásos MASH eljárással. Ugyanakkor az óraérték adatsorok MASH rendszerrel történő homogenizálásánál, a napi adatsoroknál detektált töréspontok metaadatként automatikusan felhasználhatók.

A hatóránkénti csapadékösszeg adatsorok homogenizálása során azt tapasztaltuk, hogy – a rövid időszak miatt is – kevésbé bizonyultak inhomogének, így mind a négy óras adatsorra csak egy enyhe homogenizálást hajtottunk végre.

A MISH interpolációs rendszere a modellező rendszer eredményeinek felhasználásával működik. Azonban ezek a rendszerek napi, havi adatsorok interpolálásához készültek, tehát óras hőmérsékleti adatokra való alkalmazásuk esetén bizonyos fejlesztésekre volt szükség. A probléma a napi menet kérdésével kapcsolatos. A módszertani fejlesztés lényege, hogy a napi értékekre vonatkozó modellezett klímastatisztikai paramétereket használjuk fel az óraértékek interpolálására, a térbeli trendértékeket módosítottuk a napi és óraértékek közötti regressziós együtthatók segítségével. Az nyilvánvaló, hogy nem interpolálhatunk ugyanúgy hajnalban, mint délben – hiszen teljesen

Korreláció a napi átlagok és óraértékek között, havi bontásban (58 állomás átlaga)



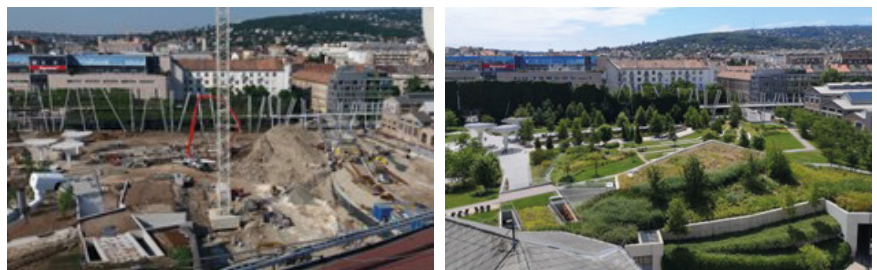
12. ábra. Korreláció a hőmérséklet napi és óraértékei között, havi bontásban, állomásátlag.

különböznek a várható értékek –, és azt is megállapítottuk, hogy a napi és óraértékek között erős, szignifikáns sztochasztikus kapcsolat van (12. ábra) (Szentimrey, 2019; Barna és mtsai, 2022).

Csapadék esetében nincs okunk markáns napi menet feltételezésére, mindemellett egy esetleges modellezéshez megfelelő mintával sem rendelkezünk. Ezért a napi összegre vonatkozó eljárást alkalmaztuk az óraérték adatsorok interpolálására. Ezt megtehetjük azért is, mert a MISH rendszerben alkalmazott alapvetően multiplikatív modell valójában egy vegyes formula, melyben kis csapadékösszeg esetén az additív tag, míg a medián értéknél nagyobb csapadékösszeg esetén tisztán a multiplikatív tag dominál (Szentimrey és Bihari, 2014).

6. Összefoglalás

Cikkünkben bemutatásra került, hogy milyen módszerekkel, mely éghajlati elemekre készülnek a HungaroMet-nél az időben és térben reprezentatív adatbázisok. Bemutattuk az elmúlt évek fejlesztéseit, melynek eredményeképpen pontosabb rácsponti adatbázist tudunk készíteni az éghajlat megismeréséhez (Barna és mtsai, 2023). Azt azonban figyelembe kell venni, hogy ezek a rácsponti adatbázisok ún. dinamikus adatsorok, hiszen minden évben megújítjuk őket. Az újonnan telepített mérőállomások adatait éppúgy



13. ábra. HungaroMet székház környezete (Széll-park) 2019.06.27-én (bal oldali ábra) és 2023.07.06-án (jobb oldali ábra).

felhasználjuk, mint az újonnan digitalizált és ellenőrzött archív adatokat. A homogenizálás során mindig a jelen időszakhoz igazítjuk a múltbeli méréseket (Izsák, 2021) és a homogenizált állomási adatsorok esetén akár 2–3 évente is jelentősebb változás léphet fel, ha a mérőműszer környezetében jelentős változás következett be. Erre jó példa a Budapest belterület állomás homogenizált maximumhőmérséklet adatsora. A környezetben 2020-ra bekövetkező igen drasztikus változással egyértelműen magyarázhatók a homogenizált maximumhőmérséklet adatsorban történt nagyobb módosulások (13. ábra).

A hatórási adatsoroknál figyelembe kell venni, hogy a rácsponti adatbázishoz kevesebb állomást tudunk figyelembe venni, mint a napi adatsorok esetén. Ugyanakkor az interpolációhoz a modellezett paraméterek ugyanazok, tehát kevesebb prediktor is elegendő az interpoláláshoz (Izsák és mtsai, 2022). Órás adatbázisok vizsgálatánál lehetnek eltérések az adatpótlásból és ellenőrzésből adódóan is, de lehetséges, hogy ugyanazon a településen működő több állomás közül – például csapadék esetén – nem ugyanannak az adatsorát használjuk fel az órás vagy a napi értékek interpolálásakor. Jó példa erre, hogy 2023-ban Kékestetőn a hagyományos és az automata csapadékmérővel mért évi csapadékoszeg különbsége 109,2 mm-nek adódott.

Köszönetnyilvánítás:

A cikkben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1 21-2022- 00014 számú projekt támogatásával valósult meg.

A Kulturális És Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3 Kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- Allaga-Zsebeházi G., Bán B. és Szépszó G., 2022: Kisokos a klímamodell-eredmények gyakorlati felhasználására. A KlimAdat projekt tájékoztató kiadványa, 28 p.
- Barna, Zs., Izsák, B., and Pieczka, I., 2023: Comparison of interpolation methods for six-hour temperature data series. 11th Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and 6th Interpolation Conference jointly organized with the 14th EUMETNET Data Management Workshop, Budapest, 2023.05. 9–11.
- Barna Zs., Izsák B., és Pieczka I., 2022: Trendvizsgálat: óráértékek hazai hőmérsékleti trendje, *Léggör* 67, 122–129. <https://doi.org/10.56474/legkor.2022.3.1>

- Izsák, B., 2023: Homogenization and interpolation of relative humidity hourly values with MASH and MISH software. *Int. J. Climatol.* 43., 6285–6299. <https://doi.org/10.1002/joc.8205>
- Izsák B., 2021: Homogenizálás a meteorológiában: Vissza a jövőbe. *Élet és Tudomány* 76, 176–178.
- Izsák B., Bihari Z., és Szentes O., 2021: Éghajlatváltozás: Homogenizált vagy nyers adatsorokat vizsgáljak? *Léggör* 66(3), 11–15.
- Izsák, B. and Szentimrey, T., 2020: To what extent does the detection of climate change in Hungary depend on the choice of statistical methods? *GEM – Int. J. Geomath.* 11, 17. <https://doi.org/10.1007/s13137-020-00154-y>
- Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R., and Szentes, O., 2022: Creation of a representative climatological database for Hungary from 1870 to 2020, *Időjárás* 126, 1–26. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.1.1>
- Szalai S. és Szentimrey T., 2001: Melegedett-e Magyarország éghajlata a XX. században? In (szerk.: Szász G.) Dr. sen. Berényi Dénes születésének centenárius jubileumi tudományos ülése DE-MTA-OMSZ, Debrecen. 203–214.
- Szentes, O., Lakatos, M., and Pongrácz, R., 2023: New homogenized precipitation database for Hungary from 1901. *Int. J. Climatol.* 43, 4457–4471. <https://doi.org/10.1002/joc.8097>
- Szentimrey T., 2011: Éghajlati adatsorok elemzése, homogenizálása. In (Szerk.: Bartholy, J., Bozó, L., Haszpra, L.) Klímaváltozás – 2011, Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. MTA és ELTE Meteorológiai Tanszék. 38–43.
- Szentimrey, T. 2017: Manual of homogenization software MASHv3.03, Hungarian Meteorological Service, p.71.
- Szentimrey T., 2019: Rácsponti adatbázis hatórási adatokra. Budapest, OMSZ belső kiadvány.
- Szentimrey, T. and Bihari, Z., 2014: Manual of interpolation software MISHv1.03, Hungarian Meteorological Service, p. 60.
- Szentimrey, T., 2023: Overview of mathematical background of homogenization, summary of method MASH and comments on benchmark validation. *Int. J. Climatol.* 43, 6314–6329. <https://doi.org/10.1002/joc.8207>
- WMO, 2018: Guide to Climatological Practices, WMO TD.No. 100. Geneva, Switzerland. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5541
- WMO, 2020: Guidelines on Homogenization. WMO-No. 1245. Geneva, Switzerland.

Letölthető adatbázisok

HuClim database: <https://odp.met.hu/climate/>



Megfigyelt éghajlatváltozás 30 éves klímanormálok és egy készülő éghajlati atlasz tükrében

Bihari Zita, Szentés Olivér

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., bihari.z@met.hu

DOI: 10.56474/légkor.2024.K.2

Az éghajlat állapotát 30 éves átlagokkal, azaz a klímanormálokkal írjuk le az ajánlások szerint. Az egymást követő 30 éves időszakok normálértékeinek elemzésével az éghajlat változásáról is átfogó képet kapunk. Tanulmányunkban a középhőmérséklet és a csapadék normálértékeit vizsgáljuk a 20. század elejétől. Az éghajlati atlaszok jellemzően a legutóbbi normál időszak adataira épülnek, ugyanakkor az újabb atlaszok már a megfigyelt éghajlatváltozás nyomán követésére is vállalkoznak, például a klímanormálok változásának elemzésével. A HungaroMet is új éghajlati atlasz elkészítésére vállalkozott, az 1991–2020-as időszak adatai alapján. Az éghajlat jelen állapota mellett az atlasz az 1901–2100 időszak megfigyelt és várható éghajlatát is be fogja mutatni mérések és klímodell eredmények felhasználásával.

Examination of observed climate change based on 30 years climate normals and in the light of a forthcoming climate atlas

The suggested way to describe the state of the climate is in terms of 30-year averages, or climate normals. By analysing the normal values over successive 30-year periods, we can also get a comprehensive picture of climate change. In our study, we examine the mean temperature and precipitation normals since the beginning of the 20th century. Climate atlases are typically based on the most recent normal period, but nowadays they attempt to follow observed climate change also, for example by analysing changes in climate normals. HungaroMet has also undertaken to produce a new climate atlas based on data for the period 1991–2020. In addition to the current state of the climate, the atlas will present the observed and projected climate for the period 1901–2100 using measurements and climate model results.

Az éghajlati normál fogalma

Annak megállapítására, hogy időjárási szempontból egy adott napot, hetet, hónapot vagy évet az átlagosnál magasabb vagy alacsonyabb értékek jellemeznék, meg

kell határozni az éghajlati átlag fogalmát. Éghajlatunk természetes változékonysága miatt fontos a hosszú távú átlagok használata. Olyan időtartamot kell választani, ami elég hosszú ahhoz, hogy az éghajlat természetes változékonyságát kisimítsa, de nem túl hosszú, hogy

az éghajlatváltozás jelét elfedje. Az átlag meghatározására a gyakorlatban a Meteorológiai Világszervezet (World Meteorological Organization – WMO) ajánlására 30 éves periódusokat használunk (WMO, 2007, 2017) és ezeket a bázisidőszakokat normál időszaknak, a hozzájuk tartozó átlagokat éghajlati normáknak (Climatological Standard Normals – CLINO) nevezzük. A normálidőszakok teljes évtizedekből állnak, 10 évenként megújítják azokat, így jelenleg az 1991–2020-as időszakot tekintjük az éghajlat jelenlegi állapotát leíró 30 évnak. Az átlagolási időszak szabványosítása azért is fontos, mert így lehetővé válik a világ minden tájáról származó megfigyelések összehasonlítása.

Az éghajlati normálok a megfigyelt éghajlatváltozás nyomán követésének egyik eszközeként is felhasználhatók, ha egymást követő 30 éves időszakok átlag- és szélsőértékeit hasonlítjuk össze egymással.

Felhasznált adatsorok és módszerek

A megfigyelt éghajlatváltozás elemzéséhez homogénizált és interpolált rácsponti napi adatsorokat használunk. A homogénizálásra azért van szükség, mert a sok évtizedes adatsorokban gyakran vannak olyan törések, amik nem az éghajlatváltozás következményei, hanem a mérési körülmények megváltozásából fakadnak. Ilyen kiváltó ok lehet pl. az állomás áttelepítése, a mérőműszer vagy a mérési időpontok megváltozása. E problémák kiküszöbölésére, az adatsorok homogénizálására a MASH homogénizációs módszert (Szentimrey, 2023) használjuk. Ezekből a homogénizált állomási adatsorokból pedig a MISH interpolációs módszerrel (Szentimrey és Bihari, 2007) állítjuk elő az egyenes térbeli felbontású rácshálózat pontjaira interpolált adatsorokat. A számításokat az alapvető éghajlati paraméterekre (maximum-, minimum- és átlaghőmérséklet, csapadék, relatív nedvesség, légnyomás, átlagos szélesebség, maximális széllelőcs, globálsugárzás) végezzük el. A leghosszabb, ilyen módon kezelt adatsoraink 1870-ben kezdődnek. Meteorológiai elemektől és az időszaktól függően

11–500 állomás adatait vizsgáljuk. Az adatsorok nagy része a Meteorológiai Adattárban elérhető [1].

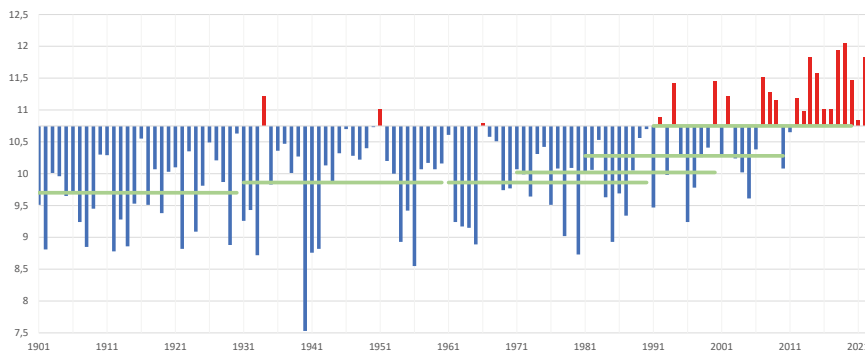
Az adatsorok előállításáról részletes leírás olvasható *Izsák és mtsai* (2024) cikkében.

Éghajlati normálok a 20. század elejétől

A megfigyelt éghajlatváltozást leggyakrabban a hőmérséklet és csapadék adatsorok elemzésével vizsgáljuk, részben azért, mert ezekre a meteorológiai elemekre vannak a leghosszabb adatsoraink, részben azért, mert az éghajlati hatásvizsgálatokban is ennek a két paraméternek van a legjelentősebb szerepe. Az adatsorokra most nem a lineáris trendet, hanem a 30 éves klímanormálokot fektettük rá. A század első kétharmadában az egymást követő időszakokat ábrázoltuk, míg 1971-től, az intenzív melegedés kezdetétől 10 évenként csúsztatott időszakokat.

Az 1. ábrán és az 1. táblázatban jól látható, hogy az 1961-gyel kezdődő 30 éves időszakig az évi középhőmérséklet változása nem jelentős, ezt követően azonban a 10 évenként csúsztatott átlagok között is nagyobb a különbség, mint az első három ábrázolt periódus értékei között. A csúsztatott időszakok közül a legnagyobb melegedés 1981–2010 és 1991–2020 között következett be (0,47 °C), az egymást követő időszakokban pedig 1961–1990 és 1991–2020 között (0,89 °C).

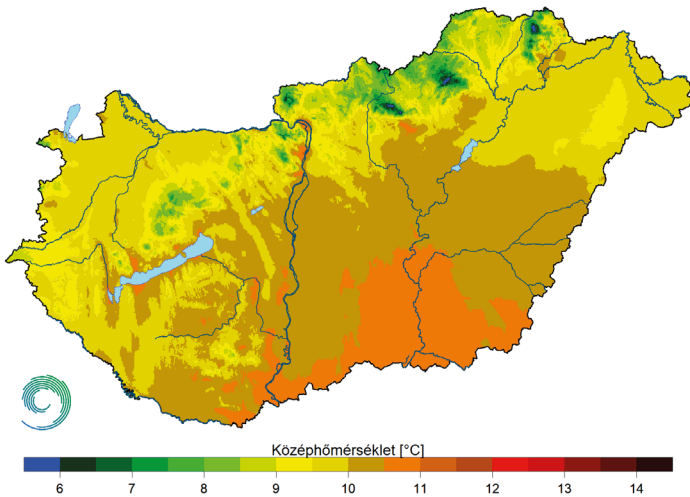
A 2. és 3. ábrákon a területi különbségeket mutatjuk be az 1961–1990 és az 1991–2020 közötti normál időszakra. A két periódusban a térbeli eloszlás hasonló képet mutat. A domborzat mellett az éves hőmérséklet



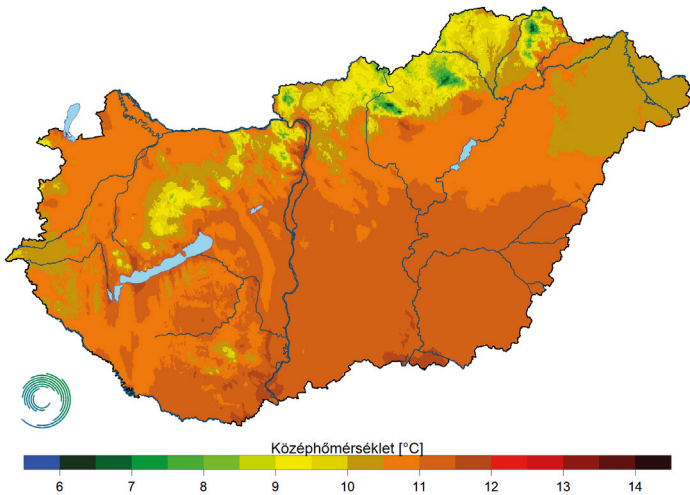
1. ábra. Az éves középhőmérséklet országos átlagai (°C) az 1991–2020-as klímanormálhoz viszonyítva. A zöld színű egyenesek a 30 éves időszakok klímanormáljait mutatják.

1901–1930	1931–1960	1961–1990	1971–2000	1981–2010	1991–2020
9,67	9,862	9,861	10,02	10,28	10,75

1. táblázat. Az éves országos középhőmérséklet normálértékei (°C) a 20. század elejétől.



2. ábra. Az éves középhőmérséklet 30 éves átlaga (1961–1990).



3. ábra. Az éves középhőmérséklet 30 éves átlaga (1991–2020).

1901-1930	1931-1960	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
620	627	593	583	600	616

2. táblázat. Az éves országos csapadékösszeg normalértékei (mm) a 20. század elejétől.

eloszlását a nagyobb hegységektől (Kárpátok, Alpok, Dinári-hegység) való távolság határozza meg alapvetően. A legalacsonyabb értékek a magasabban fekvő területeken jelennek meg, míg Szeged környéke a legmelegebb. Jelentős viszont a különbség az értékekben. Az országos átlagértékeknek megfelelően (9,86 °C, illetve 10,75 °C) nagyjából egy fokkal melegebbek az egyes országrészek is, megjelent a 11, sőt a 11,5 fok fölötti kategória is, viszont a hegységekben is eltűntek a 6 fok alatti körzetek.

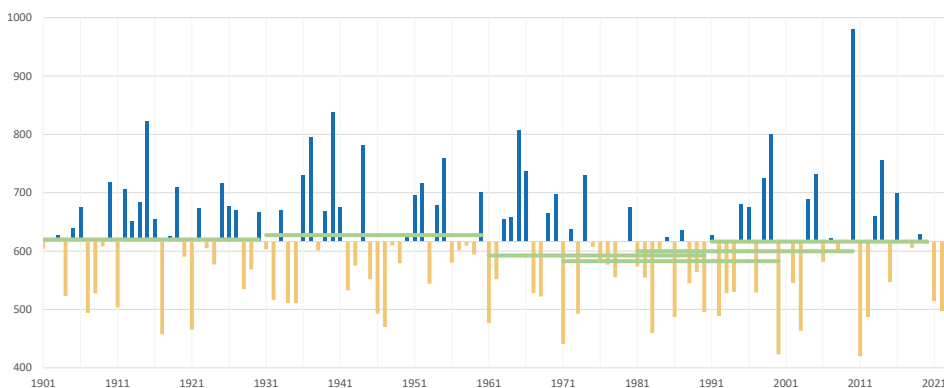
A csapadék alakulása a 20. század elejétől sokkal kevésbé egyértelmű, mint a középhőmérsékleté (4. ábra, 2. táblázat), sokkal inkább a változékonyság és nem az egyirányú változás jellemzi. Bár az 1971-től kezdődő, 10 évenként csúsztatott normalértékek egy növekvő tendenciát jeleznek, 30 éves átlagban a legcsapadékosabb periódus az 1931–1960 közötti, a legszárazabb pedig az 1971–2000 közötti.

A fentiek ellenére az 1961–1990 és az 1991–2020 közötti normálidőszakok térképeit vizsgálva a hőmérséklethez hasonló jellemzőket figyelhetünk meg, vagyis a térbeli eloszlás hasonló jellegű a két időszakban a domborzat, a nagyobb hegységektől való távolság (medence hatás) a meghatározó (5. és 6. ábra). A legcsapadékosabb az ország délnyugati része, valamint a magasabban fekvő területek, az évi csapadékösszeg DNy-ról ÉK felé csökken. A két periódus közötti különbség az értékekben mutatkozik meg, bár a lecsapadékosabb, 700 mm fölötti csapadéku területek kiterjedése nem változott jelentősen, a század végére eltűnt az 500 mm alatti terület, és nagymértékben csökkent az 500–550 mm közötti régió.

Éven belüli változások

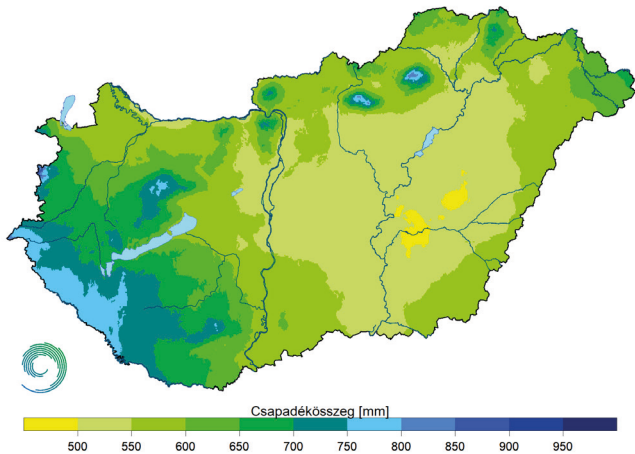
Az éves értékek változása mellett érdemes megvizsgálni a havi normalértékeket is, mert ezek alakulása nem minden esetben követi az éveseket.

Középhőmérséklet esetén az éves értékekhez hasonlóan a havi értékek is szinte minden

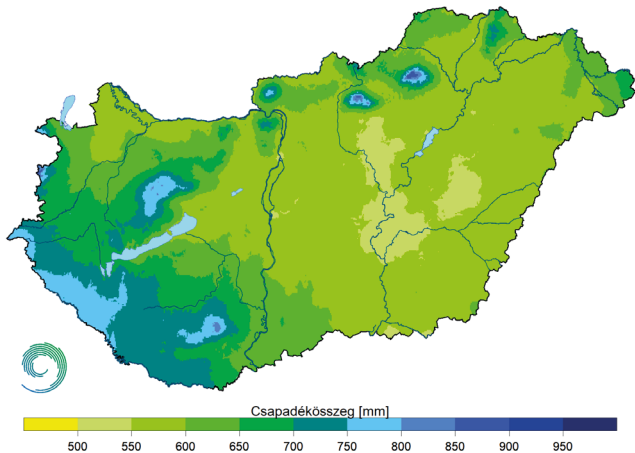


4. ábra. Az éves csapadékösszeg országos átlagai (mm) az 1991–2020-as klímanormálhoz viszonyítva. A zöld színű egyenesek a 30 éves időszakok klímanormáljait mutatják.

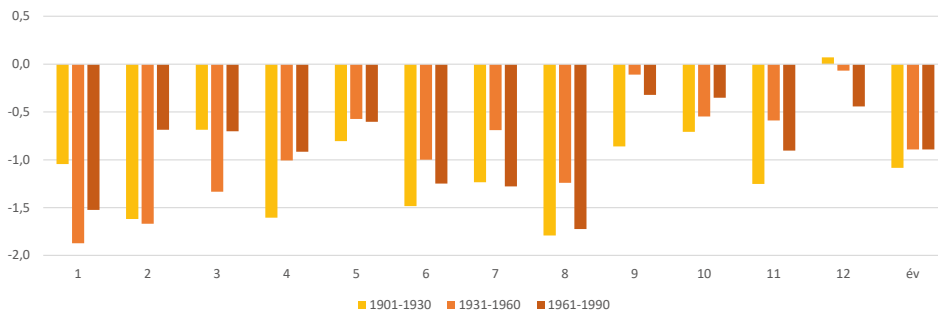
esetben alacsonyabbak az 1991–2020 normálnál (7. ábra). Mind a négy normálidőszakban január a leghidegebb, és július a legmelegebb hónap (3. táblázat), de az 1991–2020-as időszakra az augusztusi érték a korábbi időszakokénál sokkal jobban megközelíti



5. ábra. Az éves csapadékösszeg 30 éves átlaga (1961–1990).



6. ábra. Az éves csapadékösszeg 30 éves átlaga (1991–2020).



7. ábra. Havi és éves középhőmérsékletek eltérése az 1991–2020 normáltól (°C).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1901–1930	-1,6	-0,4	5,2	9,8	15,3	18,3	20,3	19,3	15,2	10,0	4,2	0,5
1931–1960	-2,4	-0,4	4,5	10,4	15,5	18,8	20,8	19,9	15,9	10,1	4,8	0,4
1961–1990	-2,1	0,5	5,1	10,5	15,5	18,5	20,2	19,4	15,7	10,3	4,5	0,0
1991–2020	-0,5	1,2	5,8	11,4	16,1	19,8	21,5	21,1	16,0	10,7	5,4	0,5

3. táblázat. Havi középhőmérsékletek (°C) különböző normál időszakokban. (A legmelegebb hónapot piros, a leghidegebbet kék színnel jelöltük.)

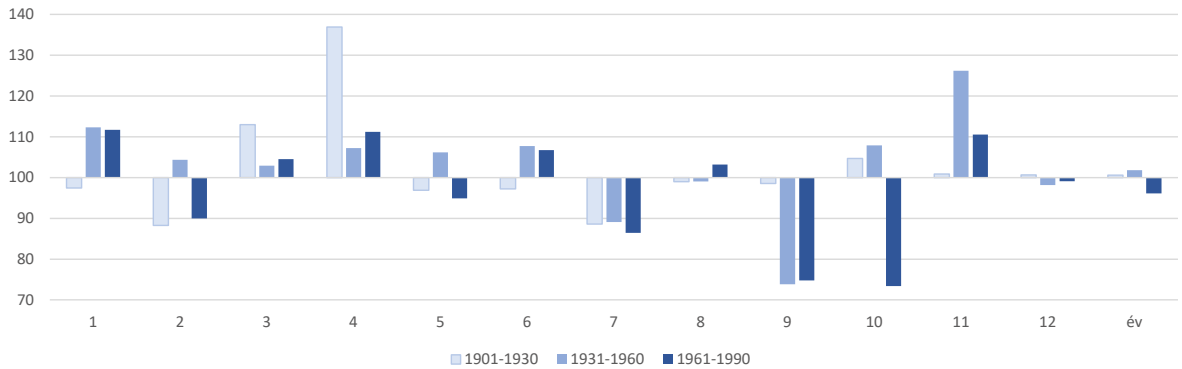
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1901–1930	32	33	39	55	62	70	64	59	58	53	49	46
1931–1960	37	39	35	43	68	77	64	59	44	55	61	45
1961–1990	37	33	36	45	61	77	62	61	44	37	54	45
1991–2020	33	37	34	40	64	72	72	60	59	51	49	46

4. táblázat. Havi csapadékösszegek (mm) különböző normál időszakokban. (A legcsapadékosabb hónapokat sötétkék színnel, a másodmaximumot világos kézzel, a legszárazabbakat pedig sárgával jelöltük.)

az előző hónapét, a különbség csupán 0,4 °C (maximumhőmérsékletek esetében pedig mindkét hónapban 28,0 °C az átlag). Azt is érdemes megfigyelni, hogy bár éves szinten az 1931–1960 és 1961–1990 időszakok középhőmérséklete megegyezik (1. táblázat), havi skálán ez nem mondható el (3. táblázat).

Csapadék esetén a helyzet már sokkal változó-konyabb. A havi értékek az 1991–2020-as normáltól

pozitív és negatív irányban is eltérnek, az eltérések aránya az évesnél sokkal nagyobb (8. ábra). A legcsapadékosabb hónap mind a négy időszakban június, de az utolsóban július is felzárkózik mellé (4. táblázat). A két középső periódusban megjelenik egy novemberi másodmaximum is, ami



8. ábra. Havi és éves csapadékösszegek az 1991–2020 normál százalékában (%).

azonban sem előtte sem utána nem alakul ki. A legszárabb hónapok pedig január és március között figyelhetők meg (ami amiatt is érdekes, mert február 3 nappal rövidebb szomszédainál).

Hőmérséklet- és csapadékindexek normálértékei

A különböző éghajlati indexek – az átlagértékek mellett – szemléletesen mutatják az éghajlat alakulását. Az alábbiakban néhány alapvető hőmérsékleti és csapadékindex normálértékeit mutatjuk be (5. táblázat), kiemelve a szomszédos időszakok közötti leg-

nagyobb változást. A fagyos és hóhullámos napok számának változása jól tükrözi a 20. század utolsó harmadában megkezdődött erőteljes melegedést. A hóhullámos napok minimuma az 1961–1990 időszakra esik, amit a nyári hónapok középhőmérsékletének alakulása is alátámaszt (3. táblázat). A csapadék indexek közül a csapadékos napok száma majdnem folyamatosan csökken, viszont a 20 mm-nél nagyobb csapadékos napok számának változása irányt vált minden időszak váltásánál. A száraz időszakok maximális hossza az 1961–1990-es években a legmagasabb, a nyári napi csapadékin-tenzitás értékek pedig folyamatosan növekednek.

	1901-1930	1931-1960	1961-1990	1991-2020
Fagyos napok ($t_{\min} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) száma	102,4	102,5	98,9	89,9
Hóhullámos napok ($t_a \geq 25 \text{ } ^\circ\text{C}$) száma	15,8	19,5	14,5	28,5
Csapadékos napok ($r \geq 1 \text{ mm}$) száma	105,2	98,7	92,5	92,9
20 mm-nél nagyobb csapadékos napok száma	3,3	4,0	3,7	4,4
Száraz időszakok ($r < 1 \text{ mm}$ egymást követő napokon) maximális hossza	25,9	25,8	29,3	27,8
Nyári napi csapadékin-tenzitás (mm/nap)	6,4	7,0	7,1	7,5

5. táblázat. Hőmérséklet és csapadék indexek normálértékei a 20. század elejétől. (A szomszédos időszakok közötti legnagyobb változást színezéssel jelöltük, a növekedést zölddel, a csökkenést sárgával.)

Szerző, cím	Feldolgozott időszakok
Kakas József (szerk.): Magyarország éghajlati atlasza, Akadémiai Kiadó, 1960	1901-1950
Pécsi Márton (szerkesztőbizottsági elnök): Magyarország Nemzeti Atlasza - National Atlas of Hungary. Kartográfiai Vállalat, Budapest. (1989)	1951-1980
Mersich Iván et al.: Magyarország éghajlati atlasza, Országos Meteorológiai Szolgálat, 2003	1961-1990
Bihari Zita (fejezet szerk.): Éghajlat In: Kocsis K. (főszerkesztő): Magyarország Nemzeti Atlasza: Természeti környezet. Magyar Tudományos Akadémia, 2018	1901-2016, 1981-2010, 2021-2050, 2071-2100
Készülő digitális éghajlati atlasz (HungaroMet, 2026)	1901-2020, 1961-1990, 1991-2020, 2041-2070, 2071-2100

6. táblázat. Önálló éghajlati atlaszok és éghajlat fejezetet tartalmazó atlaszok Magyarországon, a feldolgozott időszakokkal.

Éghajlati atlaszok

Egy ország éghajlatának jellemzői hozzátartoznak az alapvető földrajzi ismeretekhez. Éppen ezért az éghajlati térképek állandó részei a földrajzi atlaszoknak, és időnként készülnek speciális, csak éghajlati információt tartalmazó atlaszok is.

A 6. táblázatban felsoroljuk azokat a jelentősebb kiadványokat, melyek valamilyen szempontból mérföldkövet jelentettek az éghajlati tematikájú atlaszokban. Az első átfogó éghajlati atlasz Kakas József szerkesztésében jelent meg 1960-ban. A térképes megjelenítés mellett egy adattár is tartozott hozzá, amit évtizedeken keresztül használtak éghajlati elemzésekhez. Az 1989-ben megjelent nemzeti atlasz elsőként használt a Meteorológiai Világszervezet ajánlása szerinti 30 éves időszakot az éghajlat jellemzésére. Újabb önálló éghajlati atlasz már csak az ezredforduló után, 2003-ban jelent meg Mersich Iván szerkesztésében. Ebben először használtunk statisztikus klimatológiai alapokon nyugvó interpolációt a korábbi, kézzel készült izovonalak helyett. A 2018-as nemzeti atlasz újdonsága, hogy már nem csak a jelen időszakokkal, hanem a múlttal (1901-től) és a jövővel (2100-ig) is foglalkozik.

Az Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium keretében a HungaroMet egyik feladata, hogy egy új éghajlati atlaszt készítsen. Korunk technikai eszközeivel az atlasz digitális formában készül el, melyben interaktív eszközökkel lehet majd lekérdezni az éghajlati információkat: térképeket, grafikonokat és táblázatokat. A mérések alapján a jelent legjobban leíró 1991–2020-a klímanormál időszakot és az ezt megelőző 1961–1990-es 30 éves periódust mutatjuk be, a klímamodell eredmények alapján pedig a 21. század közepén és végén várható éghajlati jellemzőkkel ismerkedhetünk meg. Az idősorok 1901-től lesznek elérhetőek.

A tervek szerint az éghajlati vizsgálatokban általában használt paraméterek teljes körét bemutatjuk (hőmérséklet, csapadék, napsugárzás, szél, relatív nedvesség, légnyomás, talajnedvesség stb.). Az átlagos értékek mellett a szélsőségeket, rekordértékeket is feltüntetjük. Nem csak az alapváltozók lesznek elérhetőek, hanem a belőlük származtatott éghajlati indexek is, melyek a különböző szektorokat képviselő felhasználóknak célzottan szemléltetik az éghajlat jellemzőit. A felszíni mérőhálózat adatai mellett bizonyos esetekben figyelembe vesszük a EUMETSAT műholdak adatait is.

A közölt adatok időbeli felbontása éves, évszakos és havi szintű lesz, az idősorokat és éves meneteket bemutató grafikonok országos és megyei szinten készülnek el. Ezáltal mintegy 1500 térképet, 1000 idősort, 1200 éves menetet bemutató grafikont és 100 táblázatot fogunk előállítani.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1 21-2022-00014 számú projekt támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Bihari Z. (fejezet szerk.), 2018: Éghajlat. In: *Kocsis K.* (főszerkesztő): Magyarország Nemzeti Atlasza: Természeti környezet. Magyar Tudományos Akadémia.
- Izsák B., Szentes O., Bihari Z., Bokros K., és Lakatos M., 2024: Reprezentatív meteorológiai adatok biztosítása a múlt és a jelen éghajlatának megismerésére, *Légekör különszám*, től-ig. DOI
- Kakas J. (szerk.), 1960: Magyarország éghajlati atlasza, Akadémiai Kiadó.
- Pécsi M. (szerkesztőbizottsági elnök) 1989: Magyarország Nemzeti Atlasza – National Atlas of Hungary. Kartográfiai Vállalat, Budapest.
- Mersich I. et al. 2003: Magyarország éghajlati atlasza. Országos Meteorológiai Szolgálat, 2003.
- Szentimrey, T., 2023: Overview of mathematical background of homogenization, summary of method MASH and comments on benchmark validation. *Int. J. Climatol.* 43, 6314–6329. <https://doi.org/10.1002/joc.8207>
- Szentimrey, T. and Bihari, Z., 2007: Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 17–27.
- WMO, 2007: WCDMP-No. 61 The role of climatological normals in a changing climate WMO/TD-No. 1377, Geneva.
- WMO, 2017: Guidelines on the Calculation of Climate Normals, WMO-No. 1203.

Internetes hivatkozások

- [1] [https:// odp.met.hu](https://odp.met.hu)



Összetett extrém események vizsgálata – szeles és csapadékos időjárás Magyarországon

Bordi Sára, Szabó Péter, Pongrácz Rita

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék, bordi.s@met.hu

DOI: 10.56474/légkor.2024.K.3

Az éghajlatváltozás és annak hatásai kapcsán egyre több figyelem fordul az ún. összetett események felé. Ezek közé tartozik, amikor több éghajlati változó egyidejű szélsőségessége miatt a kisebb egyedi hatások helyett erőteljesebb környezeti következményekkel kell számolnunk. Cikkünk a magyarországi szeles és egyben csapadékos események elemzésére fókuszál, mely különösen nagy kihívást jelent mind a szél, mind a csapadék nagy térbeli és időbeli változékonysága miatt. Az eredmények azt mutatják, hogy télen inkább a mérsékeltövi ciklonok hidegfrontjaihoz, illetve erős szélviharokhoz kapcsolódnak az összetett szeles és csapadékos események, nyáron viszont jellemzően a zivatarok velejárójaként jelentkeznek. A leggyakrabban a Balaton és a Bakony térségében fordul elő, s a várható változások is ebben a régióban a legjelentősebbek.

Analysis of compound events – extreme wind and precipitation in Hungary

Compound events receive increasing attention in the context of global climate change and its potential consequences. A special type of compound events is when more severe environmental impacts occur due to concurrent extremes of several climate variables than in the cases of separate extremes of these variables. This paper focuses on the compound events occurred in Hungary when wind and precipitation are both extreme, the analysis is especially challenging because of the high spatial and temporal variability of these climate variables. The results show that compound events with strong wind and extreme precipitation tend to be associated with the cold fronts of mid-latitude cyclones and strong windstorms in winter, while they are typically associated with thunderstorms in summer. Overall, these compound events occur most frequently in the area of Lake Balaton and the Bakony hills, and the greatest changes are also projected in this region.

Az extrém időjárási események önmagukban is nagy mértékben veszélyeztethetik a társadalmat és a környezetet károsító hatásukkal, emiatt fokozott figyelmet érdemelnek. A legtöbb kár kialakításáért felelős szélsőséges időjárási helyzetek azonban gyakran nem

egyetlen éghajlati elem extrém viselkedésének következtében jönnek létre, hanem több, egyidejűleg előforduló különböző esemény együtteseként állnak elő. *Zscheischler et al. (2018)* az ilyen típusú szélsőséges időjárási helyzeteket összetett klimatológiai eseményként

definiálta, amely magába foglal minden olyan időjárási eseményt, aminek kialakulásában több befolyásoló tényező is szerepet játszik, és kockázatot jelent a társadalomra vagy a környezetre nézve. Ha egy ilyen eseményt alkotó extrémumok valamelyike csak önmagában fordulna elő, az közel sem okozna akkora kárt, mint abban az esetben, amikor társul hozzá még egy, vagy akár több szélsőséges időjárási esemény is. Ilyenkor a résztvevő hatások egymást erősítve összeadódnak.

Ezeknek az eseményeknek négy típusát különböztethetjük meg (*Zscheischler et al., 2020*):

- **többváltozós:** több tényező egy időben és ugyanazon az földrajzi területen egyszerre fejt ki hatását (például part menti térségekben ciklonokhoz kapcsolódóan az extrém szél és csapadék által keltett vihardagály);
- **előfeltételes:** egy esemény olyan módon befolyásolja az időjárási viszonyokat, hogy a környezet még inkább sebezhetővé válik egy másik eseménnyel szemben (például hosszas aszályos időszak után következő hóhullámban jelentősen nő az erdőtüzek kialakulásának esélye);
- **időben összetett:** adott földrajzi térségben, tágabb időintervallumon belül több azonos vagy különböző extrém jelenség követi egymást (például több egymást követő zivatar áradást okoz);
- **térben összetett:** egy adott időintervallumon belül, de egymástól viszonylag távol lévő térségekben jelentkező extrém események (például az El Niño hatására kialakuló extrém szárazság egyes régiókban, míg a Föld más területein extrém mennyiségű csapadék).

A hazánkban is gyakran előforduló extrém szél és extrém csapadék által kialakított összetett extrém esemény a fentiek közül a többváltozós típusba tartozik. Ez a fajta esemény a Föld különböző pontjain különböző módon jelentkezik, és más-más jellegű kockázatos hatással bír. A trópusi térségekben jellemzően trópusi ciklonokhoz kapcsolódik előfordulásuk – itt leginkább a partmenti térségekre jelentenek veszélyt, főként az általuk létrehozott vihardagály miatt (pl.: *van den Hurk et al., 2015*). A mérsékelt övben, Európában szintén alacsony nyomású központokhoz, főként mediterrán- és viharciklonokhoz kapcsolódóan találkozhatunk leggyakrabban ilyen jellegű összetett extrém eseményekkel. Itt szintén veszélyeztetettek a partmenti térségek, ugyanakkor az erős szél által megrongált környezetben az extrém mennyiségű csapadék óriási károkat tud okozni a kontinensek belső területein is (*Dowdy and Catto, 2017, 2021*). Azokon a területeken, amelyek különösen kitettek a heves zivatarcelláknak, zivatar-

láncoknak, rendkívül veszélyes ezek kifutószelének és nagy mennyiségű csapadékának együttes hatása. Mind a zivatarok, mind a ciklonok által keltett összetett események veszélyeztetik hazánkat is. Különösen erős még a szupercellákban kialakuló tornádók hatása, melyek a leggyakrabban az USA területén a tornádók völgyében (azaz a Mississippi és fő mellékfolyóinak térségében) alakulnak ki. A sok csapadékkal járó szupercellák esetén ugyanis előfordulhat, hogy a tornádót elfedi a csapadékfüggöny, így a veszélyes jelenség nem csak műszerekkel, hanem szabad szemmel is nehezebben detektálható, ami miatt lényegesen lerövidül a felkészülési, fedezékbe vonulási idő (*Bluestein, 2013*).

Felhasznált adatok és módszerek a széles-csapadékös extrém események Magyarországi vizsgálatához

Mivel a széles-csapadékös összetett extrém események Magyarországon eddig is kockázatot jelentettek, felmerül a kérdés, hogy a klímaváltozás hatására hogyan változik az ilyen típusú események előfordulási gyakorisága, növekszik-e a térségünk veszélyeztetettsége ebből a szempontból. Erre választ keresve vizsgálatot végeztünk kifejezetten a szél és csapadék által keltett összetett események múlt- és jövőbeli előfordulásának kapcsán, Magyarországra vonatkozóan. A múltra (2001–2020) vonatkozó elemzéshez felhasználtunk szinoptikus kódok formájában tárolt állomási mérési adatsorokat (20 magyarországi állomásról), és a HungaroMet (korábban: Országos Meteorológiai Szolgálat) által létrehozott HuClim [1] homogenizált és interpolált rácsponti adatbázist (*Izsák et al., 2022*). Vizsgáltuk a napi maximális széllelkést és a napi csapadékmennyiséget, annak érdekében, hogy meghatározzuk, hogy a múltban milyen gyakran fordultak elő olyan napok, amikor az adott mérőállomáson/rácspontban a széllelkés elérte a Beaufort-skála szerinti viharos erősséget (17 m/s), vagy a napi csapadékmennyiség meghaladta a 10 mm-t. Ezután pedig azt határoztuk meg, hogy milyen gyakran fordult elő ugyanazon a napon mind szélviharos, mind csapadékös esemény.

A klímaváltozás hatásának vizsgálatához olyan, a Euro-CORDEX [2] keretén belül készített klímamodell-szimulációkat használtunk fel, amelyek tartalmaznak napi maximális széllelkés adatokat az optimistább RCP4.5 és a pesszimista RCP8.5 forgatókönyvvel számolva is. Összesen hat ilyen modellszimuláció állt rendelkezésünkre (*1. táblázat*). A szimulációk esetében ugyancsak az összetett extrém eseményes napokat (17 m/s-nál erősebb széllelkés és 10 mm feletti

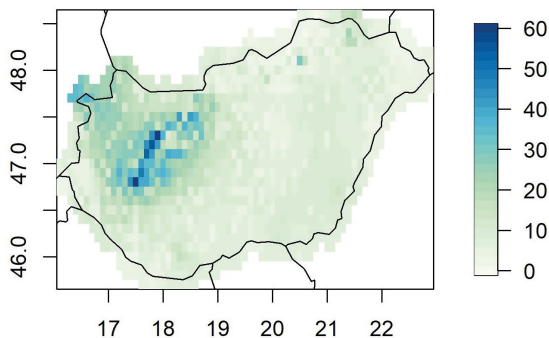
csapadék együtt) vizsgáltuk rácsponthonként az évszázad végéig. A modellszimulációkat a HuClim adatbázis segítségével a 2001–2020 időszakra validáltuk, majd hibakorrigáltuk a projekciók kiértékelésének megkezdése előtt. A módszertani részletek *Bordi (2023)* diplomamunkájában olvashatók.

Meghajtó globális modell – Regionális modell I	CNRM-CM5	EC-EARTH	NorESM1-M	IPSL-CM5A-MR
RCA4	X	X	X	X
RACMO22E	X	X		

1. táblázat. Az elemzéshez felhasznált modellszimulációk.

Múlta vonatkozó eredmények

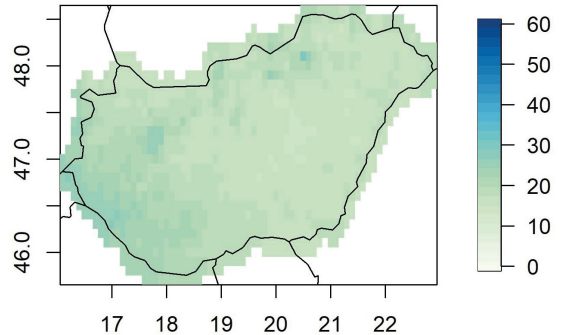
Az elmúlt húsz éves időszak alapján Magyarországon a szélviharos napok éves száma nagy mértékben függ attól, hogy az ország mely területét vizsgáljuk (1. ábra). Míg az Alföldön viszonylag kevés szélviharos esemény volt jellemző – évente kevesebb, mint 10 nap, egyes részein (pl. Szabolcs-Szatmár-Bereg vármegyében) számuk az 5 napot sem haladta meg –, a Dunántúlon lényegesen több alkalommal jelentkeztek. A Kisalföldön évente átlagosan 20–40 szélviharos nap fordult elő, a leginkább kitett területnek pedig a Balaton és Bakony térsége bizonyult, ahol az ilyen napok átlagos száma néhol elérte az évi 60-at. A területi eloszlást nagy mértékben meghatározza a domborzat, a magasabban fekvő rácspontokban (Kékestető, Bakony) az előfordulási számok szembetűnően nagyobbak voltak, mint az alacsonyabban fekvő közvetlen környezetükben.



1. ábra. Szélviharos napok (napi maximális szélsebesség > 17 m/s) éves átlagos száma Magyarország területén a HuClim adatbázis alapján, 2001–2020.

Ugyanerre az időszakra vonatkozóan megvizsgáltuk az extrém csapadékos napok számát is. Bár itt nem olyan szembetűnő a kontraszt az ország különböző területei között, mint a szél esetén, a Dunántúlon az extrém csapadék is (a szélhez hasonlóan) több alkalommal fordult elő, mint az ország keleti felében (2. ábra).

A legtöbb alkalommal a Dunántúl délnyugati részén voltak jellemzők a nagy mennyiségű csapadékkal járó események, és szintén jelentős számban, évente több mint 25 alkalommal fordultak elő a Bakony térségében, illetve az Északi-középhegységben is. Az Alföld keleti részén, ahol az extrém csapadék kevésbé volt jellemző, az ilyen napok éves átlagos száma 10–15 volt.



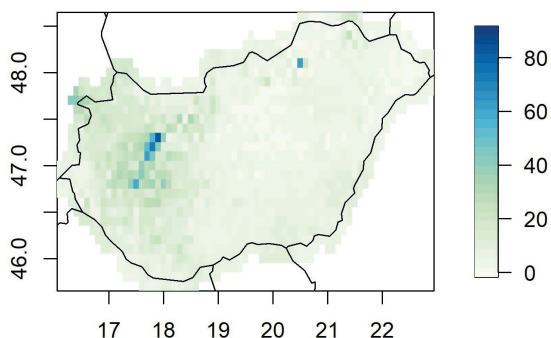
2. ábra. Extrém csapadékos napok (napi csapadékmennyiség > 10 mm) éves átlagos száma Magyarország területén a HuClim adatbázis alapján, 2001–2020.

Ha a két esemény gyakoriságait összehasonlítjuk, akkor egyértelműen kijelenthetjük, hogy összességében évente átlagosan több napon fordult elő extrém szél, mint extrém csapadék (ami részben abból adódik, hogy a két változó eltérő eloszlással írható le, és a vizsgált küszöbértéket meghaladó esetek előfordulási gyakorisága is más). Ez persze az ország különböző térségeit külön-külön tekintve már nem mindenhol igaz, ugyanis az Alföldön, az Északi-Középhegységben és a Dunántúl délnyugati részén is inkább az extrém csapadékos események előfordulása volt jellemző. Az extrém szél csak a viharos helyzeteknek legkitettebb térségekben fordult elő gyakrabban: a Balaton és a Bakony környékén, illetve a Kisalföldön, ahol az ilyen esetek évi átlagos száma egyes rácspontokban az extrém csapadékos események számának a kétszeresét is meghaladta.

A szinoptikus táviratok formájában tárolt mérőállomási adatok alapján Kékestető, Siófok, Veszprém-Szentkirályszabadja és Sopron állomásokon fordult elő a legtöbb legalább viharos kategóriát elérő szél-lökés. Az adatok alapján kiszűrt leghevesebb szélviharos eseményekhez (ahol a maximális szélsebesség meghaladta az orkán erősséget megközelítő 30 m/s-ot is) a legtöbb esetben extrém csapadék is társult (*Bordi, 2021*).

Az olyan extrém események összes számát, amelyek során az adott napon mind a csapadék, mind a szél-lökés extrém erősségű volt (tehát a 10 mm-t meghaladó napi csapadékmennyiség és a 17 m/s-ot meghaladó napi maximális szélsebesség együttesen fordult elő, így összetett

extrém eseményt kialakítva) a 3. ábra szemlélteti. A közölt térképen ezen szélsőséges eseményeknek a vizsgált teljes húsz éves időszakra összegzett előfordulási száma szerepel. A Dunántúl nagy részén 10–20 ilyen eset volt, az Alföldön ezzel szemben jóval kevesebbszer, jellemzően csupán 1–10 napon fordult elő együttesen mindkét esemény. Ugyanakkor a Balaton és a Bakony környékén, ahol a két tényező előfordulási gyakorisága külön-külön is a legnagyobb volt, lényegesen nagyobb számban fordultak elő összetett események is, egyes rácsponthoz számuk a 60-at is meghaladta (ami évi átlagban 3 napot ad ki).



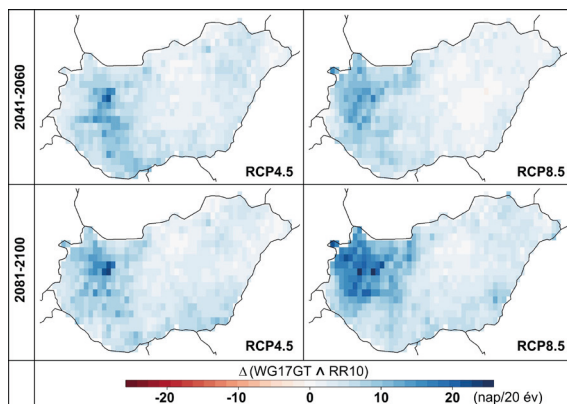
3. ábra. Összetett extrém szeles-csapadékos napok (napi maximális szélsebesség > 17 m/s és napi csapadékmennyiség > 10 mm) száma a vizsgált 20 év alatt Magyarország területén a HuClim adatbázis alapján, 2001–2020.

Jövőre vonatkozó eredmények

A globális klímaváltozás hatására a térségünkre jellemző időjárási helyzetek is változhatnak a jövőben. Az extrém időjárási eseményekkel kapcsolatban az általános prognózis a jövőre vonatkozóan az, hogy előfordulási számuk összességében csökkenni fog, ugyanakkor ezek gyakrabban lesznek hevesebb intenzitásúak (IPCC, 2021). Általánosságban véve gyakrabban alakulhatnak ki összetett extrém események, és akár olyan változók között is felléphet kapcsolat összetett eseményt kialakítva, amire eddig még nem volt példa (Zscheischler et al., 2018).

Magyarországra vonatkozóan hat modellszimuláció felhasználásával vizsgáltuk, hogy a klímaváltozásnak milyen hatása várható az összetett szeles-csapadékos eseményekre. A 4. ábra segítségével átfogó képet kaphatunk arról, hogy a hat hibakorrigált modellszimuláció modellátlaga alapján mire számíthatunk két különböző scenárió (RCP4.5 és RCP8.5) esetén, két jövőbeli húszéves időszakra vonatkozóan.

Mindkét forgatókönyv esetén az ország szinte teljes területén növekedés várható az összetett extrém szeles-csapadékos napok számában, a legnagyobb

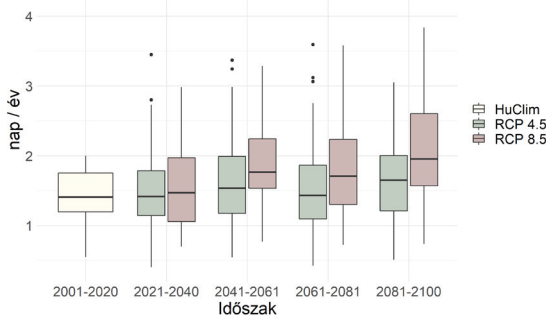


4. ábra. Összetett extrém szeles-csapadékos események előfordulási számának változása a 2041–2060 és a 2081–2100 időszakokra hat modellszimuláció átlaga alapján az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyv figyelembevételével, referencia időszak: 2001–2020.

mértékben a Dunántúlon, azon belül is a Balaton és a Bakony térségében. Az optimistább RCP4.5 forgatókönyv szerint a század közepére ebben a térségben 20 év alatt több mint 20 nappal több extrém esemény fog előfordulni, mint amennyi a múltbeli referencia időszakban fordult elő. A század végére a Kisalföld egy kisebb területén számuk ugyan még tovább fog nőni, összességében azonban nem várható további jelentősebb változás. Az RCP8.5 forgatókönyv szerint az előfordulási szám növekedése később kezdődik majd, mint az optimistább forgatókönyv esetén (itt ugyanis a század közepén még nem jelennek meg a 20 napot elérő változási értékek), viszont folytatódik egészen a század végéig. A 2081–2100-as időszakban a pesszimistább forgatókönyvet követve akár 25 napos növekedésre is számíthatunk egyes rácsponthoz a Balaton és a Bakony térségében, és az optimistább forgatókönyvhöz képest nagyobb területen valószínűsíthető, hogy az extrém szeles-csapadékos események száma kb. 20 nappal fog nőni az elmúlt húszéves időszakhoz képest.

Tehát a modellszimulációk együttese alapján a Bakony a térségére (é.sz. 46°36'–47°24', k.h. 17°00'–18°00') vonatkozó területi átlagban várható a legnagyobb növekedés az extrém szeles-csapadékos napok éves számában. Az 5. ábra dobozdiagramok formájában szemlélteti a kijelölt 20 éves időszakokra vonatkozóan az összetett extrém esemény évenkénti átlagos előfordulási számát, figyelembe véve az összes modellszimuláció előrejelzését. A medián értékek egyik forgatókönyv esetén sem mutatnak nagy változást a referencia időszakhoz képest a század végéig (a pesszimistább forgatókönyv esetén sem éri el az egy teljes napot évente), a maximális értékekben azonban már lényegesen szembetűnőbb

a különbség az időszakok között. Az RCP4.5 forgatókönyv esetén, míg a 2001–2020 as időszakban maximálisan 2 volt az összetett extrém szeles-csapadékos napok évi átlagos száma, addig a század végére ez várhatóan egy nappal növekedni fog. Ez az éves előfordulási gyakoriság növekedés arányaiban tekintve 30%-ot jelent. Az RCP8.5 forgatókönyv szerint a maximális értékek a század során folyamatosan növekedni fognak, a század végére elérik a csaknem 2 nap/év mértékű változást, ami a referencia időszakban jellemző 2 naphoz képest mintegy 90% os növekedést jelent. Míg néhány magasabb esetszám az optimistább forgatókönyv esetén pontokkal jelölt kiugró értéként jelenik meg a grafikonon, a peszsimistább forgatókönyv esetén nem jellemzőek a kiugró értékek. Ugyanakkor a magasabb maximumok arra utalnak, hogy habár az optimistább forgatókönyv teljesülése esetén is számíthatunk olyan egyedi évekre, amikor a szeles-csapadékos összetett események száma lényegesen magasabb lesz, mint a múltban volt, viszont a peszsimistább forgatókönyv teljesülésével alapvetően gyakrabban számíthatunk hasonlóan magas esetszámú évekre.



5. ábra. Az összetett extrém szeles-csapadékos napok éves előfordulási gyakoriságának dobozdiagramja, 20 éves időszakokra vonatkozóan a 6 vizsgált modellszimuláció becslése az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek esetén, valamint a HuClim referencia adatbázis alapján a Bakony térségében. A dobozok az alsó és felső kvartilis között vannak felrajzolva, a középső vízszintes vonal a mediánt jelöli, a függőleges vonalak a szélsőértékek között jelennek meg, végül azon kívül pöttyök jelzik a kiugró értékeket.

Köszönetnyilvánítás

Kutatásainkat a G-2108-62486, G-2208-64555 és G-2309-66801 ECF-projekt, a K-129162 NKFI projekt, valamint az RRF-2.3.1-21-2022-00014 Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium támogatta.

Irodalomjegyzék

Bluestein, H.B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-05381-8>

Bordi, S., 2021: Szélllel kapcsolatos összetett extrém események elemzése. BSc szakdolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.

Bordi, S., 2023: Extrém szélllel kapcsolatos összetett események várható jövőbeli alakulása Magyarországon. MSc diplomamunka. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.

Catto, J.L., and Dowdy, A., 2021: Understanding compound hazards from a weather system perspective. *Weather Climate Extr.* 32, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100313>

Dowdy, A.J., and Catto, J.L., 2017: Extreme weather caused by concurrent cyclone, front and thunderstorm occurrences. *Scientific Rep.* 7, 40359. <https://doi.org/10.1038/srep40359>

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R., and Szentes, O., 2022: Creation of a representative climatological database for Hungary from 1870 to 2020. *Időjárás* 126, 1–26. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.1.1>

van den Hurk, B., van Meijgaard, E., de Valk, P., van Heerlingen, K.-J., and Gooijer, J., 2015: Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environ. Res.Lett.* 10, 035001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/035001>

Zscheischler, J., Westra, S., van den Hurk, B.J.J.M., Senewiratne, S.I., Ward, P.J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D.N., Leonard, M., Wahl, T., and Zhang, X., 2018: Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8, 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R.M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M.D., Maraun, D., Ramos, A.M., Ridder, N.N., Thiery, W., and Vignotto, E., 2020: A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 333–347. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>

Internetes hivatkozások

[1] https://odp.met.hu/climate/homogenized_data/gridded_data_series/

[2] <https://www.euro-cordex.net/>



Az éghajlatváltozás hatásainak komplex vizsgálatát támogató információs rendszer fejlesztése

Szépszó Gabriella, Allaga-Zsebeházi Gabriella, Bordi Sára, Megyeri-Korotaj Otília, Schuchné Bán Beatrix, Zempléni Zsuzsanna

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., szépszo.g@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.K.4

A magyar meteorológiai szolgálat több forrásra támaszkodik a következő évtizedekben várható éghajlatváltozással kapcsolatos információ-igény kielégítésére. Az elmúlt években megújult az intézmény ALADIN-Climate és REMO regionális modelleken alapuló 10 km-es felbontású klímaprojekció-együttese, továbbá a EURO-CORDEX adatbázisból kiválasztott regionális szimulációs eredmények feldolgozása is bővül. Megkezdődött a lokális jelenségek vizsgálata nem-hidrosztatikus klímamodellekkel, s folytatódott a klímaváltozás városi hatásainak feltérképezése az 1 km-es felbontású SURFEX felszíni modellel. A hazai mérési és szimulációs adatok alapján elkészült a KLIMADAT adatbázis, ami Magyarországra 10 km-es, Budapestre 1 km-es felbontással tartalmaz éghajlati információkat 2100-ig. A meteorológiai szolgálat éghajlati szolgáltatásokkal kapcsolatos stratégiájának részeként az adatbázis adatokat és információt nyújt a klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás számára, s a folyamatosan köré épülő keretrendszerben fontos eleme a témával kapcsolatos tájékoztatásnak is.

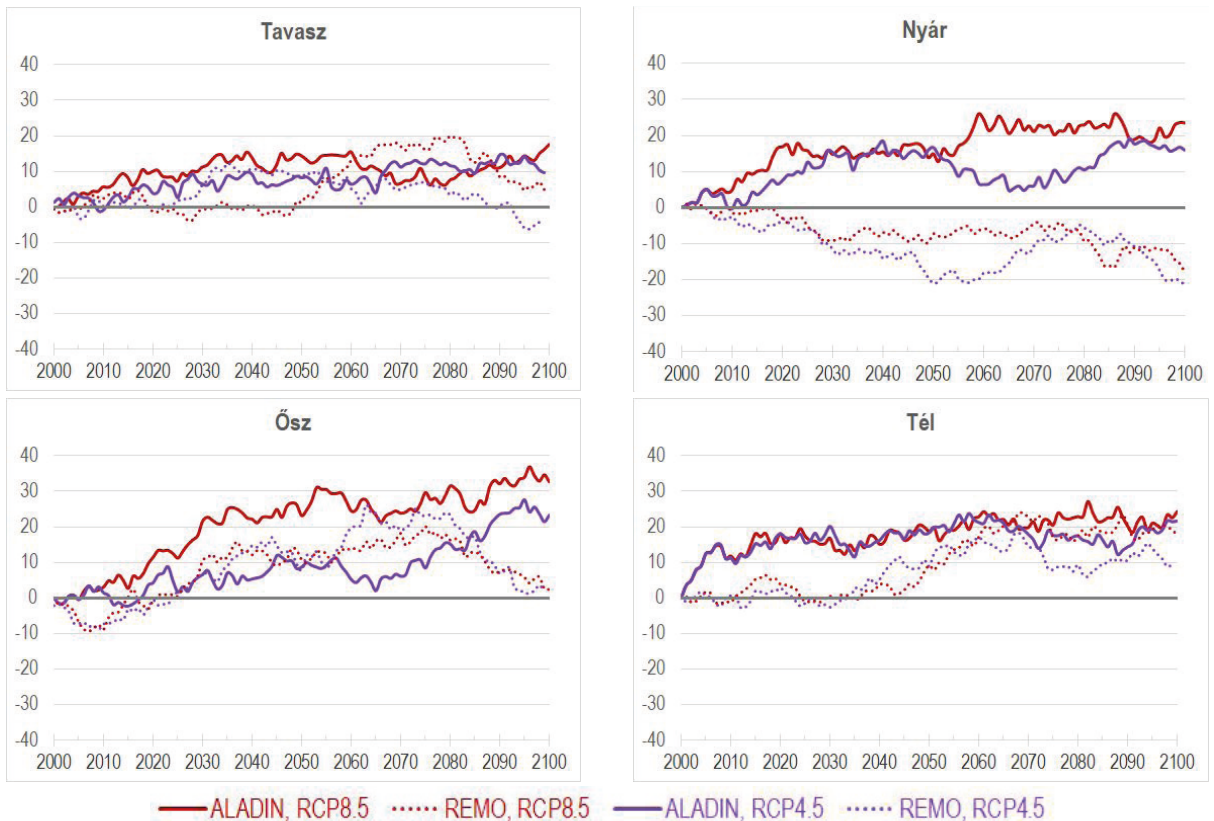
Development of an information system supporting the complex examination of the effects of climate change

The Hungarian meteorological service satisfies the information need on future climate change from multiple sources. The 10 km resolution climate projections based on the in-house simulations of the ALADIN-Climate and REMO regional climate models (RCM) as well as the EURO-CORDEX RCM results have been updated in the last few years. Local climate phenomena have been studied using non-hydrostatic climate models, while urban climate impacts have been explored with the SURFEX surface model at 1 km resolution. The KLIMADAT database is established based on measurement and simulation data over Hungary and it provides climate information covering the country with 10 km resolution until 2100 with a more detailed focus on Budapest at 1 km resolution. In the framework of climate service strategy of the meteorological service, the database supports climate adaptation and related communication.

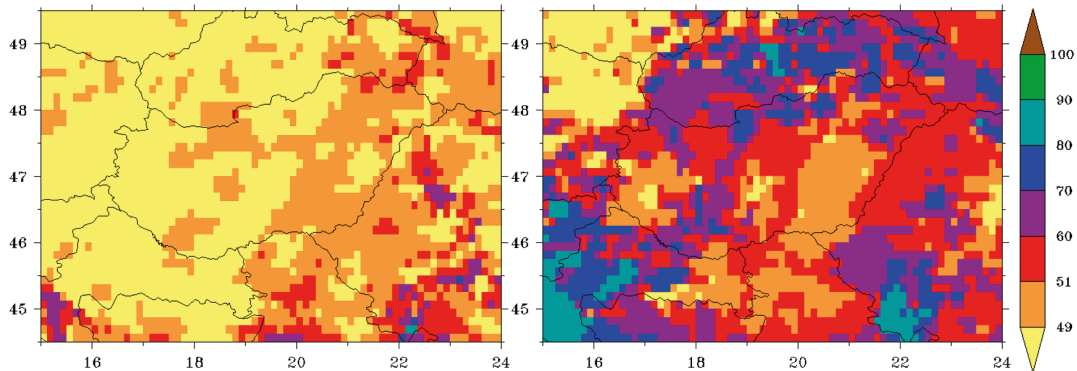
Az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás információt igényel a változások meteorológiai vonatkozásairól. Az elmúlt évtizedekben tapasztalt tendenciákat a mérési adatsorok, a jövőben várható változásokat pedig a modellezés eszközeivel tanulmányozhatjuk. Az éghajlati rendszer kormányzó folyamatait leíró matematikai egyenletrendszer közelítő megoldására a tartományt egy háromdimenziós ráccsal fedjük le, s ennek rácspontjaiban írjuk le a meteorológiai állapotváltozások időbeli megváltozását, a ráctávolságnál kisebb skálájú folyamatok hatását ún. parametrizációk alkalmazásával figyelembe véve. A fizikai és az antropogén folyamatok közelítő leírásából eredő bizonytalanságokat több modellkísérlet eredményeinek együttes vizsgálatával jelenítjük meg. A modellszimulációk térbeli és időbeli felbontása, a bennük reprezentált folyamatok nagyban meghatározzák, hogy az eredményeiket milyen célokra lehet alkalmazni. A cikkben bemutatjuk a magyar meteorológiai szolgálatnál a Kárpát-medencében várható éghajlatváltozás vizsgálatára használt különböző modelleket, betekintést nyújtunk az eredményekbe, azok felhasználásába, valamint a folyamatban lévő fejlesztésekbe.

Regionális modellszimulációk

A jövőben várható éghajlatváltozás részleteinek feltárására regionális éghajlati modelleket használunk, amelyek segítségével egy kiválasztott területre 10–50 km-es rácsfelbontás alkalmazásával pontosíthatjuk a globális klímamodellekből származó nagyskálájú információkat. A magyarországi változások vizsgálatára a meteorológiai szolgálatnál két regionális modellel készítünk szimulációkat: az időjárás-előrejelzésben is használt, nemzetközi együttműködésben fejlesztett ALADIN modell klímaváltoztatával (Bán et al., 2021), illetve a hamburgi Max Planck Intézetben kifejlesztett REMO modellel (Szépszó, 2014). Az elmúlt években 4 projekciós kísérletet hajtottunk végre a modellekkel egy Közép- és Kelet-Európát 10 km-es felbontással lefedő tartományon. A tartományon kívül zajló folyamatok leírását a CNRM-CM5 és az MPI-ESM-LR Föld-rendszer modellek ALADIN-Climate-tel illetve REMO-val 50 km-es felbontással leskálázott eredményei adták, egy-egy közepes és magas antropogén üvegházgáz kibocsátást feltételező (RCP4.5 és RCP8.5; Moss et al., 2010) forgatókönyv alkalmazásával.



1. ábra. A magyarországi átlagos évszakos csapadékösszeg változása (%) az 1971–2000 időszak átlagához képest nagy modellszimuláció 30-éves mozgóátlaga alapján.



2. ábra. Az 1971–2000 időszak átlagához viszonyítva 2071–2100-ra várható nyári csapadékcsökkenés valószínűsége (%) 12 modellszimuláció alapján az RCP4.5 (bal) és RCP8.5 (jobb) forgatókönyvek alkalmazásával.

Az eredmények (Megyeri-Korotaj et al., 2022) alapján Magyarországon 2071–2100-ra országos átlagban 1,6 és 4 °C közötti éves átlaghőmérséklet emelkedésre számíthatunk az 1971–2000 időszak átlagához képest. A legnagyobb változások nyárra és télre várhatók, s az évszázad második felében egyértelműen megmutatkozik a különböző forgatókönyvek hatása: minden évszakban a nagyobb növekedést az RCP8.5 forgatókönyvvel készített kísérletek adják. A néhány fokal hőmérséklet-emelkedés jelentős változásokat eredményezhet a ritkán előforduló, szélsőséges események gyakoriságában. A hóhullámos napok száma például az évszázad végére 6–27 nappal megemelkedhet, miközben a 0 °C alatti minimumhőmérsékletű, fagyos napok előfordulása egyes tájakon akár 90%-kal is csökkenhet.

A projekciók a nyár kivételével minden évszakban a magyarországi csapadék növekedését valószínűsítik, s ezt tavasszal és ősszel a 10 mm-t meghaladó csapadékösszegű napok gyakoribbá és a száraz időszakok hosszabbá válása kíséri. Nyárra két modellszimuláció a csapadékösszeg országos átlagában mintegy 20%-os növekedést, kettő pedig hasonló mértékű csökkenést vetít előre az évszázad végére (1. ábra). A forgatókönyv megválasztásának a magyarországi csapadék esetében nem mutatkozik hatása a változás irányára, a projekciók bizonytalansága a csapadékképződéssel kapcsolatos folyamatok eltérő leírásából ered.

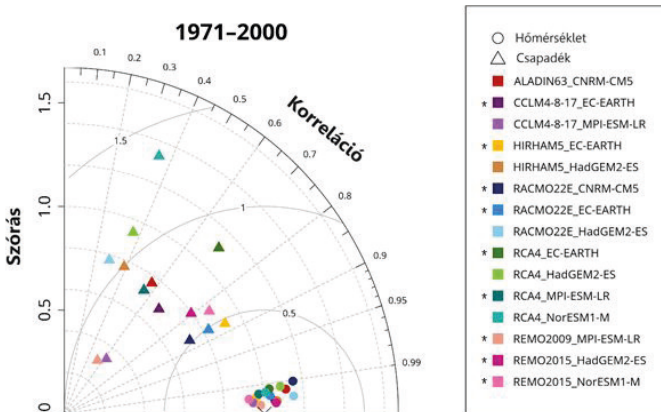
Európai klímamodell eredmények vizsgálata

A 4-tagú szimuláció-együttes alapfokú információt ad a projekciók forgatókönyv- és modellválasztásból eredő bizonytalanságáról. Ugyanakkor, ahogyan az 1. ábra is illusztrálja, nem elegendő ahhoz, hogy kizárólagos alkalmazásával teljeskörűen feltérképezzük például a klímaváltozás hazai csapadékviszonyokra

gyakorolt hatását. Ezért a saját szimulációink mellett figyelembe vesszük az európai éghajlatkutató intézetek regionális klímamodell eredményeit is. Ehhez jó alapot szolgáltat a World Climate Research Programme által 2009-ben kezdeményezett CORDEX együttműködés Európára koncentráló ága. A EURO-CORDEX együttműködésben (Jacob et al., 2013) 10–50 km-es felbontással készülnek szimulációk a kontinensre az RCP antropogén forgatókönyvek felhasználásával.

Az elmúlt években 24 projekciót választottunk ki, melyek a globális és regionális modellek 12 kombinációjával készültek az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek alkalmazásával. Ezek az eredmények árnyalják vagy kiegészítik a hazai eredményeket: például ahogyan azt a 2. ábra mutatja, Magyarország nyugati tájain az évszázad végére a nyári csapadék csökkenése valószínűbb a magasabb antropogén kibocsátás következtében.

Időközben az általunk feldolgozott együttesben szereplő szimulációkból többet is újrafuttattak fejlettebb modellváltozatokkal vagy beállításokkal, egy esetben pedig a felfedezett hibák miatt nem ajánlották annak további használatát. Emiatt szükségesnek tartottuk a korábbi eredményeink frissítését a rendelkezésünkre álló új adatok felhasználásával. Ezúttal az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvek mellett az RCP2.6 kibocsátási szcenáriót is vizsgáljuk, amely azokról a változásokról ad információt, ami a légköri szén-dioxid koncentráció csökkentése mellett valószínűleg megvalósulna. A globális és regionális modellek 15 kombinációjával készült kísérletek 12 km-es felbontású adatait töltöttük le, s megvizsgáltuk, hogyan teljesítettek az 1971–2000 időszakon. A validációhoz a magyar meteorológiai szolgálatnál előállított, homogenizált és rácsra interpolált HuClim (Izsák et al., 2022) éghajlati adatsort használtuk. A modellkísérleteket a napi csapadékösszeg, valamint az átlag-, maximum- és minimumhőmérséklet, és az ezekből származtatott éghajlati



3. ábra. A modellszimulációk Taylor-diagramjai az 1971–2000 időszakra vonatkozó magyarországi havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg alapján. A Taylor-diagram 3 mérőszámot mutat egyszerre: a korrelációt (függőleges tengellyel bezárt szög), a referenciaértékkel normált szórást (origó körüli koncentrikus körök) valamint a szintén normált centralizált átlagos négyzetes hibát (X-jel körüli koncentrikus körök). Optimális esetben a modellszimulációkat jelölő szimbólumok az X pont közelében helyezkednek el. A csillaggal megjelölt 9 modellkombináció eredményeit a projekciós vizsgálatokhoz is felhasználjuk.

indexek éves menete, évszakos és havi átlagai, hibái, korreláció- és szórásértékei alapján rangsoroltuk. (A 3. ábrán a modellszimulációk átlaghőmérséklet és csapadék adatainak statisztikai jellemzői láthatók, Taylor-diagram formájában megjelenítve.) Ez alapján összesen 9 modellszimulációt választottunk ki, amit felhasználunk a 2041–2070 és 2071–2100 időszakokra vonatkozó projekciós vizsgálatokhoz.

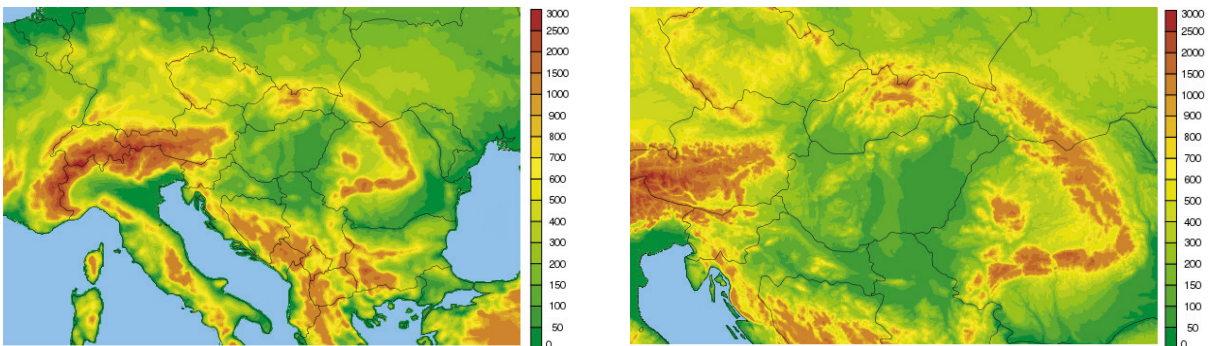
A lokális jelenségnek vizsgálata

Bár az EURO-CORDEX regionális modellszimulációi részletes képet adnak az Európában várható változásokról, a hozzávetőlegesen 10 km-es rácsfelbontás még mindig nem elegendő a kisebb méretskálájú, lokális jelenségek, pl. az intenzív csapadék-

események részletes leírásához. Ezek a folyamatok olyan néhány km-es felbontású, nem-hidrosztatikus modellek segítségével tanulmányozhatók, melyekben a mélykonvekciót nem parametrizáció útján, hanem a rácsponthoz közeli mélykonvekció segítségével írják le. Számos vizsgálat (pl. *Ban et al., 2021; Lind et al., 2023*) igazolta, hogy ezek a modellek részletesebben és pontosabban írják le a csapadék mennyiségét, intenzitását, napon belüli menetét, területi eloszlását, illetve a rövid idő alatt nagy mennyiségű csapadékkal járó eseményeket.

Ebből a célból kezdtük meg 2023-ban a HARMONIE-Climate (HCLIM) éghajlati modell adaptálását. A modell az ACCORD (A Consortium for CONvection-scale modelling Research and Development) mezoskálájú rövidtávú modellfejlesztő konzorcium modelljeire és keretrendszerére (*Bengtsson et al., 2017; Termonia et al., 2018*) épül, s két fő konfigurációban futtatható (*Belušić et al., 2020*): a HCLIM-AROME az AROME nem-hidrosztatikus időjárás-előrejelző modell parametrizációin és dinamikáján alapul, míg a hidrosztatikus HCLIM-ALADIN az ARPEGE hidrosztatikus globális modell korlátos tartományú változata. Vizsgálatainkhoz a HCLIM 43-as verzióját (HCLIM43) választottuk, mely még kiértékelés alatt áll, ezáltal eredményeinkkel hozzájárulhatunk ennek folyamatához.

A HCLIM43-ALADIN és HCLIM43-AROME konfigurációval elsőként két rövid tesztkísérletet végzünk: (1) egy hidrosztatikus modellfuttatást 10 km-es felbontáson és 65 szinten az ALADIN-Climate regionális klímamodellünk tartományával megegyező területre, illetve (2) egy nem-hidrosztatikus modellfuttatást 2,5 km-es felbontáson és 65 szinten az operatív AROME előrejelző modellünk tartományával megegyező területre (4. ábra). Az integrálási időlépcső az első esetben 360, míg a második esetben 60 másodperc, az 1 évre szóló modellfuttatás várhatóan 1, illetve 7 napot fog igénybe venni a HungaroMet szuperszámítógépén. Az oldalsó peremfeltételeket a kb. 30 km-es horizontális



4. ábra. A HCLIM regionális éghajlati modell 240x160 rácsponthoz álló 10 km-es (balra) és 500x320 rácsponthoz álló 2,5 km-es (jobbra) horizontális felbontású tesztkísérleteinek tartománya és domborzata.

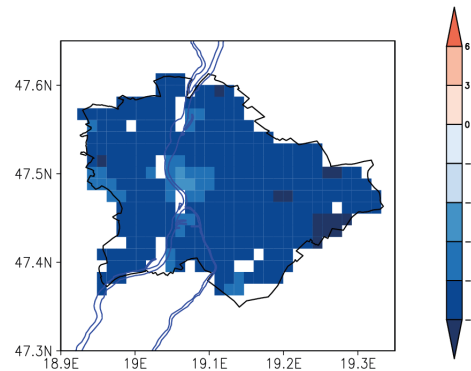
felbontású ERA5 adatbázis (Hersbach et al., 2020) 3-óránkénti reanalízisei szolgáltatják. A felszíni folyamatok leírása a SURFEX (Surface Externalisécé) csatolt felszíni modellel történik.

A tesztek először egy-egy múltbeli évre tervezzük futtatni, melynek célja, hogy az előállt eredményeket összehasonlítsuk az ALADIN-Climate 10 km-es felbontású eredményeivel, majd megvizsgáljuk a felbontásnövelés és az eltérő fizikai csomag hatását. Ezt érzékenységi vizsgálatok követik majd az optimális tartomány és felbontás megválasztására, amihez a rendelkezésre álló számítási kapacitást is figyelembe vesszük. Ezután következhet a finomfelbontású modell részletes validációja egy többéves időszakon, illetve később projekciók készítése.

A klímaváltozás városi jellemzőinek vizsgálata

A jelenlegi regionális klímaszimulációk nem adnak részletes információt a városi éghajlat várható alakulásáról. Ennek oka egyrészt az, hogy a tipikusan 10 km-es horizontális felbontásuk nem elegendő a heterogén városi felszínborítás kialakította lokális éghajlat leírására, másrészt az, hogy a regionális klímamodellek többnyire egyszerű közelítéssel írják le a városi felszín és a légkör közötti kölcsönhatásokat. A városi légkört jellemző fizikai folyamatokat is tartalmazó felszíni modellek költséghatékony eszközt jelentenek lokális éghajlati projekciók készítésére. Erre a feladatra a SURFEX felszíni modellt alkalmazzuk, melyben a városi folyamatokat a TEB (Town Energy Balance; Masson, 2000) parametrizációs séma írja le.

Ezzel a felszíni modellel készültek el a 21. századra vonatkozó projekciók 1 km-es horizontális felbontással Budapest és Szeged városokra. A SURFEX által kezelt néhány 10 méteres réteg feletti meteorológiai viszonyokat az ALADIN-Climate regionális klímamodell eredményei írták le, a forgatókönyvekből adódó bizonytalanságot pedig az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriókon keresztül vettük figyelembe (Allaga-Zsebeházi, 2021). A szimulációs eredmények alapján a városkörnyéki természetes területek fokozottabb melegezése miatt a város hőmérséklettöbblete (azaz az ún. városi hősziget-intenzitás mértéke) a jövőben gyengülhet. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a városi lakosság a jövőben ne lenne fokozottan kitéve az éghajlatváltozásnak, hiszen például azon éjszakák száma, amikor a minimumhőmérséklet nem süllyed 20 °C alá, Budapesten már az évszázad közepére 2–2,5-szeresére növekedhet az 1971–2000 időszakhoz képest.



5. ábra. Az útfelszín átlagos augusztusi maximális napi hőmérsékletének eltérése az albedó növelése után a változtatás nélküli referencia szimuláció megfelelő értékétől a 2046–2055 időszakon, RCP8.5 forgatókönyv alapján.

A SURFEX-szel érzékenységvizsgálatokat is végzünk különböző klímaadaptációs lehetőségek vizsgálatára. Például a modell segítségével vizsgáljuk Budapesten a tetők és az utak napsugárzás visszaverő képessége (azaz az albedó) változtatásának hatását a felszíni, illetve a felszínközeli léghőmérsékletre. Egy 10 éves időszakon az utakra a SURFEX modellben alapértelmezetten használt 0,08 értékű albedót 0,58-ra emeltük, amely közelítőleg a gránit és a beton albedójának felel meg. A legnagyobb hatást az utak maximális felszíni hőmérsékletében tapasztaltuk: a nyári hónapokban a belváros kivételével kiterjedt területen 12–15 °C-os csökkenés volt elérhető (5. ábra). A belvárosban a csökkenés ennél kisebb, 7–9 °C mértékű. Ennek oka, hogy a belvárost a modell nagyobb épületmagassággal és szűkebb utcákkal jellemzi, így az utak jobban árnyékolnak, és kevésbé tud érvényesülni az albedó növelésének a hatása. A felszíni hőmérsékletben ilyen módon elérhető csökkenés fontos például a kötőtpályás közlekedési rendszerek szempontjából.

Az éghajlati információk felhasználása

Az éghajlatváltozás hatásai érintik a természeti környezetet és számos szektort. A felkészüléshez a meteorológiai változások különböző területekre kifejtett hatásait célzott és objektív vizsgálatokkal méri fel, s ezek eredményei beépül(het)nek az alkalmazkodással kapcsolatos stratégiai döntéshozatalba. Az éghajlati információkat célszerű olyan rendszerbe szervezni, amely az alkalmazkodás különböző szereplői számára hozzáférhető és értelmezhető. A HungaroMetnél fejlesztés alatt áll egy olyan portál, ami egy helyre gyűjti a szakemberek által megbízhatónak tartott éghajlati

adatokat, ezek felhasználóbarát elérhetővé tételével szolgálja a hatások számszerű vizsgálatát, éghajlati információkra épülő szolgáltatásokat közvetít, továbbá felületet biztosít a klímaváltozással kapcsolatos tudományos alapú ismeretterjesztésnek és tájékoztatásnak.

A tervezés alatt álló éghajlati portál egyik fontos alapját nyújtja az elmúlt években kialakított KLIMADAT alkalmazás. Ebben a klimadat.met.hu címen keresztül hazai mérési és a cikkben bemutatott szimulációs adatokból (a cikk készítésének időpontjában az ALADIN-Climate, a REMO és a SURFEX eredményeiből) számított hőmérsékleti és csapadék indikátorok kérdezhetők le, jeleníthetők meg és tölthetők le Magyarország területére. Az alkalmazás segítségével 30-éves időszakokat tudunk kiválasztani, s azokat 10 évenként tudjuk léptetni 1971 és 2100 között. Az 1971–2000, 1981–2010 és 1991–2020 időszakokra vonatkozó információk a magyarországi állomási mérések homogenizációjával és egy 0,1-fokos felbontású horizontális rácsra való interpolációjával álltak elő. A 2001–2030-tól 2071–2100-ig terjedő időszakokra négy regionális klímamodell-szimuláció eredményein alapuló információk jeleníthetők meg. Az alkalmazás egyik különlegességét adják a részletesebb városi hőmérsékleti információk, melyek elsőként Budapestre érhetőek el, s a mérések és a két 0,01-fokos

felbontású SURFEX városi szimuláció eredményeinek kombinálásával készültek. Az adatok többféle területi lehatárolásban jeleníthetők meg: Magyarországra lehetőség van a regionális információk megyei és járási átlagok formájában való megtekintésére is, míg Budapestre rácsponti információkat vagy kerületekre kiszámított átlagértékeket kérhetünk le. A projekciók bizonytalanságának számszerűsítését speciális megjelenítési formák támogatják. A kvantilis típusú megjelenítéssel az adatbázisban lévő modellszimulációk eredményei alapján az adott változó várható értékének minimumát, maximumát vagy mediánját tudjuk megtekinteni. A valószínűségi térképek arról adnak információt, mennyi a valószínűsége az adatbázisban elérhető modellszimulációk eredményei alapján, hogy az adott indikátor jövőbeli megváltozása meghalad egy küszöbértéket. (A 6. ábra a napi minimumhőmérséklet júliusi jellemzőire mutat be néhány példát.) A térképek és az azokon szereplő adatok elmenthetők és további feldolgozások végezhetőek rajtuk például más térinformatikai rendszerekben.

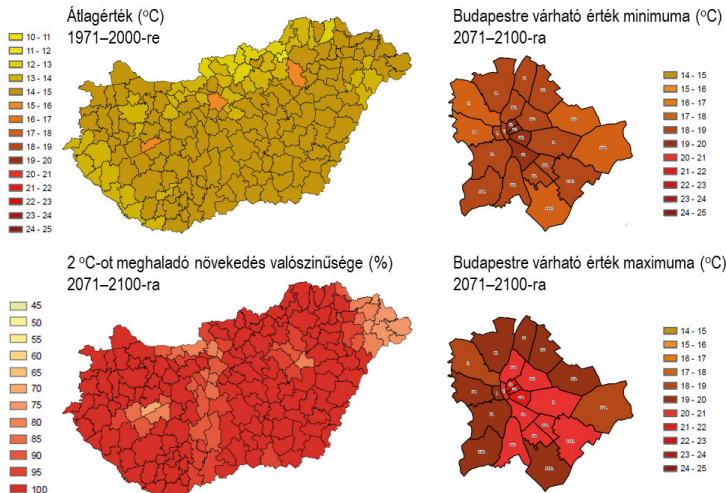
Összefoglalás

A társadalmi és gazdasági fejlődés egy feltételezett pályájának hatását az éghajlatunkra a modellezés segítségével vizsgálhatjuk. A magyar meteorológiai szolgálatnál az éghajlati modellek széles skáláját használjuk a térségünkben várható változások feltérképezésére. A nyers adatokból kiszámított hőmérsékleti és csapadék indikátorok számos szakterület számára nyújtanak kiindulási információt az éghajlatváltozás további hatásainak vizsgálatához és az ezzel kapcsolatos tervezéshez. A háttérre adó adatbázis fejlesztése folyamatos: mind a regionális, mind a városi projekciókat bővítjük és frissítjük a legújabb modelledményekkel; megkezdtük az első km-es térskálájú regionális szimulációkat; a városi hatások vizsgálatát több magyarországi városra is kiterjesztjük; további indikátorokkal és speciális megjelenítési eszközökkel támogatjuk a várható változások és azok bizonytalanságának számszerűsítését. Az ezekre épülő KLIMADAT alkalmazás lényeges eleme a meteorológiai szolgálat éghajlatváltozási szolgáltatásainak és az azzal kapcsolatos tájékoztatásnak.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott fejlesztések és vizsgálatok az EEA-C13-10 számú (RCMTÉR), a KEHOP-1.1.0-15-2015-00001 számú (KlimAdat), a LIFE20 CCA/HU/001774 számú (Városi Eső), illetve a Széchenyi Terv Plusz

Júliusi napi minimumhőmérséklet



6. ábra. Bal felső panel: A napi minimumhőmérséklet júliusi átlagértéke (°C) a magyarországi járásokra 1971–2000-ben mérések alapján; bal alsó panel: annak valószínűsége (%) 4 regionális klímamodell-szimuláció eredményei alapján, hogy a napi minimumhőmérséklet júliusban 2 °C-ot meghaladó mértékben növekszik 2071–2100-ra az 1971–2000 időszakhoz képest; jobb felső/alsó panel: a napi minimumhőmérséklet 2 városi modellszimuláció eredményei alapján 2071–2100-ra várható legkisebb/legnagyobb júliusi értéke (°C) Budapest kerületeire.

program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú (Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium) projektek támogatásával valósultak meg.

Irodalomjegyzék

- Allaga-Zsebeházi, G. 2021: Az RCP4.5 és RCP8.5 forgatókönyvekkel készített SURFEX városi éghajlatváltozási kísérletek kiértékelése. KlimAdat projekt beszámoló. https://www.met.hu/klimadat/doc/reports/KLIMADAT_beszamolo_Allaga-Zsebehazi_202112.pdf
- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinolfi, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belušić, D., Berthou, S., Brisson, E., Cardoso, R. M., Chan, S. C., Christensen, O. B., Fernández, J., Fita, L., Frisius, T., Gašparac, G., Giorgi, F., Goergen, K., Haugen, J. E., Hodnebrog, Ø., Kartsios, S., Katragkou, E., Kendon, E. J., Keuler, K., Lavin-Gullon, A., Lenderink, G., Leutwyler, S., Lorenz, T., Maraun, D., Mercogliano, P., Milovac, J., Panitz, H.-J., Raffà, M., Remedio, A. R., Schär, C., Soares, P. M. M., Srnec, L., Steensen, B. M., Stocchi, P., Tölle, M.H., Truhetz, H., Vergara-Temprado, J., de Vries, H., Warrach-Sagi, K., Wulfmeyer, V., and Zander, M.J., 2021: The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynam.* 57, 275–302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Bán, B., Szépszó, G., Allaga-Zsebeházi, G., and Somot, S., 2021: ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results. *Időjárás* 125, 647–673. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.6>
- Belušić, D., de Vries, H., Dobler, A., Landgren, O., Lind, P., Lindstedt, D., Pedersen, R. A., Sánchez-Perrino, J. C., Toivonen, E., van Ulft, B., Wang, F., Andrae, U., Batrak, Y., Kjellström, E., Lenderink, G., Nikulin, G., Pietikäinen, J.-P., Rodriguez-Camino, E., Samuelsson, P., van Meijgaard, E., and Wu, M., 2020: HCLIM38: a flexible regional climate model applicable for different climate zones from coarse to convection-permitting scales. *Geosci. Model Dev.* 13, 1311–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1311-2020>
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K.-I., Lenderink, G., Niemela, S., Nielsen, P. K., Onville, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Santos Munoz, D., Subias, A., Tijn, S., Toll, V., Yang, X., and Költzow, M.Ø., 2017: The HARMONIE–AROME Model Configuration in the ALADIN–HIRLAM NWP System. *Mon. Weather Rev.* 145, 1919–1935. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R. J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépau, J.-N., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Izsák, B., Szentimrey, T., Lakatos, M., Pongrácz, R., and Szentés, O., 2022: Creation of a representative climatological database for Hungary from 1870 to 2020. *Időjárás* 126, 1–26. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.1.1>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preussmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., and Yiou, P., 2013: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, Springer Berlin Heidelberg, 1–16.
- Le Moigne, P., Albergel, C., Boone, A., Belamari, S., Decharme, B., Dumont, M., Masson, V., 2018: SURFEX V8.1 main scientific documentation. https://www.umr-cnrm.fr/surfex/IMG/pdf/surfex_scidoc_v8.1.pdf
- Lind, P., Belušić, B., Médus, E., Dobler, A., Pedersen, R. A., Wang, F., Matte, D., Kjellström, E., Landgren, O., Lindstedt, D., Christensen O. B., Christensen, J. H., 2023: Climate change information over Fennoscandinavia produced with a convection-permitting climate model. *Clim. Dynam.* 61, 519–541. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06589-3>
- Masson, V. 2000: A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In *Atmospheric Models*. *Bound.-Lay. Meteorol.* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Megyeri-Korotaj O., Bán B., and Suga R., 2022: A REMO2015 és az ALADIN5.2 regionális klímamodellek projekciós eredményeinek közös kiértékelése. KlimAdat projekt beszámoló. https://www.met.hu/klimadat/doc/reports/KLIMADAT_beszamolo_Megyeri-Korotaj_et_al_202203.pdf
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Szépszó G., 2014: A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére. Doktori értekezés, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földtudományi Doktori Iskola, Földrajz–Meteorológia Program. https://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2014/szepszo_g.pdf
- Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouysse, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolík, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C., and Joly, A., 2018: The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.* 11, 257–281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>



A klímaváltozás lehetséges hatásai a nagy folyóink vízminőségére – a vízminőségi modellezés peremfeltételeinek klímáparaméterezése

Liptay Zoltán, Engloner Attila

Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar, liptay.zoltan.arpad@uni-nke.hu

DOI: 10.56474/légkor.2024.K.5

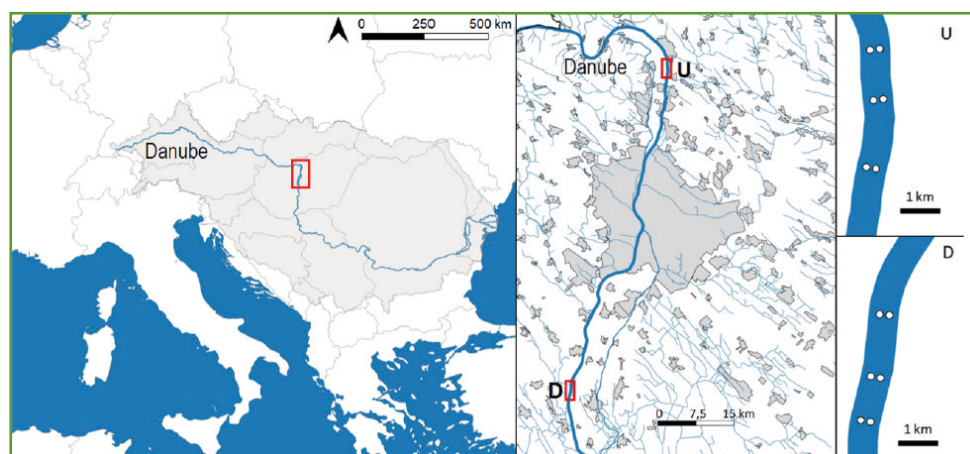
A „Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” elnevezésű projekt keretében többek között 12 hónapon át vizsgálták a Duna vízminőségének változásait Budapest feletti és alatti folyószakaszokon, majd a terepi mérések alapján vízminőségi modellezés is történt. A bearányosított modellek alkalmasak a klímaváltozás hatásainak vizsgálatára. Ehhez a vízhozam és víz hőmérséklet idősorokat két kiválasztott klímascenárió alapján a 2100-as időszakra vetítettük, és a velük elvégzett vízminőségi szimuláció eredményeit összehasonlítottuk a kiindulási eredményekkel. Vizsgáltuk a peremfeltételek hosszú távú kiterjesztésének lehetőségeit, valamint azt, hogy az általunk használt MIKE21FM és EcoLab modell hogyan reagál a peremfeltételek megváltozására.

The possible effects of climate change on the water quality of our large rivers - climate parameterization of the boundary conditions of water quality modeling

In frame of the „Drinking water: multidisciplinary assessment of secure supply from the source to the consumers” project water quality field measurement were carried out on the Danube for 12 months upstream and downstream of Budapest, and later the measurements were used for building a water quality model. The calibrated models are capable of estimating the effect of climate change. We selected two climate scenarios and projected the discharge and water temperature time series to 2100 and finally compared modelling results to the baseline results. We analysed the possibilities of long term projection of the boundary conditions and compared the changes modelled by MIKE21FM and EcoLab to the conclusions of the field measurements.

A Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal Nemzeti Kiválóság Programjának keretében valósult meg a „Tiszta Ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” elnevezésű projekt, amely az ivóvízbiztonságot veszélyeztető

hatásokat tárja fel partiszűrős rendszereken. A kutatás az ivóvízbázistól kezdve a teljes ellátórendszerre kiterjedt, így többek között 12 hónapon át vizsgálták a Duna vízminőségének változásait Budapest feletti és alatti folyószakaszokon (1. ábra).



1. ábra. A vizsgált területek elhelyezkedése. Baloldalon a Duna vízgyűjtője, középen Budapest és környezete, jobb oldalon pedig a felső (U), és az alsó (D) mintaterület. (Englner et al., 2023).

A vízminőségi adatsorok lehetővé teszik a klímaváltozás lehetséges hatásainak vizsgálatát nemcsak a kutatási időszakra, hanem - megfelelő vízminőségi- és klímamodellek felhasználásával – hosszabb távra is.

A hidrológiai körforgás növekvő intenzitása (Cammalleri et al., 2020; Lhotka et al., 2020; Stagge et al., 2017) miatt kialakuló szélsőséges események újabb kérdéseket vetnek fel. A változó éghajlat azonban nem csak a vizek mennyiségére, és eloszlására van hatással, hanem azok minőségére is, főképp a hőmérsékletfüggő hidrológiai és vízkémiai folyamatok révén. A klímaadaptáció miatt a megváltozó antropogén hatások is befolyásolják a vizeink minőségét. Az elmúlt években számos tanulmány foglalkozott a klímaváltozás vízminőségi aspektusaival. Ilyen például a nitrogénfolyamatok hőmérsékletfüggősége (Gervasio et al., 2022, Liao et al., 2018, Allin et al., 2017, Bernard and Leadley, 2005), vagy a vízhozamok hosszútávú alakulásának becslése (Probst and Mauser, 2023). Munkánk során a terepi mérésekre alapozott numerikus modellel szimuláltuk az oxigén-háztartási, nitrogén és foszfor folyamatokat, majd a bearányosított modellt időben kiterjesztettük a klímaszcenáriókból származtatott hosszú távú változásokkal.

A szakirodalomban számos megközelítést találunk a vízminőségi modellezésre, ezeket átfogóan Ejigu and Amosa (2021) taglalja. Ilyenek például a Telemac 2D és hozzákapcsolható WAQTEL vízminőségi modul (Van et al., 2022; Shettigar et al., 2022), a WASP vízminőségi szimulációs program, ami a HEC-RAS 2D modellel is összeköthető (Shabani et al., 2021), a Delft 3D (Eladawy et al., 2014; Prilop et al., 2014), a CE-QUAL-W2 (Kim et al., 2019, Terry and Lindenschmidt, 2023), az IberWQ (García-Feal, 2020), a RiverFlow2D (Fernández-Pato and García-Navarro,

2021) és a MIKE EcoLab modellje, ami a szoftveren belül tetszőleges hidrodinamikai vagy hidrológiai modellel kapcsolható (Xu et al., 2023).

A kutatás két fő kérdése, hogy milyen módszerrel lehetséges a vízminőségi modell peremfeltételeit a klímaváltozás alapján újraparaméterezni, és hogy az új idősorokkal elvégzett szimuláció eredményei mennyire követik a terepi mérések során tapasztalt összefüggéseket.

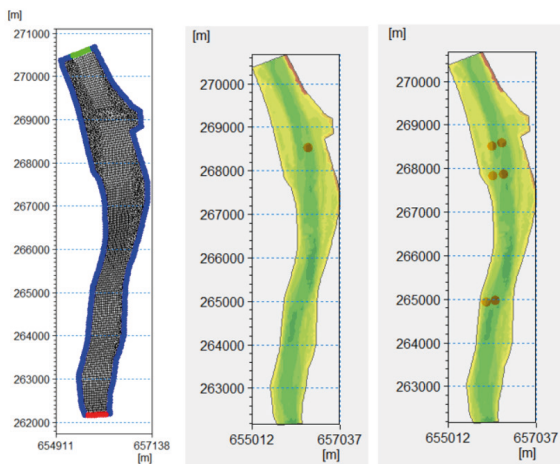
A hidrodinamikai modell és adatai

Jelen kutatásban a MIKE21 FM modellt használtuk a MIKE EcoLab vízminőségi modullal kiegészítve, a modellépítés a Danish Hydraulic Institute (DHI) közreműködésével történt. A MIKE21 FM 2 a sekélyvízi egyenleteket szabálytalan számítási hálóra írja fel, és a megoldást rugalmas időlépés mellett számítja, így stabilitása és a pontossága is kiváló, rendkívüli skálázhatósága pedig feladatok széles palettájának megoldására teszi alkalmassá. A projekt során a Duna mindkét vizsgált szakaszára készült modell, de a klímaváltozás hatásainak elemzése során egyelőre csak az északi modellel dolgoztunk (1. ábra, „U” jelű mintaterület).

A modellezett terület 7,7 km², a számítási elemek átlagos oldalmérete 40–60 m, az összes elemszám 5302 (2. ábra). A szimulációs időszak a terepi mérések időszaka, azaz 2019.02.18-tól 2020.02.18-ig. Ezt a 12 hónapot a durvább felbontással a modell viszonylag gyorsan szimulálja, a teljes számítás időigénye 6–7 óra közötti. Az északi terület jellegzetessége a tisztított szennyvíz sodorvonalis bevezetése (2. ábra), ami pontszerű hozzáfolyásként került be a modellbe a szennyvíztisztító által szolgáltatott mennyiségi és minőségi adatok figyelembevételével. A vizsgált szakasz terepi mintavételezési pontjait szintén a 2. ábra mutatja. A 3 pontpárból egy-egy a szennyvízbevezetés

felett és alatt helyezkedik el, a harmadik pedig 3 km-rel délebbre. A pontpárok egy sodorvonal mintavételi pontból és egy partközeli mintavételi pontból állnak. A partközeli mintavétel minden mérésekor az 1 méteres vízmélység függvényében történt, azonban ezt a modellt nem képes kezelni, így egy átlagosan 1 méteres vízmélységű rögzített pont került kijelölésre.

A felépített hidrodinamikai modell két nyitott peremfeltétellel dolgozik, az egyik egy vízhozam típusú felső peremfeltétel, a másik pedig egy vízállás típusú alsó peremfeltétel. Az ezekhez szükséges vízhozam és vízállás idősorokat a Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta.



2. ábra. A M21FM numerikus modell (balról jobbra: számítási háló, tisztított szennyvíz sodorvonalai beeresztése, mérési pontok).

A vízminőségi modell és adatai

Az EcoLab modell egy vízminőségi munkafüzet, amiben deklarálhatók meghajtó erők, szabad paraméterek, belső változók és az ezeket összekapcsoló összefüggések. Emellett tartalmaz sablonokat is, amelyek az elmúlt évtizedek szakirodalmára alapozva előre definiálnak bizonyos kérdésköröket. Fontos tulajdonsága, hogy a térdimenziók számától függetlenül kapcsolható más modellekhez, így 1, 2 és 3 dimenziós vízminőségi szimulációk is elvégezhetők. A hidrodinamikai meghajtó erő esetünkben a MIKE21FM modell, tehát a vízminőségi modell eredményeit is annak számítási hálóján kapjuk vissza.

A terepi mintavételezés a Duna két szakaszán történt; Budapesttől északra, Surány térségében, 3 szelvényben, valamint délre, Ráckeve térségében, szintén 3 szelvényben (1. ábra). A mérések során 14 napos időlépcsőkben történt mintavételezés. A vizsgált

nagyszámú komponens közül (Engloner et al., 2023) az alábbiakat használtuk fel a modellhez: vízhőmérséklet, oldott oxigén, összes szerves szén, összes nitrogén, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , összes foszfor, PO_4^{3-} , Zn, E. coli, Carbamazepine, Sulfamethoxazole, és 1H-Benzotriazole. Ezeket az EcoLab külön sablonokban kezeli, a tápanyag-háztartási jellemzőket az ún. Water Quality, a cink koncentrációjának alakulását az ún. Heavy Metals, a szervesetlen mikroszennyezőket (mint a Carbamazepine, Sulfamethoxazole, és Benzotriazole gyógyszermaradványok) pedig az ún. Xenobiotics sablonok segítségével. Jelen kutatásban a tápanyag-háztartásra koncentráltunk, így a továbbiakban az ezzel kapcsolat eredményeket mutatjuk be.

A vízminőségi modell bearányosítása

A vizsgált szakaszon rendelkezésre álló terepi mérésekből az északi pontpár mintavételi eredményeit a vízminőségi modell felső peremfeltételeként definiáltuk, így a kalibráció a második (ES2 sodorvonal, és EP2 partközeli) és harmadik (ES3, EP3) pontpárok felhasználásával volt lehetséges. Néhány paraméter RMSE és RSE értékeit az alábbi táblázatok (1. és 2. táblázat) szemléltetik.

	ES2	EP2	ES3	EP3
DO	0,178	0,378	0,199	0,22
NH_4^+	0,009	0,011	0,013	0,009
NO_2^-	0,004	0,017	0,003	0,004
NO_3^-	0,081	0,058	0,167	0,128
PO_4^{3-}	0,017	0,025	0,017	0,022

1. táblázat. Kalibrációs RMSE [mg/l].

	ES2	EP2	ES3	EP3
DO	0,14	0,27	0,16	0,31
NH_4^+	1,24	0,75	0,89	2,7
NO_2^-	0,59	0,09	0,14	0,24
NO_3^-	0,02	0,06	0,05	0,07
PO_4^{3-}	0,588	0,485	0,581	0,788

2. táblázat. Kalibrációs RSR [-].

A klímaváltozás hatása a peremfeltételekre

A vízben lejátszódó fizikai, kémiai és biológiai folyamatok egy része hőmérsékletfüggő, így többnyire a modell által használt alapegyenletek is tartalmazzák ezt a függőséget. Tehát bizonyos paraméterek esetén a meghajtó erő nem csupán a hidrodinamikai részeredmény, hanem közvetlenül a vízhőmérséklet is. Ez a modell kalibrációja során az észlelt vízhőmérsékletet jelenti, de egyben lehetővé is teszi a bearányosított folyamatok áthelyezését más hőmérsékleti viszonyok közé. Hasonló módon, ám közvetetten a vízhozam és a vízjárás megváltozása is hatást gyakorol a vízminőségi folyamatokra. Ez a hatás a hidrodinamikai modellen keresztül mutatkozik meg. A vízminőségi modell tekintetében tehát két hosszútávon változó paramétert jelöltünk ki, a vízhőmérsékletet és a vízhozamot.

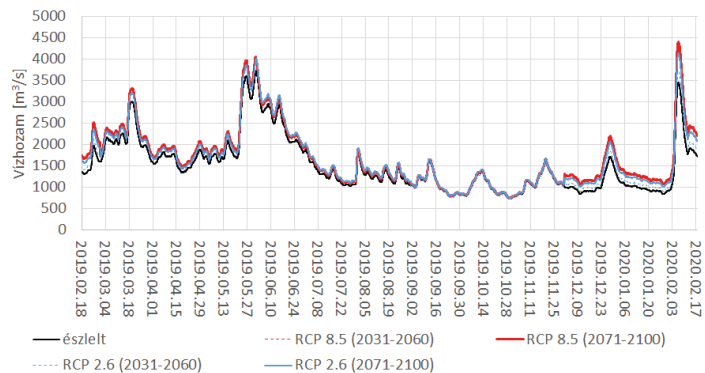
Vízhozam változás az 1971-2000 időszak havi átlagértékeinek százalékában [%]				
hónap	RCP 8.5 2031-2060	RCP 8.5 2071-2100	RCP 2.6 2031-2060	RCP 2.6 2071-2100
1	21,1	27,7	7,8	20,2
2	21,1	27,7	7,8	20,2
3	6,2	10	5,5	6,8
4	6,2	10	5,5	6,8
5	6,2	10	5,5	6,8
6	4,7	6,2	7,9	7,8
7	4,7	6,2	7,9	7,8
8	4,7	6,2	7,9	7,8
9	0,0	2,0	-3,1	2,8
10	0,0	2,0	-3,1	2,8
11	0,0	2,0	-3,1	2,8
12	21,1	27,7	7,8	20,2
Átlag	8	11,5	4,5	9,4

3. táblázat. Probst & Mauser (2023) által becsült vízhozam változás.

Probst and Mauser (2023) hosszú távú hidrológiai modellezéssel közelítette meg a Duna vízgyűjtő vízjárás változásainak feltárását. Munkájukban két klímaszenáriót (IPCC, 2014) vettek alapul, és többek között publikálták a havi átlag vízhozamok változását két időtávon, 2031–2060 és 2071–2100 között. A két vizsgált klímaszenárió:

- **RCP 2.6:** „low emission”, „middle of the road”, azaz alacsony kibocsátású, vagy középút szcenárió. A globális átlagos léghőmérséklet emelkedés 2100-ig kevesebb, mint 2,0 °C.
- **RCP 8.5:** „business as usual”, „high emission”, „worst-case scenario”, azaz magas kibocsátású, legrosszabb eset szcenárió. A globális átlagos léghőmérséklet emelkedés 2100-ig 4,3 °C.

A két időtávra becsült értékeket a 3. táblázat szemlélteti az 1971–2000 havi átlagértékek százalékában. A hidrodinamikai modell felső peremfeltétele a váci vízmérce vízhozam órás idősora, így számunkra ez a referencia idősor. Ezeket az értékeket módosítottuk az RCP 2.6, valamint RCP 8.5 klímaszenáriók közép és hosszú távú változásaival (3. ábra).



3. ábra. Mért és előrejelzett vízhozamok.

A vízhozamhoz hasonlóan a vízhőmérsékletek idősorát is a klímaszenáriók alapján vetítettük előre. Mivel nagyon erős korrelációt mutat egymással a léghőmérséklet és a vízhőmérséklet (Mohseni and Stefan, 1999), így első megközelítésként kigyűjtöttük a KLI-MADAT adatbázisból (HungaroMet Nonprofit Zrt.) a havi átlagos léghőmérséklet értékeket a modellterület rácspontjában (4. táblázat). Ezek az átlagértékek az alábbi két klímaszenárión alapuló két különböző regionális klíma-modell-szimuláció (ALADIN-Climete, REMO) eredményeiből származnak:

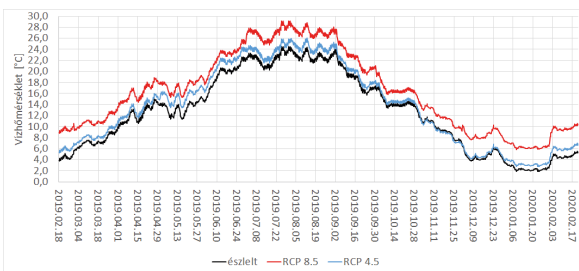
- **RCP 4.5:** „intermediate scenario”, azaz mérsékelt szcenárió, mely szerint az emisszió 2040 környékén tetőzik, majd csökken. A globális átlagos léghőmérséklet emelkedés 2100-ig 2–3 °C közötti.
- **RCP 8.5:** lsd. feljebb.

Az 1991–2020 közötti időszak léghőmérséklet adataihoz viszonyítva meghatároztuk a változás várható mértékét, és ezt közvetlenül érvényesnek tekintettük a vízhőmérsékletekre. A vizsgált Duna szakasz vízmércéi (Vác, Göd) hiányos vízhőmérséklet adatsorral

Léghőmérsékletek [°C]					
hónapok	RCP 8.5	RCP 4.5	1991-2020	változás RCP 8.5	változás RCP 4.5
1	3,9	0,8	-0,1	4	0,9
2	6,6	3,1	1,6	5	1,4
3	9,4	6,8	5,8	3,7	1
4	14,7	11,8	10,9	3,8	1
5	19,0	17,2	15,2	3,9	2,1
6	21,7	20,3	18,6	3,2	1,8
7	26,0	22,8	21,5	4,6	1,4
8	25,7	22,9	21,3	4,4	1,6
9	20,0	17,4	16,4	3,6	1
10	13,7	11,8	11,2	2,5	0,6
11	8,1	5,4	5,8	2,3	-0,3
12	4,6	1,1	0,8	3,8	0,3
Átlag	14,5	11,8	10,7	3,7	1,1

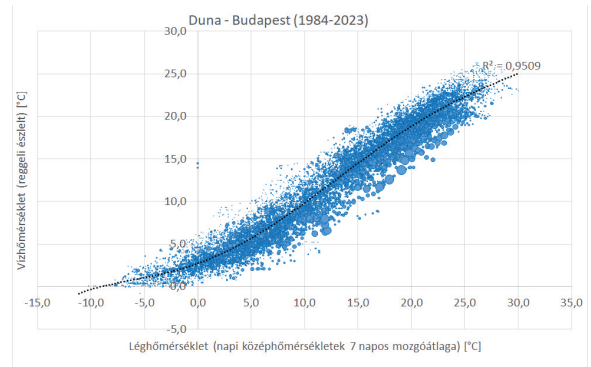
4. táblázat. A KLIMADAT adott rácsontra vonatkozó átlagos havi léghőmérséklet értékei.

rendelkeznek, a legközelebbi összefüggő, és hibától feltehetőleg mentes adatsor a budapesti vízmércén található. Ez 24,5 km-re van a modellterület alsó határától, ezért feltételezzük, hogy ezen a szakaszon a vízhőmérséklet nem változik meg szignifikáns mértékben. Így ezt tekintjük kiindulási alapnak, és ezt az idősort vetítjük előre. A becscsült értékeket a 4. ábra mutatja.

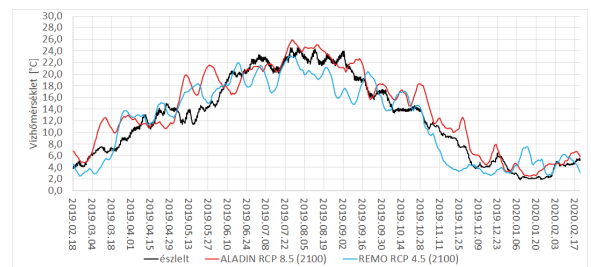


4. ábra. Mért és előrejelzett vízhőmérsékletek (1. módszer).

A második megközelítés szerint a két klímamoddellel (ALADIN RCP8.5 és REMO RCP4.5) 2100. évre becscsült napi lépésű léghőmérsékleti idősorokat vettük alapul, melyet az Országos Meteorológiai Szolgálat állított elő. A léghőmérséklet és vízhőmérséklet idősorok közötti regressziós polinom (5. ábra) egyenletét felhasználva a klímamodellek idősoraiból számított napi vízhőmérsékleteket állítottunk elő (6. ábra).



5. ábra. Léghőmérsékletek és vízhőmérsékletek kapcsolata (buborék nagysága: vízhozam).



6. ábra. Mért és előrejelzett vízhőmérsékletek (2. módszer).

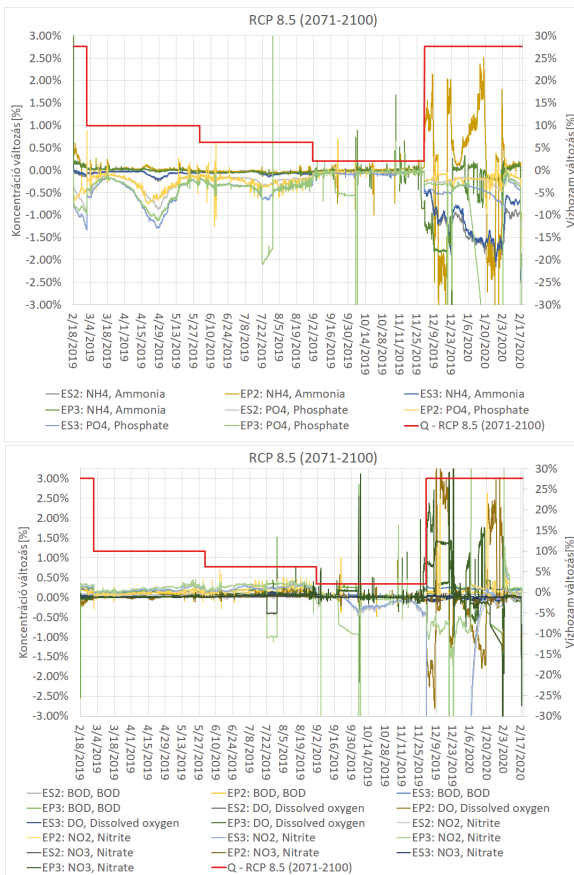
A klímaváltozás hatása a vízminőségi modell eredményeire

A kutatás ezen része jelenleg is folyamatban van, így az alábbi ábrákon néhány főbb eredményt szemléltetünk. Ezek a szélsőségesebb, azaz az RCP8.5 klímascenárióhoz tartozó eredmények, a 7. ábra a megváltozott vízhozam hatását, míg a 8. ábra a megváltozott vízhőmérséklet hatását mutatja. Mindkét ábrapáron felül a jellemzően fordítottan arányos, alul a jellemzően egyenesen arányos komponensek láthatók.

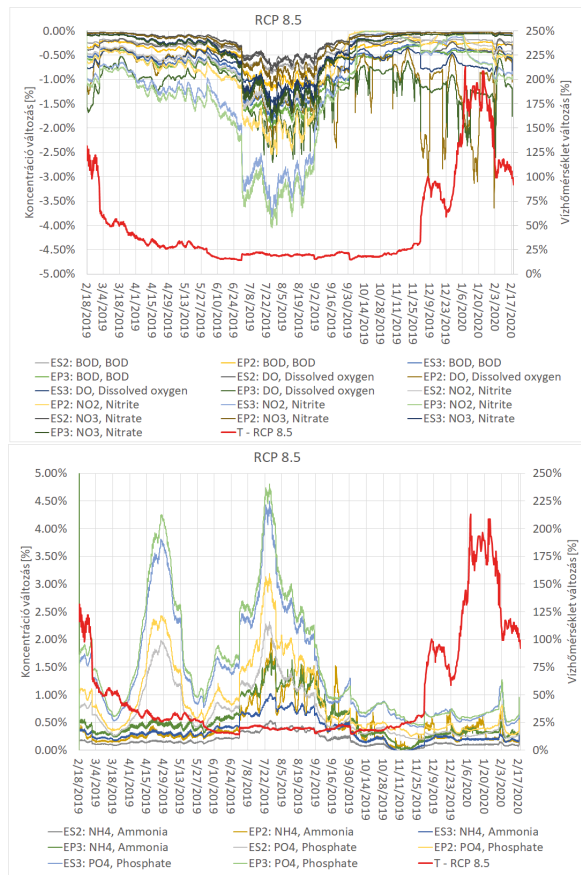
Diszkusszió

A vízminőségi modell a kalibráció után viszonylag jó egyezést mutat a terepi mérésekkel az oldott oxigén, NO₃⁻ és NO₂⁻ paraméterek esetén, és kevésbé jó egyezést az NH₄⁺ és PO₄³⁻ esetén. Ennek oka a leírás módjában keresendő, hiszen az EcoLab tápanyag-háztartás sablonja nagyszámú (43) szabad paraméterrel dolgozik, így ezek együttes kalibrációja komplex feladat. Sőt a vízminőségi alapegyenletek erősen konceptuálisak, többnyire mérlegegyenletek összessége, melyeket arányszámokkal paraméterezhetünk.

A vízhozamok várható alakulásáról jelenleg egyetlen publikált művet találni (Probst and Mauser, 2023), így nincs összehasonlítási lehetőség más eredményekkel.



7. ábra. Vízminőség változása a vízhozam megváltozásának hatására.



8. ábra. Vízminőség változása a vízhőmérséklet megváltozásának hatására.

A középvízhozamok nem jellemzik jól az extrém vízjárési helyzeteket, így ezeket külön kell vizsgálni, mind mennyiségi, mind pedig tartóssági szempontból. A vízhőmérsékletek várható alakulása is nagy bizonytalanságot hordoz magában, amit jól szemléltet a két módszer közötti különbség. Az első módszer viszonylag magas nyári vízhőmérsékleteket eredményezett az RCP 8.5 klímaszcenárió mellett, míg a második módszerrel kapott vízhőmérsékletek nem különböznek jelentős mértékben a terepi mérések során észleltektől. Ennek oka, hogy a 2019. év az átlagosnál melegebb év volt, így ezt tovább növelve túlzóan magas értékeket kapunk. A klímamodellek alapján polinomiális regresszióval számított vízhőmérsékletek kevésbé drasztikus változást mutatnak, de a szezonális változások itt is markánsan jelentkeznek.

A megváltoztatott peremfeltételekkel végzett vízminőségi szimulációk eredményei számos kérdést vetnek fel. Bár az eredmények alapján jól elválasztható egymástól az adott paraméterrel fordítottan vagy egyenesen arányos komponens, sőt az arányosság erőssége is számszerűsíthető, de fontos elvárás,

hogy a terepi mérések ugyan ezeket az összefüggéseket mutassák, azaz ne legyen alapvető ellentmondás a természet és a modell között. Ez tovább vetíti azt a kérdést, hogy egy-egy folyamat milyen összefüggés rendszerrel van szimulálva, és az milyen paraméterezési lehetőséget biztosít. Végül pontban pedig, hogy a paraméterek mennyire határozzák meg a folyamat jellegét, azaz fennáll-e a túltanítás veszélye. Ezek eldöntésére részben a modell dokumentációjában találunk támpontokat, részben pedig a dokumentációban hivatkozott szakirodalomban.

A megfelelő vízminőségi modell kiválasztásának fontos szempontja, hogy mennyire aktuális annak elméleti háttere. A jelen kutatás során használt MIKE EcoLab modell sablonjai számos hiányosságot mutatnak, így a tápanyag-háztartáson túl nem alkalmasak a klímaváltozás hatásainak becslésére, hiszen a többi mért komponens esetén nem veszik figyelembe a vízhőmérsékletet. Mivel a sablonok csak iránymutatók, és szabadon szerkeszthetőek, így kellő szakértelemmel minden további összefüggés beépíthető a modellbe.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az NKFIH „Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztóig” Nemzeti Kiválóság Programja (2018-1.2.1-NKP-2018-00011) támogatta. Köszönjük a DHI Hungary Kft. közreműködését a modellek építésében.

Irodalomjegyzék

- Allin, A., Schernewski, G., Friedland, R., Neumann, and T., Radtke, H., 2017: Climate change effects on denitrification and associated avoidance costs in three Baltic river basin – coastal sea systems. *J. Coastal Conserv.* 21, 561–569. <https://doi.org/10.1007/S11852-017-0530-8>
- Bernard, R. and Leadley, W., 2005: Global change, nitrification, and denitrification: A review. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 19, GB1007. <https://doi.org/10-1029/2004GB002282>
- Cammalleri C., Naumann G., Mentaschi L., Formetta G.(a), Forzieri G., Gosling S.(b), Bisselink B., De Roo A., and Feyen, L., 2020: Global warming and drought impacts in the EU, EUR 29956 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/597045>
- Ejigu, M.T. and Aмосa, M.K., 2021: Overview of water quality modeling. *Cogent Engineer.* 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1891711>
- Eladawy, A., Negm, A., Saavedra, O., Nadaoka, K., and El-Shinawy, I., 2014: Coupled Hydrodynamic-Water Quality Model for Pollution Control Scenarios in El-Burullus Lake (Nile Delta, Egypt). *Amer. J. Environ. Sci.* 10. 546-565. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.546.565>
- Engloner, A., I., Németh, K., Dobosy, P., and Óvári, M., 2023: Exploring the trend effects of diffuse anthropogenic pollution in a large river passing through a densely populated area. *Helyion* 9(9), e20120. <https://doi.org/10.1016/j.helyion.2023.e20120>
- Fernández-Pato, J. and García-Navarro, P., 2021: An Efficient GPU Implementation of a Coupled Overland-Sewer Hydraulic Model with Pollutant Transport. *Hydrology* 8(4):146. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040146>
- García-Feal, O., Cea, L., González-Cao, J., Domínguez, J.M., and Gómez-Gesteira, M., 2020: IberWQ: A GPU Accelerated Tool for 2D Water Quality Modeling in Rivers and Estuaries. *Water* 12(2):413. <https://doi.org/10.3390/w12020413>
- Gervasio, M., P., Soana, E., Granata, T., Colombo, D., and Castaldelli, G., 2022: An unexpected negative feedback between climate change and eutrophication: higher temperatures increase denitrification and buffer nitrogen loads in the Po River (Northern Italy). *Environ. Res. Lett.* 17, 084031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8497>
- IPCC, 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. in IPCC AR5 Synthesis Report website
- Kim, D., Kim, Y., and Kim, B., 2019: Simulation of eutrophication in a reservoir by CE-QUAL-W2 for the evaluation of the importance of point sources and summer monsoon. *Lake Reservoir Manage.* 35(1), 64–76. <https://doi.org/10.1080/10402381.2018.1530318>
- Liao, R., Miao, Y., Li, J., Li, Y., Wang, Z., Du, J., Li, Y., Li, A., and Shen, H., 2018: Temperature dependence of denitrification microbial communities and functional genes in an expanded granular sludge bed reactor treating nitrate-rich wastewater. *RSC Adv.* 8, 42087–52094. <https://doi.org/10.1039/C8RA08256A>
- Lhotka, O., Trnka, M., Kyseľ, J., Markonis, Y., Balek, J., and Možny, M., 2020: Atmospheric Circulation as a Factor Contributing to Increasing Drought Severity in Central Europe. *J. Geoph. Res. Atmos.* 18. 125. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>
- Mohseni, O. and Stefan, H.G., 1999: Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *J. of Hydrol.* 218, 128-141.
- Prilop, K., Lorenz, M., Le, T. T., H., Hieu, N., Meon, G., Nguyen, H-Q., 2014: A 3D-hydrodynamic and water quality model of the Thi Vai river under strongly tidal effect. Contributions to the 4th International Conference for Environment and Natural Resources, ICENR
- Probst, E., Mauser, W., 2023: Climate Change Impacts on Water Resources in the Danube River Basin: A Hydrological Modelling Study Using EURO-CORDEX Climate Scenarios. *Water* 2023, 15, 8. <https://doi.org/10.3390/w15010008>
- Shabani, A., Woznicki, S., Mehaffey, M., Butcher, J., Wool, T., and Whung, P., 2021: A coupled hydrodynamic (HEC-RAS 2D) and water quality model (WASP) for simulating flood-induced soil, sediment, and contaminant transport. *J. Flood Risk Manage.* 14. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12747>
- Shettigar, N., A., Riom, W., Bi, Q., Toorman, E., 2022: Modelling particle size distribution in TELEMAC- 2D with Population Balance Method. Conference paper. https://www.researchgate.net/publication/367295146_Modelling_particle_size_distribution_in_TELEMAC-2D_with_Population_Balance_Method
- Stagge, J.H., Kingston, D.G., Tallaksen, L.M., and Hannah, D.M., 2017: Observed drought indices show increasing divergence across Europe. *Sci. Rep.* 7, 14045. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14283-2>
- Terry, J. and Lindenschmidt K-E., 2023: Modelling Climate Change and Water Quality in the Canadian Prairies Using Loosely Coupled WASP and CE-QUAL-W2. *Water* 15(18):3192. <https://doi.org/10.3390/w15183192>
- Van, L-A., Nguyen, K-D., Le Marrec, F., and Jairy, A., 2022: Development of a Tool for Modeling the Fecal Contamination in Rivers with Turbulent Flows—Application to the Seine et Marne Rivers (Parisian Region, France). *Water* 14(8),1191. <https://doi.org/10.3390/w14081191>
- Xu, C., Ren, Z., Huang, S., Li, J., Zi, Y., and Hu, X., 2023: Simulation Study on the Impact of Water Flow Regulation Based on the MIKE 21 Model in a River Water Environment. *Sustainability* 15, 10313. <https://doi.org/10.3390/su151310313>



Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra

Bordi Sára, Szépszó Gabriella

HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt., bordi.s@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.K.6

Az Atlanti-óceán meridionális áramlási cirkulációja meghatározó szerepet játszik bolygónk éghajlatának alakításában, különös tekintettel Európa térségére. Mivel az óceán és a légkör folyamatos kölcsönhatásban áll egymással, a globális éghajlatváltozás az óceáni cirkulációt is módosíthatja. Az AMOC változásainak vizsgálata bonyolult feladat a kevés rendelkezésre álló műszeres mérés és a múltra vonatkozó rekonstrukciós adatok bizonytalansága miatt. Klímamodell szimulációk alapján az áramlási rendszer lassulása várható a klímaváltozás hatására a század végéig, ami összességében hűvösebb éghajlatot eredményezne Európában, mint napjainkban.

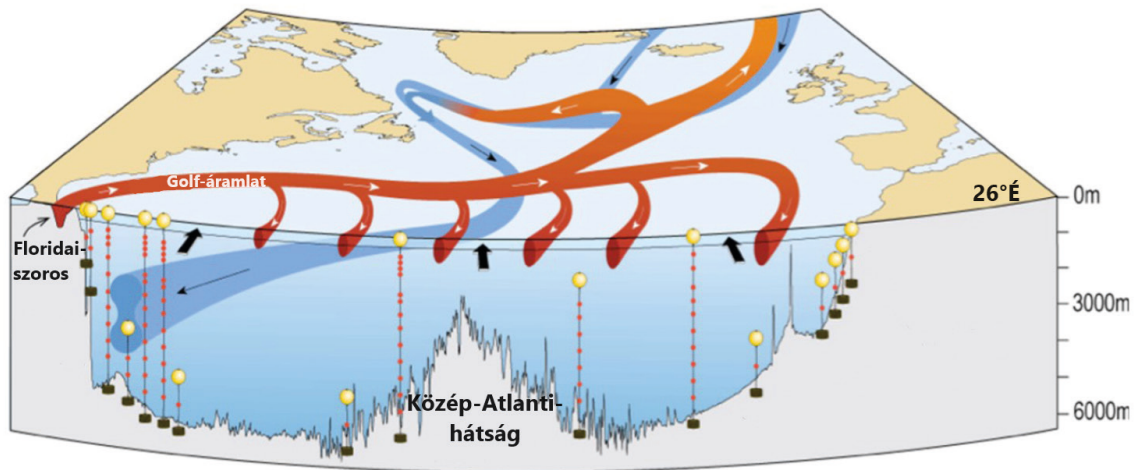
Impact of changes in the circulation system of the Atlantic Ocean on the climate

The Atlantic Meridional Overturning Circulation plays a major role in shaping the climate of our planet, especially in Europe. Because the ocean and atmosphere are in constant interaction, global climate change can also modify the ocean circulation. Investigating changes in the AMOC is a complicated task due to the insufficiency of the instrumental measurements and the uncertainty of historical reconstruction data. Based on climate model simulations AMOC is expected to slow down by the end of the century, which would result in an overall cooler climate in Europe than in present times.

Az Atlanti óceán áramlási rendszere

A légköri és óceáni áramlási rendszerek azért működnek bolygónkon, hogy a Naptól a Föld felszínére érkező, egyenlőtlen arányban eloszló sugárzás miatt fellépő hőmérséklet- és sűrűségkülönbségeket kiegyenlítsék. A két rendszer kölcsönösen, egymásra is hatással van, így az óceáni cirkulációk a szárazföldek klímájában is kulcsfontosságú szerepet játszanak.

Az AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) az Atlanti-óceán fő tengeráramlási rendszere – egy termohalin cirkuláció, ami a hőmérséklet- és a sótartalombeli különbségek kiegyenlítésére törekszik (*1. ábra*). Az Egyenlítő térségében erőteljesebb a besugárzás, emiatt a víz melegebb és az intenzívebb párolgás miatt sósabb, mint a pólusok térségében. A sűrűségkülönbségek kiegyenlítésére a felszíni vízréteg az északi félgömbön észak felé kezd áramlani



1. ábra. Az AMOC áramlási rendszer é.sz. 26°-tól északra. A piros szín a felszíni, meleg áramlatokat, a kék szín a mély, hideg áramlatokat jelöli (McCarthy et al, 2017).

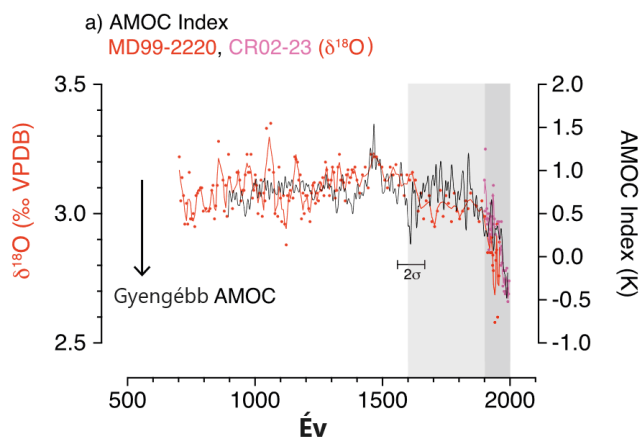
a Golf-áramlattal (a Mexikói-öböl felől Európa nyugati partja irányába), miközben többlet hőjét a légkörnek adja le. Amikor Grönland térségébe ér, már elegendő mértékben lehűl ahhoz, hogy hőmérséklete megegyezzen az óceán fenekén lévő vízrétegével, így itt az áramlás kormányzásában a hőmérséklet elveszti meghatározó szerepét. Helyette a különböző vízrétegek között fellépő sótartalombeli különbségek válnak jelentőssé, melyek vertikális irányú áramlást generálnak. Mivel az egyenlítői eredetű felszíni vízréteg sósabb – s ezáltal nehezebb –, mint a mélységi vízréteg, ezért Grönlandnál a felszíni víz süllyedni kezd, majd a mélyben az Egyenlítő térségéből kiáramló víztömeg pótlására dél felé indul meg. Mivel a leáramlás egy kis területre koncentrálódik, a poláris területek változásai a teljes óceáni cirkulációra hatással lehetnek.

Az északias irányú meleg Észak-atlanti-áramlat a Brit-szigeteken és Európa nyugati partvidékén enyhébb teleket eredményez a hasonló szélességi körökön fekvő kontinentális, partvidéktől távolabb eső térségek időjárásához képest (McCarthy et al., 2017; IPCC, 2021). A jövőben a klímaváltozás hatására bekövetkező magasabb léghőmérsékletek miatt azonban megnőhet a sós tengervízbe beáramló édes olvadékvíz mennyisége a grönlandi térségben, így a felszíni vízréteg veszítene a sótartalmából. Ez által a vízrétegek közötti sűrűségkülönbség is csökkenne, amely a függőleges irányú áramlás intenzitásának gyengülését (az átlagosan szállított víz mennyiségének csökkenését, az áramlás lassulását) eredményezné. Ekkor

az óceáni cirkuláció egyensúlya megbomlana, aminek következtében gyengülne a Golf-áramlat intenzitása is. Mivel ez táplálja az Európa térségébe érkező Észak-atlanti-áramlatot, az is megváltozna, és így az általa nagy mértékben befolyásolt szárazföldi éghajlat is.

Múltbeli változások az AMOC-ban

A több száz, több ezer évvel ezelőtti múltbeli klíma jellemzőinek meghatározására ún. *proxykat* alkalmaznak. Ezek segítségével például fossziliák fizikai, kémiai tulajdonságai alapján becsülhető bizonyos jellemzők lehetséges múltbeli alakulása (Báldi, 2006). Mivel a proxykból kinyert információ nem közvetlenül műszeres mérésekből származik, hanem köztes számításokat is végezni kell bizonyos feltételezések mellett, a megbízhatósága is sokkal kisebb, mint egy mért adatsornak. Az AMOC változásainak feltérképezésére jellemzően a tengerfelszín hőmérsékletét, a tengerszint magasságát és a sótartalmat vizsgálják. Ezekről azonban rendszeres mérések csak a kétezres évek elejétől állnak rendelkezésre, így a távolabbi múltra vonatkozóan ezeket az információkat tengeri üledékek jellemzőinek oxigén- vagy szénizotópos vizsgálatával, méretelemzéssel állítják elő. Az ilyen proxy információ alapján a múltban az AMOC mind erősségében, mind vertikális szerkezetében többször is változáson esett át, s ezek a klímában történt változásokkal is kapcsolatba hozhatók. Az egyik nevezetes klímával kapcsolatos oszcilláció, a Dansgaard-Oeschger ciklusok,



2. ábra. Az AMOC változásai a múltban proxy adatok alapján. Piros és lila pontok és vonal: a 18-as tömegszámú oxigénizotóp koncentrációváltozása különböző vizsgálatok eredményei alapján. Fekete vonal: a oxigénizotópos vizsgálatokból számított AMOC index, amely csökkenése az AMOC intenzitásának gyengülésére utal (Thibodeau et al., 2018).

a legutóbbi jégkorszakban (14–70 ezer évvel ezelőtt) több alkalommal előfordult (Dansgaard et al., 1993). A jégkorszak legintenzívebb periódusában (kb. 20 ezer évvel ezelőtt) az AMOC jelenlegi állapotához képest gyengébb volt, mely az északi félgömbön erőteljes lehűlést eredményezett, míg a déli félgömbön melegebbé hozott. A hemiszférák közti hőmérséklet-különbség azonban éppen azt segítette elő, hogy az AMOC áramlási rendszere újra megerősödjön. A jégkorszak után, kb. 8 ezer év óta az AMOC relatíve stabilnak tekinthető, de időszakos ingadozások továbbra is előfordultak (Gulev et al., 2021).

Az elmúlt évezredet tekintve az AMOC jelenleg a leggyengébb pontján van, a gyengülése feltehetően a 19. század végén kezdődött (2. ábra). A proxy adatok azonban nagy bizonytalansággal terheltek, ugyanis ezeket sok folyamat befolyásolja (pl. a levegő hőmérséklete, a légköri nyomás, a csapadékmennyiség). Emellett további bizonytalanság származik abból is, hogy az AMOC nagy változékonyságú, így a biztos, hosszú távra vonatkozó trend felállítása nehezebb feladat. Az éghajlatváltozás fizikai hátterével és folyamataival foglalkozó IPCC (2021) jelentés emiatt csak alacsony megbízhatóságot társít az elmúlt évszázadban tapasztalt gyengüléshez. 2004-től azonban már direkt mérések is rendelkezésre álltak az AMOC monitorozására, pl. tengeri bóják, műholdas információk. Ezek alapján az atlanti-óceáni áramlás intenzitása ténylegesen gyengült a 2004–2015 időszakban, ám azt, hogy

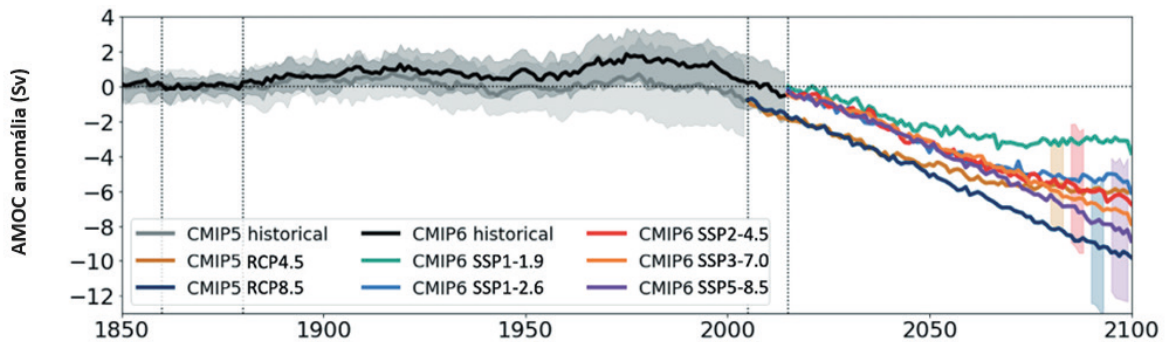
ez a gyengülés egy hosszútávú trend eredménye, vagy csak egy időszakos ingadozás, a rövid mérési időszak miatt egyelőre még nem lehet meghatározni.

Az AMOC múlt- és jövőbeli változásainak vizsgálatára klímamodell szimulációkat is alkalmaznak, így az áramlási rendszer éghajlatváltozással való kapcsolatáról is kaphatunk egy hozzávetőleges képet. A elmúlt években széleskörűen alkalmazott globális szimulációegyüttes (CMIP5) eredményeiben nem volt jelen a proxy adatokból készült rekonstrukcióban a 20. században megmutatkozó AMOC gyengülés (Cheng et al., 2013). Ennek feltehetőleg az a fő oka, hogy a szimulációk (50–350 km-es) felbontása nem kellőképpen finom ahhoz, hogy az AMOC-kal kapcsolatos örvénylő mozgásokat helyesen le tudja írni, s így alábecslik az áramlási rendszer belső változékonyságát. Az újabb, jobb (50–250 km-es) felbontású CMIP6 szimulációk esetében a rekonstrukciókhoz képest ellentétes irányú változás is megjelenik: 1940 és 1985 között az AMOC erősödését mutatják, majd 1990-től jelentkezik egy kisebb gyengülés (Menary et al., 2020). Ezek a szimulációk korszerűbb módon veszik figyelembe az aeroszol részecskék hatását, amelyek nagyobb mértékű időszakos változásokat idéznek elő, ellensúlyozva az üvegházhatású gázok koncentrációnövekedése által keltett változások gyengítő hatását. Az egyes szimulációk között nagy eltérések vannak, ami a modellek bizonytalanságára utal.

Bizonytalansággal terheltek ugyanakkor a rekonstrukciók is: a tenger felszínének hőmérsékletét például az AMOC-on kívül légköri hatások is befolyásolják, a szubpoláris áramlási körben (ahonnan a legtöbb proxy adat származik) egyéb, AMOC-tól független változékonyság is felléphet, például a szél változékonyságának hatására. Az, hogy a szimulációs eredmények és a proxy rekonstrukciók is eltérnek egymástól, tovább nehezíti a múltbeli viszonyok feltérképezését (Eyring et al., 2021; Fox-Kemper et al., 2021).

Jövőbeli projekciók a klímaváltozás tükrében

A CMIP6 modellszimulációk alapján a 19. században elkezdődött AMOC gyengülés a jövőben is folytatódni fog, de hogy milyen időtávon, azt nagyban befolyásolja a választott antropogén kibocsátási scenárió (3. ábra). Az alacsony üvegházhatású gáz kibocsátást feltételező forgatókönyvek alapján 2060 után az AMOC stabilizálódik, és nem gyengül tovább, míg a magas kibocsátással számoló scenáriók esetén az AMOC 2060 után is tovább gyengül. Mivel



3. ábra. AMOC által szállított víztömeg anomáliájának multi-modell átlaga (1 Sv = 109 kg/s) CMIP5 és CMIP6 ensemble alapján, a 35° északi szélességre vonatkozóan (Fox Kemper et al., 2021).

a termohalin cirkuláció erőssége arányos az Atlanti-óceán északi és déli medencéje között fellépő sűrűség- és nyomáskülönbséggel, a két térség jövőbeli melegedésének mértéke és ritmusa fontos meghatározó tényező a cirkuláció intenzitásában, stabilitásában (Weijer et al., 2019). Megfigyelések alapján a poláris területek már eddig is nagyobb mértékben melegedtek, mint az Egyenlítő térsége, és a klímamodellek szerint a két térség közti hőmérsékletkülönbség a jövőben tovább fog csökkenni (Rantanen et al., 2022), így a cirkuláció gyengülése is várható. Kibocsátási scenáriótól függően az AMOC intenzitás csökkenésének várható mértéke kb. 24–39% lesz 2100-ig. Annak az esélye, hogy a cirkuláció teljesen leálljon, és az AMOC rendszere összeomoljon 2100 előtt, a mai modelleredmények alapján kicsi, 2300-ra viszont bekövetkezhet. Itt azonban fontos megjegyezni, hogy a CMIP6 szimulációk nem veszik figyelembe a grönlandi édes olvadékvíz beáramlását, ami több tanulmány szerint is nagy mértékben gyengítheti az AMOC intenzitását, így a leállás esélyét is megnövelheti (Lohmann and Ditlevsen, 2021).

Ditlevsen és Ditlevsen (2023) más módszert alkalmazott az esetleges leállás bekövetkezésének tanulmányozására: vizsgálatukban a Hadley Centre 1870 és 2020 közötti tengerjég- és tengerfelszín-hőmérséklet re-analízis idősorán (Rayner et al., 2003) hajtottak végre elemzéseket. Megközelítési módjuk alapja, hogy úgy tekintik, az AMOC jelenleg egyensúlyi állapotban van, azonban ha egy a folyamatban részt vevő kontroll paraméter (vizsgálatukban az édesvíz Észak-Atlanti -ceánba történő beáramlásának mértéke) elér egy kritikus értéket, a rendszer előbb instabillá válik, majd egy ún. bifurkációs ponton áthaladva új stabil állapot felvételére törekszik. Ekkor következhet be az AMOC teljes leállása, mint új stabil állapot. Az átalakulásnak

azonban vannak figyelmeztető jegyei: olyan statisztikai paraméterek, amelyek közvetlenül az átalakulás előtt változnak meg nagy mértékben. Az AMOC esetében a kritikus mértékű lassulást és a stabilitás csökkenését tekintik ilyen korai jeleknek; az előbbit az autokorreláció, míg az utóbbit a variancia növekedésével számszerűsítik. A szerzők a globális és az északi sarkhoz közeli területek tengerfelszín-hőmérséklet idősorainak vizsgálatával lényegében a bifurkáció időpontját becsülték meg, s arra az eredményre jutottak, hogy az AMOC leállása az évszázad közepére várható (a 95%-os megbízhatóságú időintervallum 2025–2095).

Az AMOC változásának hatása térségünk éghajlatára

Gyakran esik szó arról, hogy az AMOC leállása egyben a Golf-áramlat leállítását jelenti-e. Az óceáni vízkörzésben a Golf-áramlat kettős szerepet tölt be: egyfelől fontos része a sűrűségkülönbségek által vezérelt AMOC-nak, másfelől a szél hajtotta felszíni áramlási rendszerben az atlanti szubtrópusi áramlási kör észak és nyugat felé irányuló ága (4. ábra). A felszíni áramlások önmagukban is zárt rendszert alkotnak, ami az AMOC leállása esetén is megmarad. Paleoklimatológiai és modell vizsgálatok alapján az AMOC teljes leállítására, majd újraindulására volt már példa az elmúlt 12–115 ezer évben. Ennek becsült légköri hatásai (l. alább) nem elhanyagolhatók, de nem vezetnek a teljes óceáni cirkuláció (benne a Golf-áramlat) összeomlásához.

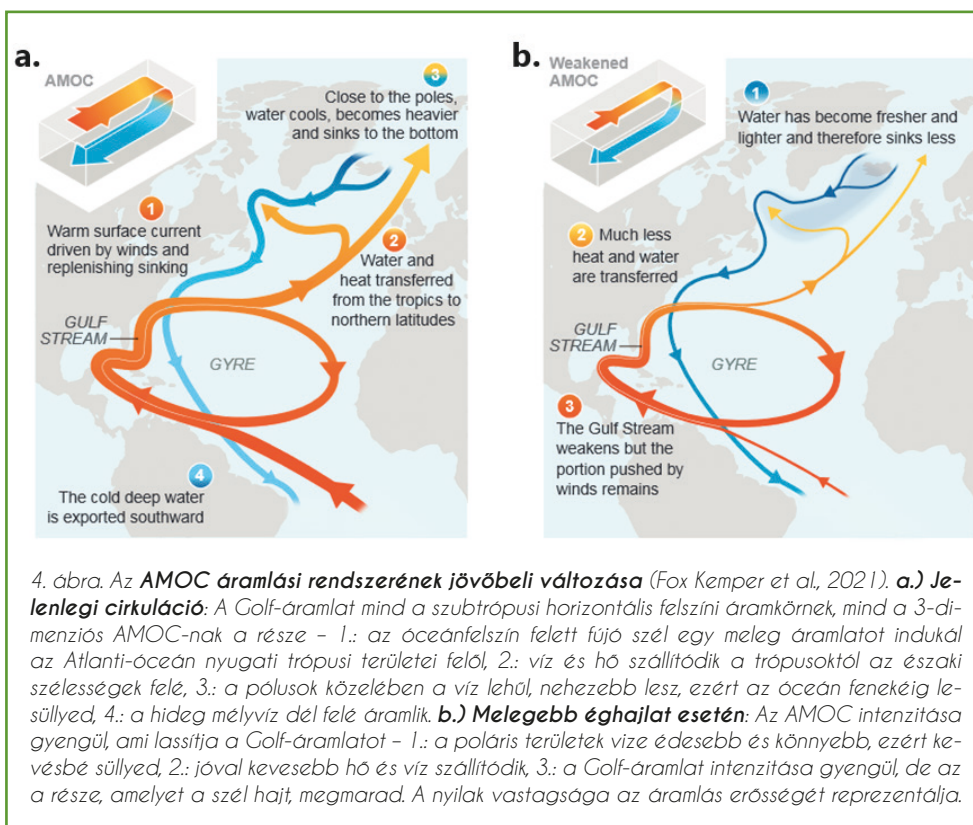
Az AMOC lassulásának folytatódása befolyásolja a jövőbeli éghajlat alakulását. Azt, hogy ez a változás milyen mértékű lenne, klímamodellek szimulációkkal vizsgálhatjuk. A korábban említett globális CMIP5 és CMIP6 szimulációk segítségével hozzávetőleges képet kaphatunk Európa térségének jellemző

égghajlatában fellépő, tengeráramlatok keltette változásokról. Azonban ezeknek a modelleknek a felbontása általában több száz kilométeres, ami túlságosan durva ahhoz, hogy a jelenleg hatását kifejezetten a Kárpát-medencére vonatkozóan pontosan le tudja írni. Ilyen jellegű vizsgálathoz regionális klímamodellek alkalmazása lenne célszerű, amelyek csak kisebb területet fednek le, felbontásuk viszont sokkal finomabb (néhány tíz km), mint a globális modelleké. Mivel a rendelkezésre álló regionális modelleket jelenleg csak 2100-ig futtatják, az AMOC leállása azonban az elő-

rejelzések szerint csak 2100 után következhet be, a leállás hatásának regionális modellekkel történő vizsgálatára egyelőre még nincs lehetőség.

Annak érdekében, hogy az AMOC változásának hatását kifejezetten Európa térségére vonatkozóan ismertetni tudják, *Jackson et al.* (2015) a rendelkezésre álló legfinomabb felbontású (60 km) HadGem3 GC2 (*Hewitt et al.*, 2011; *Williams et al.*, 2015) globális modellt alkalmazta a vizsgálatok elvégzésére. Kísérletükben a tengervíz sótartalmának perturbálásával érzékeltették az édes olvadékvíz beáramlásának a hatását úgy, hogy az AMOC fokozatosan lelassuljon, majd leálljon. A légkör szén-dioxid koncentrációját állandó értéknek vették a teljes időszakra vonatkozóan, így biztosítva, hogy kizárólag az AMOC-ban fellépő változások hatása szerepeljen az eredményekben. Mivel vizsgálatuk nem egy modellegyüttesen, hanem csak egyetlen modellkísérleten alapszik, a bizonytalanság nem mutatkozik meg a végeredményekben, és arról sem kapunk képet, hogy a modellszimuláció milyen jellegű hibákkal lehet terhelve.

Eredményeik azt támasztják alá, hogy az AMOC lassulásának folytatódása Európa jövőbeli klímájára is hatással lenne. A 3-dimenziós áramlási rendszer intenzitás gyengülése önmagában alacsonyabb átlag-



4. ábra. Az AMOC áramlási rendszerének jövőbeli változása (Fox Kemper et al., 2021). **a.) Je-lenlegi cirkuláció:** A Golf-áramlat mind a szubtrópusi horizontális felszíni áramkörnek, mind a 3-dimenziós AMOC-nak a része – 1.: az óceánfelszín felett fújó szél egy meleg áramlatot indukál az Atlanti-óceán nyugati trópusi területei felől, 2.: víz és hő szállítódik a trópusoktól az északi szélességek felé, 3.: a pólusok közelében a víz lehül, nehezebb lesz, ezért az óceán fenekéig lesüllyed, 4.: a hideg mélyvíz dél felé áramlik. **b.) Melegebb éghajlat esetén:** Az AMOC intenzitása gyengül, ami lassítja a Golf-áramlatot – 1.: a poláris területek vize édesebb és könnyebb, ezért kevésbé süllyed, 2.: jóval kevesebb hő és víz szállítódik, 3.: a Golf-áramlat intenzitása gyengül, de az a része, amelyet a szél hajt, megmarad. A nyílak vastagsága az áramlás erősségét reprezentálja.

hőmérsékletet eredményezne a kontinens legnagyobb részén. Míg a nyári csapadékmennyiség általánosságban csökkenne (s így az aszály esélye növekedne), a tél csapadékosabb lenne, és a csapadék nagyobb része hullana hó formájában. A téli megnövekedett csapadékmennyiség főként a téli viharok gyakoriságának növekedésével függene össze. A vegetáció és a végezhető mezőgazdasági tevékenységek a hűvösebb klíma és kisebb rendelkezésre álló vízkészlet miatt csökkenne (*Jackson et al.*, 2015). Ezeknél a következményeknél a globális légköri melegedés hatása nem szerepel, azonban a valóságban mindenképpen fontos ezt is figyelembe venni. Bár a gyengülő AMOC valóban kevesebb hőt fog szállítani Európa térségébe (4. ábra), az évtizedekig töretlenül folytatódó melegedés miatt a légkör több hőt ad majd kontinensünknek. Így összességében a tengeráramlat okozta hűlés sokkal inkább azt eredményezi majd, hogy Európa néhány része lassabban melegedjen, mint ahogyha csak az általános légköri és óceáni felmelegedés játszana szerepet a térség klímájának megváltozásában. Modellszimulációk alapján Európában a változás emellett intenzívebb viharokkal és csökkenő átlagos csapadékmennyiséggel járna (*Fox Kemper et al.*, 2021).

Irodalomjegyzék

- Báldi, K., 2006: Paleohőmérséklet becslésére szolgáló korszerű módszerek ("proxy"-k), a tengeri mikropalantológiában. *Földtani Közlemények* 136, 191–200.
- Cheng, W., Chiang, J.C.H., and Zhang, D., 2013: Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and Historical Simulations. *J. Climat.* 26, 7187–7197. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00496.1>
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, A.E., Jouzel, J., and Bond, G., 1993: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364, 218–220. <https://doi.org/10.1038/364218a0>
- Ditlevsen, P. and Ditlevsen, S., 2023: Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Commun.* 14, 4254. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>
- Eyring, V., N.P. Gillett, K.M. Achuta Rao, R. Barimalala, M. Barreiro Parrillo, N. Bellouin, C. Cassou, P.J. Durack, Y. Kosaka, S. McGregor, S. Min, O. Morgenstern, and Y. Sun, 2021: Human Influence on the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 423–552. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.005>
- Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1211–1362. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaa, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 287–422. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Hewitt, H.T., Copsey, D., Culverwell, I.D., Harris, C.M., Hill, R.S.R., Keen, A.B., McLaren, A.J., and Hunke, E.C., 2011: Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system. *Geosci. Model Develop.* 4, 223–253. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-223-2011>
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Lohmann, J. and Ditlevsen P.D., 2021: Risk of tipping the overturning circulation due to increasing rates of ice melt. *Proc. Acad. Sci.* 118, e2017989118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2017989118>
- Jackson, L.C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M.A., Woollings, T., Mecking, J.V., and Wood, R.A., 2015: Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Clim. Dyn.* 45, 3299–3316. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>
- McCarthy, G., Smeed, D., Cunningham, S., and Roberts, C., 2017: Atlantic Meridional Overturning Circulation. *MCCIP Sci. Review 2017*, 7 pages <https://doi.org/10.14465/2017.ARC10.002-ATL>
- Menary, M.B., Robson, J., Allan, R.P., Booth, B.B.B., Cassou, C., Gastineau, G., Gregory, J., Hodson, D., Jones, C., Mignot, J., Ringer, M., Sutton, R., Wilcox, L., and Zhang, R., 2020: Aerosol-Forced AMOC Changes in CMIP6 Historical Simulations. *Geoph. Res. Lett.* 47, e2020GL088166. <https://doi.org/10.1029/2020GL088166>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., and Laaksonen, A., 2022: The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth & Env.*, 3, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Rayner, N.A., Parker, D., Horton, E.B., Folland, C., Alexander, L., Rowell, D., Kent, E., and Kaplan, A., 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late Nineteenth Century. *J. Geoph. Res.* 108. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Thibodeau, B., Not, C., Zhu, J., Schmittner, A., Noone, D., Tabor, C., Zhang, J., and Liu, Z., 2018: Last Century Warming Over the Canadian Atlantic Shelves Linked to Weak Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Geoph. Res. Lett.* 45, 12,376–12,385. <https://doi.org/10.1029/2018GL080083>
- Weijer, W., Cheng, W., Drijfhout, S.S., Fedorov, A.V., Hu, A., Jackson, L.C., Liu, W., McDonagh, E.L., Mecking, J.V., and Zhang, J., 2019: Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: A Review and Synthesis. *J. of Geoph. Res.: Oceans*, 124, 5336–5375. <https://doi.org/10.1029/2019JC015083>
- Williams, K.D., Harris, C.M., Bodas-Salcedo, A., Camp, J., Comer, R.E., Copsey, D., Fereday, D., Graham, T., Hill, R., Hinton, T., Hyder, P., Ineson, S., Masato, G., Milton, S.F., Roberts, M.J., Rowell, D.P., Sanchez, C., Shelly, A., Sinha, B., Walters, D.N., West, A., Woollings, T., and Xavier, P.K., 2015: The Met Office Global Coupled model 2.0 (GC2) configuration. *Geosci. Model Dev.* 8, 1509–1524. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1509-2015>

Kislexikon

Bifurkáció: egy dinamikai rendszer viselkedésében a kontroll paraméter kritikus értékének elérése után bekövetkező hirtelen kvalitatív változás. *(In: Bordi Sára, Szépszó Gabriella: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra)*

CMIP5: a Coupled Model Intercomparison Project, azaz a kapcsolt (léggöri és óceáni komponens is tartalmazó) globális éghajlati modellekkel készült szimulációk összehasonlításának 5. fázisa. *(In: Bordi Sára, Szépszó Gabriella: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra)*

CMIP6: a Coupled Model Intercomparison Project 6. (legfrissebb) fázisa. *(In: Bordi Sára, Szépszó Gabriella: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra)*

Dansgaard-Oeschger ciklusok: klimatológiai fluktuáció, mely során gyors (néhány évtizedes), erőteljes felmelegedést hosszú ideig (néhány évszázadon át) tartó lehülés követ. *(In: Bordi Sára, Szépszó Gabriella: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra)*

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, azaz Éghajlatváltozási Kormányközi Testület, mely 5–7 évente jelentésekben foglalja össze az ENSZ kormányai számára az éghajlatváltozással kapcsolatos tudományos vizsgálatok eredményeit. *(In: Bordi Sára, Szépszó Gabriella: Az Atlanti-óceán áramlási rendszerében történő változások hatása az éghajlatra)*

A 2023. évi 49. Meteorológiai Tudományos Napok központi témái körüljárták az éghajlatváltozás kihívásait, környezeti, társadalmi és gazdasági következményeit, valamint azt, hogy a különböző területek hogyan reagálnak a változó körülményekre. A program szorosan illeszkedett az éghajlatváltozás hazai vizsgálata során meghatározott célkitűzések, valamint az eddigi kutatások, fejlesztések során elért eredmények bemutatásához, kitérve az egyes témakörök előzményeire is. Az előadások szorosan kapcsolódtak az éghajlatváltozás által előidézett és befolyásolt jelenségek feltárásához, monitorozásához és modellezéséhez, az okozott problémák és azok mértékének bemutatásához, a kockázatok mérséklésére tett válaszok tudományos megalapozottságú tervezéséhez. Az előadások jelentős része az RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium projekt támogatásával jött létre, ezért a Légkör 2024. évi különszámát e projekt előadásainak szenteltük.

A lapban bemutatott cikkeken kívül a tejlenség kedvéért a következő linken elérhető az összes előadás rövid összefoglalója:



https://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2023/49.Meteorologiai_Tudomanyos_Napok_2023-osszefoglalo.pdf

A projekt címe: Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium

Azonosító: RRF-2.3.1-21-2022-00014

A projekt időtartama: 2022. március 1. – 2026. február 28.

Konzorciumvezető: Pannon Egyetem

Konzorciumi tagok: HungaroMet Nonprofit Zrt. (2023-ig: Országos Meteorológiai Szolgálat), Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Miskolci Egyetem, Ökológiai Kutatóközpont, Semmelweis Egyetem

A szerződött támogatás összege: 3 571 000 000 Ft

A HungaroMet feladatainak támogatása: 570 200 000 Ft

Támogatás mértéke: 100%

Projekt szakmai vezetője: dr. Gelencsér András

Projektmenedzser: Morvai Bálint, Rostási Ágnes

HungaroMet kapcsolattartók:

Dr. Szépszó Gabriella szakmai vezető

Konkolyné Bihari Zita alprojektvezető

Fejes Edina alprojektvezető

Buránszkiné dr. Sallai Márta projektmenedzser

Az Éghajlatváltozás Multidiszciplináris Nemzeti Laboratórium a Pannon Egyetem vezetésével hazai egyetemek, kutatóhelyek és a HungaroMet Nonprofit Zrt. (2023-ig: Országos Meteorológiai Szolgálat) szakmai együttműködésével, multidiszciplináris szemléletben, egységes szakmai irányítás mellett valósul meg. A Nemzeti Laboratórium az éghajlatváltozás jellemzőinek vizsgálata és az éghajlatváltozás elemeinek az emberi egészségre, természeti, gazdasági rendszerekre és a társadalomra gyakorolt hatásainak tanulmányozása mellett a technológiai, gazdasági és társadalmi adaptáció területén is végez kutatás-fejlesztési tevékenységet.

Kutatási területek

- Koromrészecskék kutatása; tavi üledékek és bioásványok kutatása;
- Bioakkumulátorok kutatása integrált bioelektrokémiai rendszerek segítségével;
- Döntéstámogató rendszerek fejlesztése; vízellátási problémák kezelése;
- A klímaváltozás gazdasági és üzleti hatásainak kutatása;
- A klímaváltozás társadalmi vonatkozásainak kutatása;
- A klímaváltozás hatása a vízi környezetben zajló kémiai kommunikációra;
- Ökológiai rendszerek változásainak kísérletes vizsgálata; balatoni planktonikus szervezetekre gyakorolt klimatikus hatások vizsgálata;
- Biológiai diverzitás megőrzési kutatások;
- Az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatához szükséges éghajlati adatsorok előállítás;
- Az éghajlatváltozás hatásainak komplex vizsgálatát támogató információs rendszer kialakítása;
- Az éghajlatváltozás hatásainak ismertetéséhez szükséges szolgáltatások és kommunikáció fejlesztése;

- Az éghajlatváltozás hatása a vízciklus „láthatatlan” felszín alatti részére, közvetlen és közvetett ökológiai következmények és adaptáció;
- Az éghajlatváltozás mozgatórugói és környezeti hatásai a Kárpát-medencében: fenntartható tavi ökoszisztémák biztosítása az éghajlatváltozás során;
- Az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálata különböző szektorokban; az éghajlatváltozás és a kültéri/beltéri levegőminőség kapcsolata;
- Atmosphericus és légszennyezési paraméterek akut szív és érrendszeri betegségekre vonatkozó hatásainak vizsgálata;
- Országos klinikai meteorológiai és légszennyezési információs rendszer tartalmi specifikálása a klinikai kutatás fényében;
- Ipari folyamatok CO₂ kibocsátásának csökkentése;
- Környezeti szenzoralapú monitoringhálózat fejlesztése

A HungaroMet Nonprofit Zrt. (2023-ig: OMSZ) feladatai

Az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatához szükséges éghajlati adatsorok előállítása: Az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatához elengedhetetlen a térben és időben jó minőségű meteorológiai alapadatok használata. Célunk, hogy ezeket az alapadatokat a lehető legjobb minőségben, a lehető legrészletesebb időbeli és térbeli felbontásban előállítsuk, folyamatosan frissítsük és a felhasználók számára elérhetővé tegyük. Magyarország területére, a legfontosabb meteorológiai paramétereiből részletes rácspontri adatsorokat állítunk elő mind a mérések felhasználásával az elmúlt és a jelen időszakra, mind a klímamodellek eredményei alapján a jövőre vonatkozóan.

Az éghajlatváltozás hatásainak komplex vizsgálatát támogató

információs rendszer kialakítása: Az éghajlatváltozás hatásainak vizsgálatához elengedhetetlen a térben és időben jó minőségű meteorológiai alapadatok használata. Ugyanakkor a hatásvizsgálók számára sokszor nem elegendők az országos lefedettségű, viszonylag durva felbontású alapadatsorok sem a múltat, sem a jövőt illetően. Munkájukat segítő indikátorokat és egyéb származtatott produktumokat állítunk elő az éghajlatváltozás mindennapi életre, levegőminőségre, városokra, mezőgazdaságra és különböző gazdasági szektorokra gyakorolt hatásainak számszerűsítéséhez.

Az éghajlatváltozás hatásainak ismertetéséhez szükséges szolgál

atások és kommunikáció fejlesztése: A hazánkban már bekövetkezett és a várható éghajlati változások hatással vannak a társadalomra és a gazdaságra is. A meteorológiai szolgálat az országra egyedülállóan hiteles, reprezentatív éghajlati adatokat állít elő. Az alapadatok vagy számított klímaindexek, éghajlati indikátorok nagy mennyisége miatt a felhasználók számára az eredmények értelmezése nehézkessé válhat, ezért a kutatás fő célja, hogy a döntéshozók, a gazdasági szereplők, a különböző szektorok és a lakosság igénye szerint alakítsuk és tegyük közzé az éghajlati információkat. A HungaroMet Nonprofit Zrt. aktív szerepet vállal a régiókat érintő és várható éghajlati trendek kommunikációjában és a lakosság szemléletformálásban is.



ÉGHAJLATVÁLTOZÁS
Nemzeti Laboratórium

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 ÉRDEKESSÉGEK

ELŐREJELZÉS

AKTUÁLIS, MÉRT ADATOK

ÉGHAJLAT

VESZÉLYJELZÉS, RIASZTÁS

LÉGSZENNYEZETTSÉG



HungaroMet
Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.

www.met.hu

Minden információ egy helyen az időjárásról és a meteorológiáról

HUNGAROMET NONPROFIT ZRT.