LÉGKÖR

67. ÉVFOLYAM 1. SZÁM

SÁRGALÁZ SZÚNYOG EURÓPÁBAN

KLÍMAKORMÁNYZÁS

AGRÁRKLÍMA DÖNTÉSTÁMOGATÓ RENDSZER

ÉGHAJLATVÁLTOZÁS ÉS ENEREGIAELLÁTÁS

KLÍMAVÁLTOZÁS A BÜKKÖSÖKBEN

SZÉLSŐSÉGES IDŐJÁRÁS AZ ÁRAMSZOLGÁLTATÁSBAN

A LÉGKÖRI KONVEKCIÓ: ZIVATAROK

2022. MÁRCIUS

Jéggömbök az ónos eső után. A karácsony másnapján kezdődött periódusban a Dél-Alföldön helyenként 20 mm-t is meghaladó ónos eső hullott. Hérincs Dávid, Szatymaz, 2021. december 27.

Hidegfront mögötti rendkívüli átlátszóság. A mihályi evangélikus templom háttérében igen jó kontrasztokkal láthatjuk a 110 km-re lévő Schneeberg vonulatait. Pintér András, Mihályi, 2022. február 25.

LÉGKÖR

67. évfolyam 1. szám
2022. március

AZ
ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT
ÉS A MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG
SZAKMAI TÁJÉKOZTATÓJA

Kiadja az
ORSZÁGOS METEOROLÓGIAI SZOLGÁLAT
1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1.

A kiadásért felel:
Dr. Radics Kornélia
az OMSZ elnöke

Készült:
PREMIER Nyomda

Felelős vezető:
Király Attila

ISSN 0133-3666

Készült 600 példányban

Éves előfizetési díja:
3000 Ft
Megrendelhető a legkor@met.hu címen.

Főszerkesztő: Fejes Edina
Főszerkesztő-helyettes: Tóth Róbert

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

ELNÖK:
Haszpra László

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

Olvasószerkesztő: Szabó Bernadett

Tervezőszerkesztő, grafikus: Szabó Dorottya

TARTALOM

KÖSZÖNTŐ 2

MÁTYÁS CSABA, BIDLÓ ANDRÁS, CZIMBER KORNÉL, GÁLOS BORBÁLA, GRIBOVSZKI ZOLTÁN, FÜHRER ERNŐ, ILLÉS GÁBOR, BOROVICS ATTILA: A klímaváltozáshoz alkalmazkodás támogatása az erdészetben: Az Agrárklíma döntéstámogató rendszer 4
Assistance for adaptive management in forestry: the Agrárklíma decision support system

MÉSZÁROS PÉTER: Az éghajlatváltozás hatása az energiaellátás-biztonságra 12
Effects of climate change on security of energy supply

HUSZÁR ANDRÁS: Az európai klímarendelet hatása a magyar klímakormányzásra 14
The impact of the European Climate Decree on Hungarian climate governance

UJJ APOLKA, JANCSOVSZKA PAULINA, FERNANA RAMOS DIAZ: A klímaváltozás hatásának enyhítése a magyar gazdálkodók agroökológiát támogató gyakorlatában 20
Mitigation of the climate change impacts in the agroecological practices of Hungarian farmers

VISINÉ RAJCZI ESZTER, HOFMANN TAMÁS, ALBERT LEVENTE, MÁTYÁS CSABA: Az előrevetített klímaváltozás hatásának növénykémiai vizsgálata bükk (*Fagus sylvatica* L.) fafajon 28
Phytochemical response of beech (Fagus sylvatica L.) to the effects of projected climate change

TRÁJER ATTILA JÁNOS: A sárgaláz szúnyog populációk múltbeli, közelmúltbeli és jövőbeli éghajlati stabilitásának vizsgálata Európában 34
Investigation of the past, the recent and future climate stability of yellow fever mosquito populations in Europe

HORVÁTH ÁKOS, SIMON ANDRÉ: Az áramszolgáltatást veszélyeztető szélsőséges időjárási helyzetek. III. rész. A légköri konvekció: zivatarok 42
Extreme weather events endangering the power supply. III. section. Atmospheric convection: thunderstorms

SZOLNOKI-TÓTIVÁN BERNADETT: 2021/2022 telének időjárása 53

MARTON ANNAMÁRIA: A 2021. év időjárása 58

HÍREK 66

KISLEXIKON 68

CÍMLAPON: Szilvási Tibor János: Téli ébredés

Kedves Olvasó!

Nemcsak az éghajlat, hanem minden más is folyamatosan változik körülöttünk. A folyóiratoknak is alkalmazkodniuk kell a változásokhoz, hogy megtartsák, bővítsék olvasói körüket. Amellett, hogy folyamatosan napra kész, érdekes tartalmat kell nyújtanunk, időről időre a megjelenés formáját is meg kell újítani. A 67. évfolyamába lépő Légkört lényegesen megváltozott külalakkal veheti kézbe a kedves Olvasó. Más folyóiratokhoz hasonlóan igyekeztünk a Légkört figyelemfelkeltő, tetszetős külsővel felruházni, a tipográfiai változtatásokkal pedig az írásokat áttekinthetőbbé, könnyebben olvashatóvá tenni. A világban fellelhető jó nevű tudományos magazinokhoz hasonlóan az igényes tudományos szakcikkek mellett a Légkör ismeretterjesztő munkákkal is nyitni kíván a meteorológia iránt érdeklődő, de nem feltétlenül meteorológusként tevékenykedők felé. A remélt interdiszciplináris írásokkal olyan szakemberek figyelmét is felkelthetjük, akik eddig a meteorológiai ismereteket esetleg kevésbé hasznosították munkájukban, illetve bővíthetjük a meteorológus közösségben dolgozók ismereteit, bemutathatjuk a meteorológiai információk széles körű hasznosíthatóságát. Bár a természettudományok terén az angol nyelv gyakorlatilag egyeduralkodóvá vált, magyar nyelvű folyóiratként feladatunknak tekintjük a magyar szaknyelv ápolását, fejlesztését is.

A szakcikkek és ismeretterjesztő munkák továbbra is csak szigorú szakmai lektorálás után jelenhetnek meg a Légkörben, ezzel az eljárással garantálva a folyóirat magas tudományos minőségét, a tanulmányok más tudományos folyóiratokban való hivatkozhatóságát. A Magyar Tudományos Művek Tára hivatalos listáján is szerepel a Légkör, így a tudományos előmenetelt megalapozó publikációs tevékenység első lépcsője lehet az eredmények Légkörben történő megjelentetése. A magazin jellegnek megfelelően a Légkörben szakmai útibeszámolók, konferencia-beszámolók, jelentősebb kutatási programok ismertetése mellett rövid hírek is megjelennek majd érdeklődésre számot tartó témákról. Megőrizzük az évszakos időjárási összefoglalót, megemlékezünk szakmánk jelentős személyiségeiről, továbbá beszámolunk az Országos Meteorológiai Szolgálat és a Magyar Meteorológiai Társaság fontosabb eseményeiről.

Bár a tudományos folyóiratok jelentős része ma már csak elektronikusan jelenik meg, a Légkör is elérhető ebben a formában, de úgy gondoljuk, hogy sokan még ma is szívesen fogadják a bármikor kézbe vehető, könnyen lapozgatható, remélhetőleg tetszetősnek talált nyomtatott változatot, amit továbbra is biztosítani szeretnénk Olvasóink számára.

A lappal együtt nagyrészt szintén megújult szerkesztőbizottság köszönetet mond az elődöknek, akik örökül hagyva ránk egy színvonalas szakmai folyóiratot lehetővé tették számunkra a komoly megbecsültséggel rendelkező Légkör továbbvitelét. Ahhoz, hogy méltók lehessünk a hagyományokhoz, szívesen vesszük az olvasók és a jövendő szerzők véleményét, javaslatait.

Szerkesztőbizottság

Gondolatok...

1956 nem csak a forradalom miatt emlékezetes szeretett szakmánk történetében. Annak a mozgalmas évnek az elején indult útjára a Légkör folyóirat az Országos Meteorológiai Intézet (OMI) szakmai tájékoztatójaként. A lap akkor az OMI házinyomdájában készült (1994-ig) 1500 példányban. Elindítója Dési Frigyes, az OMI igazgatója volt, aki egyben ellátta a felelős szerkesztő posztját is. Az akkori szerkesztőbizottság további három tagból állt: Hajósy Ferenc, Antal Emánuel és Szilágyi Tibor. Utóbbi két tag főleg az agrometeorológia területén dolgozott. Amikor 1985-ben beléptem a Szolgálathoz, őket még munkatársaimnak tudhattam. Hamarosan nyolc főre emelkedett a szerkesztőbizottság létszáma, közülük személyesen is volt szerencsém ismerni Zách Alfrédot, Simon Józsefet, Czelnai Rudolfot, valamint Csomor Mihályt, aki évtizedeken át technikai szerkesztőként tevékenykedett, s az ő ösztönzésére írtam meg NDK-gyártmányú Optima írógépen az első cikkemet a Légkörben. A megjelenése nagy büszkeséggel töltött el, mivel 1980 óta vagyok a lap olvasója, s egyetemistaként nem gondoltam, hogy nekem is lesz közlésre érdemes írnivalóm a szakma nagyjainak cikkeivel egy lapban.

Dési 1974-ig volt felelős szerkesztő, az ő ideje alatt a lap fő céljának tekintették a meteorológia népszerűsítését és kapcsolattartást az észlelőhálózattal. Tőle Czelnai Rudolf az OMSZ vezetőjeként vette át a szerkesztőbizottság elnöki tisztét, amit 1979-ig töltött be. Őt követően Ambrózy Pál, a Központi Meteorológiai Intézet igazgatója volt a leghosszabb ideig a lap felelős szerkesztője s egyben a szerkesztőbizottság elnöke. A Légkör 1992-től az Országos Meteorológiai Szolgálat és a Magyar Meteorológiai Társaság szakmai tájékoztatója.

A Légkör 2006-ban kiadott bibliográfiája az első 50 évet dolgozta fel. Ez időszak alatt 486 különböző elsőhelyi szerző cikke jelent meg benne. Ambrózy Pál és Zách Alfréd bizonyultak a legtermékenyebb szerzőknek száznál több írásukkal. Mezősi Miklós 40 éven keresztül tevékenykedett szerkesztőbizottsági tagként 1965-2005 között. Ezt túlszárnyalni Haszpra Lászlónak nyílik esélye leginkább, aki 38 éve tag, esetleg jómagamnak, aki 32 éve szolgálom a lapot.

Pali bácsi 31 év után, 2010-ben Dunkel Zoltánnak adta át a felelős szerkesztő pozíciót, aki a szerkesztőbizottság elnöke is volt, s többnyire az operatív ügyeket és a tördelést is végezte. Az OMSZ elnökeként, majd nyugdíjasként is elkötelezetten dolgozott azon, hogy a Légkör továbbra is szolgálja szakmánk javát, elismertségét. Az általa szerkesztett utolsó szám a 2021. évi 1. szám volt.

Radics Kornélia, az OMSZ elnöke és egyben a Légkör felelős kiadója 2020-ban a lap életében jelentős változásokat tűzött ki célul. Ennek keretében megújult és egyúttal kibővült a szerkesztőbizottság. Fejes Edina kapott főszerkesztői megbízást. A szerkesztőbizottsági tagok Haszpra Lászlót választották a szerkesztőbizottság elnökének. Ezzel e két fontos feladatkör külön válik, ahogy néhányszor a múltban is. Szabó Dorottya személyében grafikusi tapasztalattal rendelkező munkatárs segíti a lap arculatának alakítását. Ez a szám az első, amely már az új külsővel és belső szerkezettel jelenik meg, reményeink szerint mind az olvasók, mind a szerzők megelégedését szolgálva.

Tóth Róbert
főszerkesztő-helyettes

A klímaváltozáshoz alkalmazkodás támogatása az erdészetben: Az Agrárklíma döntéstámogató rendszer

Mátyás Csaba[1], Bidló András[1], Czimber Kornél[1],Gálos Borbála[1], Gribovszki Zoltán[1], Führer Ernő[2], Illés Gábor[2], Borovics Attila[2]

[1]SoE Erdőmérnöki Kar, matyas.csaba@uni-sopron.hu

[2]SoE Erdészeti Tudományos Intézet

A klíma gyors változása az erdőgazdálkodás számára nagy kihívás a hosszú termesztési ciklus miatt. Mára a korábban változatlannak tekintett termőhelyi potenciált dinamikusan változó tényezőként kezeli az erdőtervezés. Az Agrárklíma döntéstámogató rendszer (DTR) ehhez nyújt háttérinformációt. Az előrevetítési időszak választható és a század végéig terjed. A DTR javaslatot tesz fafajválasztásra, becslést ad a várható hozamra és előalkalmazkodott szaporítóanyag-forrásokat is azonosít. A térinformatikai rendszer gazdálkodási területegységre lebontva szolgáltat múlt- és jövőbeli adatot az erdőről. Webes felülete kapcsolható térképi rétegekkel rendelkezik (pl. domborzat, klíma, talaj), térbeli felbontása 1 ha.

Assistance for adaptive management in forestry: the Agrárklíma decision support system

Rapid climate change poses a huge challenge for forestry due to the length of the production cycle. Considered earlier as a static value, the site potential has become a dynamic factor in forest planning. The Agrárklíma decision support system provides background data for estimations. The system proposes suitable tree species, estimates their yield potential and identifies also sources of preadapted populations. Reference climate periods may be selected until 2100. The geoinformatic system provides forest-related data of the past and future by land use units (compartments), based on background maps of 1 ha resolution (geography, soil, climate, hydrology etc.).

Bevezetés

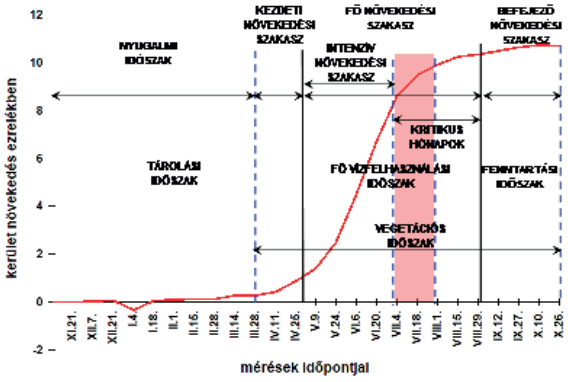
A természetes vegetáció, főleg az erdő megjelenési formája Alexander von Humboldt (1806) óta a klímazónák jellemzésének fontos eszközévé vált. A klímára érzékeny fafajok elterjedési mintázata jól leképezi a klíma változatosságát a Kárpát-medence sík- és dombvidékein is. Valamennyi klíma- ill. erdőzónát jellemző, domináns fafajunk, a bükk, a kocsánytalan tölgy, a gyertyán és a cser, az országhatáron belül eléri elterjedése alsó, azaz a szárazsági határát. Nem meglepő ezért, hogy Magyarországon a termőhelyi potenciál meghatározásának, és az erdészeti tervezésnek alapvető eleme az ún. „erdészeti klímaosztály", ami csaknem 60 éve segíti az erdőtelepítés és -felújítás fafajválasztását és a várható hozam becslését.

A klíma változása az erdészet jelenleg legnagyobb kihívása: az ökológiai és gazdasági fenntarthatóság bizonytalanná vált (*Führer et al.*, 2013; *Mátyás et al.*, 2018). Már az elmúlt évszázad közepe óta kimutatható a zónahatárok elmozdulása klímaérzékeny fafajaink esetében. Világszerte, és Magyarországon is komoly társadalmi visszhangot váltottak ki az utóbbi néhány évtized egyre növekvő erdőkárai (*Csóka et al.*, 2012), amelyek fő kiváltója már bizonyítható módon a klíma megváltozása. Az eddig változatlannak tekintett termőhelyi potenciál az éghajlati zónák eltolódása miatt dinamikusan változó tényezővé vált. Az Agrárklíma DTR a jövőbeni állapot megítéléséhez nyújt háttérinformációt, a tervező és a gazdálkodó számára egyaránt. A változások különösen kritikusak a szárazodással legjobban érintett alföldi területeken, ahol a klíma mellett a hidrológiai viszonyok változása az erdőtenyészet határát jelentősen korlátozni fogja. A tanulmány első része a DTR létrehozását szükségessé tevő *környezeti változásokkal és a jellemzéshez használt lefontosabb klímaindex-szel* ismerteti meg az olvasót.

A termőhelyi potenciált meghatározó klimatikus és hidrológiai tényezők és a változások hatása a hazai erdőtakaróra

A termőhelyi potenciál klimatikus feltételeinek jellemzése a FAI index-szel

A klímaindikátorként kezelt (zonális) fafajok mellett, a termőhelyi feltételek klimatikus jellemzésére korábban egyetlen klímatényező szolgált, a júliusi 14 órai átlagos relatív páratartalom (*Járó*, 1972). A klíma dinamikus változása miatt elsősorban a nedvességhiány, illetve az aszálystressz pontosabb meghatározására van szükség. Ehhez figyelembe kell venni a faállományok növekedési és egészségi állapotát elsősorban befolyásoló időszakok (fő növekedési szakasz: V-VIII. hó; kritikus periódus: VII-VIII. hó) részletesebb adatait (*1. ábra*). A fiziológiai alapon meghatározott, egyszerűsített erdészeti szárazsági mutató (*Forestry Aridity Index: FAI*) olyan meteorológiai jellemzőket vesz figyelembe, amelyeket az országban hosszú idő óta, sok helyen



1. ábra. Erdei fafajok általánosított növekedési görbéje az öko-fiziológiai (vízfelhasználási) szempontból fontos periódusok bemutatásával (Führer, 2018).

rögzítenek, és amelyek térben és időben jól modellezhetők (*Führer*, 2010, 2018; *Führer et al.*, 2011). A *FAI* képlete:

$$FAI = 100*T_{Ø(VII-VIII)}[C^0] / P_{(V+VI+2VII+VIII)}[mm],$$

ahol $T_{Ø(VII-VIII)}$ a kritikus hónapok átlaghőmérséklete, $P_{(V+VI+2VII+VIII)}$ a fő növekedési periódus csapadékösszege, melyben a legmelegebb és legalacsonyabb páratartalmú július csapadéka súlyozva szerepel.

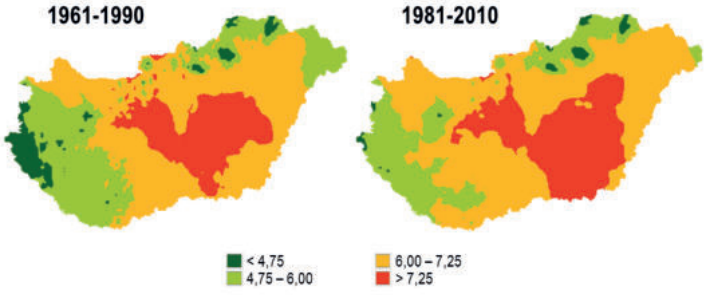
Az 1961-től 2010-ig tartó meteorológiai mérések adatbázisára, továbbá a magyarországi zonális fafajú (klímához kötött) faállományok elterjedésére építve meghúzhatjuk az erdészeti klímaosztályok határait. E szerint a klíma

- bükkös (B), ahol a *FAI* értéke 4,750, vagy az alatti,
- gyertyános-tölgyes (GyT), ahol a *FAI* értéke 4,751 és 6,000 közötti,
- kocsánytalan tölgyes, ill. cseres (KTT-CS), ahol a *FAI* értéke 6,001 és 7,250 közötti, és
- erdős-sztyep (ESZTY), ahol a *FAI* értéke nagyobb, mint 7,250.

Természetesen egy adott erdőrészlet klímabesorolásánál az eltérő mezo- és mikroklimatikus adottságok miatt figyelembe kell venni a klímaperiódus alatti időjárás évenkénti változékonyságát és a szélsőséges események előfordulásának gyakoriságát is.

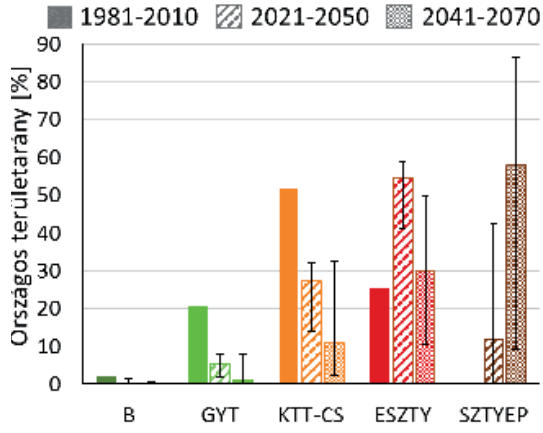
A klímaváltozás hatásai a klímaosztályok területi megoszlására

Az erdészeti szárazsági index (*FAI*) alapján az 1961–1990-es időszakban az ország területének még 5,5%-a bükkös, 28,9%-a gyertyános-tölgyes, 46,5%-a kocsánytalan tölgyes ill. cseres és 19,1%-a erdős-sztyep klímájú volt. 20 évvel később, az 1981-től 2010-ig terjedő időszakban a változás egyértelműen kedvezőtlen irányú. Amíg a bükkös klímakategória aránya 2,1%-ra, a gyertyános-tölgyesé pedig 21%-ra csökkent, addig a kocsánytalan tölgyes ill. cseres klímaosztály területe 51,8%-ra, az erdős-sztyepé pedig 25,1%-ra növekedett (*2. ábra*).



2. ábra. Erdészeti klímaosztályok eltolódása az 1961-1990 és az 1981-2010 időszakok átlagos FAI-értékei alapján. Magyarázat a szövegben (Führer, 2018).

Az A1B kibocsátási forgatókönyv feltételezésével a 21. századra futtatott modellek átlagos előrebecsléseit a *3. ábra* mutatja. Eszerint drasztikusan csökken a bükkös, a gyertyános-tölgyes és a kocsánytalan tölgyes, illetve cseres klímaosztályok területe, míg az erdős-sztyep klímaosztályé jelentősen nő. E helyzetképet tovább rontja, hogy az eddigi erdősült klímaosztályok területéből a 2021–2050-es időszakra több mint 10%-nyi, a 2041–2070-es időszakra pedig csaknem 60%-nyi már a sztyep klíma megjelenését vetíti előre (*Gálos* és *Führer*, 2018). A sztyep klímaosztály erdőtervezéséhez viszont tudni kell, hogy ha ott a termesztésbe vont fafajok számára egyéb vízforrás nem áll rendelkezésre, akkor a mai erdészeti fogalmaknak megfelelő erdőtakaró fenntartása kétségessé válhat.



3. ábra. Az erdészeti klímaosztályok országos területaránya 1981-2010-ben (telt oszlopok), valamint az A1B kibocsátási forgatókönyv szerinti modellszimulációk eredményei két időszakra (mintás oszlopok). Hibasávok: a modelleredmények 66%-a (Gálos - Führer, 2018).

Az erdőket érintő hidrológiai változások

Az elmúlt évtizedek klimatikus változásai egyre gyorsuló ütemben módosítják a hidrológiai ciklust, valamint a vízkészletek állapotát (*Nováky* és *Bálint*, 2013). Az erdős-sztyep és sztyep klímájú területek terjedése meg fogja növelni a többletvízformák jelentőségét, és ezek jelenlegi 20%-os részaránya a jövőben várhatóan csökkenni fog. A többletvizek közül kiemelten fontos kérdés a talajvízviszonyok változása. Az 1960-as évekre vonatkozó modellezéssel előállított talajvíztérképpel összehasonlítva a jelent (*Kovács et al.*, 2015) megállapítható, hogy középhegységeinkben a lejtők lábánál és a mélyebb völgyekben a szivárgó vízű termőhelyek területe a jövőben tovább fog csökkenni. A síksági területeinken jellemzően 0–1 m közötti talajvízszint csökkenés jelentkezhet (a Duna-Tisza közén ennél lényegesen nagyobb értékeket mértek). A csökkenés a talajvíztől függő erdők hidrológiai viszonyait valószínűleg átrendezi: már fél méteres változás is kategóriaváltást jelenthet. Mindamellett, a talajvízszint becslése soktényezős és bizonytalan, a klimatikus hatások és a felszínborítás változás mellett a mesterséges vízkivételeknek igen nagy jelentősége van (*Pálfai*, 2010).

A többletvízhatástól független termőhelyek vízgazdálkodását elsősorban a talajok víztározóképessége (mechanikai összetétel) és a termőréteg

mélysége befolyásolja a jövőben is. Utóbbi esetében a gyökérmélység és annak lehetséges növekedése kulcskérdés lehet.

Az Agrárklíma DTR alkalmazása az erdészeti gyakorlatban

Az Agrárklíma DTR célkitűzései és működése

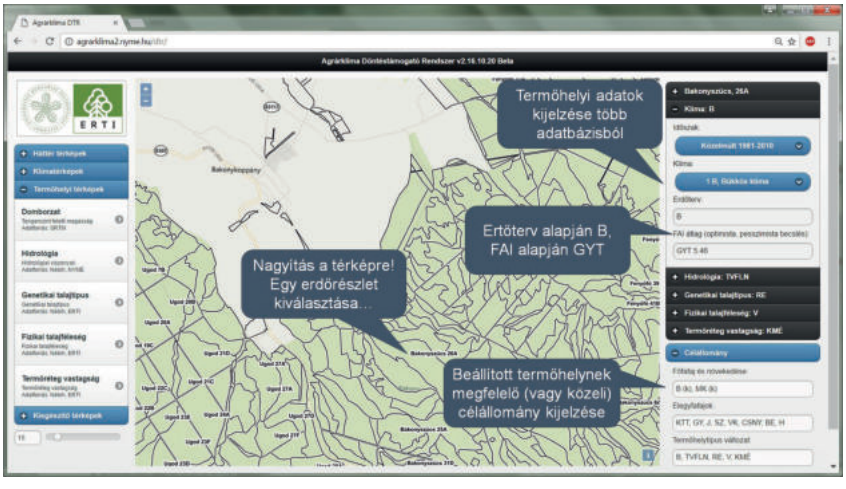
Az elmúlt évtizedekben számos országban fejlesztettek ki erdészeti döntéstámogató rendszereket (DTR). Ilyen DTR-nek tekinthető a *Járó Z.* (1972) koncepciója alapján kidolgozott, évtizedek óta alkalmazott szakértői rendszer is (*Wisnovszky*, 2005). Az Agrárklíma erdészeti DTR-fejlesztés egy olyan stratégiai és dinamikus rendszer kialakítására irányul, amely képes a rendelkezésre álló termőhelyi és hozam adatok alapján előrebecsülni a jövő feltételeit, hogy az adott helyszínen biztonságosan termeszthető fajok, populációk kiválasztásával és hozamuk előrejelzésével segítse a gazdálkodókat (*Mátyás*, 2017). A webes fejlesztés lehetővé teszi a tájékozódást a kockázatok megítélésében, alkalmazkodási és kárenyhítési stratégiák megválasztásában, helyi és országos szinten egyaránt. A moduláris felépítés (*4. ábra*) alkalmat nyújt a felhasznált adatbázisok aktualizálására vagy akár cseréjére is, pl. a felhasznált klímamodellek tekintetében.

A DTR újdonsága, hogy a térinformatikai rendszer konkrét területegységenként szolgáltat múlt- és jövőbeli adatokat a gazdálkodónak. Az előrevetítési időszak választható és a század végéig terjed. Webes felülete kapcsolható térképi rétegekkel rendelkezik (pl. domborzat, klíma, talaj, vízellátás stb.), térbeli felbontása 1 ha.

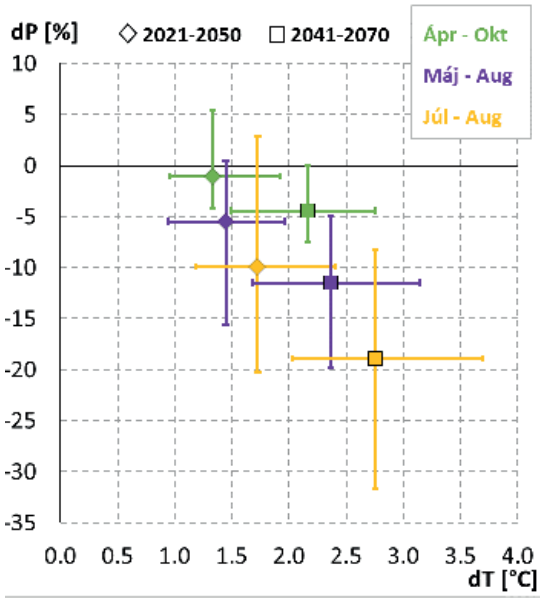
A DTR felhasználója kiválaszthatja a helyszínt és az időszakot, amelyre az értékelést kéri. A rendszer a megadott helyre és tervezési időszakra a meglévő adatbázisok alapján becslést ad a termőhelyi feltételekre és a termeszthető fajok növekedési-fatermési kilátásaira. Ezek az adatok a DTR használatakor vizuálisan megjelennek a képernyőn (*4. ábra*). Lehetőség van – a helyszíni viszonyok ismeretében – a rendszer által felkínált adatok módosítására és az új adatokon alapuló becslés futtatására.

A DTR termőhelyi adatbázis moduljai

Klímaadatok. A DTR-ben elérhető klímafelületeken a múlt (1961–1990, 1981–2010) hőmérséklet- és csapadékviszonyait a CARPATCLIM adatbázis (*www.carpatclim-eu.org*) alapján jellemeztük. A rendszer a kijelölt helyszínre meghatározza a *FAI* alapján definiált erdészeti klímaosztályt, amely megfelelően alátámasztott információk esetén helyesbíthető. A várható klíma becslése 12 regionális klímamodell szimuláció (*www.ensembles-eu.org*) eredményeinek együttes elemzésével történt, az IPCC A1B kibocsátási forgatókönyvének feltételezésével, három időszakra (2021–2050, 2041–2070 és 2071–2100). A jövőbeni változások nagyságát az 1981–2010-es referencia-periódushoz képest állapítottuk meg. Meghatároztuk a szimulációk átlagos eredményét, valamint a valószínű változás tartományát, mely az IPCC definíciója alapján a modelleredmények 66%-át tartalmazza.



4. ábra. A DTR a képernyőn: a kiválasztott erdőrészletre (itt: Bakonyszűcs 26a) kijelzi az Adattár eddigi adatait, valamint az előrevetített klímára (itt: GYT, FAI: 5,46) érvényes fafaj-javaslatot (főfajok: bükk és/vagy magaskőris, mindkettőre közepes hozamot jelez előre) (Czimber K., eredeti).



5. ábra. A vegetációs időszak (ápr – okt), a fő növekedési szakasz (máj – aug) és a kritikus hónapok (júl – aug) átlaghőmérsékletének (dT) és csapadékösszegének (dP) várható változása az 1981-2010-es referencia periódushoz képest. Elemzett régió: Nyugat-Zselic, GYT klíma. Hibasávok: a modelleredmények 66%-a (Gálos - Führer, 2018).

Az elemzett körzetektől függetlenül, a fafajok számára meghatározó hónapok átlaghőmérséklete az 1981–2010-es időszakhoz képest szignifikáns növekedést mutat. Minden vizsgált jövőbeli periódusban a fák egészségi állapota és növekedése szempontjából kritikus hónapok (július-augusztus) hőmérséklete emelkedik a legjobban, és a modelleredmények szórása ellenére ezekben a hónapokban várható a legnagyobb csapadékcsökkenés (*5. ábra*).

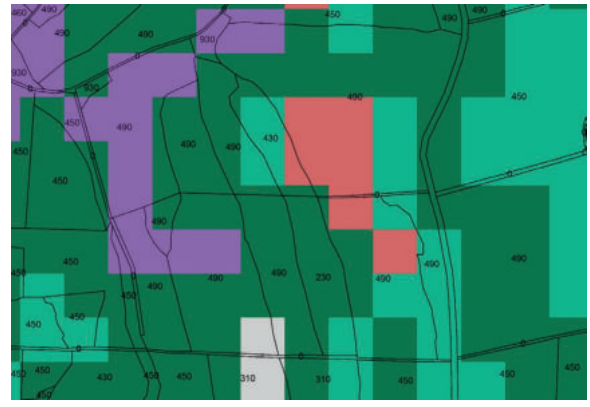
Az erdők szempontjából aszályos évek gyakoriságát szintén a *FAI* segítségével definiáltuk és becsültük. A 21. század közepére nemcsak gyakoribbak, hanem szélsőségesebbek is lehetnek azok a periódusok, melyekben a fő növekedési időszak jelentősen szárazabb és melegebb, mint az 1981–2010-es átlag (*Gálos* és *Führer*, 2018).

A DTR az újabb klímaprojekciókkal folyamatosan frissíthető. Újabb elemzéseink szerint az RCP4.5 és az RCP8.5 szcenáriókra futtatott modellek eredményei is egyértelműen jelzik az aridítás fokozódását és a jövedelmező erdőgazdálkodásra kevésbé alkalmas területek jelentős növekedését.

Talajadatok. A DTR a talaj tulajdonságok közül jelenleg külön modulban kezeli a genetikai talajtípust, a talajok fizikai féleségét, illetve a termőréteg vastagságát (*4. ábra*). A klímaváltozás miatt, fokozottan előtérbe kerül a talaj vízháztartásának, víztározó képességének a kérdése. A hosszabb-rövidebb aszályos, illetve forró időszakokat az erdő fái csak akkor képesek „átvészelni", ha a talaj megfelelő víztározó képességgel rendelkezik (*Bidló et al.*, 2018). Ezért a rendszerben a fizikai talajféleség és genetikai talajtípus leíró adatai helyett a becsült víztározó képesség értéke szerepel.

A DTR talajadatainak elsődleges forrása az Erdőállomány Adattár, amely minden hazai erdőrészletre kiterjedően tartalmaz a talajra vonatkozó adatokat. Ezen adatállomány legfőbb előnye, hogy országos lefedettségű, hátránya viszont az, hogy a rendelkezésre álló adatok megbízhatósága eltérő (becsült vagy mért adatok), csak egész erdőrészletre vonatkozó „átlagos" adatok állnak rendelkezésre, továbbá a jelenlegi erdőn kívüli területekről nem tartalmaz adatot.

Az Agrárklíma DTR fejlesztése keretében egységes, a mező- és az erdőgazdálkodási adatbázisok egyesítésével és a környezeti változók felhasználásával részletes digitális talajtérképet szerkesztettünk (*Illés et. al.*, 2016), amely az ország egész területére tartalmazza a genetikai talajtípusokat, 1 ha-os felbontásban (*6. ábra*). A fejlesztéshez



6. ábra. A talaj adatbázis digitális finomítása a DTR-ben. Az Erdőállomány Adattár talajtípus-térképén (fekete határok és kódjelek) a DTR 1 ha-os felbontású, pontosított adatait színezés mutatja. Mintapélda: az Adattár karbonátmaradványos barna erdőtalaját (kódjel: 490) a DTR csak a vörös négyzetekben jelzi (Hőgyész, Tolna m.; Illés G., eredeti).

pontszerű felvételi adatokat (több tízezer pontot), illetve digitális térképi adatokat használtunk fel. E térkép (illetve a hozzá tartozó adatbázis) nagyban megkönnyíti egy-egy nagyobb terület értékelését és az előrejelzések elkészítését.

A digitális térképi adatállományok tartalmazzák továbbá az ország domborzatmodelljét, a földtani és a talajvíz adatokat, a klimatikus és földhasználati térképi fedvényeket. Tájékoztató adatként pedig rendelkezésre állnak még a becsült humusz- és mésztartalom-, valamint a kémhatás gyakorlatban alkalmazott besorolási kategóriái is. Mivel az adatbázisokban szereplő adatok nem mindig pontosak, a jövőben sem tekinthetünk el a helyszíni termőhelyfeltárás, ezen belül pedig a talajvizsgálatok végzésétől.

Hidrológia. A DTR 1 × 1 km-es felbontású hidrológiai térképének készítéséhez az MGFI által a 2000-es évekre készített talajvíztérképet, a BMGE-n készült aktuális párolgástérképet (*Szilágyi* és *Kovács*, 2010) és az agrotopográfiai térképet használtuk fel. Jövőbeli bizonytalanságuk miatt az aktuális talajvízviszonyok pontosítása helyi terepi vizsgálatok útján ugyancsak ajánlott.

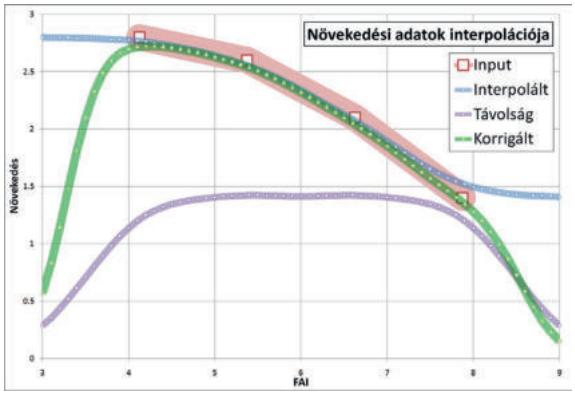
A fafajválasztást támogató háttéradatok

A DTR az erdészeti termőhely-értékelés fő paraméterei alapján tesz javaslatot a fafajválasztásra. A klimatikus és hidrológiai változások miatt azonban olyan új termőhelytípus-változatok is létrejönnek, amelyekre a korábbi szakértői táblák nem adnak javaslatot. Ezek nagy része a klíma „eltolódásából" adódik, miáltal olyan talajtípusok kerülnek egy-egy erdészeti klímaosztályba, amelyek korábban abban nem szerepeltek. Új helyzetet idéznek elő az eddigi négy klímaosztály mellett megjelenő sztyep termőhelyi viszonyai, melyek erdészeti megítélésére jelenleg hiányoznak a tapasztalatok. A DTR fejlesztésének fontos célja volt, hogy ezen új termőhely-kombinációkra is tegyen javaslatot. Ehhez a fatermőképesség és a termőhely kapcsolatának becslését két irányból közelítettük meg.

Statisztikai modellezés. A tapasztalati alapon rendelkezésre álló, rendszeres terepi adatgyűjtésből építkező Erdőállomány Adattár, és a termőhelyi adottságokat modellező háttér adatait együttesen modelleztük. A modellek validációjára a faállományok növekedésének részletesebb megfigyelésére létesített monitoring (FNM-hálózat) állandósított pontjait használtuk. Az FNM pontok adataihoz képest a statisztikai modell becslési pontossága ± 1 fatermési osztályon belül maradt.

Előrebecslés gépi tanulással. A fatermőképesség (hozam) előrebecsléséhez a szakértői célállomány-táblázatok (*Wisnovszky*, 2005) adatainak digitális általánosítására volt szükség. (A „célállomány" a termőhelynek megfelelő, erdészeti hasznosítású állomány típusa.) A klímaváltozás következtében várható új termőhelyi változó-kombinációk esetében a tapasztalatokkal nem kellően feltölthető hiányok kitöltésére, valamint a célállomány táblázatok digitális általánosítására kidolgoztunk egy gépi tanulási módszert, amely a táblázatok adataiból indul ki, azok adataiból tanul, és a tanulási folyamat végén fafaj- és növekedésbecslést ad. Elsőként valamennyi termőhelytípus-változati tényezőt mennyiségi értékekre váltottuk. A klímaosztály esetében a lokális *FAI* index-szel, a termőréteg-vastagság esetében a konkrét mélységgel, a fizikai talajféleség és genetikai talajtípusnál a becsült víztározó képességgel helyettesítettük a kategóriákat. A hidrológiai viszonyokat tekintve első körben csak a többletvízhatástól független termőhelyekkel foglalkoztunk. A jó-közepes-gyenge növekedéstrendet 3, 2, 1 értékekkel helyettesítettük.

A gépi tanulási módszer a kvantifikált adatok alapján egy ötdimenziós termőhelytípusváltozat-térben (*4. ábra*) keresi a legközelebbi öt célállományt, és távolságkernelek segítségével súlyozza azok növekedését (*7. ábra*). A módszer célállományonként súlyoz, és csak a tanításra használt adatsoroktól való távolságszámítás és súlyozás után választja ki a legközelebbi öt célállományt. A módszer kimenete egy lista, minden erdészeti szempontból fontos, a jelenben és a jövőben valószínűsíthető termőhely típus-változatra, amely tartalmazza a legközelebbi öt (vagy kevesebb) célállományt, azok várható számszerűsített növekedését, valamint egy egész számot, hogy a növedékbecslés hány közeli adatsor alapján történt



7. ábra. A növekedés/hozam modellezése egyetlen jellemző, a FAI index alapján. Az ábrán a kocsánytalan tölgy szakértői táblákból levezetett növekedési adatai interpolációja (kék), valamint a távolsággal (lila) korrigált interpolációja (zöld) látható (Czimber K., eredeti).

A rendszert felkészítettük az ötödikként belépő sztyep klímára történő becslésekre is (*Czimber* és *Gálos*, 2016).

Előalkalmazkodott szaporítóanyag-források azonosítása

A klímaváltozás gyorsasága a nagyon hosszú életciklusú erdei fafajok esetében nemcsak a természetes alkalmazkodóképességet haladja meg, de a tolerancia nemesítés útján való javítására sem ad lehetőséget (eltekintve az ültetvényesen termesztett klónoktól). Ezért a klímatolerancia javításának egyik fontos lehetősége az előalkalmazkodott populációk mesterséges áttelepítése, amely a természetes körülmények között jóval hosszabb időtávlatban lezajló fajvándorlás felgyorsítása (*támogatott migráció*). Előalkalmazkodottnak tekintjük azt a populációt, amely ahhoz a helyi klímához alkalmazkodott, amely a felújításra tervezett területen, a kiválasztott jövőbeni referencia időszakban várható. A DTR egy applikációja lehetővé teszi az előalkalmazkodott populációk szaporítóanyag-forrásai azonosítását egy kiválasztott helyszínre. A webes alkalmazás a felújítandó helyszín jövőbeni klímájának megfelelő szaporítóanyag-forrásokat nemcsak az ország területén, hanem az adott fafaj teljes elterjedési területén belül keresi és azonosítja (*8. ábra*).

A hazai támogatáspolitika is ösztönzi a gazdálkodókat az *„erdei ökoszisztémák ellenálló képességének és környezeti értékének növelését célzó beruházások”* című pályázati lehetőséggel, és a „klímarezisztens” szaporítóanyag-források alkalmazásának logisztikai többletköltségeit jelentős, akár 1000 Euró/ha-t meghaladó összeggel támogatja. Például a kocsánytalan tölgy esetében, hektáronként legalább 4000 db csemete ültetése vagy 200 kg/ha tölgy makk vetése esetén több mint 800 Euró/ha támogatás vehető igénybe (*Benke* és *Borovics*, 2019).

8. ábra. Szaporítóanyag-források azonosítása a DTR-el. Egy pilisi erdőrészlet (! jelnél) felújításához „előalkalmazkodott” csertölgy szaporítóanyag forrást azonosít a rendszer hazai magtermelő állományokban (Δ), illetve a határokon túl (megfelelő: kék, alkalmatlan: piros). A jövőbeli referencia időszak a 2050-re átlagolt klíma (forrás: SoE ERTI).

Az Agrárklíma DTR adatai a NATéR-ben

A DTR fejlesztése során kapott erdészeti eredményeket a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer (NATéR) rendszerében is elhelyeztük (*Selmeczi et al.*, 2016; www.agrater.hu). A SoE ERTI munkatársai a CIVAS modell megközelítését használva, termőhelyi alapon becsülték a fafajok változásokkal szembeni érzékenységét, valamint értékelték a termőhelyi tartalékokban, a kor-, és fajszerkezetben mutatkozó adaptációs lehetőségeket. A fenti elemek összesített értékelése alapján kialakítottak egy erdő-sérülékenységi indikátort. A NATéR rendszerébe a fenti adatok 1 km-es térbeli felbontással, a klímaosztály eltolódási adatok 10 km-es térbeli felbontással kerültek be.

Összefoglalás

Az Agrárklíma DTR az erdészeti kutatás legújabb innovációja. Alkalmazása lehetővé teszi a termőhelyi feltételek jövőbeni alakulásának finom léptékű követését, bármely kiválasztott helyszínre vonatkoztatva. Javaslatot szolgáltat a hosszú távon fenntartható fafajokra, várható hozamukra, és akár a gazdálkodás módjára is. A körzeti erdőtervek megújítása során ma már alkalmazzák az Agrárklíma DTR-t. A rendszer részletes tartalmát és szakmai hátterét az Erdészeti Lapok 2017 áprilisa és 2018 januárja közötti számaiban, Mátyás Csaba szerkesztésében megjelent „A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai – I-VIII" című cikksorozat mutatja be.

Az Agrárklíma döntéstámogató rendszer jelenlegi továbbfejlesztési fázisában elsősorban a gyakorlati bevezetés terepi tesztelésével foglalkoznak a SoE ERTI kutatói, különösen a jövő klíma-forgatókönyveire megállapított, újszerű termőhelyi viszonyokkal kapcsolatban. Az elkészült szoftver az érdeklődők számára is hozzáférhető lesz, jelenleg még csak részleteiben megnyitható. A rendszerről és a „klímarezisztens szaporítóanyag" kereső szoftverről további információk a SoE ERTI honlapján (ertigis.hu; naik – erti geoportál) érhetők el.

Köszönetnyilvánítás. Az ismertetett kutatási és fejlesztési eredmények legnagyobb részét az Agrárklíma.2 VKSz-12-13-0034 sz.kutatási projekt támogatása alapozta meg.

Irodalom

Benke A., Borovics, A., Cseke K., Keserű Zs. és *Nagy L.*, 2019: Erdészeti nemesítési és genetikai eredmények a Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központban. In (Szerk.: *Karsai, I.*), A magyar növénynemesítés eredményei az ezredfordulón (1990–2018). Agroinform Kiadó, Budapest, 111–120.

Bidló A. és *Horváth A.*, 2018: Talajok szerepe a klímaváltozásban. *Erdészettud. Közlem. 8*, 57–71.

Czimber, K. and *Gálos, B.*, 2016: A new decision support system to analyse the impacts of climate change on the Hungarian forestry and agricultural sectors, *Scand. J. Forest Res. 31*, 664–673.

Csóka Gy., Hirka A. és *Szőcs L.*, 2012: Rovar- globalizáció a magyar erdőkben. *Erdészettud. Közlem. 2*, 187–198.

Führer E., 2010: A fák növekedése és a klíma. *„KLÍMA-21" Füzetek 61*, 98–107.

Führer E., 2018: A klímaértékelés erdészeti vonatkozásai. *Erdészettud. Közlem. 8*, 27–42. DOI:10.17164/EK.2018.002

Führer, E., Horváth, L., Jagodics, A., Machon, A., and *Szabados, I.*, 2011: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás 115(3)*, 205–216.

Führer, E., Jagodics, A., Juhász, I., Marosi, Gy. and *Horváth, L.*, 2013: Ecological and economical impacts of climate change on Hungarian forestry practice. *Időjárás 117(2)*, 159-174.

Gálos B. és *Führer E.*, 2018: A klímaértékelés erdészeti célú előrevetítése. *Erdészettud. Közlem. 8(1)*, 43–55. https://doi.org/10.17164/EK.2018.003

Illés G., Fonyó T., Pásztor L., Bakacsi Zs., Laborczi, A., Szatmári, G. és *Szabó J.*, 2016: Az Agrárklíma.2 projekt eredményei: Magyarország digitális talajtípus térképének előállítása, *Erdészettud. Közlem. 6*, 17–24.

Járó Z., 1972: A termőhely fogalma. In (Szerk.: *Danszky I.*), Erdőművelés I. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 47–87.

Kovács A., Szőcs T., Tóth Gy., Marton A., Kun É. és *Kerékgyártó, T.*, 2015: A talajvíz klímaérzékenységének modellezése a NATéR projekt keretei között. MFGI Kutatási jelentés.

Mátyás Cs., 2017: Az eDTR alapvető célkitűzései és működése. *Erdészeti Lapok 152(11)*, 306–307.

Mátyás, Cs., Berki, I., Bidló, A., Csóka, Gy., Czimber K., Führer, E., Gálos, B., Gribovszki, Z., Illés, G., Hirka, A., and *Somogyi, Z.*, 2018: Sustainability of forest cover under climate change on the temperate-continental xeric limits. *Forests 9*, 489; 32. https://doi.org/10.3390/f9080489

Nováky, B. and *Bálint, G.*, 2013: Shifts and modification of the hydrological regime under climate change in Hungary. In (Ed.: *Singh, B.R.*), Climate change – Realities, impacts over ice cap, sea level and risks. InTech 163–190. https://doi.org/10.5772/54768

Pálfai I., 2010: A Duna - Tisza közi hátság vízgazdálkodási sajátosságai. *Hidrológiai Közlöny 90*, 40–44.

Selmeczi P., Pálvölgyi T. és *Czira, T.*, 2016: Az éghajlati sérülékenységvizsgálat elemzési-értékelési módszertana. In (Szerk.: *Pálvölgyi, T.* és *Selmeczi, T*) 2016: Tudásmegosztás, alkalmazkodás és éghajlatváltozás. A MFGI kutatási-fejlesztési eredményei a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer létrehozására. MFGI, Budapest, 25–29.

Szilágyi, J. és *Kovács, Á.*, 2010: Complementary relationship-based evapotranspiration mapping (cremap) technique for Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering 54*, 95–100. https://doi.org/10.3311/pp.ci.2010-2.04

Wisnovszky K., (szerk.) 2005: Az egyes termőhelytípus-változatokon alkalmazható célállományok és azok várható növekedése. Áll. Erdészeti Szolgálat (ÁESz), Budapest.

Az éghajlatváltozás hatása az energiaellátás-biztonságra

Mészáros Péter
Pannon Egyetem Gazdaságtudományi Kar, petervonmeszaros@gmail.com

Az éghajlatváltozás hatásait általában véve hosszú távon érzékeljük, de olyan energetikai rendszereknek – amelyek komoly tervezési és előkészítési munkákat igényelnek – szükséges feltétele, hogy a működési környezet és az ebben a cikkben ismertetett folyamatok és azok hatásai alapján következtetéseket és megoldásokat előre meghatározzuk.

Effects of climate change on security of energy supply

The effects of climate change are generally perceived in the long term, but for energy systems that require serious planning and preparation work, it is a prerequisite to determine conclusions and solutions in advance based on the operating environment and the processes and impacts described in this article.

Joggal vetődik fel a kérdés, hogy a címben ismertetett energiaellátás biztonság hogyan kapcsolódik közvetlenül vagy közvetetten az éghajlathoz és annak változásához. Az elektromosság feltalálása és kezdeti hasznosítása óta tudjuk, hogy az emberiségnek az igényei ellátásához elektromos áramra van szüksége. E mennyiségnek ismertek a fizikai korlátai és összefüggései, amelyből az egyik legszigorúbb, hogy a termelt és az elfogyasztott energiamennyiségnek egyensúlyban kell lenni, azaz pontosan annyi energiát kell megtermelni, amit el is fogyasztunk. Ebben villamos ipari szempontból a frekvencia és a feszültség minimális ingadozásának lehetősége enged némi rugalmasságot, de ettől még a feltétel méréstechnikai szempontból is nagyon szigorú. A nominált teljesítményű energiatermelő rendszerek irányítástechnikai alapelvek mentén alapjellel vezérelve termelnek, előre menetrendezett terv alapján. Ellentétben a nem nominált teljesítményű termelő rendszerek (nap, szél, kishozamú víz, kishozamú geotermikus) a környezeti hatásoknak és főként az időjárásnak a függvényében termelnek, vagy ami jelen esetben még érdekesebb, nem termelnek. A jelenlegi energiatárolási kapacitás hiányában nem lehetséges a túltermelés hazai sőt, európai szinten sem. 2020-ban nemzeti és európai szinten is többször álltunk közel a teljes black out (területi áramkimaradás) jelenséghez, amelyet csak az operátorok rendkívül gyors beavatkozása és bizonyos fogyasztók leválasztásával tudtak elkerülni. Az erőművi termelő rendszerek átlagos környezeti hatásokra vannak méretezve, így a teljesítményük váratlan időjárási környezetben

drasztikusan megváltozik. A környezeti paraméterek meghatározásán az időjárás változására általában egy paraméter drasztikus megváltozását értelmezik, így a modellek is erre készülnek. Több modellezést végeztem annak elemzésére, ha az időjárási körülmények és más befolyásoló tényezők együttesen lépnek fel. A modellek elemzése rávilágított, hogy több olyan eset is előfordul, amikor több időjárási körülmény egymást erősíti, és van olyan eset is, amikor a minimálisnak vélt környezeti hőmérséklet emelkedés jelentős változást idéz elő.

Az éghajlatváltozás erőművekre gyakorolt hatásai közül a legjelentősebb a hőmérséklet növekedése, és itt nem feltétlenül az átlag, hanem sokkal inkább az extrém melegek és meglepőnek tűnhet, de az aszályos időszakok jelentenek problémát. Az erőművek jó része hőerőmű (a hőforrás alapján atom, szén, gáz, geotermikus, napkollektoros), így a hűtésük összefüggésben áll természetes vizeink hőmérsékletével és főleg vízhozamával. Az aszályos időszakok jól láthatóan negatívan befolyásolják a hőerőművek termelési kapacitását és környezetvédelmi szabályok is vonatkoznak a termelési engedélyekre. A hatásuk is öngerjesztő, ugyanis ha melegebb és kevesebb hűtési kapacitás áll rendelkezésre, akkor a visszabocsátott közeg is jóval melegebb lesz, mert a hűtési feladatot el kell látni. A hőerőművek környezeti hatáscsökkentése elkezdődött, de a teljes függetlenség nem is várható el, és a fotovoltaikus energiatermelők rekord méretű növekedése további kockázatot jelent. MAVIR és időjárási adatokat együtt elemezve jól látszódnak azok a kritikus körülmények, amelyek az időjárási hatások ellátási biztonságot is veszélyeztető tényezőit adják. Az erőművek között két alapelvbeli különbség is tehető, amely a hálózati függetlenség. A szakirodalomban black start képes erőműnek nevezzük, amelyek a környező villamosenergia rendszerektől függetlenül képesek az energiatermelésre. Magyarországon azonban ez a kapacitás nagyon alacsony. A hálózati függőség azt is jelenti, hogy vagy a védelmi rendszerek, vagy pedig maga a hálózatra csatlakozó inverterek csak akkor működnek, ha fennáll az energia egyensúly. A modelljeinket sajnos az élet is visszaigazolta az idei évben. 2021. január 8-án dominóelv szinten kapcsolódtak le a hálózatok, és a nyugat-európai stabilitásvesztést egy romániai áramszünet okozta. Jól szemléltetve ezzel, hogy azon a napon nem volt meteorológiai szempontból extrém időjárási körülmény, de a termelésben a keleti energiaforrások komoly szerepet kaptak, mivel alacsonyabb volt a nap- és a szélerőművek termelékenysége a prognosztizáltnál. Európai szinten elemezve az adatokat azonban látszik, hogy az aszályos és melegnek mondható januári időjárás is közrejátszott a hatásokban. A téli hónapokban az alacsony napsugárzási hatás sokszor párosult hosszan tartó ködös-párás, közel légmozgásmentes idővel. Magyarországon több napon keresztül voltak olyan időjárási körülmények, amelyek a fotovoltaikus és szélenergiás termelést sem tették lehetővé, sőt ilyenkor ezen egységek nettó fogyasztói a rendszernek. Tekintve, hogy egyre több kisebb szigetű kiserőmű és háztartási méretű kiserőmű épült az elmúlt időszakban a fogyasztási szokások is változnak, változtak ezzel. Több háztartásban találkozunk a termeléshez igazodó fogyasztói szabályozással, amelyek abszolút mértékben szolgálják a megújuló energiaforrások nagyobb arányú használatát, de egyben komoly kihívást jelentenek az energia elosztónak, hiszen nem tudják a fogyasztói szokásokhoz igazítani az igényeket. A fotovoltaikus rendszerek terjedése és meghatározott termelési kapacitásuk adott a helyi igényekhez és körülményekhez. Fontos tehát, hogy a most létesítendő erőművek, termelő kapacitások és elosztórendszerek az időjárási hatásokra is méretezve legyenek és komplex időjárási körülmények ne csak egy-egy erőmű, hanem a teljes szektort figyelembe véve képződjenek. Modellünkben különböző termelő egység együttes termelési adatait elemeztem, amelyben megfigyelhető, hogy az előrevetített 2 fokos éves átlaghőmérséklet emelkedés 2030-ra, aszályos időjárás, és a rekord meleg képes akár 10 százalékkal is csökkenteni a beépített teljesítményt. Létre kell hozni az energiastratégia biztonsági elemzését is, amelyhez modelljeink is hozzájárulnak, hogy Magyarország energiaellátása biztonságosan üzemeltethető és fenntartható legyen, és számolni kell azonban azzal, hogy a modellek alapján az átlaghőmérséklet emelkedése, a szélsőségesebb időjárási viszonyok tovább nehezítik az energiaellátás tervezését. A folyamat nem lineáris, hanem ennél sokkal meredekebb összefüggést mutat: számításaink szerint az évi 1 fok átlaghőmérséklet emelkedés körülbelül 5%-kal csökkenti a beépített kapacitásokból kivehető teljesítményt beavatkozás nélkül.

Az európai klímarendelet hatása a magyar klímakormányzásra

Huszár András
Nemzeti Közszolgálati Egyetem

A 2021-ben elfogadott Európai Klímarendelet az első olyan jogilag kötelező EU-s dokumentum, amely kimondja, hogy a közösségnek 2050-ig az első klímasemleges régióvá kell válnia a világon. A jogszabály elfogadását több fontos politikai és tudományos esemény készítette elő. A Klímarendelet meghatározó lesz az EU-s döntéshozatalban, ugyanis egyértelműen kijelöli azokat a stratégiai célokat, amelynek az EU-s jogszabályoknak meg kell felelniük. Emellett olyan középtávú célokat is meghatároz, amelyek előfeltételei a hosszú távú célok elérésének, és a legfrissebb tudományos eredmények hatékonyabb becsatornázásának is utat nyit egy európai szintű tudományos tanácsadó testület létrehozásával. Ez az új keretrendszer természetesen a tagállami mozgásteret is jelentősen befolyásolja. A tanulmány azt elemzi, milyen hatásai lehetnek a fenti fejleményeknek tagállami szinten.

A tanulmány a szerzőnek a Magyar Éghajlatváltozási Tudományos Testület által szervezett Első Országos Interdiszciplináris Éghajlatváltozási Tudományos Konferencián, 2021. április 14-én bemutatott előadása alapján készült.

The impact of the European Climate Decree on Hungarian climate governance

The European Climate Law, adopted in 2021, is the first legally binding EU document stating that the community must become the first climate-neutral region in the world by 2050. The adoption of this piece of legislation was prepared by several important political and scientific events. The Climate Law will be a key factor in EU decision-making, as it clearly sets out the strategic objectives that EU legislation must meet. It also sets medium-term goals, which will be the preconditions for the achievement of the long-term goals. It will also ensure to channel the latest scientific results into the decision-making process more effectively by setting up a scientific advisory body at the European level. Of course, this new framework will also have a significant impact on Member States' room for maneuver. The study analyzes the potential impact of these developments at Member State level.

Az éghajlatváltozás már tapasztalható és előre jelzett, egyre fenyegetőbb következményei mára elérték a társadalmak és a döntéshozók ingerküszöbét is. Szinte nincs olyan nemzetközi politikai fórum, ahol ne jelenne meg legalább pár udvarias megállapítás a téma fontosságát illetően. Ez a folyamat persze nem tegnap kezdődött, de különösen a 2018 októberében megjelent IPCC jelentés és az azt követő klímatüntetések miatt főleg Európában megkerülhetetlen napi politikai

témává emelkedett. A 2019. tavaszi Európai Parlamenti választások nagyrészt arról szóltak, ki tud nagyobbat ígérni „zöld fronton". A 2019 őszén megalakult, Ursula von der Leyen vezette Európai Bizottság is a zöld témákat tette a tevékenysége fókuszába. Ennek eredményeképpen jelent meg az átfogó Európai Zöld Megállapodás elnevezésű javaslatcsomag, amely a Bizottság 2024-ig tartó mandátumának központi sorvezetője. A javaslatcsomag egyes elemei alapján a mai napig sorozatban jelennek meg az újabb és újabb jogszabályjavaslatok. Ebben az elemzésben az egyik legfontosabb, már elfogadott jogszabályról, az Európai Klímarendeletről és annak lehetséges hatásairól lesz szó.

Időrendi áttekintés

A tartalmi elemzés előtt érdemes röviden bemutatni, hogyan jutottunk el az Európai Klímarendelet elfogadásig. Az Európai Zöld Megállapodást (angolul European Green Deal, a továbbiakban: EZM) a Bizottság a megalakulása után szinte azonnal, 2019. december 11-én előterjesztette[1]. Az időzítés azért is volt kulcsfontosságú, mert az európai állam- és kormányfők mindössze egy nappal később ültek össze annak érdekében, hogy az EZM javaslatcsomagot megalapozó célra rábólintsanak. Óriási volt a nyomás Európa vezető politikusain, hogy a 2019 nyarán először még el nem fogadott[2] közös EU-s 2050-es klímasemlegességi célra igent mondjanak. Ezt a nyomást fokozta az EZM nyilvánosságra hozása is. Végül meg is született a megegyezés a legfelső szinten arról, hogy „az EU a Párizsi Megállapodásban kitűzött célokkal összhangban 2050-re klímasemleges legyen."[3]

Ennek a döntésnek a jelentősége nehezen túlbecsülhető, a megértéséhez azonban két fontos körülményt érdemes látni. Ahogy a bevezetőben említettem, az ENSZ Kormányközi Éghajlatváltozási Testülete (a továbbiakban: IPCC) 2018 októberében adta közre a 1,5 °C Globális Felmelegedésről szóló különjelentését[4]. Leegyszerűsítve ez a jelentés mondta ki azt először, hogy ha kb. 2050-ig nem érjük el globális szinten a klímasemlegesség állapotát[5], akkor minimális esélyünk lesz arra, hogy a felmelegedés mértékét 1,5 °C alatt tartsuk az iparosodás előtti szinthez képest. Ez pedig olyan nem kívánatos következményekkel járna, amelyeket a jelentés alaposan részletez. Nagyjából a jelentés közreadásával együtt kezdett egyre nagyobb médiafigyelmet kapni a Greta Thunberg által kezdeményezett „Fridays for Future"[6] ifjúsági tüntetéssorozat, amely globális méreteket öltött. Ez a két körülmény vezetett el nagyon gyorsan arra az egyébként is zajló, de eredetileg sokkal lassabb ütemű politikai erjedéshez, amelynek alapján a klímasemlegességi cél elfogadása Európában elkerülhetetlenné vált.

Az állam- és kormányfők 2019 decemberében nemcsak elfogadták a 2050-es EU-s klímasemlegességi célt, hanem „nyugtázták" az Európai Zöld Megállapodásról szóló bizottsági közleményt, és felkérték az Európai Unió Tanácsát, hogy vigye tovább az ezzel kapcsolatos munkát. Ennek a felhatalmazásnak az alapján, az EZM-ben megfogalmazott menetrend szerint az Európai Bizottság 2020 márciusában terjesztette elő az európai klímarendeletre vonatkozó javaslatát[7]. A szöveg alapján az EU Tanácsa és az Európai Parlament is megkezdte a szokásos rend szerint a javaslat tárgyalását. Ám időközben – tekintettel a 2050-es klímasemlegességi cél elfogadására – a Bizottság jelezte, hogy dolgozik egy javaslatcsomagon, ami az új hosszú távú klímasemlegességi célhoz igazítja az EU középtávú (2030-as) ÜHG kibocsátáscsökkentési célját. Emiatt pedig a márciusban előterjesztett klímarendelet-javaslat egyes részeit még ki fogja egészíteni. Ez 2020. szeptember 17-én történt meg, amikor a Bizottság közreadta, hogy a korábbi legalább 40%-os kibocsátás-csökkentési célt 55%-ra módosítja, és ennek megfelelően tettek javaslatot a korábbi klímarendeleti javaslat kiegészítésére[8]. Hosszas tárgyalások után 2020. decemberi következtetéseiben az Európai Tanács jóváhagyta az EU megemelt 2030-as célját, vagyis az üvegházhatásúgáz-kibocsátás legalább 55%-os nettó csökkentését 1990-hez képest[9]. Ennek a politikai megállapodásnak az eredményeképpen végül a formális jogalkotási folyamat is le tudott zárulni nem sokkal később. A mind a klímasemlegességi, mind a megemelt 2030-as célt tartalmazó európai klímarendelet végső szövegéről 2021. április 21-én állapodott meg egymással

a Tanács és a Parlament tárgyalódelegációja[10], amelyet azóta mindkét szerv formálisan is elfogadott. Jelenleg az európai klímarendelet végső szövege kihirdetés alatt áll[11].

Az európai klímarendelet bemutatása

Az európai klímarendelet egy olyan keretjogszabály, amely meghatározza az elkövetkező 30 év EU-s klímapolitikai cselekvését. A 2050-re kitűzött klímasemlegességi cél mellett a következő főbb elemekkel fogadták el a jogszabályt[12] az uniós társjogalkotók:

1. Először is a klímarendelet a 2050 utáni időszakra is vonatkozik, tartalmazza ugyanis azt az elkötelezettséget, hogy az EU 2050 után nettó kibocsátó lesz, vagyis több ÜHG-t köt meg a területén, mint amennyit kibocsát. Ennek mélyebb elemzése túlfeszítené a jelen írás kereteit, ugyanakkor annyit érdemes megjegyezni, hogy ennek a célnak is nagyon nagy jelentősége van. Tudjuk ugyanis, hogy egyes ÜHG gázok sok-sok évig a légkörben maradhatnak, és ezáltal hiába érjük el a klímasemlegesség állapotát, a már korábban kibocsátott gázmennyiség még sokáig fokozza a melegedést. Ezért fontos cél az, hogy ne csak az egyensúlyt érjük el a kibocsátások és az elnyelések között, hanem próbáljuk kivonni a feleslegesen a légkörbe került gázokat. Ez a kérdéskör ráadásul összefügg a mesterséges nyelőkapacitások fejlesztésével is, így látszólag távolinak tűnik 2050-re tekinteni, de a jogalkotók már erre az időszakra is előírták a főbb célt.

2. Az extra hosszú távú kitekintés után térjünk rá a következő tíz évre. Ahogyan arra korábban utaltunk, a jogszabály tartalmazza azt a kötelező célt, hogy 2030-ra az 1990-es szinthez képest legalább 55%-kal kell csökkenteni a nettó üvegházhatásúgáz-kibocsátást. Érdekesség, hogy az EU paradigmaváltást lépett meg azzal, hogy áttért a „bruttó” célról a „nettó” célra. Ez azt jelenti, hogy korábban az ÜHG csökkentési célértékből nem vonták ki az elnyeléseket, azaz azok „abszolút” kibocsátáscsökkentési értékeket jelentettek az 1990-es szinthez képest. Az új 2030-as cél azonban nettó 55%-os csökkentést irányoz elő, ami azt jelenti, hogy a jelenleg elnyelő szektornak számító földhasználati szektor (land use, land use change and forestry, a továbbiakban: LULUCF) nyelőkapacitása is „beleszámít” a csökkentésbe. Ahogyan arra több környezetvédelmi szervezet is felhívta a figyelmet[13], ha a korábbi számítást vesszük alapul, akkor az új 2030-as bruttó csökkentési cél jó pár százalékkal az 55% alatt lenne. A nettó cél kétértelműsége, illetve bizonytalansága miatt azonban az uniós intézmények tárgyalói megállapodtak abban, hogy 225 millió tonna CO_2 egyenértékre korlátozzák a 2030-as célkitűzésbe beszámítható kibocsátás-csökkentés mértékét. Így nem lehet majd „önmagában” ÜHG kivonással elérni a 2030-as célt. Mindemellett a szöveg elismeri az EU ÜHG megkötő kapacitás-növelésének fontosságát, amelyet egy ambiciózusabb célokat tartalmazó LULUCF-rendelet révén kíván elérni. Erre is a Bizottság fog hamarosan javaslatot tenni.

3. A rendelet nemcsak 2030. és 2050. évvel foglalkozik, hanem szól a két dátum közötti 2040-es köztes célról is. Erre az utóbbi dátumra vonatkozóan jelenleg még nem létezik külön EU-s kibocsátás-csökkentési cél. Azonban a klímarendelet a Bizottság számára előírja, hogy hat hónappal az első ún. Globális Értékelés[14] után tegyen erre vonatkozó javaslatot. A 2040-es célra vonatkozó javaslattal együtt nyújtja majd be a Bizottság az EU karbon költségvetésére vonatkozó elképzelését a 2030 és 2050 közötti időszakra. A karbonköltségvetés segít majd pontosabban felosztani a 2030 és 2050 közötti 20 éves pályát, mert megmutatja, hogy a 2050-es klímasemlegesség eléréséhez mennyi (hány CO_2 tonna egyenérték) kibocsátható ÜHG esik még ki összesen. Ebből aztán megfelelőbben lehet tervezni a csökkentési szükségleteket és csak egy bizonyos mennyiségű ÜHG kibocsátást „engedélyezni” már az adott időszakban. Vagyis a logika a csökkentés felől megfordul a maximális kibocsátható mennyiség irányába.

4. Megállapodás született arról is, hogy az Európai Környezetvédelmi Ügynökségen belül létrejön egy kifejezetten az éghajlatváltozással foglalkozó európai tudományos tanácsadó testület. Ez az új intézmény 15, különböző nemzetiségű vezető tudományos szakértőből áll majd, akiknek a mandátuma négy évre szól és egyszer újraválaszthatók. Ennek a független testületnek a feladata lesz többek között, hogy értékelje az EU klímapolitikáját, és jelentéseken keresztül javaslatokat fogalmazzon meg. Ez az EU-s szinten új, de számos tagállamban már létező kezdeményezés remélhetőleg még szorosabbá teszi majd a tudomány és a döntéshozatal együttműködését, és erősíti a klímapolitikai döntések tudományos megalapozottságát. Ugyanakkor érdekes lesz látni majd, hogy pontosan hogyan fog együttműködni a gyakorlatban ez az új szerv a döntéshozókkal, menynyiben fogják megfogadni a javaslataikat.

5. A klímarendelet ezen túl nagyobb felhatalmazást ad a Bizottság részére, hogy értékelje a tagállamok és az EU egészének éghajlati teljesítményét. Ha nyilvánvalóvá válik, hogy az EU és a tagállamok nem járnak a megfelelő úton a klímasemlegesség felé, akkor a Bizottság ajánlásokat fog tenni. A tagállamoknak ugyan jogilag nem kötelező végrehajtaniuk ezeket az ajánlásokat, azonban nyilvánosan meg kell indokolniuk miért térnek el azoktól.

6. A klímarendelet tartalmaz rendelkezéseket az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodásra nézve is, vagyis nem csak kibocsátás-csökkentés fókuszú. Az alkalmazkodásra vonatkozóan szigorúbb rendelkezéseket fogalmaz meg az új jogszabály, mint a korábbi vonatkozó előírások. Minden tagállamnak immár kötelező adaptációs stratégiát készítenie, amelynek figyelembe kell vennie az EU-s alkalmazkodási stratégiát, amit a Bizottság terjeszt elő[15].

Végül, de nem utolsó sorban a klímarendelet előírja általánosságban, hogy az uniós szakpolitikák közötti erős koherenciát kell biztosítani a klímasemlegességi célkitűzés elérése érdekében, és valamennyi szakpolitikának szolgálnia kell annak elérését. Emellett a jogszabály hivatkozik több alapelvre, amit a végrehajtás során figyelembe kell venni. Ezek közé tartozik az elővigyázatosság és a „szennyező fizet" elve, amelyeket az alapszerződések is tartalmaznak. Az energiahatékonyság az első elv, amely az Energiaunió egyik alapelve szintén szerepel, és végül, de nem utolsó sorban megjelenik a „ne csinálj kárt" elv, amelyet az EZM vezetett be.

Az európai klímarendelet jelentősége és hatása a magyar (tagállami) klímapolitikai tervezésre

Az egyik legizgalmasabb folyamat, ami megfigyelhető az új klímarendelet elfogadása kapcsán, hogy a közös EU-s klímacélok meghatározása az egyhangúságot igénylő Európai Tanácsi (EiT) kompetencia felől elmozdult a pusztán többségi elfogadást igénylő rendes uniós jogalkotás irányába, hiszen az európai klímarendelet egy minősített többséggel elfogadható uniós jogi aktus. Ugyan a szövegekben több helyen is szerepel, hogy az EiT ezirányú kompetenciáját nem érinti az, hogy pl. a Bizottság tesz majd javaslatot a 2040-es célra, egyértelműen látszik a fenti irányba történő elmozdulás szándéka, még ha ez nem is lenne feltétlenül üdvös. A klímapolitikai célok ugyanis nem véletlenül dőltek el eddig a legmagasabb szinten, amit a jogszabály-javaslatok csak leképeztek vagy kibontottak. A klímacélok az egész gazdaságot érintik, így tipikusan témákon átívelő terület, nem egy-egy szakpolitikát dönt el, hanem a kereteket. Így olyan nagypolitikai döntésről van szó, amelyet a legmagasabb szinten is jóvá kell hagyni. Ugyanakkor tisztán jogi szempontból mostantól elég lenne csak a klímarendeletet módosítani többségi szavazással az EU-s klímacél megemelése érdekében, „kihagyva" az állam- és kormányfőket. A rendes jogalkotási szisztéma alkalmazása révén a társjogalkotó és a klímatémában általában meglehetősen ambiciózus Európai Parlament is nagyobb beleszólást kap a legfontosabb célszám meghatározásába. Az együttdöntési eljárás során az egyik legnagyobb vita épp a célszámról zajlott, a Parlament

sokáig kitartott a 60%-os csökkentési cél mellett. A Tanács és az EiT erejét mutatja azonban, hogy ebből végül nem lett semmi, de nincs garancia arra, hogy a jövőben a Parlament akarata jobban érvényesülhet majd.

A viták során többször felmerült, hogy a klímarendeletnek nemcsak uniós szinten, hanem minden egyes tagállam számára kötelezően is elő kell írni a klímasemlegesség elérését 2050-ig. Ez a felvetés abból a logikából indul ki, hogy a közös EU-s klímasemlegességi cél nehezen képzelhető el úgy, ha nem minden tagállam teljesíti azt önállóan is. Ez ugyanis azt jelentené, hogy egyes államoknak mások helyett kompenzálniuk kellene a kibocsátásokat, ami hosszú távon nem fenntartható, különösen, hogy az EU a fentebb bemutatottak szerint nettó elnyelő kíván lenni 2050 után. Ugyanakkor szintén érezhető az a trend, hogy EU-s szinten immár még nagyobb lesz a befolyás a tagállami célok meghatározásába és azok megvalósításába is. Ezt az is alátámasztja, hogy a Bizottság ajánlásokat fog tenni a tagállamoknak, ha úgy látja „nem tesznek eleget". Ezek most még jogilag nem kötelezők, de eljutottunk az intézkedések puszta kommunikálásától az ajánlások irányába, és a folyamat könnyen az előírás felé is elmozdulhat, legalábbis bizonyos esetekben. A tagállamok már így is magyarázkodni lesznek kénytelenek, ha nem teljesítik a Bizottság ajánlásait. Ez egyfelől érthető, ha komolyan akarjuk teljesíteni a célokat, de másfelől kérdéses, a Bizottság mennyire tudja megfelelően figyelembe venni a tagállamok közötti különbözőségeket. Különösen a keleteurópai tagállamok hivatkoznak erre, illetve arra, hogy az alapszerződésben rögzített joguk, hogy maguk határozzák meg az energiamixüket.

Kedvező fejlemény, hogy a politikai döntéshozatal erősebb és közvetlenebb tudományos támogatást kap az Európai Tudományos Klímaügyi Tanácsadó Testület (angolul: European Scientific Advisory Board on Climate Change, a továbbiakban: Tudományos Tanácsadó Testület) felállításával. A Tudományos Tanácsadó Testület 15 tagból fog állni, a tagokat nyílt kiválasztási eljárást követően négy évre választja ki az Európai Környezetvédelmi Ügynökség által felkért bizottság, ez az eljárás jelenleg folyamatban van[16]. Legfeljebb két tag lehet ugyanannak a tagállamnak az állampolgára. A Tudományos Tanácsadó Testület tagjainak kiválasztása során törekednek a változatos tudományági és ágazati szakértelem, valamint a nemek közötti és a földrajzi egyensúly biztosítására. A Tudományos Tanácsadó Testület tagjai tisztségüket a tagállamoktól és az uniós intézményektől függetlenül látják el.

A klímarendelet alapján[17] a Tudományos Tanácsadó Testület feladati közé tartozik majd:

- tudományos tanácsadás és jelentések kiadása a már meglévő és javasolt európai uniós intézkedésekről, éghajlati célokról, valamint ezeknek a klímarendelet célkitűzéseivel és az Európai Unió Párizsi Megállapodás szerinti nemzetközi kötelezettségvállalásaival való összhangjáról;

- hozzájárulás a független tudományos ismeretek elterjesztéséhez a modellezés, a nyomon követés, a kutatás és innováció területén;

- az Európai Unió éghajlat-politikai céljainak sikeres eléréséhez szükséges intézkedések és lehetőségek meghatározása;

- az éghajlatváltozással és annak hatásaival kapcsolatos társadalmi tudatosság növelése, valamint az Európai Unión belüli tudományos testületek közötti párbeszéd és együttműködés ösztönzése.

Mondható, hogy a tudomány elvileg politika független, de pl. az európai kutatási pénzek elosztása vagy az IPCC-ben a kelet-európai kutatók jelenléte meglehetősen egyenlőtlen a nyugat-európaiak javára. Biztosítani kell tehát a valódi földrajzi és kutatás-területi egyensúlyt is majd a testület összeállításakor. Fontos részletszabály lesz, hogy a testület által készített ajánlások milyen eljárás keretében kerülnek az európai döntéshozatal asztalára. Mennyire lesz erős befolyása a testület javaslatainak, és vajon mennyiben követik a testület felállítását nemzeti tanácsadó testületek felállítása, ahogyan arra több javaslat is érkezett.

Végül az alkalmazkodási politikák nagyobb összehangolása felé is elmozdulás történt. Ez azért is kedvező folyamat, mert ugyan az egyes kihívások eltérők a különböző területek között, de ezek gyakran nem az ország-, hanem sokkal inkább a természeti határokat követik. A megfelelő fellépés érdekében viszont össze kell hangolni az egyes intézkedéseket, hogy a lehető legnagyobb előny származhasson belőlük.

Összegzés

Az európai klímarendelet elfogadásával az EU klímapolitikája újabb mérföldkőhöz érkezett. Eddig a közös klímacélok nem voltak egy átfogó kötelező jogszabályban rögzítve, és nem voltak „mindenek fölé" helyezve. Az európai klímarendelet egy olyan keretjogszabály, amely a Bizottság által a továbbiakban előterjesztett szakpolitikai javaslatok alapjául szolgál majd. Ennek következtében a tagállamok, így Magyarország mozgástere is némileg tovább szűkül, de egyelőre még őrzi azokat a kompetenciákat, amelyek által reflektálhat nemzeti sajátosságaira. Ugyanakkor a klímacélok és azok meghatározása „visszavonhatatlanul" közösek lettek, és ez egyre inkább így lesz a végrehajtási eszközök terén is.

Hivatkozásjegyzék

[1] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hu/ip_19_6691

[2] https://www.politico.eu/article/eu-leaders-fail-to-commit-to-climate-neutrality-by-2050/

[3] https://www.consilium.europa.eu/media/41781/12-euco-final-conclusions-hu.pdf

[4] https://www.ipcc.ch/2018/10/10/ipcc-presents-findings-of-the-special-report-on-global-warming-of-1-5c-at-event-to-discuss-viet-nams-response-to-climate-change/

[5] Ez azt az állapot jelenti, amelynek során az emberi tevékenységből származó üvegházhatású gáz kibocsátások egyensúlyba kerülnek az elnyelő kapacitásokkal, vagyis a légkörben nem nő tovább az ÜHG mennyiség.

[6] https://fridaysforfuture.org/

[7] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=EN

[8] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0563&from=EN

[9] https://www.consilium.europa.eu/media/47296/1011-12-20-euco-conclusions-en.pdf

[10] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_1828

[11] A kézirat lezárásnak napja 2021. június 22.

[12] A jelenleg elérhető legfrissebb szöveg itt található: https://www.consilium.europa.eu//media/49461/st08440-en21.pdf

[13] https://mk0eeborgicuypctuf7e.kinstacdn.com/wp-content/uploads/2020/09/The-EU-2030-climate-target-_NGO-views.pdf

[14] A Párizsi Megállapodás keretében sorra kerülő Globális Értékelés célja a Párizsi Megállapodás végrehajtásának számbavétele, a világ kollektív előrehaladásának értékelése a megállapodás hosszú távú céljainak elérése felé. Az első GST-re 2021 és 2023 között kerül sor, és a folyamatot ezt követően 5 évente megismétlik.

[15] Ennek előterjesztése 2021 februárjában meg is történt (lásd: https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what_en), és a Tanács a 2021. június 10-i ülésén támogatta is azt (lásd: https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/06/10/council-endorses-new-eu-strategy-on-adaptation-to-climate-change/?utm_source=dsms-auto&utm_medium=email&utm_campaign=Council+endorses+new+EU+strategy+on+adaptation+to+climate+change)

[16] https://www.eea.europa.eu/about-us/climate-advisory-board/call-for-expressions-of-interest

[17] Európai Klímarendelet 3. cikk (2) bekezdés

A klímaváltozás hatásának enyhítése a magyar gazdálkodók agroökológiát támogató gyakorlatában

Ujj Apolka[1], Jancsovszka Paulina[1], Fernana Ramos Diaz[2]

[1] Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Vidékfejlesztés és Fenntartható Gazdaság Intézet, Ujj.Apolka@uni-mate.hu

[2] Gazdaság- és Regionális Tudományi Doktori Iskola

Az agroökológia (AE) összekapcsolja a tudományos megközelítést és a tapasztalaton alapuló ismereteket, együttesen alkotva a mezőgazdaság fenntarthatóvá alakulásának keret- és eszközrendszerét. A trAEce projekt keretében folytatott kutatás az AE és a fenntarthatósági célok gazdaság szintű értelmezésének vizsgálatát tűzte ki célul. A projekt keretében végzett, gazdálkodókkal készített 17 mélyinterjú segítséget nyújtott a gazdálkodók helyi adottságokhoz alkalmazkodó gyakorlatának és azok AE-i vonatkozásainak megismeréséhez. Az elemzést a FAO 10 AE-i alapeleméhez kapcsolt mutatók beazonosításával végeztük, rávilágítva azokra az erősségekre és gyengeségekre, amelyek a gazdálkodók különböző gyakorlati megközelítéseit jellemzik, beleértve megoldásaikat az éghajlatváltozás okozta kihívásokra.

Mitigation of the climate change impacts in the agroecological practices of Hungarian farmers

Agroecology (AE) has emerged as a sustainable agriculture approach linking scientific discipline, agricultural practices and social movement that together represent a framework and tools for agricultural transition. In the trAEce project, research was conducted to investigate the concept of AE in Hungary at farm level. Interviews with 17 practitioners were achieved in order to assess their perspective on AE. Questions explored farmers' motivation towards adhering to the elements of AE that also include climate change mitigation and show the barriers to the widespread adoption of AE. The research, based on the FAO 10 elements of AE, identified the strengths and weaknesses that characterize the various approaches of farmers, including their existing climate adaptive methods.

Bevezetés – Az agroökológia (AE) és a FAO 10 agroökológia alapelemének bemutatása, kapcsolata a klímaváltozással

A fenntartható fejlődés fogalmát a nemzetközi egyezmények, tanulmányok, szakirodalmak és maga a gazdálkodási gyakorlat is eltérő megközelítésben értelmezi. Ennek oka a fogalom összetettségéből ered, hiszen a környezeti dimenzión túl a gazdasági és a szociális fenntarthatóságot is magában foglalja. Széles körben az a definíció elfogadott, amely szerint a fenntarthatóság „a világ megóvásának stratégiája, ami megköveteli a természeti erőforrások olyan felhasználását, mely úgy képes kielégíteni a jelenlegi generáció

szükségleteit, hogy azzal nem veszélyezteti a jövő nemzedék esélyeit" (*World Commission on Environment and Development*, 1987). A bolygónk jelenlegi mezőgazdasági tevékenysége és élelmezési rendszere azonban egyáltalán nem elégíti ki a fenntarthatósági elvekkel szemben támasztott követelményeket, különös tekintettel az élelmiszerbiztonságra és a megtermelt élelmiszerek minőségére (*Barrios et al.*, 2020). Az agroökológia, mint a fenntartható mezőgazdaság jó példája, összekapcsolja a tudományos megközelítést és a tapasztalaton alapuló mezőgazdasági ismereteket a társadalmi mozgalommal, együttesen alkotva a mezőgazdaság kívánatos átalakulásának keretrendszerét és egyben eszközrendszerét is (*Wezel, A.*, 2009; *Bálint et al.*, 2020). Az agroökológia a természeti környezettel jobban együttműködő mezőgazdasági termelés érdekében ökológiai elveket alkalmaz, miközben társadalmi szempontokat is érvényesítve fenntartható és méltányos élelmezési rendszerek megteremtését célozza meg (*Gliessman*, 2016). A pozitív kölcsönhatások erősítése révén az agroökológia fontos szerepet tölt be az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodásban is (*FAO*, 2018; *Réthy és Tóth*, 2020). Az agroökológia, mint gazdálkodási irányzat a fenntartható gazdálkodási gyakorlatok gyűjtőfogalmaként is értelmezhető, amely felismeri a mezőgazdaság ökoszisztémákra és társadalomra gyakorolt hatását. A gyakorlatban az agroökológia nem rendelkezik tanúsítási rendszerrel, vagyis nem lehet kijelenteni egyértelműen, hogy mely gazdálkodási gyakorlat felel meg az agroökológia irányelveinek, de elemei beazonosíthatók, úgymint soktagú vetésforgó-, zöldtrágyanövények használata, klímatudatos talajművelés, rövid értékesítési lánc, erőforrás-hatékony körkörös gazdaság működtetése, kemikáliák alkalmazásának minimalizálása stb.

Az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezete (FAO) az agroökológiát az éhezés, a szegénység és az éghajlatváltozás elleni harc egyik kulcsfontosságú eszközeként azonosította. A FAO nemzetközi szimpóziumain résztvevő döntéshozók, civil szervezetek képviselői, kutatók és gyakorló gazdák együttes ajánlásai alapján született meg az agroökológia 10 alapeleme. Ez a 10 alapelem nyújt segítséget a gazdálkodást érintő változtatások megkezdéséhez, mintegy keretrendszert és ellenőrzési pontokat állítva fel (*Barrios et al.,* 2020). Az agroökológia 10 alapelemének megfogalmazása hosszú előkészítési folyamat eredménye. A folyamat magában foglalta az aktív részvételen alapuló megbeszélések sorát, az információgyűjtést, majd az agroökológia-ismeretek szintézisét és végül a FAO jóváhagyását (*FAO*, 2019). Az agroökológia 10 alapeleme egymással szoros összefüggésben áll, minden elem ugyanolyan fontos és elengedhetetlen, tükrözve az agroökológia holisztikus jellegét. Az agroökológia FAO által megfogalmazott 10 alapeleme *1. ábra* (rövid magyarázattal) a következő (*FAO*, 2018; *Barrios et al.*, 2020):

1. Sokféleség: A fogalom nemcsak a fajok sokféleségét és eltérő ökológiai funkcióit, hanem az élelmiszerrendszerek különböző szereplőinek sokrétű ismereteit is magába foglalja. Lefedi a biológiai sokféleséget (genetikai, taxonómiai stb.), a tudásrendszerek sokféleségét és az agroökoszisztéma különböző elemeit és szintjeit.
2. A tudás közös létrehozása és megosztása: A tudományos és a gyakorlati ismeretek összekapcsolása és megosztása, valamint az új innovatív megoldások együttes létrehozása az agroökológia döntéshozatalának központi eleme. A tudomány és a gyakorlat, valamint a társadalom kölcsönös tanulását szorgalmazza. A formális és a nem formális oktatás alapvető szerepet játszik az agroökológiát támogató innovációk és a hagyományos ismeretek megosztásában.
3. Együtthatások: Az agroökológia tágan értelmezi ezt a fogalmat, hiszen szinergiák megnyilvánulhatnak tábla szinten (pl. köztes termesztés), a gazdaság szintjén (pl. az okszerű tápanyag gazdálkodás és a kedvező talajszerkezet közötti szinergiák) vagy akár a táj szintjén (pl. vizes élőhelyek, agrárerdészet).
4. Hatékonyság: Célja a termelékenység szinten tartása vagy növelése, a külső inputok felhasználásának optimalizálása és a belső erőforrások felhasználásának növelése mellett.
5. Újrahasznosítás: Az újrahasznosítás a körforgásos gazdaság és az élelmiszer rendszerek központi témája, amely az anyag- és

az energiaáramlás tekintetében nem korlátozódik gazdaság szintre, hanem értelmezhető területi és regionális szinten, valamint az élelmiszer-ellátási rendszerek szektorai között.

6. Rugalmas ellenálló képesség: A termelési rendszer képessége a külső zavaró tényezők és események kedvezőtlen hatásainak semlegesítésére (pl. szélsőséges időjárási események) és a gyors válaszreakciók megszervezésére annak érdekében, hogy a rendszer sikeresen tudjon tovább működni.
7. Emberi és társadalmi értékek: Az agroökológia támogatja a méltányosságot, a befogadást és az igazságosságot, a tisztességes munkahelyekhez való egyenlő hozzáférést, ami együttesen járul hozzá a megélhetés javításához.
8. Kultúra és étkezési hagyományok: Az étel és az elkészítéséhez fűződő hagyományok fontos emberi örökség. Az agroökológia elősegíti az egyenlő hozzáférést a természeti erőforrásokhoz, ami életben tartja a kultúrát és az étkezési hagyományokat, amelyek a társadalom minden tagját érintik.
9. Felelős kormányzás: Az agroökológia fontosnak tartja az átlátható, inkluzív irányítási mechanizmust, támogatja a termelőket az agroökológiai termékek népszerűsítése révén.
10. Körkörös és szolidáris gazdaság: Az agroökológia támogatja a rövid élelmiszer-láncokat, kiemelten kezelve a helyi termelői piacok szerepét.

1. ábra. A FAO 10 agroökológiai alapeleme. (Kép forrása: http://www.fao.org/agroecology/en/)

Az Agroökológiai szakképzés gazdálkodóknak 'trAEce' nevű projekt bemutatása

Az 'Agroökológiai szakképzés gazdálkodóknak', rövid nevén trAEce, az Európai Unió által támogatott hároméves kapacitás- és tudásfejlesztési stratégiai partnerségi projekt, ami az Erasmus+ program keretein belül valósul meg. A projekt elősegíti a közeljövőben remélhetőleg bekövetkező zökkenőmentes áttérést a hagyományos iparszerű mezőgazdaságról az agroökológiai gyakorlatokra. E folyamat megvalósításának kulcsa a tudás- és kapacitásfejlesztés. Ennek alapján, a trAEce célja, hogy a gazdálkodóknak és oktatóiknak olyan kompetencia alapú készség-fejlesztéshez szükséges eszközöket kínáljon, amelyek lehetővé teszik az agroökológiai elveknek megfelelő gazdálkodás folytatását.

A projekt megvalósításában 5 európai ország (Magyarország, Románia, Ausztria, Csehország és Portugália) 6 intézményének szakértői dolgoznak együtt és osztják meg egymással tapasztalataikat az agroökológia gyakorlati megközelítésének döntéshozói szinten történő előmozdítása érdekében. Az együttműködés további célja egy olyan szakképzés kidolgozása, ami szaktudást és gyakorlati ismereteket közvetít, és amely segítségével a gazdálkodó a termeléstől az értékesítésig meg tudja tervezni, vagy át tudja alakítani már működő gazdaságát, figyelembe véve az agroökológiai alapelveket. Ennek alapja a projekt partnerek által elkészített ország-specifikus helyzetelemzés, ami átfogó képet ad a mezőgazdasági termelők agroökológiai tevékenységekkel kapcsolatos ismereteiről és véleményéről, valamint azonosítja a kapcsolódó politikai diskurzusokat, szabályozásokat, szereplőket, gyakorlatokat, hálózatokat stb. (*Bálint et al.*, 2020). A helyzetelemzés tartalmazza az agroökológiához

kapcsolódó különböző szintű és időtartamú képzések és tanulási lehetőségek gyűjteményét is. A helyzetelemzés eredményeire támaszkodva a projekt csapata kidolgozza a gazdálkodók és képzők számára az agroökológiai szakképzés tantervét, amelyhez tananyagok – felhasználói kézikönyv és rövid filmek – is készülnek, és amelyeket próba-képzések alkalmával a gazdálkodók és oktatók is tesztelhetnek. Az agroökológiai gyakorlatokkal kapcsolatos ismeretek hatékonyabb terjesztése érdekében a projekt nemzetközi csapata oktatási módszertani útmutatót dolgoz ki, képzők és oktatók számára.

Anyag és módszer

A helyzetelemzéshez a kérdőíves vizsgálatot (kvalitatív módszer) választottuk, ami alkalmazható minden felderítő, leíró vagy magyarázó jellegű kutatásban, ahol az elemzés alapegysége a válaszadó személye (*Babbie*, 2008).

Félig strukturált, egyéni interjúkat készítettünk, személyesen, online vagy telefonon keresztül. A legrövidebb interjú 45 percig, a leghosszabb pedig 120 percig tartott. Az interjúk száma eltért az egyes partner országokban: HU: 17 db, RO, Erdély: 13 db, CZ: 12 db, PT: 26 db és AT: 9 db. Ugyanakkor az interjúfonalat a következő azonos kérdéscsoportok alkották:

- tevékenység, fenntartható gazdálkodási gyakorlatok, a gazdaság fenntarthatósághoz kapcsolódó kihívásai – ezen belül külön kérdés vonatkozott az éghajlatváltozáshoz történő alkalmazkodás, negatív hatásai elleni védekezésre;
- a gazdálkodó önértékelése, ismeretei és készségei, azok alkalmazása a gyakorlatban;
- agroökológiai attitűd, ismeretek és készségek, amelyeket a gazdálkodó fontosnak tart;
- Agroökológiai képzésre való igény és a gazdálkodó javaslatai erre vonatkozóan.

Az interjúalanyok kiválasztásánál a nem-véletlenszerű mintavételezési formát alkalmaztuk, azon belül is a célirányos szakértői kiválasztás módszerét, hogy az interjúalanyok minél diverzebbek legyenek profiljuk és képviselt stakeholder típusuk tekintetében. Így az interjúalanyok között, pozíciójukat tekintve, volt elnök, ügyvezető igazgató, farmtulajdonos, alkalmazott. Az interjúalanyok korcsoport szerinti eloszlása a következő volt: 25 év alatti 1 fő; 25–34 év 7 fő; 35–54 év 6 fő; 55–65 év 2 fő. A megkérdezettek közül 13 fő egyetemi (10 MSc és 3 BSc diploma), 2 fő középiskolai végzettséggel rendelkezett, 1 főnek pedig Aranykalászos gazda minősítése volt, 1 fő nem nyilatkozott. Változatos képet mutat a kiválasztott gazdaságok tevékenységi köre és vállalkozási formája:

- szántóföldi növénytermesztő magángazdaság (3 db) és gazdasági társaság (2 db),
- kertészeti magángazdaság (6 db) és gazdasági társaság (1 db),
- borászat (2 db),
- állattenyésztő magángazdaság (2 db),
- vegyes gazdálkodást folytató mezőgazdasági vállalkozás (1 db).

A vizsgált gazdaságok hasznosított mezőgazdasági területe 0,25 ha és 7500 ha között váltakozott, a legnagyobb számban a kisgazdaságok szerepeltek, de ugyanúgy közepes és nagygazdaságok is reprezentálva voltak. A gazdaságok egy része ökológiai, másik része pedig konvencionális gazdaság.

A bemutatott vizsgálat célja a trAEce projekt keretén belül magyar gazdákkal készített interjúk agroökológiai elemzése, amely a FAO 10 agroökológiai alapelemének gyakorlati alkalmazását értékeli, valamint a válaszadók attitűdjét tanulmányozza.

Az agroökológiai elemzést a magyar gazdákkal folytatott 17 mélyinterjú során nyert információkat felhasználva végeztük el, beazonosítva a FAO agroökológia alapelemeihez illeszkedő mutatókat.

A vizsgálat során meghatározásra kerültek:

- A mutatók száma AE alapelemenként és azok összes előfordulása szintén alapelemenként (vagyis az, hogy az adott mutató hányszor került rögzítésre az interjúkban, illetve a vizsgált gazdaságokban). Ennek célja egyrészt annak megértése, hogy mely alapelemekhez kapcsolódó gyakorlatok preferáltak, másrészt ebből kiindulva annak körülhatárolása, hogy mely területeket kell megerősíteni az oktatás során.
- A gazdaságonkénti mutatók száma azzal a céllal, hogy következtetni lehessen arra, hogy a gazdálkodóknak milyen tematikájú

képzésre van szükségük. Emellett még beazonosításra kerültek azok a gazdaságok, ahol a mutatók előfordulása a legmagasabb volt. Ezek a gazdaságok később referencia-gazdaságként működhetnek, jövőbeli kutatások helyszíneként szolgálhatnak, tanulmányi kirándulások célpontjai lehetnek.

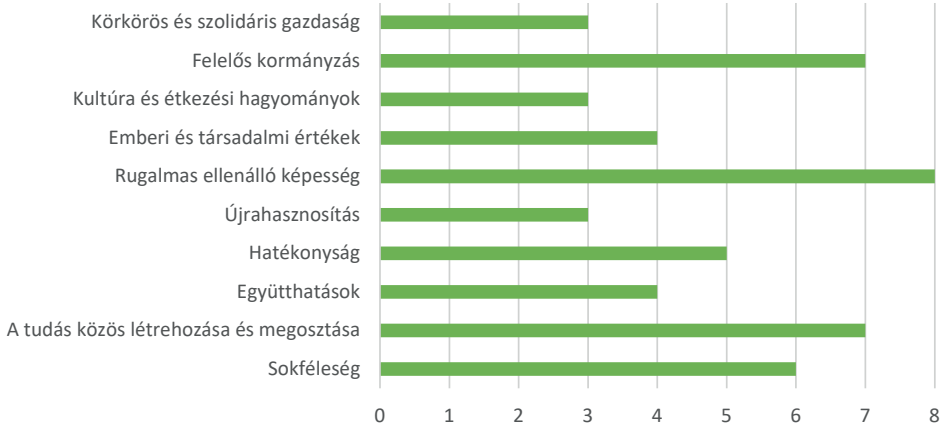
Eredmények

A vizsgálat kiinduló pontja az interjúk alapján kialakított mutatók, amelyek az AE alapelemekhez kötődnek:

1. *Sokféleség – 6 mutató*: Biológiai diverzifikáció a gazdaságban, Változatos mezőgazdasági termelés és feldolgozás, Biológiai talajélet fokozása (szántás nélküli talajművelés, zöldtrágya-használat, zöld ugaroltatás, talajlazítás) Mechanikus gyomirtás, Vetésforgó, Az ökoszisztémák megőrzését biztosító gazdálkodási gyakorlatok.
2. *A tudás közös létrehozása és megosztása – 7 mutató*: Magas szintű szakmai tudás, Infrastruktúra a tudásmegosztó tevékenységekhez, A mezőgazdaság társadalmi vonatkozásainak ismerete, Nyitottság új ismeretek megszerzésére, Hajlandóság a tudás átadására, Más gazdálkodókkal való tudásmegosztás, Oktatás a gazdaságban.
3. *Együtthatások – 4 mutató*: Biológiai növényvédelem, Ökoszisztéma-szolgáltatások (beporzás, tó), Tájba illeszkedő épületek, Vegyes gazdaság (állattenyésztés és növénytermesztés).
4. *Hatékonyság – 5 mutató*: Termelési input-önellátás, Mulcsozás, Rendszeres talajmonitoring; Vízgazdálkodási módszerek alkalmazása (korszerű öntözési technikák), Korszerű termesztéstechnológiák alkalmazása.
5. *Újrahasznosítás – 3 mutató*: Komposzt-használat, Szervestrágya-használat, Növénymaradvány-újrahasznosítás.
6. *Rugalmas ellenálló képesség – 8 mutató*: Önfenntartó (támogatást igénybe nem vevő) gazdaság, Termőhely feltételeihez igazodó vetőmaghasználat, Fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok alkalmazása, Az éghajlatváltozáshoz igazodó gyakorlatok alkalmazása, Saját vetőmag előállítása, Vegyszermentes termesztés, Hormon és antibiotikum mentes állattenyésztés, Szabadtartás (baromfitenyésztés).
7. *Emberi és társadalmi értékek – 4 mutató*: Szociális farmszolgáltatások (fiatalok, nők, idősek, romák, fogyatékkal élők bevonása), Jó kapcsolat és együttműködés a helyi közösséggel, Jó kapcsolat és együttműködés más gazdákkal, Jó kapcsolat és együttműködés az alkalmazottakkal.
8. *Kultúra és étkezési hagyományok – 3 mutató*: Társadalmi-kulturális tevékenységek a gazdaságban, Részvétel helyi gasztronómiai rendezvényeken, Helyi rendezvények szervezése.
9. *Felelős kormányzás – 7 mutató*: Részvétel gazdálkodói hálózatokban, Részvétel nemzeti és nemzetközi mozgalmakban, Kollektív döntéshozatal, Konkrét üzleti modell alkalmazása, Közösségfejlesztés irányítása, Jó kommunikáció a gazdaságban, Részvétel agrár-környezeti programban, Közösség-alapú gazdálkodás.
10. *Körkörös és szolidáris gazdaság – 3 mutató*: Változatos termékkínálat, REL (rövid ellátási láncok: CSA - közösség által támogatott mezőgazdaság, direkt értékesítés), Alkalmazkodás a piaci igényekhez (magas értékű és minőségű, ökológiai termékek).

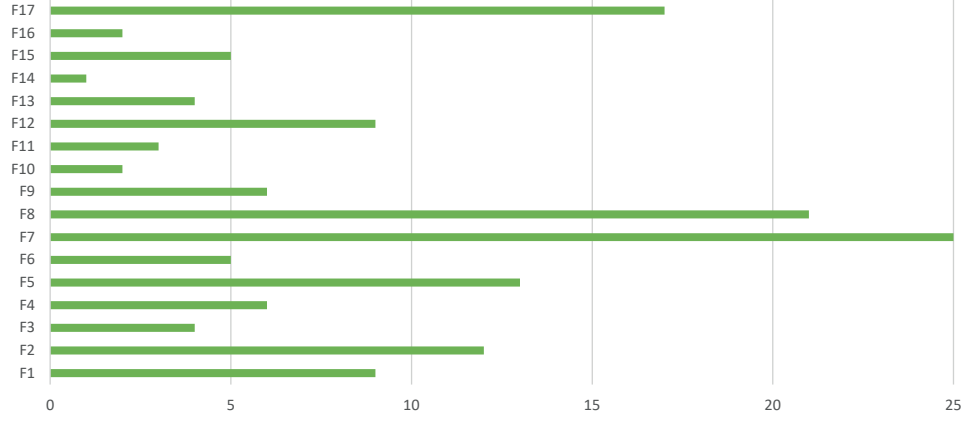
A *2. ábra* szemlélteti a mutatók számát a FAO 10 AE alapeleméhez kapcsolódóan.

A *Sokféleség alapelem* esetében a Biológiai talajélet fokozása, a Vetésforgó mutató rögzítésre került a legtöbb (5) gazdaságban, azokat követte a Változatos mezőgazdasági termelés és feldolgozás és Az ökoszisztémák megőrzését biztosító gazdálkodási gyakorlatok mutató (3–3 gazdaságban). Csak 1–1 gazdaságban jelent meg a Biodiverzitás a gazdaságban és a Mechanikus gyomirtás mutató. *A tudás közös létrehozása és megosztása alapelem*hez kapcsolódó mutatók közül a Magas szintű szakmai tudás fordult elő a legtöbb (9) gazdaságban, emellett még a Nyitottság új ismeretek megszerzésére és Más gazdálkodókkal való tudásmegosztás mutató volt reprezentálva 7, illetve 6 gazdaságban. A legkisebb előfordulása volt az Infrastruktúra a tudásmegosztó tevékenységekhez és az Oktatás a gazdaságban mutatóknak. Az *Együtthatások alapelem*hez tartozó mutatók



2. ábra. A FAO 10 agroökológiai alapeleméhez rendelt mutatók száma.

közül 7 gazdaság képviselője nevezte meg a Biológiai növényvédelmet, 3 pedig az Ökoszisztéma-szolgáltatásokat. A Tájba illeszkedő épületek és Vegyes gazdaság mutatók csak 1–1 gazdaságnál jelentek meg. A *Hatékonyság alapelem* esetén a Rendszeres talajmonitoring 5 gazdaságnál, a Vízgazdálkodási módszerek mutató 2 gazdaságnál került említésre. Az *Újrahasznosítás alapelem*nél a legtöbb gazdaságban előforduló mutatók a Szervestrágya-használat a gazdaságban (6 gazdaság), a Növénymaradvány-újrahasznosítás (6 gazdaság) és a Komposzt-használat (4 gazdaság) voltak. A *Rugalmas ellenálló képesség alapelem*hez kialakított mutatók közül a Termőhely feltételeihez igazodó vetőmag használata és a Fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok (pl. soktagú vetésforgó, csökkentett talajművelés vagy talajművelés nélküli termesztés, komposztálás) alkalmazása 4–4 gazdaságnál, a Saját vetőmag-előállítás 3 gazdaságnál, az Éghajlatváltozáshoz igazodó gyakorlatok (pl. stressztűrő fajták használata a vetésforgóban, a gazdaság területi elhelyezkedése – hűvösebb helyen, talajtakarás, esővíz gyűjtése kis tóban és öntözésre



3. ábra. A FAO 10 agroökológia alapelemekhez rendelt mutatók száma a vizsgált 17 gazdaságban.

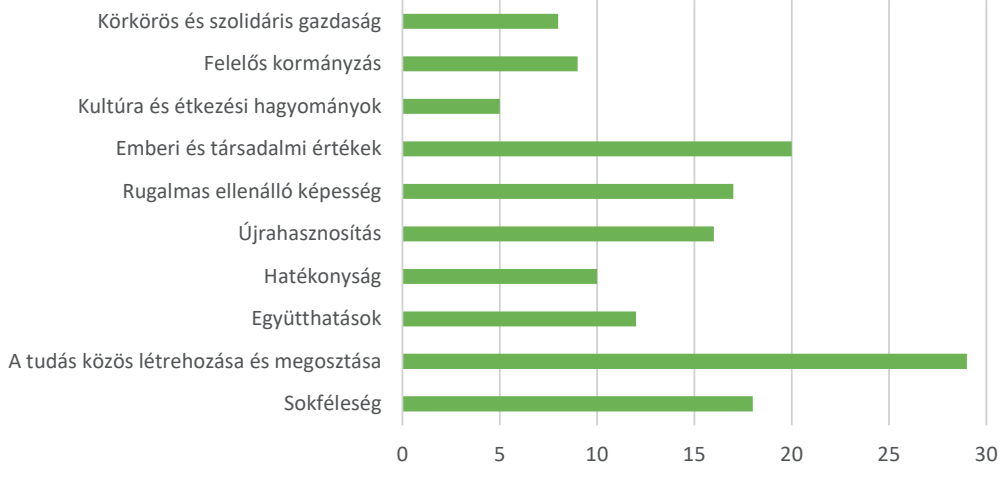
való használata) alkalmazása 2 gazdaságnál fordult elő. Az *Emberi és társadalmi értékek alapelem* kapcsán legelterjedtebbeknek bizonyultak a Jó kapcsolat és együttműködés más gazdákkal (8 gazdaságnál) és a Szociális farmszolgáltatás (7 gazdaságnál) mutatók. A *Kultúra és étkezési hagyományok alapelem*hez kapcsolódó mutatók közül 3 gazdaságban volt megfigyelhető a Társadalmi-kulturális tevékenységek a gazdaságban. A *Felelős kormányzás alapelem* esetén is jelentős szórást mutatott a mutatók előfordulása – 3 gazdaság esetén a Részvétel gazdálkodói hálózatokban, 2 gazdaság esetén a Kollektív döntéshozatal jelent meg, míg a Közösségfejlesztés irányítás előfordulása 0 volt. A *Körkörös és szolidáris gazdaság alapelem*nél a 4 gazdaságra vonatkozóan a Változatos termékkínálat, 3 gazdaság esetén a REL jelenik meg.

A *3. ábra* bemutatja a gazdaságonként megjelenő összes mutató számát. A legmagasabb értéket – 25 indikátor – az F7 gazdaság ért el, amely egy kertészeti magánvállalkozás. 21 indikátort teljesített az F8 gazdaság, amelyet követ az F17 gazdaság 17 mutatóval. Az F8 szintén kertészettel foglalkozó gazdaság, az F17 pedig vegyes gazdaság.

A *4. ábra* szemlélteti az AE alapelemenkénti mutatók összes előfordulását a vizsgált gazdaságokban. Az interjúk alapján a 2. alapelemhez (A tudás közös létrehozása és megosztása) kapcsolódó mutatók száma volt a legmagasabb (29), ezután következett az Emberi és társadalmi értékek alapelemhez tartozó összes mutató (20), valamint a Sokféleség alapelemhez köthető összes mutató (18).

Következtetések és javaslatok

A kutatás eredményei alapján megállapítható, hogy a 17 vizsgált gazdaság esetében minden agroökológiai alapelemhez köthető volt mutató. A rugalmas ellenálló képesség elemen belül a klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás is hangsúlyosan megjelenik. Azok a gazdálkodók, akiknek a gyakorlatában ez nem jelenik meg pillanatnyilag, már felismerték e gyakorlatok bevezetésének szükségességét, és a jövőbeli alkalmazását tervezik (szárazságtűrő fajták vetésforgóba illesztése, talajvédő, mulcshagyó technológiák bevezetése, talajbolygatás csökkentése stb.). Beazonosíthatóak azok a gazdaságok is, amelyek megfelelnek minden szempontból az agroökológia alapelveinek és amelyekhez minden FAO által meghatározott alapelem hozzárendelhető, annak ellenére, hogy nem létezik még Magyarországon az agroökológia minősítési- és ellenőrzési feltételrendszere. Előremutató, hogy egyre több mintaértékű gazdasággal találkozhatunk, amelyeket



4. ábra. A FAO 10 agroökológiai alapelemekhez rendelt mutatók előfordulása összesen, alapelemenként.

képzésekbe ágyazottan érdemes megismertetni más gazdálkodókkal. Kihívást jelent azonban a nagy területtel rendelkező szántóföldi növénytermesztéssel foglalkozó gazdaságok esetén a szociális és természetvédelmi dimenzióhoz kötődő alapelemek megjelenítése és gyakorlatban történő alkalmazása, hiszen sok esetben csak a gazdaságosság és profit maximalizálása a cél, ami hosszú távon nem fenntartható. A klímaváltozás okozta kihívások leküzdése érdekében az eddigi gyakorlatok változtatására kell hangsúlyt fektetni, kihasználva az ökoszisztéma szolgáltatások adta lehetőségeket. A mutatók összes előfordulásának vizsgálata alapelemenként rávilágít arra, hogy a gazdák nagy hajlandóságot mutatnak a szakmai ismeretek bővítésére és átadására, preferálják a más gazdálkodótól való tanulás módszertanát, ahol gazdaságlátogatás alkalmával ismerhetik meg hiteles gazdatársuk tapasztalatait és a gyakorlatban bevált klímakárokat enyhítő módszereiket. A gyakorlatorientált képzés az agroökológia tekintetében kiemelkedően fontos, mert a gazdálkodók nem minden esetben látnak összefüggést a tevékenységük és a helyi fejlődés, a társadalmi helyi előnyök, illetve a helyi együttműködés és hálózatépítés között, de pozitívan állnak hozzá a mezőgazdaság fenntarthatóbbá tételéhez, és egyre inkább tudatában vannak a gazdálkodási gyakorlatuk társadalmi és környezeti következményeinek, amely irányba történő elmozdulást támogatások formájában is érdemes ösztönözni és tovább erősíteni.

Köszönetnyilvánítás. Az Európai Bizottság támogatást nyújtott a trAEce ('Agroecological Vocational Training for Farmers' Erasmus+ Program 2019-1-HU01-KA202-060895 https://traece.eu) nevű projekt költségeihez. A cikk a szerzők nézeteit tükrözi, az Európai Bizottság nem tehető felelőssé az ebben foglaltak bárminemű felhasználásáért.

Irodalom

Babbie, E., 2008: A társadalomtudományi kutatás gyakorlata. Balassi Kiadó, Budapest, 744

Bálint, Cs., Moudrý jr., J., Bernas, J., Moudrý sr., J., Dezsény, Z., Mutua, K. N., Encarnação, M., Queiroga, R., Farkas, T., Ramos Díaz, F., Goda, P., Rodics, G., Grand, A., Strenchock, L., Horstink, L., Szilágyi, A., Jancsovszka, P., Ujj, A., Klenkhart, L., Vásáry, V., and *Mogyorós, L.*, 2020: Background report for agroecological vocational training. NAIK Agrárgazdasági Kutatóintézet.

Bálint, Cs., Dezsény, Z., Goda, P., Jancsovszka, P., Strenchock, L., Mutua, N.K., Ramos Diaz, F., Szilágyi, A., Ujj, A., és *Vásáry, V*., 2020: Agroökológiai helyzetelemzés, Magyarország. https://traece.eu/download/agrookologiai-helyzetelemzes-magyarorszag-2020/

Barrios, E., Gemmill-Herren, B., Bicksler, A., Siliprandi, E., Brathwaite, R., Moller, S., Batello, C. and *Tittonell, P.*, 2020: The 10 Elements of Agroecology: enabling transitions towards sustainable agriculture and food systems through visual narratives, *Ecosyst. People 16*, 230–247. http://doi.org/10.1080/26395916.2020.1808705

FAO, 2018: The 10 elements of agroecology. Guiding the transition to sustainable food and agricultural systems. http://www.fao.org/documents/card/en/c/I9037EN/

FAO, 2019: Scaling up agroecology to achieve the sustainable development goals. Proceedings of the second FAO International Symposium. 3-5 April, 2018. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 412 http://www.fao.org/3/ca3666en/ca3666en.pdf

Gliessman, S., 2016: Transforming food systems with agroecology, *Agroecol. Sustain. Food Syst. 40*, 187–189. http://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765

Réthy, K. és *F.Tóth, B.,* 2020: Az agroökológia 10 alapelve és hazai példái. Védegylet Egyesület. 29. https://drive.google.com/file/d/12WOvDrrbbooBAwcnEE9y2g4o-AA-rPgF2/preview

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., and *David, C.,* 2009: Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev. 29*, 503–515. https://doi.org/10.1051/agro/2009004

World Commission on Environment and Development, 1987: Our Common Future. Oxford University Press.

Az előrevetített klímaváltozás hatásának növénykémiai vizsgálata bükk (*Fagus sylvatica L.*) fafajon

Visiné Rajczi Eszter, Hofmann Tamás, Albert Levente, Mátyás Csaba
Soproni Egyetem, visine.rajczi.eszter@uni-sopron.hu

1998-ban az Erdészeti Kutatószervezetek Nemzetközi Szövetsége (IUFRO) szervezésében Európa szerte egy bükk (*Fagus sylvatica* L.) származási kísérletsorozat indult a fafaj klimatikus alkalmazkodóképessége tanulmányozására. A magyarországi helyszín Bucsuta (Zala megye), ökológiailag kiemelt helyen fekszik, legközelebb a fafaj szárazsági erdőhatárához. A területen kiválasztott hat azonos korú származás parcella kísérleti elrendezésben helyezkedik el. Kutatócsoportunk növénykémiai vizsgálatokkal járult hozzá a klimatikus alkalmazkodás Bucsután zajló interdiszciplináris tanulmányozásához. Több éven át követtük a szimulált klímaváltozás hatását, összehasonlítva a hat származás enzimes és nem-enzimes antioxidáns rendszereit. Mértük a kiválasztott egyedek leveleiben az összfehérje-tartalmat, a peroxidáz (POD) és polifenol-oxidáz (PPO) enzimek aktivitását, az ABTS (2,2'-azino-di-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav) antioxidáns kapacitást, és meghatároztuk a polifenolok minőségi és mennyiségi spektrumait. Megállapítottuk, hogy az áttelepítéssel szimulált klimatikus stresszre adott válaszok az eredeti származási helytől függően különböznek, és a különbségek kémiai mérésekkel kimutathatók. A peroxidáz enzim aktivitás, az összfehérje-tartalom és egyes polifenolok az adaptáció kémiai indikátorai lehetnek, és hasznosíthatók a klímaváltozás jövőbeli hatásainak előrejelzésében a bükk szaporítóanyag jövőbeli kiválasztásakor.

Phytochemical response of beech (Fagus sylvatica L.) to the effects of projected climate change

In the present work the phytochemical effects of climatic stress to European beech (Fagus sylvatica L.) populations were evaluated using a provenance test. The test was conducted in the framework of an international test series of IUFRO (International Union of Forest Research Organizations), at the experimental site at Bucsuta, Hungary, with the involvement of 6 relevant provenances. Selected enzymatic (peroxidase: POD, polyphenol oxidase: PPO) and non-enzymatic antioxidants (polyphenolic composition, ABTS (2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline)-6-szulphonic acid) antioxidant capacity) as well as the total protein content were measured from the leaves of selected populations. Results were compared with climatic indexes and average growth parameters of the populations. According to the results significant correlations were found between phenotypic (growth) response to simulated climatic stress and the activity of selected chemical components. The concentrations of certain polyphenols, POD enzyme activity, and total protein content may be chemical indicators of the acclimation potential of populations and may contribute to the forecasting of climate change effects, which can aid in the selection of suitable propagation material for adaptive silviculture.

Bevezetés

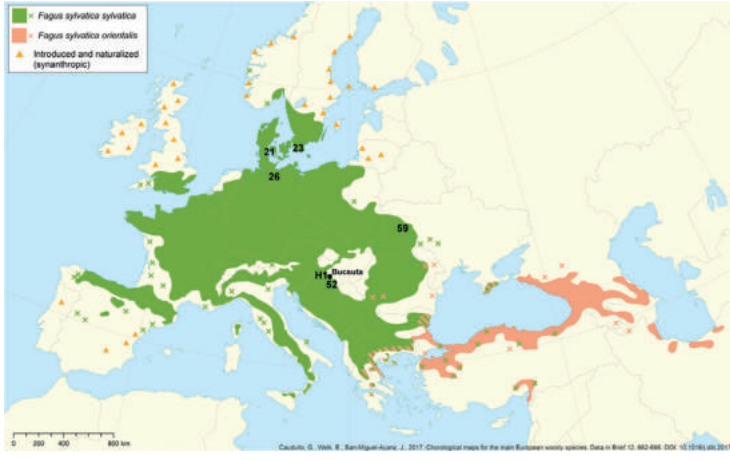
Az éghajlati modellekre alapozott klíma-előrevetítések az ország egész területén szignifikáns melegedést és aszályosodást valószínűsítenek (*Bartholy et al.*, 2014; *Gálos et al.*, 2015).

A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás legnagyobb kihívása az erdők ökológiai stabilitásának fenntartása. A veszélyeztetett fafajok között a bükk (*Fagus sylvatica* L.) állományok fontos helyet foglalnak el. A bükk Európában a leggyakrabban előforduló, gazdaságilag fontos, kemény lombos fafaj. Közép- és dél-európai elterjedését a csapadékhiány jelöli ki, ezért a klímaváltozás tükrében fokozott figyelmet érdemel, magyarországi állományai komolyan veszélyeztetettek. A szárazsági határon a rosszabbodó klimatikus feltételek következtében a növekedés visszaesése várható (*Mátyás et al.*, 2009; *Jezik et al.*, 2011; *Hlasny et al.*, 2014). Míg a fafaj 2012-ben az erdőterület 5,9 %-át adta (110,3 ezer hektáron) (*URL1*), addig az előrejelzések szerint 2050-re az ország területének mindössze 1 százalékán találhat optimális éghajlati körülményeket (*Gálos* és *Führer*, 2018).

Ezért a fafaj alkalmazkodóképességét növelni, az erdőgazdálkodás jövőbeni kockázatait csökkenteni kell. Ennek egyik módja lehet a klímatoleráns populációk, fajok behozatala és felhasználása az erdőfelújításban és a telepítésben. A klímaváltozásra adott reakciót a populációk különböző klimatikus környezetbe történő áttelepítésével szimulálhatjuk.

1998-ban az International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) szervezésében Európa szerte egy bükk (*Fagus sylvatica* L.) kísérletsorozat indult a fafaj klimatikus alkalmazkodóképessége tanulmányozására (*von Wuehlisch* és *Alia*, 2011). A teszthelyszíneken célirányosan megválasztott származási pontok klímájához alkalmazkodott populációk utódnemzedékeit telepítették. A hipotézis szerint a származási helyszínek és a teszthelyszín klimatikus differenciája gyors klímaváltozást imitál, és feltárja az öröklött alkalmazkodóképesség lehetőségeit és korlátait (*Mátyás*, 1994).

Magyarországon a bucsutai (Zala megye) bükk származási kísérletben 15 országból 36 populáció klímaváltozásra adott reakcióit tanulmányozzák. Bucsuta ökológiailag kiemelt helyen fekszik, legközelebb a fafaj szárazsági erdőhatárához (*Horváth* és *Mátyás*, 2014, 2016). A kutatásainkhoz hat azonos korú populáció (Farchau/Németország, Pidkamin/Ukrajna, Torup/Svédország, Gråsten/Dánia, Bánokszentgyörgy/Magyarország, Magyaregregy/ Magyarország) parcelláit választottuk ki a tenyészkertben (*1. ábra*). Ezek közül kettő a hazai mérsékelt kontinentális klímához (magyarországi származások), egy szélsőséges kontinentális (Pidkamin), míg további három atlanti klímához alkalmazkodott (Farchau,Torup, Grasten).



1. ábra. A bucsutai kísérlet populációi és a kiválasztott származási helyek 21: Grästen (DK), 23: Torup (S), 52: Magyaregregy (H), H1: Bánokszentgyörgy (H), 59: Pidkamin (UA), 26: Farchau (D).

A kutatás célkitűzései

Több éven át követtük a szimulált klímaváltozás hatását, összehasonlítva a hat származás enzimes és nem-enzimes antioxidáns rendszereit. Célunk volt az áttelepítéssel szimulált klímaváltozással összefüggő stressztűrő képesség (akklimáció, alkalmazkodás) jellemzése és az alkalmazkodási teljesítmény minősítése.

Módszerek és adatok

Vizsgálatainkat 2013 és 2017 között végeztük, származásonként 8 törzset vizsgáltunk, minden törzsről 20 fénylevelet és 20 árnyéklevelet vettünk

(*Visi-Rajczi et al.*, 2021). A megfelelő mintaelőkészítés után mértük a kiválasztott egyedek leveleiben az összfehérje-tartalmat, a peroxidáz (POD) és polifenol-oxidáz (PPO) enzimek aktivitását, az ABTS (2,2'-azino-di-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav) antioxidáns kapacitást, és meghatároztuk a polifenolok minőségi és mennyiségi spektrumait (*Visi-Rajczi et al.*, 2021).

A POD és PPO antioxidáns enzimek bizonyítottan részt vesznek a növények stressz folyamatokkal szembeni védekezési mechanizmusaiban, a polifenolok jelentős szerepe a stressz elleni védekezésben bizonyított (*Albert et al.*, 2002), így bükk esetében is indikátorai lehetnek a klímához való alkalmazkodásnak (*Puccinelli et al.*, 1998; *Zolfaghari et al.*, 2010).

A nem-enzimes antioxidáns rendszer vizsgálatánál elsősorban a polifenol alapú adaptációs válaszokat kutattuk, mivel a polifenolok jelentős szerepe a stressz elleni védekezésben bizonyított (*Dübeler et al.*, 1997). Mértük a kísérleti alanyok ABTS antioxidáns kapacitását is, mely átfogó képet ad az oxidatív stresszről (*Hassan et al.*, 2017). A vizsgált bükk levelekből 44 polifenolt azonosítottunk (38-at név szerint), és kiválasztottuk közülük a leghatékonyabb polifenolos antioxidánsokat, melyek szignifikánsan járulhatnak hozzá a bükk antioxidáns tulajdonságaihoz, és ezen keresztül jelentős szerepet játszhatnak a védekezési és adaptációs folyamatokban (*Visi-Rajczi et al.*, 2021).

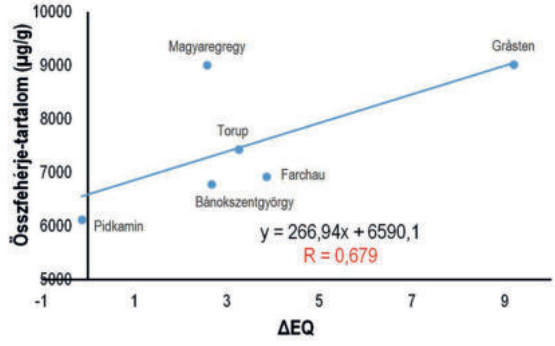
Mind az enzimes, mind a nem-enzimes antioxidáns rendszerek vizsgálata során nyert mérési eredményeket korreláltattuk az állományok klimatikus paramétereivel (Ellenberg-index – EQ; ökológiai távolság – ΔEQ) és az állományok „teljesítményével" (átlagos mellmagassági törzsátmérő a mintavétel idején). Az Ellenberg-index (EQ) a legmelegebb hónap (július, T_{07} [°C]) középhőmérsékletének és az éves csapadék (P_{ann}, [mm]) hányadosának 1000-szerese (*Ellenberg*, 1988):

$$EQ = 1000 \cdot T_{07} \cdot P_{ann}^{-1}$$

Az ökológiai távolság (*ecodistance, Mátyás*, 1994) a kísérleti helyszín és a származási helyek Ellenberg-indexének különbsége (ΔEQ), az áttelepítéssel szimulált klímaváltozás jellemzője. Pozitív értéke melegebb és szárazabb, negatív értéke hűvösebb, nedvesebb klímába kerülést jelez. Az index használhatóságát a bükk adaptációjának kutatásában korábbi munkák is alátámasztják (*Fang* és *Lechowicz*, 2006; *Czúcz et al.*, 2013).

Eredmények

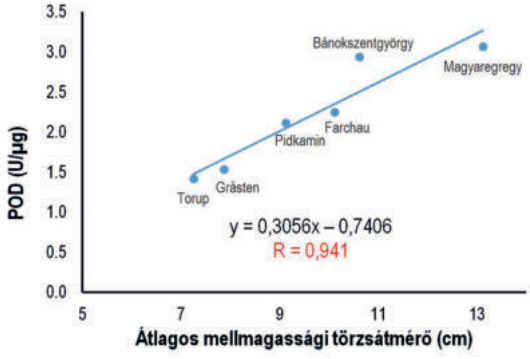
Összfehérje-tartalom és ökológiai távolság (ΔEQ). Megállapítottuk, hogy szignifikáns pozitív kapcsolat van az összfehérje-tartalom és az ökológiai távolság között (*2. ábra*). Azoknak a származásoknak, amelyek eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódtak (pl. Pidkamin), kisebb volt



2. ábra. Korreláció az Ellenberg-index változása (ΔEQ) és az összfehérje-tartalom között, a 2017-ben vett levélminták esetében.

az ökológiai távolságuk (ΔEQ), jók voltak az alkalmazkodási képességei, amit az alacsonyabb összfehérje-tartalom és az általában jobb növekedési paraméterek bizonyítanak. A hűvösebb, nedvesebb klímából áttelepített, nagyobb ökológiai változást elszenvedett származások (pl. Grånsten) fehérje tartalma az előbbiekhez viszonyítva magasabb volt, növekedési paramétereik rosszabbak, ami gyengébb adaptációs képességet jelez.

POD enzim aktivitás és átlagos mellmagassági törzsátmérő. Szignifikáns pozitív kapcsolatot ($p<0,15$) mutattunk ki a származások átlagos mellmagassági törzsátmérője és a POD enzim aktivitása között (*3. ábra*). A *3. ábra* jól mutatja, hogy a legrosszabb teljesítményű, azaz a legkisebb átlagos mellmagassági törzsátmérővel rendelkező, gyenge megmaradású populációk (Grånsten, Torup) esetében a legalacsonyabb a POD enzim aktivitás. Érdekes módon, a pidkamini



3. ábra. Korreláció az átlagos mellmagassági törzsátmérő és a POD aktivitás között (2017-ben vett levélminták).

	Származások					
	Farchau (26)	**Pidkamin (59)**	**Torup (23)**	**B.szent-György (H1)**	**M.egregy (52)**	**Grånsten (21)**
ABTS (mg trolox g^{-1} dw.)	120,7 ± 49,7^{a}	155,8 ± 27,9^{a}	202,1 ± 33,2^{ab}	163,5 ± 78,7^{a}	178,2 ± 54,9^{a}	296,2 ± 84,4^{b}
Á. mellm. törzsátm. (cm)	6,4 ± 2,5^{a}	7,4 ± 1,7^{ab}	5,1 ± 2,2^{a}	8,6 ± 2,8^{ab}	11,4 ± 4,6^{b}	5,6 ± 1,7^{a}
EQ	25,59	29,58	26,18	26,77	26,87	20,26

1. táblázat. A vizsgált származások átlagos mellmagassági törzsátmérője, ABTS antioxidáns kapacitása és Ellenberg indexe 2014-ből. Az eredmények átlag ± szórásértékben vannak feltüntetve. A különböző kisbetűk szignifikáns korrelációt jeleznek n=8 elemszám és p<0,01 szint mellett.

származások POD akitivitása és átmérője a gyenge megmaradású populációkhoz volt közelebb, ennél a származásnál azonban a viszonylag kis átmérőhöz nagy átlagos törzsmagasság társult.

Nem enzimes antioxidáns rendszer szerepe

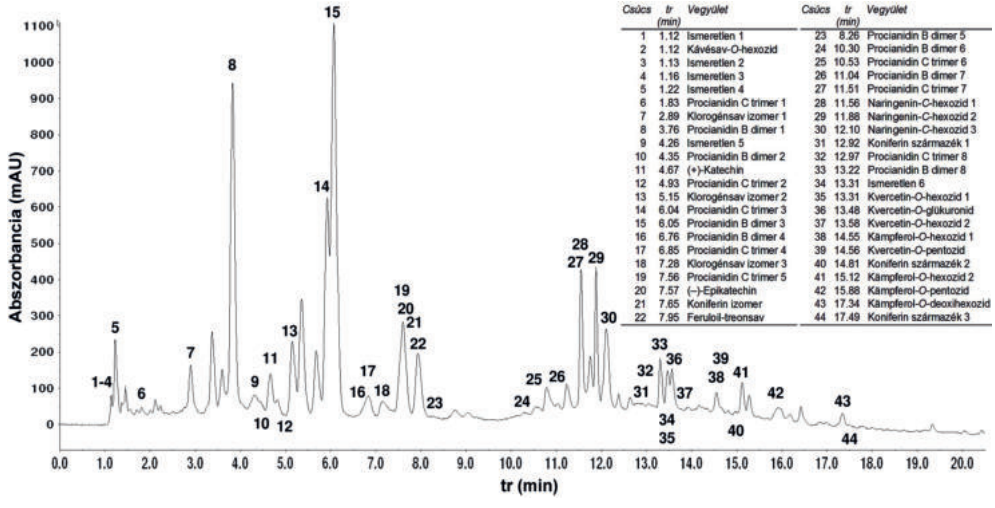
A nem-enzimes antioxidáns rendszer vizsgálatánál elsősorban a polifenol alapú adaptációs válaszokat vizsgáltuk, mivel bizonyított a polifenolok jelentős szerepe a stressz elleni védekezésben.

Kivontuk, elválasztottuk és azonosítottuk a bükk levelek polifenoljait (*4. ábra*). Összesen 44 vegyületet azonosítottunk, ebből 38-at név szerint. Az azonosított vegyületek mennyiségét egy általunk kidolgozott kromatográfiás módszerrel mértük (*Hofmann et al.*, 2017).

Meghatároztuk a levélkivonatok antioxidáns kapacitását is az ABTS módszer alapján (*1. táblázat*). Megállapítottuk, hogy a legrosszabb teljesítménnyel rendelkező állományok (Grånsten, Torup) esetében a legmagasabb az ABTS antioxidáns kapacitás. Feltételezhető, hogy ezekben a származásokban az áttelepítés nagyobb stresszt váltott ki, a magasabb antioxidáns kapacitás erre adott válasznak tekinthető.

Elvégeztük a stresszválaszt általánosan jelző ABTS antioxidáns kapacitás, a polifenolok, az Ellenberg index és az átlagos mellmagassági törzsátmérő mérésénél nyert primer adatok korrelációs vizsgálatát az egyes származásokra (*2. táblázat*).

ABTS antioxidáns kapacitás és polifenol koncentráció. Az ABTS antioxidáns kapacitás és az egyes polifenolok koncentrációi között fennálló szignifikáns pozitív korreláció azt jelezheti, hogy az adott vegyület "erős" antioxidáns, szignifikánsan járul hozzá a levelek antioxidáns tulajdonságaihoz, és



4. ábra. A bükk levél kivonat PDA (250–380 nm) kromatogramja.

Vegyület	ABTS	EQ	ÁMT	Vegyület	ABTS	EQ	ÁMT
Kvercetin-O-hexozid 1	0,937	-0,756	-0,202	Koniferin izomer	-0,359	-0,265	-0,197
Koniferin származék 2	0,919	-0,706	-0,001	Koniferin származék 3	-0,392	0,791	0,311
(–)-Epikatechin	0,903	-0,781	-0,429	Procianidin B dimer 5	-0,558	0,493	0,808
Kvercetin-O-hexozid 2	0,889	-0,678	-0,107	Procianidin C trimer 8	-0,561	0,872	0,216
Kvercetin-O-pentozid	0,876	-0,693	-0,256	Ismeretlen 1	-0,572	0,677	0,790
(+)-Katechin	0,873	-0,834	-0,084	Ismeretlen 3	-0,594	0,707	0,677
Kávésav-O-hexozid	0,872	-0,632	-0,393	Procianidin B dimer 6	-0,639	0,097	0,137
Procianidin C trimer 3	0,870	-0,851	-0,222	Procianidin C trimer 7	-0,665	0,784	0,057
Procianidin B dimer 4	0,825	-0,838	-0,143	Feruloil-treonsav	-0,683	0,314	0,679
Procianidin C trimer 4	0,817	-0,757	-0,312	Procianidin C trimer 5	-0,694	0,304	0,379
Kempferol-O-hexozid 2	0,815	-0,627	-0,059	Naringenin-C-hexozid 2	-0,733	0,539	0,344
Kvercetin-O-glükuronid	0,811	-0,555	-0,445	Ismeretlen 4	-0,759	0,656	0,582
Procianidin B dimer 2	0,761	-0,513	-0,330	Ismeretlen 5	-0,785	0,793	0,642
Kempferol-O-hexozid 1	0,740	-0,505	-0,014	Naringenin-C-hexozid 1	-0,807	0,638	0,304
Kempferol-O-pentozid	0,732	-0,531	-0,156	Naringenin-C-hexozid 3	-0,824	0,672	0,237
Ismeretlen 2	0,650	-0,435	-0,078	Procianidin C trimer 2	-0,829¬	0,869	0,075
Procianidin C trimer 1	0,605	-0,525	0,192	Procianidin B dimer 1	-0,849	0,441	0,033
Koniferin származék 1	0,534	0,007	-0,098	Procianidin B dimer 8	-0,849	0,778	0,013
Klorogénsav izomer 2	0,519	-0,200	-0,174	Ismeretlen 6	-0,900	0,848	0,658
Klorogénsav izomer 1	0,382	0,163	0,514	Procianidin B dimer 3	-0,908	0,574	0,498
Klorogénsav izomer 3	0,251	0,135	0,765	Procianidin C trimer 6	-0,944	0,688	0,497
Kempferol-O-deoxihexozid	-0,343	0,660	0,469	Procianidin B dimer 7	-0,954	0,782	0,172

2. táblázat. A származások átlagos ABTS antioxidáns kapacitásnak-, Ellenberg indexének (EQ)-, valamint az átlagos mellmagassági törzsátmérőjének (ÁMT) korrelációja az egyes polifenol koncentrációkkal. Szignifikáns korreláció ($p < 0,05$ $n=6$; $|R| \geq 0,812$) vastagon kiemelve.

jelentős szerepe lehet a védekezési, adaptációs folyamatokban. A korrelációs vizsgálat alapján a vizsgált bükk levelekben a leghatékonyabb antioxidánsok például: kvercetin-O-hexozid 1, kvercetin-O-hexozid 2, koniferin származék 2, (+)-katechin, (–)-epikatechin, kvercetin-O-pentozid, kávésav-O-hexozid, kempferol-O-hexozid 2, procianidin B dimer 3, procianidin C trimer 3 és procianidin C trimer 4.

Egyes vegyületek esetében szignifikáns negatív korrelációt találtunk ($R < -0,812$), ezeknek a vegyületeknek feltételezhetően szignifikáns ABTS prooxidáns hatása van a bükk levél kivonatokban (*2. táblázat*).

EQ értékek és polifenol koncentráció. A polifenolok koncentrációi és az EQ értékek közötti korrelációk alapján megállapítottuk, hogy a magasabb EQ-val rendelkező (melegebb és szárazabb régiókból származó) bükk származások alacsony koncentrációban tartalmaznak több, nagy antioxidáns hatékonysággal jellemezhető vegyületet (pl. (+)-katechin, procianidin C trimer 3 és procianidin B dimer 4). Ezt a megállapítást a vegyületek koncentrációi és az EQ értékek közötti szignifikáns negatív korrelációk bizonyítják. Azok a származások, melyek eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódtak evolúciójuk során, általában jobb növekedési paraméterekkel is rendelkeznek. Mivel a bucsutai kísérleti körülmények között nincsenek fokozott stressznek kitéve, ezért nem termelnek nagyobb mennyiségben hatékony és erős antioxidánsokat.

Mellmagassági törzsátmérő és polifenol koncentráció. Nem találtunk egyértelmű szignifikáns korrelációt a polifenolok koncentrációi és a mellmagassági törzsátmérő között. Megállapítható, hogy egyes vegyületek koncentrációi közvetlen, pozitív kapcsolatban állnak az átmérőnövekedéssel: Ismeretlen 1, Ismeretlen 3, Ismeretlen 4. Ezek a vegyületek markerei lehetnek a bükk származások klimatikus adaptációjának és teljesítményének.

Összefoglalás

Az áttelepítéssel szimulált klimatikus stresszre adott válaszok a genetikai alkalmazkodottságtól (az eredeti származási helytől) függően különböznek, és a különbségek kémiai mérésekkel kimutathatók.

Azok a származások (pl. Pidkamin), melyek eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódtak, anyagcseréjük során nem termelnek megemelkedett mennyiségben hatékony és erős polifenolos antioxidánsokat, mivel a bucsutai kísérleti körülmények között nincsenek fokozott stressznek kitéve, ill. jól alkalmazkodtak a klimatikus körülményekhez, ami miatt jobb növekedési paraméterekkel is rendelkeznek.

A legrosszabb teljesítménnyel rendelkező állományok (Grånsten, Torup) ABTS antioxidáns kapacitása és egyes polifenol vegyületeik koncentrációja kiemelkedően magas, míg a POD enzim aktivitások itt mutatják a legalacsonyabb értékeket. Feltételezhető, hogy a klímaváltozás mértéke nagyobb stresszt váltott ki, a megemelkedett antioxidáns kapacitás és polifenol koncentráció, a lecsökkent POD enzim aktivitás erre adott válasznak tekinthető.

Kutatási eredményeink hozzájárulhatnak a jövőbeli erdőfelújításban és telepítésben felhasználható klímatoleráns bükk populációk kiválasztásához.

Köszönetnyilvánítás. A kutatás a VKSZ_12-1-2013-0034 Agrár-klíma 2 projekt támogatásával valósult meg.

Irodalom

Albert, L., Hofmann, T., Visi-Rajczi, E., Rétfalvi, T., Németh, Zs. I., Koloszár, J. et al., 2002: Relationships Among Total Phenol and Soluble Carbohydrate Contents and Activities of Peroxidase and Polyphenol Oxidase in Red-Heartwooded Beech (Fagus sylvatica L.). 7th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, Turku/Abo, Finnland, Proceedings, 253–256.

Bartholy, J., Pongrácz, R. and *Pieczka, I.,* 2014: How the climate will change in this century? *Hungarian Geograph. Bull. 63*, 55–67, https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.5

Czúcz B., Gálhidy L., és *Mátyás Cs.,* 2013: A bükk és a kocsánytalan tölgy elterjedésének szárazsági határa. *Erdészettudományi Közlemények 3*, 39–53.

Dübeler, A., Voltmer, G., Gora, V., Lunderstädt, J., and *Zeeck, A.,* 1997: Phenols from Fagus sylvatica and their role in defence against *Cryptococcus fagisuga. Phytochemistry 45*, 51–57, https://doi.org/10.1016/S0031-9422(96)00771-6

Ellenberg, H., 1988: Vegetation ecology of Central Europe, 4th ed. Cambridge University Press.

Fang, J. and *Lechovicz, M.J.*, 2006: Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus sylvatica* L.) species in the world. *J. Biogeography 33*, 1804–1819, https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01533.x

Gálos B. és *Führer E.*, 2018: A klíma erdészeti célú előrevetítése. *Erdészettudományi Közlemények 8*, 43–55, https://doi.org/10.17164/EK.2018.003

Gálos, B., Führer, E., Czimber, K., Gulyás, K., Bidló, A., Hänsler, A., Jacob, D. and *Mátyás, Cs.*, 2015: Climatic Threats Determining Future Adaptive Forest Management – a Case Study of Zala County. *Időjárás 119*, 425–441.

Hassan, W., Noreen, H., Rehman, S., Gul, S., Kamal, M.A., Kamdem, J.P. et al., 2017: Oxidative Stress and Antioxidant Potential of One Hundred Medicinal Plants. *Curr. Topics Medic. Chem. 17*, 1336–1370, https://doi.org/10.2174/1568026617666170102125648

Hlásny, T., Barcza, Z., Mátyás, Cs., Seidl, R., Kulla, L., Merganičová, K., Trombik, J., Dobor L., and *Konopka, B.*, 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Lesnícky časopis – Forestry J. 60*, 5–18, https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001

Hofmann, T., Tálos-Nebehaj, E., and *Albert, L.,* 2017: Leaf polyphenols as indicators of climatic adaptation of Beech (Fagus sylvatica L.) - an HPLC-MS/MS via MRM approach. *Int. Labmate 42* (3), 12–14.

Horváth, A. és *Mátyás, Cs.*, 2014: Növedékcsökkenés előrevetítése egy bükk származási kísérlet alapján (Estimation of increment decline caused by climate change, based on data of a beech provenance trial). *Erdészettudományi Közlemények 4*, 91–99, https://doi.org/10.15177/seefor.16-06

Horváth, A. és *Mátyás, Cs.*, 2016: The decline of vitality caused by increasing drought in a beech provenance trial predicted by juvenile growth. *South-east Eur. Forestry 7*, 21–28.

Jezik, M., Blazenec, M., Strelcová, K., and *Ditmarová L.*, 2011: The impact of the 2003–2008 weather variability on intra-annual stem diameter changes of beech trees at a submontane site in central Slovakia. *Dendrochronologia 29*, 227–235, https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.009

Mátyás, Cs., 1994: Modelling climate change effects with provenance test data. *Tree Physiol. 14*, 797–804.

Mátyás, Cs., Bozic, G., Gömöry, D., Ivankovic, M., and *Rasztovits, E.*, 2009: Juvenile growth response of European beech (Fagus sylvatica L.) to sudden change of climatic environment in SE European trials. *iForest 2*, 213–220, https://doi.org/10.3832/ifor0519-002

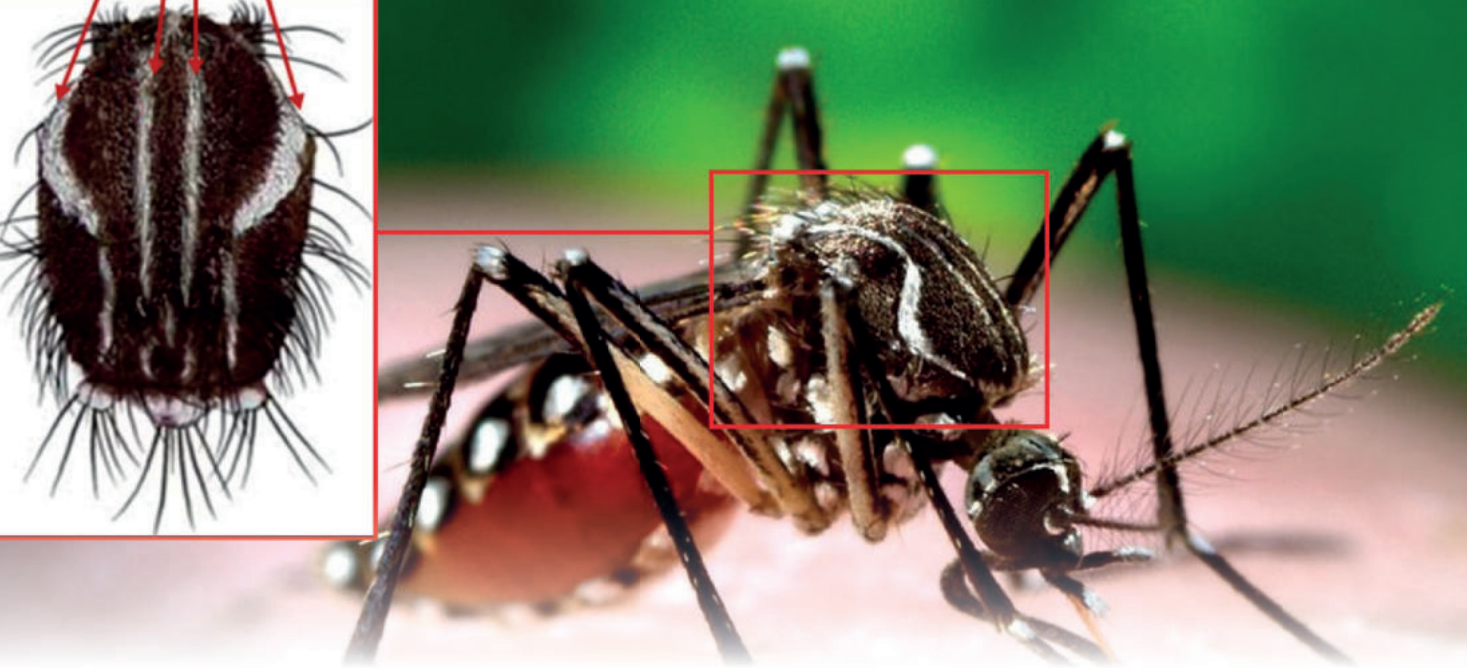
Puccinelli, P., Anselmi, N. and *Bragaloni, M.*, 1998: Peroxidases: suitable markers of air pollution in trees from urban environments. *Chemosphere 36*, 889–894.

Visi-Rajczi, E., Hofmann, T., Albert, L., and *Mátyás, Cs.*, 2021: Tracing the acclimation of European beech (Fagus sylvatica L.) populations to climatic stress by analyzing the antioxidant system. *iForest 14*, 95–103, https://doi.org/10.3832/ifor3542-013

von Wuehlisch, G. and *Alia, R.*, 2011: COST E52 Final Report-Genetic Resources of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) for sustainable forestry. Proceedings of the COST E52 'Evaluation of beech genetic resources for sustainable forestry'. (Monografías INIA: Serie Forestal 22).

Zolfaghari, R., Hosseini, S. M., and *Korori, S.A.A.*, 2010: Relationship between peroxidase and catalase with metabolism and environmental factors in Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in three different elevations. *Int. J. Environ. Sci. 1*, 243–252.

URL1: Statisztikai tükör. Az erdőgazdálkodás jellemzői. https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/regiok/orsz/erdogazd12.pdf



A sárgaláz szúnyog populációk múltbeli, közelmúltbeli és jövőbeli éghajlati stabilitásának vizsgálata Európában

Trájer Attila János
Pannon Egyetem, attilatrajer@gmail.com

A sárgaláz szúnyog az egyik legjelentősebb ízeltlábú vektor. A 19. század és a 20. század fordulóján a Földközi-tenger partvidékén behurcolt formában elterjedt volt. Jelenleg Európában csak a Fekete-tenger mellékén lelhető fel. Jelen tanulmány a faj múltbeli, referenciaidőszakot illető és a várható jövőbeli elterjedésének modellezése volt a kontinensen. A múltra és a közelmúltra vonatkozó modellezett éghajlati alkalmasság-értékek összevetése alapján állítható, hogy a faj jelenlétének nincsen jelenleg klimatikus korlátja a Földközi-tenger partvidékén. A jövőben a faj számára Európa déli részének éghajlati körülményei jelentősen javulni fognak és akár a Kárpát-medence déli területeinek klímája is alkalmassá válhat a faj fennmaradása számára.

Investigation of the past, the recent and future climate stability of yellow fever mosquito populations in Europe

The yellow fever mosquito is one of the most significant arthropod vectors. This mosquito was widespread on the Mediterranean shores at the turn of the 19th and 20th centuries. It is currently found in Europe only on the Black Sea. The present study was performed to model the past, the reference period, and the expected future distribution of the species on the continent. A comparison of modelled climatic suitability values for the past and recent periods show that there is no climatic limit to the presence of the species on the Mediterranean coast. In the future, the climatic conditions of the Sothern regions of Europe will improve significantly for the Yellow fever mosquito, and even the climate in the southern parts of the Carpathian Basin may become suitable for the species.

Bevezetés – A sárgaláz szúnyog közegészségügyi jelentősége

A sárgaláz szúnyog (*Aedes aegypti* Linnaeus, 1762) egy egyenlítői afrikai eredetű, a trópusi és szubtrópusi területeken a gyarmatosítás időszaka óta meghatározó humánegészségügyi kockázatot jelentő inváziós szúnyog faj. Olyan jelentős betegségek terjesztője, mint amilyen a Chikungunya-, a dengue-, a Zika-láz, valamint a magyar nyelvben a faj névadó betegsége, a sárgaláz. A sárgaláz Afrika, Közép- és Dél-Amerika trópusi területein fordul elő, elsődleges vektora (aktív terjesztője) a sárgaláz szúnyog. Vírus okozza, a betegség szövődményei halálosak lehetnek; az általános halálozási ráta 3–7,5%, de akiknél a sárgaság kialakul,

a halálozási arány 20–50% (*Monath*, 2008). A dengue-láz egyik fontos terjesztője a sárgaláz szúnyog, de emellett az ázsiai tigrisszúnyog (*Aedes albopictus* Skuse, 1895), s még két rokon faj is lehetséges terjesztői, melyek azonban az ázsiai tigrisszúnyogtól eltekintve Európában nem fordulnak elő. Tekintve, hogy évente nagyjából 390 millió ember fertőződik meg dengue-vírussal, és körülbelül 20–25 ezren halnak meg az általa okozott betegségben (ECDC dengue factsheet), a dengue-láz halálozási rátája aránylag nem túl magas (0.01% körüli), hacsak ki nem alakul a súlyos, vérzéses kórállapottal jellemezhető forma. A betegség ma már több mint 100 országban endémiás Afrikában, Amerikában, a Földközi-tenger keleti részén, Délkelet-Ázsiában és a csendes-óceáni térségben. Európában Dél-Franciaországban (*Gould et al.*, 2010), Spanyolországban (*Monge et al.*, 2020) és Olaszországban (*Lazzarini et al.*, 2020) figyeltek meg helyi átvitelű dengue-láz eseteket. A Chikungunya-lázra Európában 2007-ben figyeltek fel, amikor augusztusban az olasz Emilia-Romagna tartományban helyi átvitelű (autochton) eseteket figyeltek meg (*Watson*, 2007). Mint kiderült, a betegséget egy India Kerala tartományából visszatérő nő hurcolta be Olaszországba (*Rezza*, 2018), ahova az *Ae. albopictus* már korábban behurcolásra került, és azóta is jelen van Dél-Európában a vírussal együtt, melynek a sárgaláz szúnyog is egy fontos, lehetséges terjesztője.

Történelmi kitekintés

A sárgaláz szúnyog eredetileg egy szilvatikus (erdei) faj volt. Az emberi környezet, az urbanizáció alkalmas élőhelyet biztosítanak a faj számára, ezért az erdei populációk mellett megjelentek az ember környezetében élő- és szaporodó (ún. peri-domestic) populációi is. A trópusi esőerdei élőhelyét valamikor a gyarmatosítás idején hagyhatta el, bár elképzelhető, hogy valamelyik középkori afrikai államban, pl. a Mali vagy a Kanem-bornu birodalomban kezdődött el a folyamat. Eredeti elterjedési területe trópusi klímájú élőhelyekre korlátozódott, de ma már előfordul szubtrópusi, sőt, meleg-mérsékelt övi területeken is. A gyarmatosító európaiak révén eljutott Észak-, Közép- és Dél-Amerikába, Európába, Dél- és Délkelet-Ázsiába, Kelet-Ázsiába, Ausztráliába és Óceánia szigeteire. Az első jelentős, egyértelműen a sárgaláz által okozott járvány Közép-Amerikában 1647-ben történt (*Chippaux* és *Chippaux*, 2018). Érdemes megjegyezni, hogy a sárgaláz vírus is afrikai eredetű, és ahogy a szúnyog maga cukornád tövekkel, úgy a kórokozó a rabszolgakereskedelem révén jutott el más kontinensekre.

Azonban nem csak a nedves trópusi területeken okozott gondot a sárgaláz szúnyog által terjesztett sárgaláz; súlyos járványokat regisztráltak pl. a nedves szubtrópusi klímájú (*Cfa* - a Köppen-Geiger-féle klímaosztályozás szerint) Buenos Airesben (Argentína) 1871-ben és 1793-ban Philadelphiában (Egyesült Államok). Európában a sárgaláz szúnyog széltében elterjedt volt a 19. század második felében és a 20. század elején a Földközi-tenger és a Fekete-tenger térségében. Athénban, Görögországban 1881, 1889, 1895–1897, 1910 és 1927–1928 során sorozatban zajlottak dengue-láz járványok: a legsúlyosabb, ami pl. Athén lakosságának kb. a 90%-át érintette, az utolsó periódusban zajlott. Olyan északi területeken is terjesztett betegségeket a sárgaláz szúnyog, mint pl. Cardiff, Dublin, a bulgáriai Breszt és Odessza (*Andrade*, 2011). Hasonlóan a sárgaláz vírushoz, a dengue-vírus is súlyos, életveszélyes fertőzést képes okozni, ez utóbbi elsősorban a fiatalabb korosztályban. A sárgaláz szúnyog kiirtására Dél-Európából a második világháború után került sor. Ahonnan azonban kiirtani sosem sikerült az a Fekete-tenger délnyugati, a sárgaláz szúnyog szempontjából kedvező klímájú, a Kaukázus nyugati vonulataival határos öble. A grúziai Batumi klímája pl. ugyanúgy nedves szubtrópusi (*Cfa*), mint Buenos Airesé vagy Philadelphiáé. Azonban nagyon fontos kiemelni, hogy Grúzia tengerparti területei és Délnyugat-Oroszország Fekete-tengerrel határos zónája jelentik egyben a faj egyik legészakibb előfordulását is, mely tény meghatározó abból a szempontból, hogy az itt található ökotípus alkalmazkodhatott leginkább az európiai, illetve általában a mérsékelt öv melegebb részének klimatikus körülményeihez.

Célkitűzés és háttér

A Fekete-tenger körüli sárgaláz szúnyog populációknak azért van kiemelt jelentősége, mert ha behurcolnák ezen előfordulási területéről a földközi-tengeri kikötőkbe, akkor feltehető, hogy lehetősége lenne arra, hogy Európa megfelelő klímájú területeit meghódítsa. Ez a meghódítható terület valószínűleg északi irányban jelentősebb lenne, mint amit egy melegebb területről származó sárgaláz szúnyogpopuláció kolonizálni lenne képes. Különös jelentőséget ennek a lehetőségnek ugyanakkor az ad, hogy az előrejelzések szerint 2071–2100-ra Közép- és Nyugat-Európa alföldi és dombsági területeinek nagy része a rosszabb energiavisszatartási forgatókönyvek teljesülése esetén magára öltheti a nedves szubtrópusi (*Cfa*) klimatikus viszonyokat (*Beck et al.*, 2018), ami maga után vonhatná a sárgaláz szúnyog északi irányú invázióját ezeken a területeken. E jövőbeli lehetőség miatt érdemes lenne előre jellemezni a sárgaláz szúnyog várható európai előfordulását a jövőben, azonban ennek előrejelzése számos technikai buktatót rejt magában. A jelen közlemény egy, a szerző tollából a Heliyon c. tudományos folyóiratban 2021-ben megjelent publikáció egyes elemein alapul (*Trájer*, 2021).

Az elterjedési modellezés módszertani kérdései

Az elterjedés-modellezési problémák főként abból származnak, hogy Európa a sárgaláz szúnyog lehetséges elterjedéséi területének határvidékét jelenti, és a létező fekete-tengeri partvidéki populációk korlátozott földrajzi előfordulásúak. Az előrejelzés bizonytalanságát szemléltetik a faj jósolt előfordulási valószínűségi térképei és megfigyelt leírt elterjedése közötti eltérések. A modellek egy része például praktikusan nem jeleníti meg a fekete-tengeri előfordulást még akkor sem, ha azt figyelembe vették különben a modellezők. Az ilyen modellek (pl. *Dickens*, 2018) alapvető problémája az, hogy az adatbevitel során a számos egyenlítői, trópusi előfordulási adat mellett csak viszonylag csekély számú meleg mérsékelt övi megfigyelés kerül rögzítésre. Emiatt, a statisztikai feldolgozás során – a neurális algoritmusok esetén azok, itt külön nem részletezhető belső törvényszerűségei folytán is – a peremterületi megfigyelésekhez köthető szélsőséges klimatikus értékek kiesnek, így a modellezett területek sem fedik ezeket a határterületeket. Ez a hiba kiküszöbölhető, ha kizárólagosan az európai és kis-ázsiai előfordulásokat vesszük figyelembe, azonban ekkor a faj teljes toleranciájára nézve vesztünk adatokat. Ilyen esetben a félautomatizált és automatizált algoritmusok olyan térképeket eredményeznek, amik alaposan alul becsülik a faj előfordulását a déli területeken még a Földközi-tenger térségében is. A probléma megoldása céljából a modellezőnek szelektálni kell az adatok között abban a tekintetben, hogy mely faktor alsó, mely faktor felső szélső értékét vesszük tekintetbe a modellezéskor.

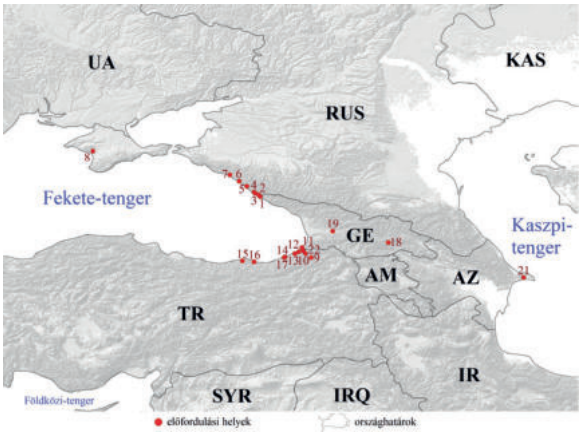
A sárgaláz szúnyog általános élőhelyi igényeinek és származási helyének megfontolása alapján állíthatók a következők:

1. Mivel a faj trópusi előfordulású volt eredetileg, ezért az északi elterjedési határ közelében általában az alacsony hőmérsékleti értékek limitálják a faj európai elterjedését.
2. Köszönhetően annak, hogy Európában olyan területek nincsenek, ahol az éves csapadékmennyiség 55 mm alatt lenne (*Cabrera* and *Selvaraj*, 2020), ezért a csapadék-természetű faktorok alacsony értékei a kontinensen nem játszanak szerepet az elterjedés szempontjából.
3. A csapadék hűtő hatása miatt feltehető, hogy a kimondottan magas csapadék értékek Európában negatívan befolyásolják a faj előfordulását, azaz ebben az esetben a csapadék-alapú változók felső értékeit kell tekinteni elterjedési limiteknek. Ez egy olyan általános megfigyelés, ami más szubtrópusi előfordulású vektorokra, pl. lepkeszúnyogokra is alkalmazható (*Trájer et al.*, 2013).

A faj populációdinamikai indikátorai a legmelegebb negyedévre vonatkozóan kerültek modellezésre, mivel ez jelenti a faj fő aktivitási időszakát a mérsékelt övi területeken, így meghatározó a sárgalázszúnyog fennmaradása és terjedése, valamint betegségátviteli kockázata szempontjából.

Előfordulási adatok

Összesen 21, dokumentált, Fekete-tenger körüli előfordulási (7 délnyugat-oroszországi, 1 krími, 9 kis-ázsiai, 4 kaukázusi) adat és 7 hőmérséklet-alapú, valamint 7 csapadék-természetű bioklimatikus változó került felhasználásra az előfordulási modellezés céljából. Az 1979–2013-es időszak volt a felhasznált referencia időszak, melyből az elterjedési helyekhez kapcsolódó klimatikus adatok kinyerésre kerültek. A referencia-időszaki modell forrása a WorldClim 2.1 adatbázis volt (*Fick* and *Hijmans*, 2017). A viszonylag csekély számú ismert előfordulási hely és azok pozíciójának kellő pontosságú ismerete miatt az adott bioklimatikus faktorhoz tartozó legalacsonyabb és legmagasabb értékek kerültek felhasználásra. Az *1. ábra* mutatja az előfordulási helyek eloszlását a Fekete-tenger tágabb környezetében.



1. ábra. A sárgaláz szúnyog jelenlegi elterjedése a Fekete-tenger mellékén Akiner et al. (2018), Ganushkina et al. (2016) és Riabova et al. (2005) adatai alapján (AM: Örményország, AZ: Azerbajdzsán, GE: Grúzia, IR: Irán, IRQ: Irak, KAS: Kazahsztán, RUS: Oroszország, SYR: Szíria, TR: Törökország, UA: Ukrajna). 1: Adler, 2: Khosta, 3: Sochi, 4: Mamayka, 5: Lazarevskoe, 6: Tuapse, 7: Dzhubga, 8: Priboy, 9: Artvin, 10: Borçka, 11: Hopa, 12: Arhavi, 13: Fındıklı, 14: Pazar, 15: Vakfikebir, 16: Trabzon, 17: Ardeşen, 18: Tbilisi, 19: Kutaisi, 20: Batumi, 21: Baku.

Populációdinamikai indikátorok

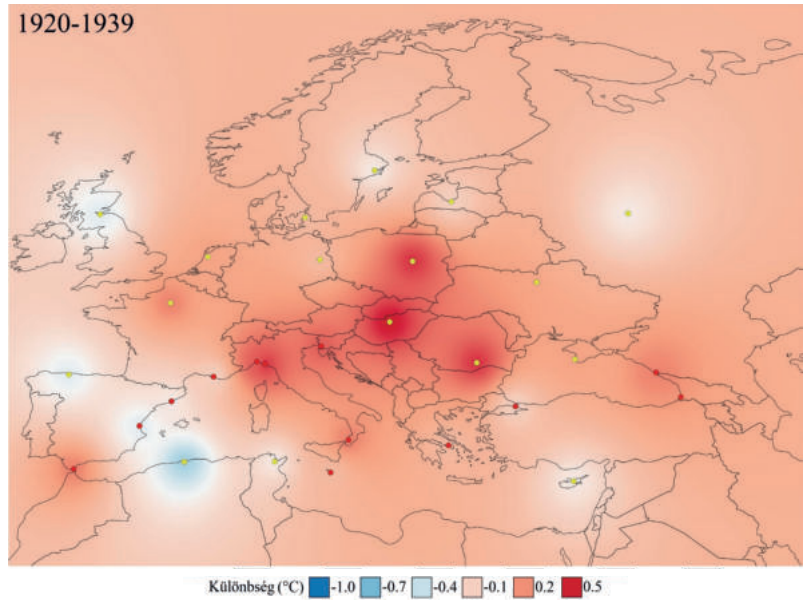
A kérdés, ami nyilván felmerül a történelmi tények ismeretében az, hogy ha a faj a közelmúltban is előfordulhatott volna a Földközi-tenger vidékén, vajon a visszatérésének feltételei a közelmúltban és a jövőben milyenek lehettek, lehetnek ahhoz az időszakhoz viszonyítva, amikor a dél-európai országokban tényleg jelen volt. Ennek vizsgálatához a faj klimatikus elterjedési igényeinek vizsgálata önmagában nem elegendő, hanem a faj populációdinamikai indikátorait is meg kell vizsgálni. Ebből a célból a szúnyog faj teljes hőmérsékletfüggő egyedfejlődéi ideje és túlélési rátája kerültek modellezésre *Tun-Lin et al.* (2000) egyenletei alapján.

Klímamodellek, klimatikus adatok

A felhasznált, közelmúltat reprezentáló és a várható jövőt jelentő térképes klímamodellek a WordClim1.4 adatbázisból (*Hijmans et al.*, 2005) származtak. A modellkörnyezet, melyben a jövőt reprezentáló modelleket előállították, a Beijing Climate Center Climate System volt. Mind a két modellezett jövőbeli periódus (2041–2060, 2061–2080) és a várható koncentrációváltozás reprezentatív pályái (Representative Concentration Pathways) közül az RCP8.5 alapú modell került felhasználásra. A már korábban használt közelmúltbeli és jövőbeli időszakok kiegészültek egy 20 éves múltbeli időszakkal is a 20. század elejéről (1920–1939). Ennek indoklása az, hogy ebben az időszakban zajlottak Görögországban a legnagyobb, sárgaláz szúnyog által mediált dengue járványok, mint az már a bevezetőben említésre került. Azonban, e múltbeli időszak esetében nem rendelkezünk térképes klímamodellel, így azt elő kellett állítani. Az előállítás alapját 11 földközi-tengeri, 2 fekete-tengeri nagy kikötőváros, valamint 11 nagyobb európai város adatainak letöltése képezte a KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) Climate Explorer adatbázisból (*Trouet* and *Van Oldenborgh*, 2013). A letöltött hőmérséklet-értékek a vizsgált 20 éves időszak-hely párokra nézve átlagolásra kerültek, és az eltérés értékek az 1979–2013-es időszakhoz viszonyítva kiszámításra kerültek. Ezt követően, az eltérés-értékeket a megfelelő földrajzi koordináták szerint visszaírva, IDW (Inverse Distance Weighting) interpoláció révén egy közelítő különbség-modellt lehetett nyerni

a 20 éves periódusra a referencia időszakhoz mérten, majd a referencia időszakot ezekkel a most már folyamatos értékekkel módosítva létre lehetett hozni 1920–1939 közelítő modelljét a legmelegebb negyedév átlaghőmérsékletére vonatkozóan (*2. ábra*).

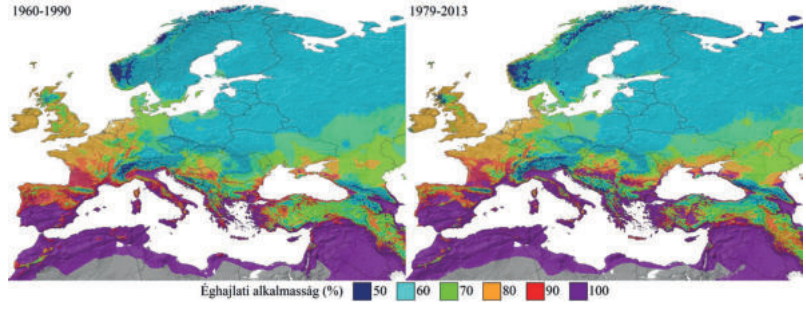
A létrehozott modellek (az éghajlati alkalmasság, az egyedfejlődési idő és a túlélési ráta) a legmelegebb negyedév hőmérsékleti értékeire alapultak, melyek alapján a hőmérsékletfüggő egyedfejlődési idő és a túlélési ráta kiszámításra, illetve térképes megjelenítésre kerültek.



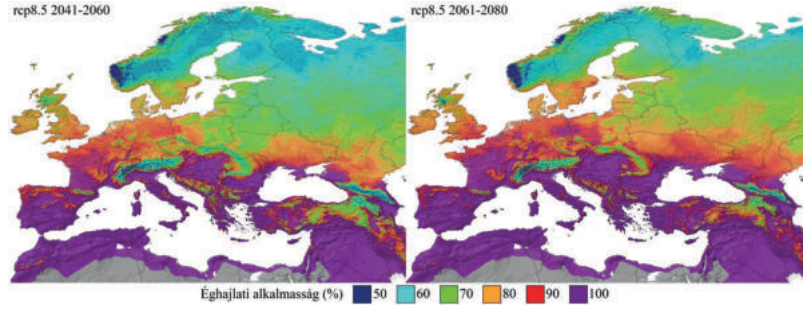
2. ábra. Az 1979–2013 és az 1920–1939-es időszak legmelegebb negyedévi átlaghőmérséklet értékei között fennálló eltérés értékek IDW-interpolált térképei. (Az ábrán lévő piros pontok nagyobb földközi-tengeri kikötőket, a sárga pontok pedig egyéb európai nagyvárosokat jelölnek).

Eredmények – Éghajlati alkalmasság értékek

A modelleredmények alapján a sárgaláz szúnyog jelenleg látható előfordulási hiánya a földközi-tengeri térségben egyértelműen nem a klíma alkalmatlanságának következménye Dél-Európában, hanem feltehetően a 20. század derekán DDT-vel végzett szúnyog-eradikálási kampányok következménye lehet. A modell visszaadta a megfigyelt Fekete-tenger körüli elterjedést, ugyanakkor a Földközi-tenger partvidékén és az Ibériai-félsziget déli felén kiterjedt lehetséges elterjedési területeket mutat az 1960–1990-as időszakra nézve. Az 1979–2013-as időszak esetében azonban már lehetséges előfordulási területek tűnnek fel a térképen a Balkán-félsziget északi részén, a Román-alföldön és a Krím-félszigeten is (*3. ábra*).

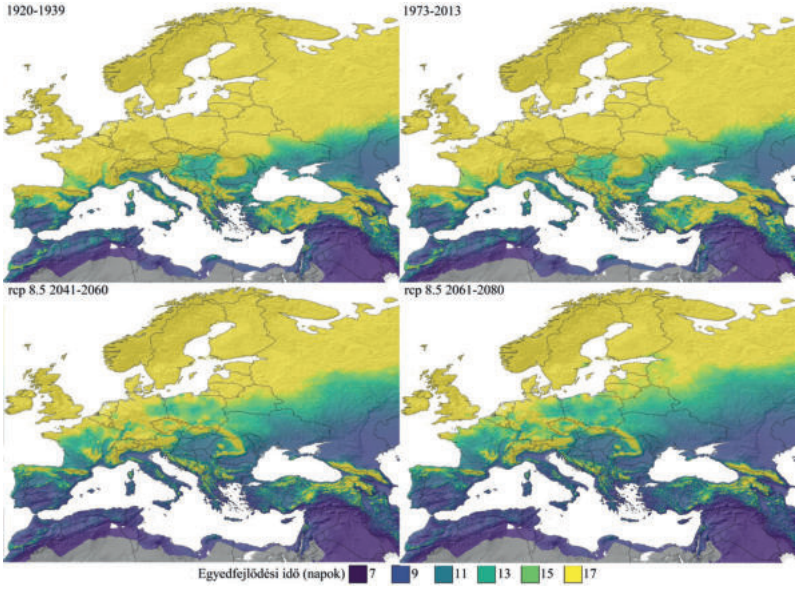


3. ábra. A sárgaláz szúnyog közelmúltbeli klimatikus alkalmasság értékei Európában és a Földközi-tenger mellékén.



4. ábra. A sárgaláz szúnyog jövőben várható klimatikus alkalmasság értékei Európában és a Földközi-tenger mellékén.

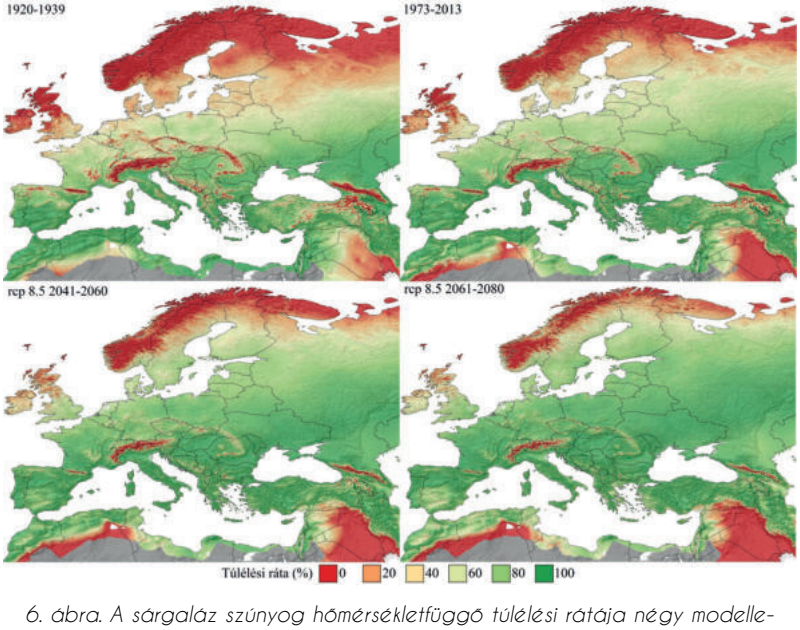
A 2041–2060 és 2061–2080-as időszakokra vonatkozó modellek a sárgaláz szúnyog jelentős, északi irányú térhódítását jósolják, ami mindenképpen érinti Franciaország központi és déli területeit, a Kárpát-medencét, a Balkán-félsziget összes alacsony és közepes tengerszint feletti magasságú területét, a Fekete-tenger összes tengerpart menti területét és Kis-Ázsia nagy részét. Modelltől függően akár Közép-Európa és Nyugat-Európa északi területeit is elérheti a sárgaláz szúnyog a jövőben (*4. ábra*).



5. ábra: A sárgaláz szúnyog hőmérséklet-függő egyedfejlődési ideje négy modellezett időpont példáján szemléltetve a múltban, a közelmúltban és a lehetséges jövőben.

A modellezett populáció-dinamikai indikátorok

A modelleredmények alapján az látható, hogy a teljes hőmérsékletfüggő egyedfejlődési idő értékek nem mutatnak érdemleges eltérést az 1920–1939-es és az 1979–2013-as időszakok összevetésében. A jövőben a faj egyedfejlődési ideje Délnyugat- és Nyugat-Európa kontinentális részén jelentősen lerövidülhet, de a változás még feltűnőbb Kelet-Közép Európa és Kelet-Európa vonatkozásában, ahol az értékek dél-északi irányú eltolódása több száz kilométer nagyságrendűnek mutatkozik (*5. ábra*).



6. ábra. A sárgaláz szúnyog hőmérsékletfüggő túlélési rátája négy modellezett időpont példáján szemléltetve a múltban, a közelmúltban és a lehetséges jövőben.

A hőmérsékletfüggő túlélési ráta értékek sem mutatnak érdemleges eltérést az 1920-1939-es és az 1979-2013-mas időszakok összehasonlítása alapján. A jövőben a faj egyedfejlődési ideje Nyugat-Európában is jelentősen lerövidülhet, de a változás – az előző indikátornál látottakhoz hasonlóan – ebben az esetben is sokkal nyilvánvalóbb és nagyobb mértékű Európa keleti felén. Ugyanakkor a hőmérsékletfüggő túlélési ráta csökkenése látható Észak-Afrikában és a Közel-Keleten az emelkedő átlaghőmérséklet miatt, ami azt jelenti, hogy ezek a déli peremsávok alkalmatlanná válnak a jövőben a faj lehetséges megtelepedése szempontjából (*6. ábra*).

Következtetések

Összefoglalva az eredményeket elmondható, hogy a sárgaláz szúnyog egyáltalán nem becsülhető le, mint a jövő inváziós szúnyog faja Európában, még akkor se, ha a jelenlegi helyzet mást sugall. Nagyon valószínű az eredmények tükrében, hogy a klímaváltozás okozta felmelegedés elősegítheti a Földközi-tenger vidékének rekolonizációját a faj által, majd a század végén a sárgaláz szúnyog északi irányú invázióját. Tekintve, hogy az ázsiai tigrisszúnyog jelenlegi hidegtűrése jobb, mint a sárgaláz szúnyogé, amennyiben ez a helyzet a 21. század végén is fennál majd, nem lehet arra számítani, hogy szerepét tekintve megelőzné azt, de ettől eltekintve bizonyos európai területeken fontos vektorrá válhat. Az eredmények láttán felmerül a kérdés, hogy mi az oka annak, hogy ma nincs jelen a faj Dél-Európában, mikor semmilyen érv nem ismert, és a jelen cikkben bemutatott tanulmány sem mutatott fel olyan tényezőt, ami megmagyarázná a hiányát a mediterrán klímaövben. Felmerül a szúnyog fajok közötti versengés lehetősége is. Annak ellenére, hogy ez a jelenség létezik (*Lounibos et al.*, 2002), ez nem jelenti azt, hogy a sárgaláz szúnyog és az ázsiai tigrisszúnyog együttes jelenléte azonos területen kizárnák egymást. Inkább gondolhatunk arra, hogy a sárgaláz szúnyog eredeti, egyenlítői afrikai származási helye és az ázsiai tigrisszúnyog délkelet-ázsiai eredete jelentős különbségekhez vezethet a fajok adaptációs képességeit illetően. Mivel a sárgaláz szúnyog populációi nem éltek olyan területen, ami a mérsékelt övi területekbe átnyúlt volna, ez magyarázhatja, hogy a hideg területek irányába esően kisebb alkalmazkodási lehetőségekkel rendelkezik, mint ázsiai társa. Arról sem szabad azonban megfeledkezni, hogy a két szúnyog faj Egyesült Államokbeli elterjedése között például egyáltalán nincs nagy különbség, ez nagyjából olyan szélességi eltérést jelent, mint Ohio állam észak-déli kiterjedése (*CDC*, 2018), kb. 340 km, ami léptékében hasonló Magyarország észak-déli kiterjedéséhez. Ha az észak-amerikai adatokat nem ismernénk, valószínűleg szkeptikusabbaknak kellene lennünk azzal kapcsolatban, vajon Európában a klímaváltozás eredményezheti-e a faj terjedését. Azonban, azt tudnunk kell, hogy a Fekete-tenger mellékén tenyésző populáció filogenetikai adatok szerint utóda egy olyan populációnak, ami a gyarmatosítás korában megjárta Észak-Amerikát, majd onnan került vissza Európába (*Kotsakiozi et al*., 2018). Ezért semmi okunk nincs feltételezni, hogy a faj európai populációinak más lehetőségei lennének, mint amerikai társaiknak. A Fekete-tenger melléki sárgaláz szúnyog populációk feltehetően már legalább száz éve megkezdték alkalmazkodásukat európai élőhelyükhöz. Hazai szempontból külön értékelendő az a körülmény, hogy már az 1979–2013-as időszakra vetített modell is azt indikálja, hogy a faj számára alkalmas lehet az észak-balkáni régió, továbbá a jövőbeli modellek is azt jelzik, hogy a 21. század második felében a klíma lényegében alkalmassá válhat a sárgaláz szúnyog számára. Mivel a sárgaláz szúnyog északi elterjedését, ha egyetlen klíma-típushoz kell kötni, az a nedves szubtrópusi (*Cfa*) kell legyen, ezért figyelemreméltó, hogy az IPCC negyedik összefoglaló jelentésének 2076–2100-as Köppen-Geiger klímatérképe is hasonló mintázatot mutat, mint amit a klimatikus alkalmassági térképen láthatunk (*Rubel et al.*, 2010). A faj vizsgált két populációdinamikai indikátora azt mutatja, hogy az emelkedő hőmérséklet ilyen szempontból is elősegíti a faj terjedését a jövőben, beleértve a Kárpát-medencét is.

Köszönetnyilvánítás. A cikkben bemutatott kutatás az NKFIH-471-3/2021 számú projekt támogatásával valósult meg.

Irodalom

Akiner, M.M., Demirci, B., Bedir, H., Öztürk, M., Demirtaş, R., Doğan, A.F., Gökdemir, A., Topluoğlu, S., Altuğ, Ü., Kurtcebe, Z.Ö., and *Irmak, H.* 2018: Surveillance and control of invasive Aedes species in the Eastern Black Sea Area of Turkey. *Turk. Bull. of Hyg. & Exp. Biol./ Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji, 75, 225–238.* https://doi.org/10.5505/TurkHijyen.2018.68736

Andrade, C.F.S., 2011: Aedes aegypti control-what to update in a subject with traditional solutions. In: 7th International Conference on Urban Pests-Ouro Preto, Brazil. https://www. researchgate. net/publication/275567865

Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., and *Wood, E.F.*, 2018: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data 5*, 1–12.https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214

CDC, The Panama Canal: https://www.cdc.gov/malaria/about/history/panama_canal.html

CDC, 2018: Centers for Disease Control and Prevention. (2018). ESTIMATED Potential Range of Aedes aegypti and Aedes albopictus in the United States, 2017.

Cabrera, C.V.P. and *Selvaraj, J.J.*, 2020: Geographic shifts in the bioclimatic suitability for Aedes aegypti under climate change scenarios in Colombia. *Heliyon 6(1)*, e03101.

Chippaux, J.P. and *Chippaux, A.*, 2018: Yellow fever in Africa and the Americas: a historical and epidemiological perspective. *J. Venom. Animal. Tox. Tropic. Diseas. 24.* https://doi.org/10.1186/s40409-018-0162-y

Dickens, B.L., Sun, H., Jit, M., Cook, A.R., and *Carrasco, L.R.*, 2018: Determining environmental and anthropogenic factors which explain the global distribution of Aedes aegypti and Ae. albopictus. BMJ Global Health 3(4), e000801. https://doi.org/10.1136/bmjgh-2018-000801

ECDC dengue factsheet: https://www.ecdc.europa.eu/en/dengue-fever/facts

Fick, S.E. and *Hijmans, R.J.*, 2017: WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. of Climat. 37(12)*, 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Ganushkina, L.A., Patraman, I.V., Rezza, G., Migliorini, L., Litvinov, S.K., and *Sergiev, V.P.,* 2016: Detection of Aedes aegypti, Aedes albopictus, and Aedes koreicus in the Area of Sochi, Russia. *Vector-borne Zoon. Dis. 16*, 58–60. https://doi.org/10.1089/vbz.2014.1761

Gould, E.A., Gallian, P., De Lamballerie, X., and *Charrel, R.N.*, 2010: First cases of autochthonous dengue fever and chikungunya fever in France: from bad dream to reality! *Clinic. Microb. Infec. 16*, 1702–1704. https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2010.03386.x

Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., and *Jarvis, A.*, 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol. 25*, 1965–1978. https://doi.org/10.1002/joc.1276

Kotsakiozi, P., Gloria-Soria, A., Schaffner, F., Robert, V. and *Powell, J. R.*, 2018: Aedes aegypti in the Black Sea: recent introduction or ancient remnant? *Parasit. Vect. 11*, 1–13. https://doi.org/10.1186/s13071-018-2933-2

Lazzarini, L., Barzon, L., Foglia, F., Manfrin, V., Pacenti, M., Pavan, G., Rassu, M., Capelli, G., Montarsi, F., Martini, S., Zanella, F., Padovan, M. T., Russo, F. and *Gobbi, F.*, 2020: First autochthonous dengue outbreak in Italy, August 2020. *Eurosurveill. 25*(36), 2001606. https://doi.org/10.2807/1560 -7917.ES.2020.25.36.2001606

Lounibos, L.P., Suárez, S., Menéndez, Z., Nishimura, N., Escher, R.L., Connell, S.M., and *Rey, J.R.*, 2002: Does temperature affect the outcome of larval competition between Aedes aegypti and Aedes albopictus? *J. Vect. Ecol. 27*, 86–95.

Monath, T.P., 2008: Treatment of yellow fever. Antiviral Res. 78, 116–124. https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2007.10.009

Monge, S., García-Ortúzar, V., Hernández, B.L., Pérez, M.Á.L., Delacour-Estrella, S., Sánchez-Seco, M.P., Fernández-Martinez, B., LucíaGarcía San Miguel, L.G., García Fulgueiras, A., Sierra Moros, M.J., and *Dengue Outbreak Investigation Team*, 2020: Characterization of the first autochthonous dengue outbreak in Spain (August–September 2018). *Acta Tropica 205*, 105402., https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2020.105402

Rezza, G., 2018: Chikungunya is back in Italy: 2007–2017. *J. Tr. Medic. 25*(1), tay004. https://doi.org/10.1093/jtm/tay004

Riabova, T.E., IuV, I., Ganushkina, L.A., Orabeĭ, V.G., and *Sergiev, V.P.*, 2005: Detection of Aedes (Stegomyia) aegypti L. mosquitoes in Sochi city. *Meditsinskaia Parazitologiia i Parazitarnye Bolezni 2005 (3)*, 3–5.

Rubel, F. and *Kottek, M.*, 2010: Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Meteorol. Zeits. 19(2), 135.

Trájer, A.J., 2021: Aedes aegypti in the Mediterranean container ports at the time of climate change: A time bomb on the mosquito vector map of Europe. *Heliyon 7*(9), e07981. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07981

Trájer, A.J., Bede-Fazekas, Á., Hufnagel, L., Horváth, L., and *Bobvos, J.*, 2013: The effect of climate change on the potential distribution of the European Phlebotomus species. *App. Ecol. Environ. Res. 11*(2), 189–208. https://doi.org/10.15666/aeer/1102_189208

Trouet, V. and *Van Oldenborgh, G.J.*, 2013: KNMI Climate Explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research 69*(1), 3–13. https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3

Tun-Lin, W., Burkot, T.R. and *Kay, B.H.*, 2000: Effects of temperature and larval diet on development rates and survival of the dengue vector Aedes aegypti in north Queensland, Australia. *Med. Veterinary Entom. 14*, 31–37. https://doi.org/10.1046/j.1365-2915.2000.00207.x

Watson, R., 2007: Europe witnesses first local transmission of chikungunya fever in Italy. *Brit. Med. J. 335*(7619), 532–533., https://doi.org/10.1136/bmj.39332.708738.DB

Az áramszolgáltatást veszélyeztető szélsőséges időjárási helyzetek

III. rész. A légköri konvekció: zivatarok

Horváth Ákos[1], Simon André[2]
[1]Országos Meteorológiai Szolgálat, horvath.a@met.hu
[2]Szlovák Hidrometeorológiai Intézet

A szélsőséges időjárási helyzetek gyakran okoznak jelentős károkat, illetve fennakadásokat a hazai infrastruktúrában, mindenekelőtt a közlekedésben és az áramszolgáltatásban. A tanulmány egy több részes elemzés harmadik részeként azt mutatja be, hogy térségünkben milyen körülmények között alakulnak ki azok a konvektív viharok, heves zivatarok, amelyek a leggyakoribb és legsúlyosabb káresemények kiváltói.

Extreme weather events endangering the power supply
III. section. Atmospheric convection: thunderstorms

Extreme weather situations often cause significant damage or disruption of the domestic infrastructure, particularly transport and electricity supply. The present study, in the third part of a multi-part analysis, shows weather conditions and appearance of severe convection and their impact to power supply.

Az infrastruktúrát közvetlenül károsító szélsőséges időjárási helyzetek három fő csoportjáról szóló cikksorozat első része *a téli vegyes halmazállapotú csapadékrendszerek*, mindenekelőtt **az ónos eső és a vizes-tapadó hó** kialakulásáról és veszélyeiről szólt (*Horváth et al.*, 2019). A második fejezet a **viharciklonokat** elemezte, amelyek elsősorban a nagy területeken, hosszan fújó orkán erejű széllel okoznak súlyos üzemzavarokat (*Horváth et al.*, 2020). A harmadik rész témaköre a *légköri konvekció*, vagyis a zivatarokkal kapcsolatos szélviharok, felhőszakadások és villámlások, illetve azok hatása az áramszolgáltatásra.

Konvektív komponensek: a konvekció kiváltó hatásai

A légköri konvekció kiváltó hatásai a konvektív komponensek, amelyek legtöbbször egymásra épülve alakítják a feláramlási folyamatokat a termikeken át a gomolyfelhőkön keresztül

a zivatarokig. Ezek a komponensek a felhajtóerő, a torlasztás (konvergencia) és a szélnyírás (*Plant et al.*,2015).

A felhajtóerő (szabad konvekció)

A légköri konvekció fogalmát az olyan függőleges irányú légmozgások leírására használják, amelyet meghatározóan a nem-hidrosztatikus állapotba kerülő légkörben megjelenő felhajtóerő vált ki. Ha csak a felhajtóerő alakítja a feláramlást, akkor szabad konvekciónak is nevezik a folyamatot. A jelenséget szokás a hőlégballonhoz hasonlítani: a felszínen felmelegített rugalmas falú ballonra a hidegebb környezet miatt felhajtó erő kezd hatni, és az emelkedésnek indul. A légkörben hasonló módon indulnak el a vitorlázó repülőket segítő láthatatlan termikek, melyek sűrűségi perturbációkból alakulnak ki (a termikben kevésbé sűrű a levegő, mint a környezetében). Az emelkedő ballonban lévő levegő hőmérséklete az alacsonyabb nyomásszinteken gyorsan csökkenni kezd, a levegő benne száraz adiabatikusan hűl. Hogy a hőmérsékletkülönbséget és ezzel a felhajtó erőt az emelkedés során is biztosítani tudják, a léghajósok bekapcsolják a gázégőt, így melegítik a ballon levegőjét. A légkörben is van ilyen melegítő mechanizmus: a hűlő levegőben kicsapódik a vízgőz, és a kondenzáció során felszabaduló látens hő melegíti az emelkedő légtestet. A légköri „gőzégő" bekapcsolása szemmel is jól látható, mivel a kicsapódó víz hatására megjelennek a gomolyfelhők. Hogy az így megjelenő gomolyfelhő tovább tud-e fejlődni, azt főként a környező levegő állapota határozza meg: hidegebb környezetben nagyobb lesz a különbség, emiatt az emelkedő légtestre további felhajtó erő hat, így az tornyos gomolyfelhővé, majd zivatarfelhővé fejlődik. Erősebb zivatarok növekedését az állítja csak meg, ha elérik a troposzféra tetejét, és a mindig stabil rétegezettségű sztratoszféra lefékezi, majd megállítja a feláramlást. Látható, hogy zivatarok esetén elegendő mennyiségű nedvesség és telítettség is szükséges ahhoz, hogy létrejöjjön a felhőzet és a csapadék.

A felhajtóerő hatását több visszacsatolás is gyengíti. Ilyen az ún. bekeveredés, amikor az emelkedő légtestbe a légköri turbulencia folytán besodródik a környező hidegebb levegő. A hőlégballonos hasonlattal élve: több helyen is lyukas a ballon. Egy másik hatás, amikor nincs elegendő vízgőz az emelkedő légtestben, így megszűnik a latens hő felszabadulása – a ballonos hasonlattal élve elfogy az égőből a gáz. Ilyenkor a felhőtető kiszárad, ellaposodik, vagy ha elég hideg a felhőtető, akkor a már kicsapódott víz fagyása és kristályosodása lesz a meghatározó (*1. ábra*). A fentiekhez még társul a nem-hidrosztatikus nyomásperturbációk hatása, ami általában fékezi a konvekciót (de ahogyan később látjuk, egyes zivatartípusoknál vannak kivételek).

1. ábra. Helyi zivatarfelhő „elegendően nedves" légkörben (baloldali kép) és szárazabb légkörben (jobboldali kép). A jobboldali zivatarban a kevés nedvesség miatt alacsonyabb szinten megindul a fagyás, az üllő szálkás lesz. (Szilágyi Eszter felvétele).

A légoszlop állapota, konkrétan annak a magassággal változó hőmérsékleti és nedvességi rétegződése meghatározza, hogy az abban emelkedő légtestre mekkora felhajtó erő hat, és ezen erő mekkora munkát tud végezni. Ezt a számszerűsíthető mennyiséget hasznosítható konvektív energiának nevezzük. Minél nagyobb a konvektív energia, annál erősebb függőleges mozgások alakulhatnak ki a zivatarban.

Az első konvektív komponens, vagyis a felhajtóerő számszerű becslésére a gyakorlati meteorológiában az ún. labilitási indexeket használják, amelyek különböző magasságokban lévő légállapotok összehasonlításából származtathatók. Ilyen elterjedt mérőszámok többek között a Showalter index (SSI), hasznosítható konvektív energia (CAPE) a K index, stb.

A konvergencia (kényszer konvekció)

A légköri konvekció egyszerűen elindítható úgy is, ha valamilyen akadály (pl. hegy) vagy éles határral rendelkező mozgó légtömeg (pl. hidegfront) feláramlásra kényszeríti a levegőt. A mozgó légtömeghatár, vagy légtömegen belüli összeáramlási zóna (konvergencia) által kiváltott konvekciót kényszer konvekciónak is nevezik. Gyakran előfordul, hogy egy zivatarcellából szétáramló hideg levegő torlasztó hatására indul fejlődésnek a következő cella (multicellás konvekció), vagy a hidegfront mentén, esetleg a front előtt alakul ki több zivatarvonal. A kényszer konvekció akkor váltja ki a hatását, ha a légkör egyébként is instabil, vagyis az első konvektív komponens jelen van. Ilyenkor a kényszer konvekció egyfajta rendező hatásként rendszerbe szervezi az egyébként véletlenszerűen kialakuló konvektív cellákat és létrejönnek a zivatarvonalak, zivatarláncok. A szervezett konvektív rendszerekben a szabad konvekció által felhasználható energiák koncentráltan szabadulnak fel, heves zivatarrendszerek jönnek létre.

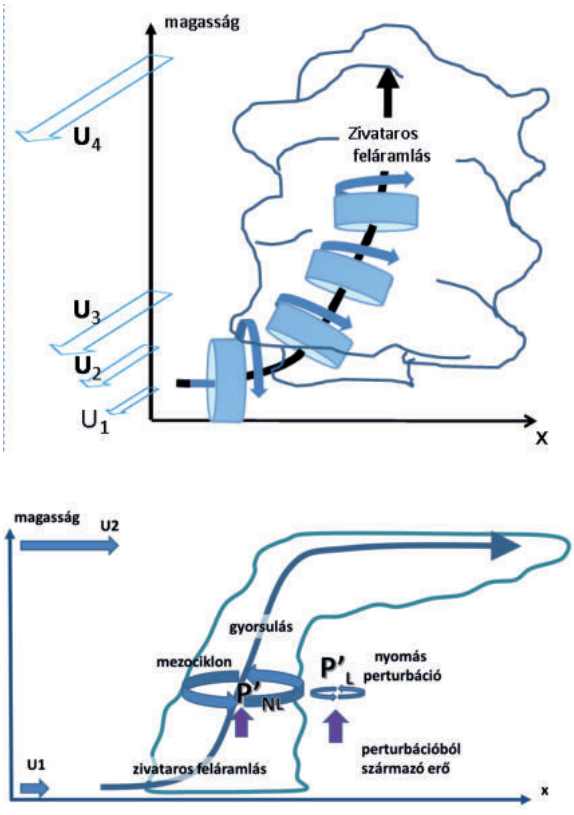
Ezen második komponens, a konvergencia leírására elsősorban az alacsonyabb szinteken a specifikus nedvesség és a szél szorzatából számított derivált érték, az ún. nedvesség konvergencia alkalmas mérőszám.

A szélnyírás (mechanikus instabilitás)

Az a tény, hogy a légkörben az alapáramlás mind horizontálisan, mind vertikálisan változik, erősen befolyásolja a konvekciót: erősíti vagy gyengíti annak lefolyását. A szélnyírás egyik hatása szinoptikus skálán zajlik. Az elméleti meteorológiában használt úgynevezett kvázigeosztrófikus közelítésből arra lehet következtetni, hogy az erős magassági futóáramlások körül olyan vertikális cirkuláció képződik, ami a jet ciklonális oldalán elősegítheti a konvekciót (*Shapiro*, 1982). Bár ez a hatás (amely az örvényességi advekcióval és szélnyírással kapcsolatos) viszonylag gyenge, csak néhány 10 cm/s, hosszabb távon alkalmasabb, instabilabb környezetet létesíthet a zivatarnak (pl. azzal, hogy leépíti a magassági hőmérsékleti inverziókat). A függőleges szélnyírás önmagában is hasznosítható energiát jelent, mivel a magasban fújó viharos szél és a talaj közeli gyengébb áramlás között kinetikus energia különbség van. Ha egy eleinte „közönséges” zivatarfelhő feláramlási rendszerében (vagyis a zivatar kéményében) a levegő az alsó, gyengébben szeles szintekről a magasabb és erősebben szelesebb szintekre jut, akkor a cella tetején a felső légréteggel keveredve felveszi annak sebességét, és a feláramlási csatorna is előre dől. Ez a megdőlés ugyanakkor nem jelent feltétlenül hátrányt a zivatar további alakulásánál, akár nagyon erős (40–50 m/s-t meghaladó) magassági szélnél is képződnek zivatarfelhők, melyeket rendszerint szélsőséges időjárás kísér.

Az örvénylő zivatarok, másnéven szupercellák forgása ugyancsak legtöbbször a függőleges szélnyírásra vezethető vissza. Az első konvektív komponens alapján kialakult zivatarba beáramló légtestnek az alsó troposzférában lévő szélnyírás folytán van egyfajta vízszintes tengelyű forgása (örvényessége), amely a beáramlás során a felhőbe jutva függőleges tengelyűvé válik, minek következtében a felhő forogni kezd (*2a. ábra*). A forgó zivatarfelhőnek – ami a szupercella hivatalos definíciója is – viszont a hagyományos zivatarfelhőhöz képest jelentősen eltérő tulajdonságai lesznek. A szupercella kialakulásához tehát szükség van a termikus labilitás mellett az alsó vagy a közepes szinteken fennálló szélnyírásra is. A szupercellák 10 km körüli átmérővel rendelkező légörvényt, ún. mezociklont hoznak létre. A mezociklon középpontjában lévő cellába spirálisan beáramló (és a növekedő nyomás-, ill. sűrűségi gradiensek miatt egyre gyorsuló) levegő önmagában is képes 120 km/h körüli szelet kelteni. Hasonlóan a szilárd testek impulzusmomentum megmaradásához, a légoszlop „megnyúlása”, avagy a vertikális áramlás magassággal történő növekedése azt eredményezi, hogy a mezociklonban növekszik az örvényesség, és a légoszlop gyorsabban forog. A fent leírt jelenség a hidrodinamikából ismert Kelvin cirkulációs tétel egyik következménye. Ha a spirálisan feláramló levegő a felhő alatt egy keskeny csatornába torkollik, akkor létrejöhet a tornádó, amely a legerősebb távvezeték szerkezetet is képes tönkretenni.

A szélnyírásnak és a mezociklon képződésének köszönhetően többféle nem-hidrosztatikus nyomásperturbáció jön létre (*Bluestein*, 2017). Alacsony szinteken ezek komoly hatással lehetnek a zivatar fejlődésére, mivel olyan függőleges irányú erőt hoznak létre, ami nagyságrendileg összehasonlítható a konvekciós felhajtóerővel. A perturbációk egy része dinamikus eredetű, ún. lineáris tagokat (melyek a forgó levegőoszlop dőlésével kapcsolatosak), valamint nem lineáris tagokat tartalmaznak. Az utóbbiak a levegőoszlop nyújtásából, az áramlás deformációjából vagy az örvényességből származnak (*2b. ábra*). Nagyon leegyszerűsítve – hasonlóan a nagyon kis skálákon működő Venturi elvhez – a zivatarok skáláján is az áramlás dinamikája létrehozhat jelentős függőleges gyorsulást, csak közvetettebb, bonyolultabb módon.



2. ábra. A függőleges szélnyírás kettős hatása. a) (fenn) a vízszintes tengelyű örvényesség függőlegessé válik, a cella forogni kezd; b) (lenn) a zivatarban keletkező mezociklon és az ezzel összefüggő lineáris ill. nem lineáris nyomásperturbációk (p'_L, p'_{NL}) további gyorsulást eredményezhetnek az alacsonyabb szinteken.

A heves zivatarok kialakulása

A fentiek alapján magyarázhatók azok a heves zivatarok, amelyek az áramszolgáltatásban és az infrastruktúra egyéb részeiben jelentős károkat okoznak.

Minden esetben a konvektív instabilitás hatására alakulnak ki a zivatarok, azonban ha csak ez az első konvektív komponens van jelen, akkor legtöbbször nem jönnek létre pusztító zivatarcellák, ill. a hatásuk nagyon lokális skálájú (a zivatar méreteihez hasonló). Amennyiben a konvergencia, vagy a torlasztó hatás is jelen van – melyek létét a nagyobb, szinoptikus skálájú folyamatok alakítják – akkor a zivatarok rendszerbe fejlődve jelennek meg. A zivatarrendszerben a konvektív energia koncentráltan szabadul fel, egymást erősítő multicellás zivatarok jönnek létre, amelyek már viharos szelet, erős villámtevékenységet, jégesőt képesek okozni, akár nagyobb területen is. Különösen veszélyesek a hidegfrontok vagy a front előtt kialakuló zivatarláncok (squall line-ok), amelyek a legtöbb hibát okozzák a középfeszültségű hálózatban. Ha a harmadik konvektív komponens is bekapcsolódik a folyamatba, akkor a szélnyírás hatására még hevesebb zivatarok jönnek létre, és kialakulnak az örvénylő zivatarok, a szupercellák, melyek a több órás létük miatt akár több száz kilométer hosszú pályán is okozhatnak pusztítást.

A zivatarok mindenekelőtt a cellából vagy a zivatar rendszerből kifutó szélen keresztül okoznak meghibásodásokat az elektromos hálózatban. A károk jelentős része farádólésből származik, amelyet erdős területeken keresztülhaladó vezetékek esetén akár egy közepesen erős cella is ki tud váltani. Zivatarrendszerek esetén a nagyszámú, vonalba rendezett cellák egyszerre sok helyen képesek megrongálni a vezetékeket, így tömeges meghibásodások keletkeznek. A különösen heves zivatarcellák, főként a szupercellák már közvetlenül a vezetéket vagy a tartó oszlopot is képesek megrongálni, akár a 220 vagy 400 KV-os vezetékek esetében is (*3. ábra*). A szélkárok mellett nem elhanyagolhatók a villámcsapások okozta károk. A közvetlen villámcsapás okozta mechanikai hatás mellett a túlfeszültségek jelentenek problémát,

3. ábra. Szupercella által 2017.07.24-én megrongált 400 KV-os vezeték Pécs környékén. (MAVIR drón felvétel)

illetve a vezetékek és szigetelők meggyengülése, amelyek csak később, esetleg egy gyengébb szélterhelés hatására okoznak szakadást.

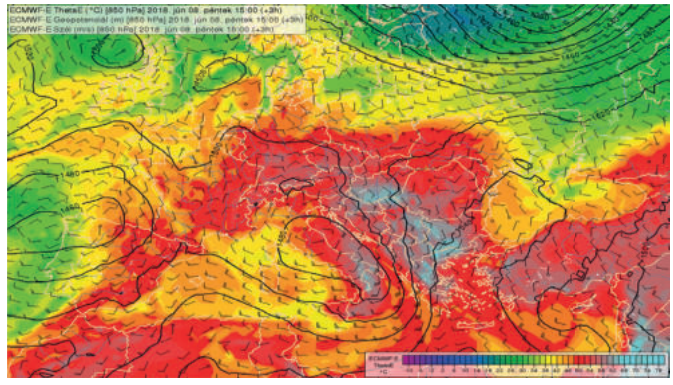
Szinoptikus helyzetek

Az alábbiakban azok az időjárási helyzetek kerülnek bemutatásra, melyek leginkább felelősek az elektromos hálózatot veszélyeztető heves zivatarok, zivatarrendszerek, illetve szupercellák kialakulásáért.

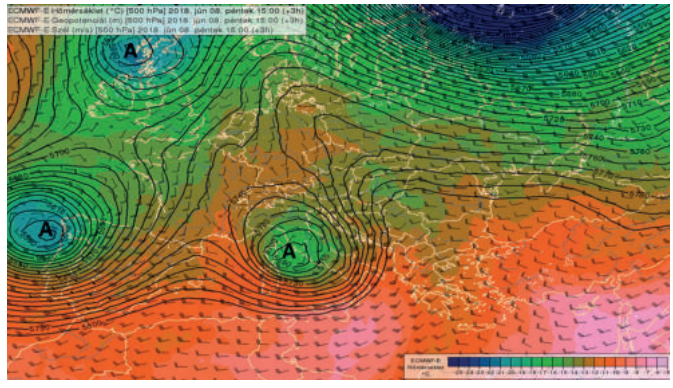
Erős konvektív instabilitás, gyenge szinoptikus kényszerrel (2018. június 8–9.)

Az erős konvektív instabilitás (vagyis amikor az első konvektív komponens a meghatározó) kedvez a hevesebb zivatarok kialakulásának. Ha van egy nagyobb skálájú, nem feltétlenül markáns szinoptikus kényszerhatás, ami a zivatarokat rendszerbe szervezi, akkor vonalba rendezett zivatarok is kialakulhatnak, amelyek már jelentős károkat képesek okozni az áramszolgáltatásban. Az ilyen időjárási helyzeteknek tipikus példája volt a 2018. június 8-9-i viharos helyzet (*Horváth*, 2018). Az eset annyiból is különlegesnek tekinthető, hogy a zivatarvonal kialakulása és áthaladása éjszaka zajlott, amikor nem a felszíni, hanem az emelt konvekció volt a meghatározó. Ez azt eredményezte, hogy a zivatarcellák nem a felszínről, hanem a felszín közeli inverzióról indultak, tehát a felszíni lokális hatások másodlagosak voltak a szinoptikus skálájú rendező hatásokhoz képest.

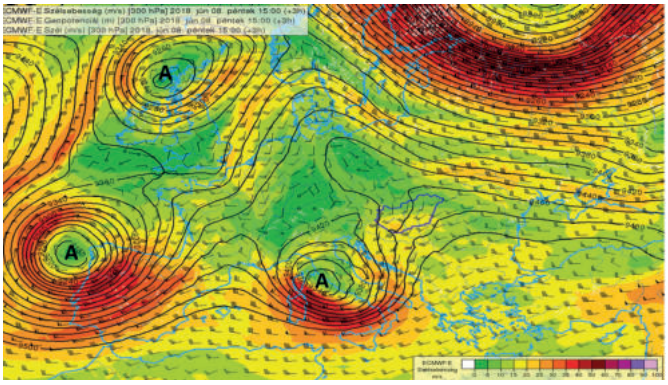
A zivatarok kialakulásához szükséges nedvesség már hosszabb ideje rendelkezésre állt a Kárpát-medencében, ami a Medárd időszakban gyakran előfordul. A nagytérségű folyamatokat egy gyenge mediterrán légörvény jelentette, amelynek az előoldali áramlási rendszerében meleg levegő áramlott a Balkán-félsziget és a Kárpát-medence fölé. A ciklon áramlási rendszere vonalba rendezte a nedvességet is, így egy sávban nagyon erős konvektív instabilitás alakult ki, amelynek térbeli eloszlása és eredete jól látható



4. ábra. Az alsó légkör (850 hPa, kb. 1500 m) állapota 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak a 850 hPa szint magasságát, a színezett területek a szint ekvivalens potenciális hőmérsékletének eloszlását mutatják. A magas értékek jelzik a ciklon előoldalában elnyúló labilis zónát.



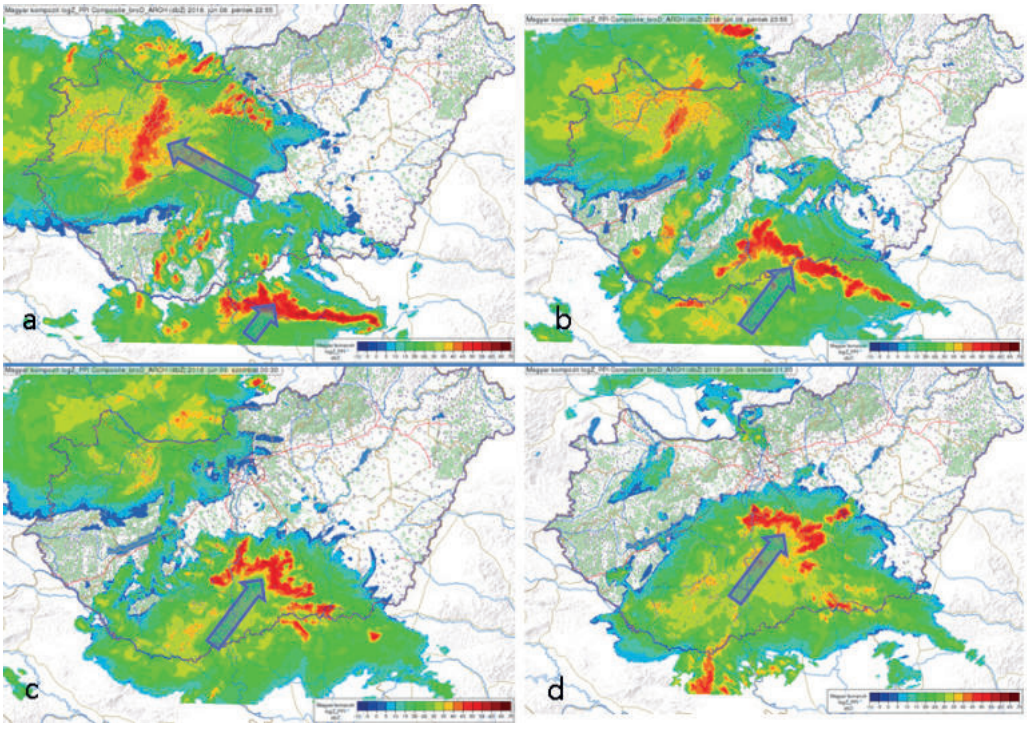
5. ábra. A középső troposzféra (500 hPa, kb. 5500 m) hőmérsékleti és áramlási viszonyai 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak az 500 hPa szint magasságát, a színezett területek a hőmérséklet eloszlását mutatják. A zivatarláncot a légörvényben erősödő szél és a ciklonálissá forduló áramlás is támogatta.



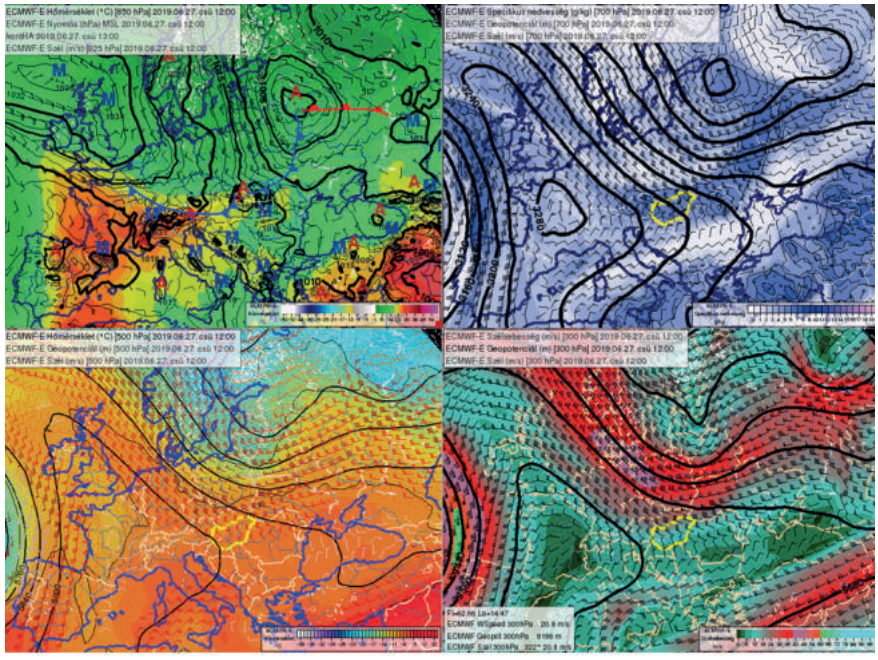
6. ábra. A magasabb légkör (300 hPa, kb. 9300 m) áramlási viszonyai 2018.06.08. 15:00 UTC-kor az ECMWF modell alapján. A folytonos vonalak az 300 hPa szint magasságát, a színezett területek a szélsebességet mutatják. A magasban erősödő szél ugyancsak támogatta a zivatarok fejlődését.

– a hőmérsékletet és nedvességet egyaránt jellemző paraméter – az alacsony rétegek ekvivalens potenciális hőmérséklet mezejében (*4. ábra*). A gyenge ciklon hatása a magasabb rétegekben ugyancsak megjelent (az 500 hPa nyomásszinten ciklonálisra forduló áramlásban), illetve a légörvényhez kapcsolódó jet-stream közeledésében, amelyek a szélnyírás és örvényességi advekció erősödésén keresztül támogatták a zivatarfejlődést (*5–6. ábrák*).

A vihar első hulláma még június 8-án a kora esti órákban végigvonult a Dunántúlon. Az Alföldre lecsapó második hullám első jelei éjfél után jelentkeztek a radarképeken, egy rendkívül erős, délről északra vonuló zivatar vonal formájában (*7.a. ábra*). A 10 km magasságot meghaladó zivatarfelhők intenzív villámlással kísérve 9-én kora hajnalban már az Alföldön, az NKM Áramszolgáltató Zrt. területén tartózkodtak, megőrizve a zivatarlánc struktúrát, amely a különösen heves zivatar rendszerek jellemzője (*7.b. ábra*). Később ez a zivatarlánc-láncszerkezet átmenetileg megtört, kissé lelassulva örvényes struktúrát mutatott (*7.c. ábra*), ami azt jelentette, hogy egy adott terület fölött tovább tartózkodtak a zivatarok, több villámcsapással és nagyobb mennyiségű csapadékkal sújtva az adott területet. Végül a zivatar hűtötte hideg levegő ismét vonalba rendezte a cellákat, amelyek északi



7. ábra. Az átvonuló éjszakai zivatarrendszer az OMSZ kompozit radarképei alapján 2018.06.09-én. a) 00:55; b) 01:55; c) 02:30; d) 03:20 helyi időben. A nyilak a zivatarláncok mozgását mutatják.



8. ábra. Időjárási helyzet 2019.06.27-én 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján 2019.06.27-én 12 UTC-kor. A bal felső ábra a tengerszinti légnyomást, az alsó szintek (925 hPa) szélviszonyait és az 1500 m körüli magasság (850 hPa) hőmérsékletét, a jobb felső ábra a 3000 m körüli magasság (700 hPa) szél és nedvességviszonyait jelzi. A bal alsó ábra az 5500 m körüli magasság (500hPa) szél és hőmérséklet viszonyait a jobb alsó ábra a 9000 m (300 hPa), azaz a jet stream rétegének szélviszonyait jelzi.

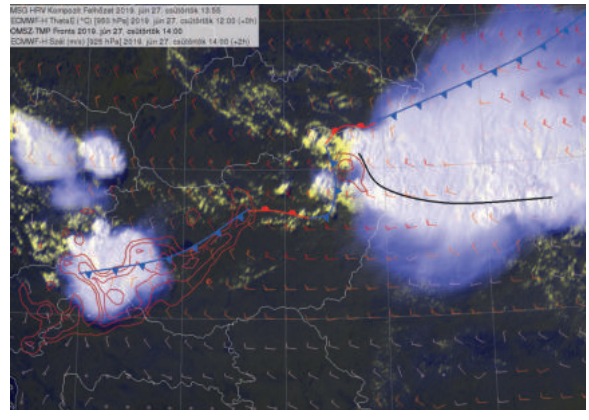
irányba elhagyták az országot (*7.d. ábra*). A vihar átvonulása során a középfeszültségű hálózatban 100-nál is több hibát regisztráltak elsősorban faradólés és villámcsapás következtében.

Konvergencia és szélnyírás északi érintő hidegfront előtt (2019. június 27.)

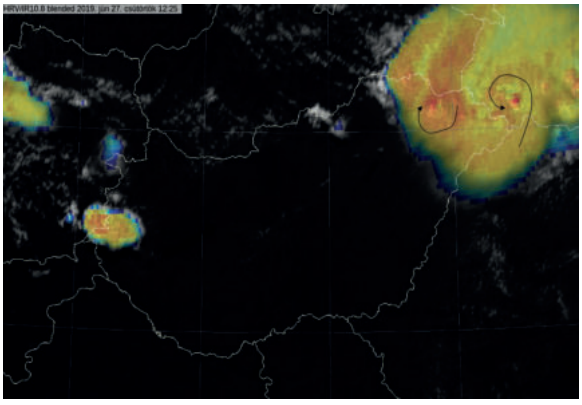
A 2019. június 27-i helyzet a keleti országrész veszélyes *konvektív időjárási helyzeteinek* egyik jellegzetes példája (*Horváth*, 2019). Egy hatalmas nyugat-európai anticiklon és egy keleti ciklon áramlási rendszerében északról érkező hidegfront mentén jöttek létre heves zivatarok. Az északi irányból érkező hidegfronton a talaj közelében a Keleti-Kárpátok fölött alakult ki egy hullám. A 700 hPa-os szinten a front előtt torlódó levegőben jelentősebb nedvesség halmozódott fel, míg a magasban fújó jet stream magja előtt jelentős szélnyírás és dinamikus feláramlás jött létre. Végül az 500 hPa-os szinten – a talaj közeli hullámvetéstől nem zavartatva – megindult a hideg beáramlás (*8. ábra*). A magas konvektív instabilitás (CAPE ~2000 J/kg), a hidegfront torlasztó hatása, valamint a nagy vertikális szélnyírás együttes hatása optimális feltételeket biztosított a Szlovákia keleti területei fölött gyorsan fejlődő zivataroknak.

Az ország keleti részére kora délután északról érkezett a hidegfront. A hullámzó front előtt egy konvergencia vonal jött létre, amelyen heves zivatarcellák alakultak ki, A hidegfront nyugati szárnya, ahol nem következett be hullámvetés, a Dunántúl középső részéig jutott el, és a keletinél jóval laposabb lévén csak kevesebb és gyengébb zivatart okozott (*9. ábra*).

A keleti területeken végigvonuló zivatarrendszerben 15 km magasba nyúló szupercella párok is kialakultak (*10. ábra*). A cellákhoz tartozó szél olyan erős volt, hogy a MAVIR 220 KV-os vezeték hálózatának oszlopait is kidöntötte. Nem lehet kizárni, hogy többfelé tornádó vagy erős légzuhatag is kísérte a cellák átvonulását.



9. ábra. A frontok helyzete és a látható tartományú EUMETSAT műholdkép 2019.06.27-én 14 UTC-kor. A fekete vonal az északi hidegfront előtti instabilitási vonalat jelzik.



10. ábra. A vihar legerősebb zivatarcellái speciális színezésű EUMETSAT műholdképen (finomfelbontású, látható és 10,8 μm infravörös csatorna kompozitképe) 2019.06.27. 12:25-kor. A vékony vonalak a feltételezett áramlási szerkezetet jelzik.

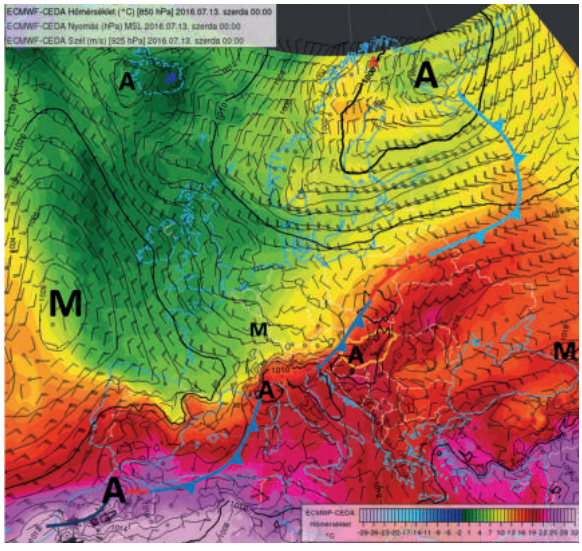
A fenti eset jól tükrözi, hogy milyen jelentős szerepe van a front behullámzásának az előtte kirobbanó zivatarok szempontjából. A hullám melegszektorában kialakuló konvergencia vonalak nem csak a zivatarláncokat segítik, de az azokon létrejövő szupercellák kialakulásához is kedvező feltételeket teremtenek, mivel a környezetükben általában nagyobb a szélnyírás.

Viharzónák: konvektív instabilitás, frontális emelés és szélnyírás együttes hatása (2016. július 13-14.)

Viharzóna alatt egy olyan, gyakran országrésznyi területet értünk, ahol akár több napon keresztül napi rendszerességgel kialakulnak heves zivatarrendszerek, zivatarláncok vagy szupercellák. Megjelenésük egy jól meghatározható szinoptikus képhez köthető: Európa északi-északnyugati területein hűvös, a déli területeken rendkívül meleg levegővel és a két légtömeg között hullámzó, nagyon lassan mozgó frontális zónával. Gyakran előfordul, hogy a Földközi-tenger nyugati felébe leáramló hideg levegő mediterrán ciklont hoz létre, így a frontális hullám ezáltal még mélyebb lesz. Ebben a nyitott hullámban jön létre a viharzóna. Ilyen időjárási helyzet volt többek között 2017. július 24-én (*Horváth*, 2017) és 2016. július 13-án hazánk felett (*Horváth*, 2016b), vagy 2016. június 29-én Szerbia északi részén (*Horváth*, 2016a).

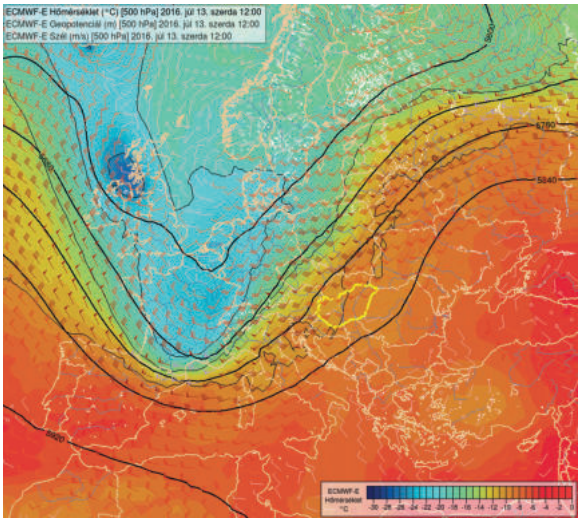
Az alábbi 2016. július 13–14-i helyzet bemutatja, hogy a térségünk felett kialakuló viharzónában több hullámban, két napon keresztül hogyan alakultak ki heves zivatarok, zivatar rendszerek.

A szinoptikus skálájú időjárási helyzet a heves nyári viharokra nézve tipikusnak mondható: Európa délkeleti részén felhalmozódó meleg levegőt egy lassan mozgó hidegfront választotta el a Nyugat-Európát elárasztó hűvös légtömegektől (*11. ábra*). A keleti irányba áthelyeződő hidegfront mentén már július 11-én heves zivatarok alakultak ki Németországban, illetve 12-én Ausztriában. A hidegfront a Kárpát-medencéhez érve lelassult, és több léghullámra szakadt, végül csak 14-én árasztotta el a hűvösebb levegő az országot. A frontrendszer lassulása azonban a felső légkörre nem terjedt ki, így a magasabb szinteken (kb. 5 km) lévő hidegebb léghullám megállás nélkül haladt keleti irányba (*12. ábra*), és sodródott a meleg levegő fölé, jelentős instabilitást okozva 13-án délután.



11. ábra. A tengerszinti légnyomás (folytonos vonalak), a 925 hPa (kb. 800 m magasság) szélmező és a 850 hPa (kb. 1500 m) hőmérséklete (színezett területek) az ECMWF analízis alapján 2016.07.13. 00 UTC-kor. Nyugat-Európa és Dél-Délkelet-Európa között éles hőmérsékleti különbség alakult ki.

A frontrendszerhez tartozó nedves szállítószalag is a térségünk fölé ért, nagy mennyiségű specifikus nedvességet (5–7 gr/kg) szállítva a 3000 m körüli rétegekbe. Végül a nagy magasságokban fújó



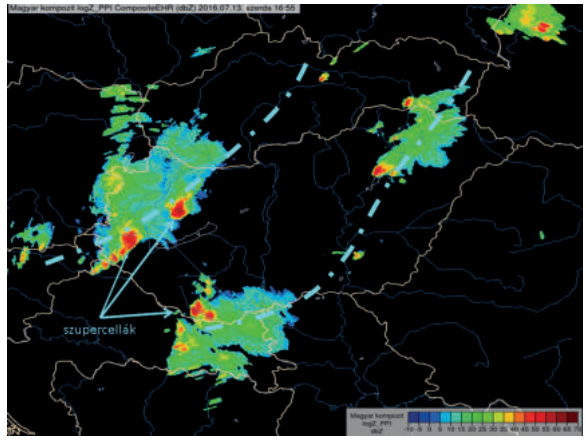
12. ábra. Az 500 hPa nyomásszint magassága (folytonos vonalak), szélviszonyai és hőmérséklete (színezett területek) 2016.07.13. 12 UTC-kor az ECMWF analízis alapján. A magassági hideg teknő keletre sodródásával a magasban megindult a hideg levegő beáramlása Közép-Európa fölé, amely jelentősen labilizálta a légkört.

jet stream is a megtorpanó hidegfront előtti meleg szektor fölé került, optimális dinamikai feltételeket biztosítva az örvénylő zivatarfelhők kialakulásához.

Ilyen időjárási helyzetben gyakran előfordul, hogy az Alpokon átkelő, keleti irányba mozgó hidegfront a talaj közelében több egymást követő hullámra, konvergencia vonalakra bomlik. Az első léghullám általában még nem jut túl a Nyugat-Dunántúlon, azonban a magasabb légkörben a fentiekben leírt hatások miatt a következő konvergencia vonalakat már egyre jobban támogatja a labilisabbá váló légkör. Ezúttal is hasonló jelenség történt.

Az első gyenge hullám július 12-én a délutáni órákban sodródott be a nyugati országrész fölé. A konvergencia vonal mentén megjelentek a zivatarok, azonban ahogy a konvergencia vonal az Alpokat elhagyva a száraz és meleg levegőjű Dunántúl fölé sodródott, a zivatarok jobbára eltűntek. A cellák között azonban éppen a konvergencia vonal mentén létrejött szélfordulást felhasználva kialakult egy örvénylő zivatarcella is, amelyet nemcsak a légköri labilitás (konvektív instabilitás), hanem a cella saját örvénylő rendszere is fenntartott. A zivatarfelhő így képes volt behatolni a meleg szektorba, és ott sokáig fennmaradt, és egészen a Bakony vonaláig sodródott.

A front második hulláma másnap (július 13-án) hajnalban vonult át a Dunántúlon, hatására átmenetileg északnyugatira fordult a szél. Az alacsony szinten beáramló hűvösebb levegő vezető éle délutánra a Tisza vonaláig jutott, viszont a Dunántúl felett az átkeveredés és a napsütés miatt már nem lehetett kimutatni a jelenlétét. A Tisza vonalában viszont délután éreztetni kezdte a torlasztó hatását, melynek nyomán Miskolc - Tisza-tó vonalon, valamint Bácskában erős zivatarok alakultak ki (*13. ábra*). Ez a vonal csak lassan mozdult kelet felé, ezért a vonal mentén kialakuló, egymás mögött fejlődő-haladó és egymást erősítő zivatarok egyre erősebbek lettek, és egy-egy sávban igen nagy mennyiségű csapadékhullást és szelet okoztak, így pl. a Tisza-tó menti Poroszlón pár óra alatt 120 mm csapadék hullott le.



13. ábra. Az OMSZ országos kompozit radarképe 2016.07.13. 16:05 UTC-kor. A korábban nyugatról átvonult konvergencia vonal hatására a Tiszánál és Bácskában zivatarok alakultak ki. Nyugatról egy újabb léghullám hatására zivatarok érték el az országot, köztük egy szupercella, amely Zala fölött a Bakony irányába mozdult.

A front harmadik hulláma július 13-án a délutáni órákban jelent meg a nyugati határon. A léghullám mentén az előző naphoz hasonlóan ismét egy szupercella alakult ki, amely a Bakony északi oldalán haladt keleti irányba, illetve a szlovén határon újabb fejlődő konvektív rendszer jelent meg (*13. ábra*). Az este közeledtével a délnyugatról közeledő rendszer is felerősödött, és a Bakony északi oldalán vonuló szupercella mellett a Balaton nyugati részét is elérte egy örvénylő zivatar.

A második szupercella végigvonult az északi part mentén, útját orkán erejű szél, igen aktív villámlás és pusztító jégesők kísérték. A nyugati medencét elérő cellából 19:40-kor még csak 25,5 m/s (92 km/h) széllökést mért a Keszthelyi-öbölben felállított mérőcölöp, azonban 20:05-kor már Zánkán 30,7 m/s-os (110 km/h) széllökések voltak. A szupercella tovább erősödött, amikor elérte a Balaton keleti medencéjét, Balatonfüreden 32,3 m/s (116 km/h), az Alsóörs-Siófok vonalon, tóközépen lévő mérőcölöpnél pedig 35,7 m/s (129 km/h) széllökéseket hozott létre. A Balatonnál átvonuló zivatarcella feláramlási csatornája fölött kialakult, a felhőtetőből kinyúló ún. túlnyúló felhőcsúcs a cella különleges erősségét jelzi, mely a radarmérések szerint **14 km** magasságba tornyosult. A Siófokhoz közeledő örvénylő zivatarcella jellegzetes, ívelt felhőzete ugyancsak megfigyelhető a *14. ábrán*. A balatoni zivatarokat okozó harmadik hullám összeáramlási rendszerében délnyugati irányba fejlődve újabb zivatarok jöttek létre, majd

14. ábra. A Siófok felé közeledő szupercella fényképe 2016.07.13. 18:20 UTC-kor.

valószínűleg ez a rendszer is hozzájárult ahhoz, hogy előtte az Alföldön 22 órára újabb heves zivatarzóna alakult ki, vélhetően újabb szupercellákkal.

A harmadik vonal keletre vonulását követően az éjszaka folyamán nyugat felől még egy **negyedik konvektív** rendszer érte el az országot, melynek mentén a kora reggeli órákra a Dunántúlon láncba rendeződő zivatarok ismételten viharos szelet és nagy mennyiségű csapadékot okoztak. Ez a negyedik rendszer már a légtömeg cserét is jelentette, így 14-én a Dunántúlt fokozatosan kitöltötte a hidegebb és stabilabb levegő, véget vetve a heves zivataroknak. Két nappal később ez a hidegfront egy ciklon kifejlődésénél játszott meghatározó szerepet, amely ugyancsak markánsan befolyásolta hazánk időjárását.

Az ország felett több hullámban átvonult zivatarok hatására változatosan alakultak a legerősebb széllökések. A szupercellák átvonulását 20–30 m/s széllökések jelezték, de a Tisza-tavi heves zivatarok 31 m/s-os szelet okoztak Poroszlón. Mivel a zivatarcellákból kifújó szél viszonylag kis területre koncentrálódott, így a mérésekhez képest több helyen lehetett viharos széllökés.

A fentiekből látható, hogy a viharzóna két nap alatt szinte az egész országban heves zivatarokat, többfelé szupercellákat okozott. A károk valamenynyi áramszolgáltatót érintették. A meghibásodások az egymást követő hullámokban olyan sűrűn következtek be, hogy az elhárítást nem győzték a szakemberek. Sokfelé napokig nem volt áram a farádőlések, a közvetlenül a szél okozta vezetékszakadások és a villámcsapások miatt. Mind a meghibásodások számát, mind a hibák súlyosságát tekintve a bemutatott viharzónához kapcsolódó helyzetek okozták a legnagyobb problémát.

Összefoglalás

A fentiekben bemutatott esettanulmányok tükrözik a térségünkben előforduló legerősebb konvektív helyzeteket. Az első esetben egy magassági hidegörvény okozta az első és harmadik konvektív komponens (konvektív instabilitás és szélnyírás) megerősödését. A második esetben a második komponens (a konvergencia) is megjelent egy átvonuló hidegfront képviseletében. A harmadik vizsgált esetben mindhárom konvektív komponens markánsan jelen volt a hullámzó, markáns hidegfront előtti labilis prefrontális területeken.

Az áramszolgáltatást veszélyeztető időjárási helyzetek közül a fentiekben bemutatott légköri konvekció a leggyakoribb esetek közé tartozik. A zivatarokhoz kapcsolódó hirtelen lecsapó, impulzív szél a korábbi tanulmányokban bemutatott esetekhez hasonlóan elsősorban a farádőlésekkel okoz vezetékszakadást, azonban a 120 km/h-t elérő széllökések képesek a vezetéket is közvetlenül leszakítani. A forgó zivatarok – szupercellák – különösen nagy energiájukkal a 220, illetve

400 KV-os oszlopokat is meg tudják rongálni. Gyanítható, hogy volt olyan oszlopkidőlés, amelyet a szupercellából kinyúló tornádó okozhatott, a tornádónak viszont egyik légvezetékrendszer sem tud ellenállni. Oszlopkidőléseket légzuhatagok is okozhatnak (*Kaňák et al*., 2007), melyek gyakori kísérői a szupercelláknak, és a magas szélsebesség (akár 120–180 km/h) mellett nagyon erős szélnyírással is járnak (a szélmaximum a talaj fölött 20–50 méter magasságban található). A konvektív vihar egyik speciális típusa a „derecho" (*Johns és Hirth*, 1987). Ez az elnevezés olyan hosszúéletű mezoskálájú rendszerekre vonatkozik, melyek már országos méretben képesek pusztító károkat okozni. Az újabb definíciója alapján pl. a 25 m/s feletti széllökés zóna legalább 650 km hosszú és 100 km széles (*Corfidi et al.*, 2016). Hasonló jellegű viharok Európában ritkák, Magyarországot 2017.08.10-én és 2017. 09.17-én (*Sipos et al.*, 2021) részben érintették derecho-jellegű viharok. A viharzónákhoz hasonlóan a derechók is komoly veszélyt jelentenek az áramellátásra.

Míg a téli intenzív ónos esős helyzetek, illetve a viharciklonok viszonylag ritkán fordulnak elő, addig a heves zivatarok minden nyáron kialakulnak. A zivatarok pusztító ereje azonban alapvetően a nagytérségű időjárási folyamatoktól függ, amelyek a konvektív komponensek erősségét határozzák meg.

Az elektromos hálózat sérülékenysége jól példázza, hogy az ipari társadalom minden fejlettsége ellenére mennyire függ a természet erőitől…

Köszönetnyilvánítás. Jelen írás a GINOP-2.3.2-15-2016-00055 számú project részeként a Széchenyi2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával készült.

Irodalom

Bluestein, H. B., 2017: Tornadoes and their parent convective storms. Oxford Handbooks Online in Natural Hazard Science. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190699420.013.15

Corfidi, S.F., Cohen, A.E., Coniglio, M.C., and *Mead, C.M.,* 2016: A proposed revision to the definition of „Derecho". *Bull. Amer. Meteor. Soc. 96*, 935–949., https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00254.1

Horváth Á. és *Simon A*., 2019: Szélsőséges időjárási helyzetek okozta súlyos zavarok az áramszolgáltatásban. I.rész: Téli vegyes halmazállapotú csapadékos helyzetek. *Légkör 64*. 14–20.

Horváth Á. és *Simon A*., 2020: Szélsőséges időjárási helyzetek okozta súlyos zavarok az áramszolgáltatásban. II. rész: Viharciklonok. Légkör 65. 4–9.

Horváth Á., 2017: Heves zivatarrendszerek a Dunántúlon. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1948&hir=Heves_zivatarrendszerek_a_Dunantulon

Horváth Á. és *Zsikla Á*., 2019: Július végi zivataros napok meteorológiai háttere. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2625&hir=Julius_vegi_zivataros_napok_meteorologiai_hattere

Horváth Á., 2018. Medárd napi vihar. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2236&hir=Medard_napi_vihar

Horváth Á., 2016b: Viharzóna Magyarország felett. https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1602&hir=Viharzona_Magyarorszag_felett;_2016._julius_13%E2%80%9314.

Horváth Á., 2016a, Egy viharzóna öt napja. https://www.met.hu/ismerettar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1588&hir=Egy_viharzona_ot_napja

J*ohns, R.H.* and *Hirt, W.D.*, 1987: Derechos: widespread convectively induced windstorms. *Wea. Forecast. 2*, 32–49. https://doi.org/10.1175/1520-0434(1987)002<0032:DWCIW>2.0.CO;2

Kaňák, J., Benko, M., Simon, A., and *Sokol, A*., 2007: Case study of the 9 May 2003 windstorm in southwestern Slovakia, *Atmos. Res. 83*, 162–175. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.09.012

Markowski, P. and *Richardson, Y*., 2011: Mesoscale meteorology in midlatitudes, volume 2., John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470682104

Parker, M.D. and *Johnson, R.H*., 2000a: Organizational modes of midlatitude mesoscaleconvective systems. *Month. Weather Rev.128*, 3413–3436. https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2

Plant, R. and *Yano, J.,* 2015: Parameterization of Atmospheric Convection. Series on the science of climate change. Imperial College Press. https://doi.org/10.1142/9781783266913_0023

Shapiro, M.A., 1982: Mesoscale weather systems of the central United States. The national STORM program: Scientific and technological bases and major objectives. UCAR Rep., Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences.

Sipos, Z., Simon, A., Csirmaz, K., Lemler, T., Manta, R.-D., and *Kocsis Zs.*, 2021: A case study of a derecho storm in dry, high-shear environment, *Időjárás 125*, 1–37. https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.1.1

Weisman, M.L. and *Klemp, J.B*., 1984: The structure and classification of numerically simulated convective stormsin directionally varying wind shears. *Month. Weather Rev. 112*,2479–2498. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<2479:TSACON >2,0CO;2

2021/2022 telének időjárása

Szolnoki-Tótiván Bernadett
Országos Meteorológiai Szolgálat, totivan.b@met.hu

A 2021-2022-es tél az átlagosnál jóval enyhébb volt. Az évszak középhőmérséklete országos átlagban 2,2 °C, mely 1,8 °C-kal magasabb az 1991-2020-as sokévi átlagnál. Így a kiemelkedő 12. helyre került a legmelegebb telek sorában 1901 óta.

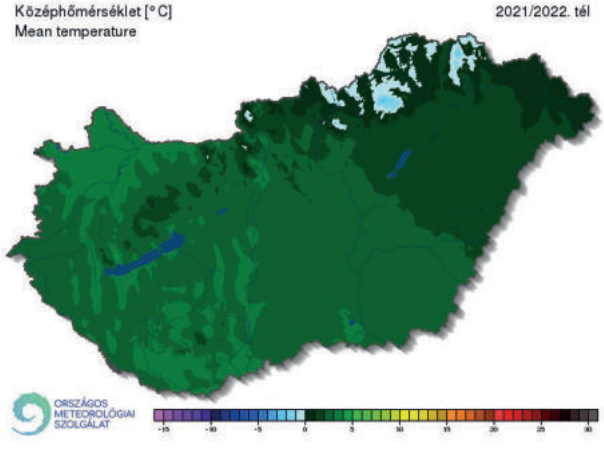
Mint általában, így most is a hegyvidékéki, magasabban fekvő tájaink bizonyultak hidegebbnek a tél során (háromhavi átlaghőmérséklet 0 °C alatt), máshol már csak pozitív hőmérsékletű évszakos átlagokat láthatunk. Ezen belül az enyhébb tájakat északnyugaton (Győri-medence, Sopron-Vasi-síkság) és a Dunántúl déli része felé haladva találjuk (*1. ábra*). A sokévi átlaghoz képest csak pozitív irányba tért el az évszakos középhőmérséklet az egész országban. A kisebb eltérést az Alföld és az Északi-középhegység keleti részén figyelhettük meg: itt 1-1,5 °C-kal volt melegebb, mint az 1991–2020-as időszakban. A Duna menti síkság, a Mezőföld, Kisalföld, a Sopron-Vasi-síkság területén, valamint Szeged térségben és a Dunántúli-dombságban többfelé viszont mintegy 2-2,5 °C-kal volt magasabb volt a sokévi átlagnál a téli középhőmérséklet (*2. ábra*). A hónapok közül a február volt a legmelegebb, az elmúlt 122 évben ez a 10. legmelegebb februárnak számít. A hőmérséklet szinte minden nap a sokéves értékek fölött haladt, összességében a hónap átlaga 3,2 °C-kal haladta meg a normált. A december és a január is melegebbnek bizonyult a megszokottnál: 1,0 °C-kal és 1,1 °C-kal. (*6. ábra*). A fagyos napok ($T_{min} \leq 0$ °C) számának országos átlaga 58 nap volt, mely 5 nappal kevesebb, mint a sokévi átlag. A zord napok ($T_{min} \leq -10$ °C) és a téli napok ($T_{max} \leq 0$ °C) száma is jócskán elmarad az 1991-2020-ra jellemző értéktől. Előbbiből 3 nap volt ezen a télen a megszokott 8 nap helyett; míg téli napból mindössze 7 napot regisztráltunk országos átlagban, a 22 napnyi sokéves átlag helyett. Hideg napból ($T_{min} \leq -5$ °C) a szokásos 24 nap helyett 17 fordult elő az évszakban. A küszöbnapok számának ilyen irányú változása is jól jelzi az enyhe telet. A három hónap csapadékösszege 77 mm lett országos átlagban, amely jelentősen elmarad az 1991–2020-as normáltól (115,3 mm). Az ország több, mint 90%-án a sokéves átlag alatt maradt az téli csapadék összege. A sokévi átlagot megközelítő mennyiség csak kevés területen hullott: a Beregi- és a Szatmári-síkon, valamint a Zselic területén. Az ország középső tájai voltak szárazabbak. Az Alföld északi része és az Északi-középhegység tekinthetőek a leginkább csapadékhiányosnak, itt a normálnak mindössze 40-50%-a hullott a télen. A tél második fele volt

az évszak száraz része: januárban és februárban csak a sokévi átlagnak a 28 és 36%-a érkezett. A december ezt egy kissé tudta mérsékelni, amikor az 1991-2020-es normál 119%-a hullott, így a téli összeg 66%-a lett a megszokottnak. (*3.* és *4. ábra*). Országos átlagban 27 csapadékos nap volt, ami 4 nappal kevesebb, mint az 1991–2020-as átlag. Havas napot viszont csak 10-et regisztráltunk, holott a szokásos érték 16 nap. A hótakarós napok száma még ennél is jelentősebben elmaradt a sokévestől: 9 napot jegyeztünk a normál 29 nap helyett. Az évszakos globálsugárzás összege az északkeleti országrészben és a középhegységeinkben volt a legalacsonyabb, a Duna-Tisza-közén és a Dunántúlon elszórtan pedig a legmagasabb (*5. ábra*).

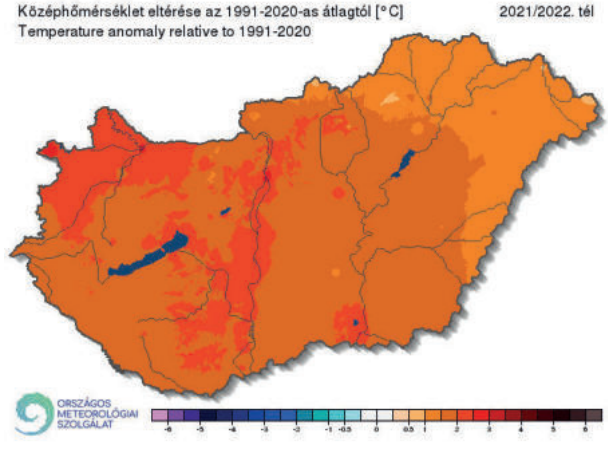
December. A szokásosnál melegebb volt már a tél első hónapja is. Országos átlagban 1,0 °C-kal magasabb a havi középérték (1,5 °C), mint a sokéves átlag. Az átlaghőmérséklet az ország legnagyobb részén -2 és +3 °C között alakult. Az Északi-középhegység jelentős részén fagypont alatti, az ország többi területén 0 °C feletti középértékek voltak jellemzőek. A legmagasabb havi átlaghőmérsékletet (+3,0 °C) Pécs Egyetem, Balatonederics, Kémes és Szeged belterület állomásainkon jegyeztük, a legalacsonyabbat (-2,2 °C) pedig Kékestetőn. Decemberben az ország területén szinte csak az átlagosnál melegebb tájakat találunk, az eltérés mértéke jellemzően +0,5 °C és +2,5 °C közé esett. Átlagosnál hűvösebb az Északi-középhegység egyes részein volt, mint pl. a Szécsényi-dombság vagy a Bükk-vidék. A legnagyobb pozitív hőmérsékleti eltérést a Dunántúl nyugati és délnyugati részein (Alpokalja, Soproni-Vasi-síkság, Zalai dombság, Dráva-sík) és Szeged térségében figyeltük meg. A hónap abszolút maximumhőmérsékletét december 31-én, Fertőrákoson regisztráltuk (+18,0 °C). Ez 1,5 °C-kal volt magasabb, mint az ezen a napon valaha (1920-ban Sopron állomáson: 16,5 °C) mért adat, így új napi országos rekordnak számít. A küszöbnapok száma alapján is enyhe volt a december. Az országban átlagosan fagyos napból ($T_{min} \leq 0$ °C) 20 nap fordult elő, mely megegyezik a sokéves értékkel. Viszont a téli napok ($T_{max} \leq 0$ °C) és a hideg napok ($T_{min} \leq -5$ °C) száma (3 és 4 nap) jócskán elmarad a 1991-2020-as normál időszakhoz képest (7-7 nap). Zord napot ($T_{min} \leq -10$ °C) pedig nem regisztráltunk országos átlagban, holott ebből az indexből a sokéves érték 2 nap.

A hónap során mért legmagasabb hőmérséklet:
18,0 °C, Fertőrákos *(Győr-Moson-Sopron megye), december 31.*
A hónap során mért legalacsonyabb hőmérséklet:
-15,2 °C, Gagybátor *(Borsod-Abaúj-Zemplén megye), december 27.*

Csapadék szempontjából jónak mondható a december, ugyanis a sokévesnél 19%-al több hullott országos átlagban. Ennek ellenére



1. ábra. A 2021/22-es tél középhőmérséklete (°C).

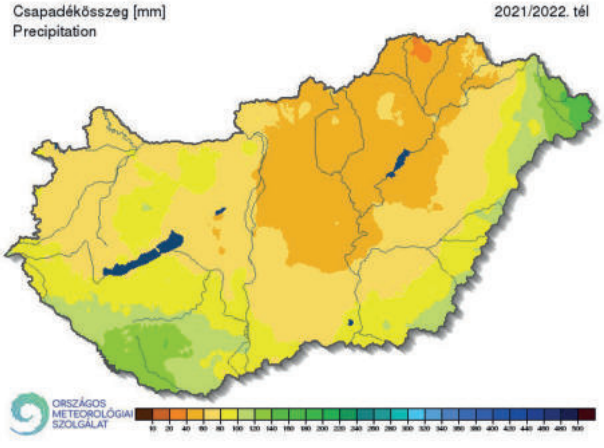


2. ábra. A 2021/22-es tél középhőmérsékletének eltérése a sokévi átlagtól (1991-2020).

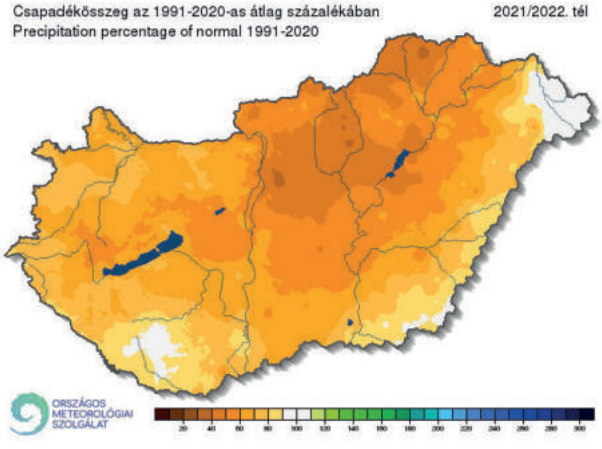
az egyenetlen területi eloszlás következtében voltak szárazabb területek is. A Kemeneshát, a Börzsöny, a Mátra, Borsod-Abaúj-Zemplén megye északi része és a Tisza-tó környezetében maradt a normál alatt a havi csapadékösszeg. Ezzel szemben a Felső-Tisza-vidéken, a délkeleti határ mentén és a Dunántúli-dombság déli részén meghaladta a sokévi átlagot a csapadék mennyisége – többfelé akár a szokásos értékek 150-200%-a is lehullott. December folyamán országos átlagban 5 havas napot (normál: 5 nap) és 4 hótakarós napot regisztráltunk (normál: 7 nap). Az ónos esős napok száma viszont (2 nap) meghaladta a szokásos értéket (1 nap). A hó az Északi-középhegységben szinte az egész hónap során megmaradt, a hótakarós napok száma Kékestetőn 31, Bükkszentkereszten és Miskolc Lillafüred-Jávorkút állomáson 28, Mátraszentimre állomáson pedig 27 volt. A hónapban a legnagyobb hóvastagságot, 23 cm-t 2021. december 10-én Kékestetőn mértük.

A hónap legnagyobb csapadékösszege:
114,1 mm, Bakonya *(Baranya megye)*
A hónap legkisebb csapadékösszege:
27,1 mm, Hidasnémeti *(Borsod-Abaúj-Zemplén megye)*
24 óra alatt lehullott maximális csapadék:
48,3 mm, Bakonya *(Baranya megye), december 02.*

Január. Az év első hónapja még a decemberinél is egy kicsivel jobban eltért a sokévi átlagtól (1,1 °C-kal magasabb a havi adat, mint a sokéves érték). A havi középhőmérséklet -3 és+3 °C között változott hazánkban. A megelőző havinál nagyobb területen voltak fagypont alatti havi átlagok: a Tiszától keletre és az Északi-középhegységben, de az ország többi részén 0 °C feletti havi középhőmérséklet volt a jellemző. Hazánk területén csak az átlagosnál melegebb tájakat találunk a hónap folyamán, az eltérés mértéke jellemzően +0,5 °C és +2,5 °C közé esett. Ezek közül is kiemelkedik Budapest és térsége, valamint Győr-Moson-Sopron megye, ahol a 2,5 °C-ot is meghaladta az anomália. A sokéves átlaggal megegyező értékek csak egy szűk sávban, a keleti határ mentén jelennek meg. A legmagasabb havi átlaghőmérsékletet (+3,1 °C) Budapest Állatkert állomásunkon regisztráltuk, a legalacsonyabbat (-3,2 °C) pedig Kékestető mérőállomáson. A hónap első napjaiban több országos, illetve fővárosi maximum- és minimumhőmérsékleti rekord is született. A hónap legmagasabb hőmérsékletét 5-én Sellye állomáson mértük (+18,2 °C). Ez 1,9 °C-kal volt magasabb, mint a 2014-ben Kaposváron mért 16,3 fokos napi érték, így új napi országos rekordnak számít. Január elsején szintén országos napi maximumhőmérséklet rekordot jegyeztünk fel: 17,5 °C-ot regisztráltunk Főnyed állomáson. A korábbi rekord 1921-ből származott; ekkor Sopron állomáson 15,3 °C-ot mértünk. Idén ezen



3. ábra. A 2021/22-es tél csapadékösszege.



4. ábra. A 2021/22-es tél csapadékösszege a sokévi (1991-2020-as) átlag százalékos arányában kifejezve.

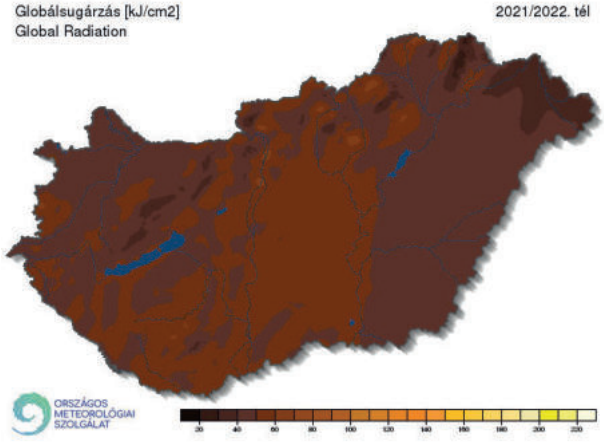
a napon egyébként további 59 (!) állomásunkon is magasabb volt a napi maximumhőmérséklet értéke, mint az 1921-es soproni adat. Január 4-én az új országos napi maximumhőmérséklet rekordját Drávaszabolcson regisztráltuk: 15,7°C-ot, mely 0,1 °C-kal haladta meg a korábbi – 1949-es – csúcstartót, Ásotthalom állomást.

A hónap során mért legmagasabb hőmérséklet:
18,2 °C, Sellye *(Baranya megye), január 05.*
A hónap során mért legalacsonyabb hőmérséklet:
-18,0 °C, Pocsaj *(Hajdú-Bihar megye), január 13.*

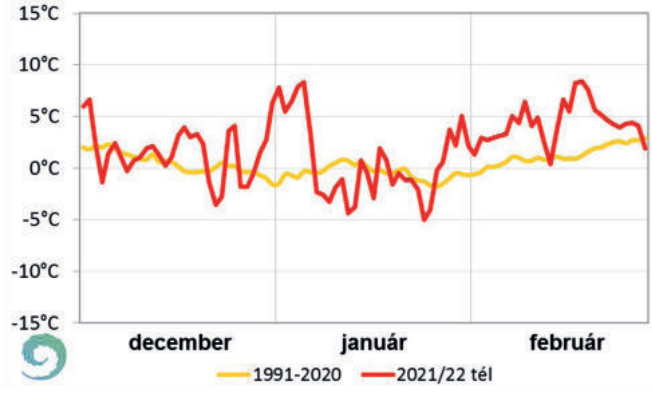
A jó csapadékellátottságú december után egy igen száraz január következett. A havi csapadékösszeg országos átlagban 9,1 mm volt, amely a sokévi átlagnak alig 28%-a. Ezzel 2022 januárja a 6. legszárazabb január az 1901-től kezdődő idősorban. Mindenhol a sokéves átlag alatt maradt a havi csapadék mennyisége, de az ország középső részein alakult ki a legsúlyosabb csapadékhiány. Pest és Heves megyében a sokéves mennyiségnek alig a 10%-a érkezett, itt 7 mérőállomáson is 1 mm alatti a havi összeg (Füzesabony, Kakucs, Tarnaméra, Tápiószele, Szentmártonkáta, Ludas, Nagykáta). A Beregi- és a Szatmári-síkon, valamint a Nyugat-magyarországi-peremvidéken a lehulló csapadék mennyisége már elérte a sokévi átlagnak legalább a felét. A hónap során országos átlagban 4 havas napot (normál: 6 nap) és 5 hótakarós napot jegyeztünk fel (normál: 10 nap). A legnagyobb hóvastagság 2022. január 24-én Sopron Muck-kilátó állomáson 18 cm volt.

A hónap legnagyobb csapadékösszege:
43,6 mm, Tiszabecs *(Szabolcs-Szatmár-Bereg megye)*
A hónap legkisebb csapadékösszege:
0,0 mm, Nagykáta *(Pest megye)*
24 óra alatt lehullott maximális csapadék:
18,3 mm, Szalafő *(Vas megye), január 05.*

Február. Nagyon enyhe hónap volt. Országos átlagban a februári középhőmérséklet 4,4 °C-nak adódott, mely 3,2 °C-kal magasabb, mint az 1991-2020-as normál. 2022 februárja az 1901-től kezdődő hosszú éghajlati idősorban a 10. helyre került. Az átlaghőmérséklet +1 °C és +6 °C között alakult hazánkban a hónapban. A legmagasabb havi átlaghőmérsékletet (+6,3 °C) Budapest Állatkert és Budapest Lágymányos állomásokon jegyeztük fel, a legalacsonyabbat pedig (-0,9 °C) Kékestetőn. Az ország egész területén csak az átlagosnál jóval melegebb tájakat találunk, az eltérés mértéke jellemzően +2 °C és +4 °C közé esett. A legnagyobb pozitív hőmérsékleti anomáliát az Alsó-Tisza-vidék, a Tolnai-Hegyhát és a Dunának a Csepel szigettől délre eső területén figyeltük meg. Ezeken a tájakon jellemzően 3,5-4 °C-kal volt melegebb, mint a referencia



5. ábra. A 2021/22-es tél globálsugárzás összege (kJ/cm²).



6. ábra. A 2021/22-es tél napi középhőmérsékleteinek eltérése a sokévi (1991-2020-as) átlagtól (°C).

időszakban. A havi legmagasabb hőmérsékletet 17-én Fertőrákoson mértük (+21,5 °C). Ez 2,9 °C-kal volt magasabb, mint az 1998-ban Sellye állomáson mért 18,6 fokos napi érték, így új napi országos rekordnak számít. Az átlagosnál melegebb február a küszöbnapok számában is jól tükröződik. A fagyos napok ($T_{min} \leq 0$ °C) országos átlaga 15 nap volt, mely 4 nappal kevesebb, mint a szokásos februári érték. A hideg napok ($T_{min} \leq -5$ °C) száma (2 nap) is csak töredéke az 1991-2020-as normálnak (7 nap). Téli napot ($T_{max} \leq 0$ °C) és zord napot ($T_{min} \leq -10$ °C) nem is regisztráltunk országos átlagban, holott ezekből az indexekből a sokéves érték 5, illetve 3 nap.

A hónap során mért legmagasabb hőmérséklet:
21,5 °C, Fertőrákos *(Győr-Moson-Sopron megye), február 17.*
A hónap során mért legalacsonyabb hőmérséklet:
-13,2 °C, Zabar *(Nógrád megye), február 13.*

A száraz január után egy hasonlóan csapadékszegény február következett. A havi csapadékösszeg országos átlagban 13 mm volt, amely a sokévi érték 36%-a. Így a 16. legszárazabb február lett a hosszú éghajlati adatsorban. A csapadék területi eloszlása az országhatárok felé haladva mutatott növekedést. A szokásosnál lényegesen kevesebb csapadék hullott az Alföld középső területein, valamint Heves és Borsod-Abaúj-Zemplén megyékben. Itt volt a legsúlyosabb a csapadékhiány, a szokásos mennyiségnek alig 20%-át figyelhettük meg. A havi legalacsonyabb összeget is itt jegyeztük, Sáta állomásunkon mindösszesen 2 mm érkezett. A hónapban a legnagyobb hóvastagságot Tiszabecs állomáson mértük, 2022. február 3-án: 16 cm. A küszöbnapok is jócskán elmaradtak a megszokottól: havas nap országos átlagban 2 volt, a normál 5 nap helyett; hótakarós napból pedig csak 1 az átlagos 9 nap helyett.

A hónap legnagyobb csapadékösszege:
42,3 mm, Tiszabecs *(Szabolcs-Szatmár-Bereg megye)*
A hónap legkisebb csapadékösszege:
2,0 mm, Sáta *(Borsod-Abaúj-Zemplén megye)*
24 óra alatt lehullott maximális csapadék:
18,2 mm, Csörnyeföld *(Zala megye), február 15.*

2021-2022 tél időjárási adatainak összesítője

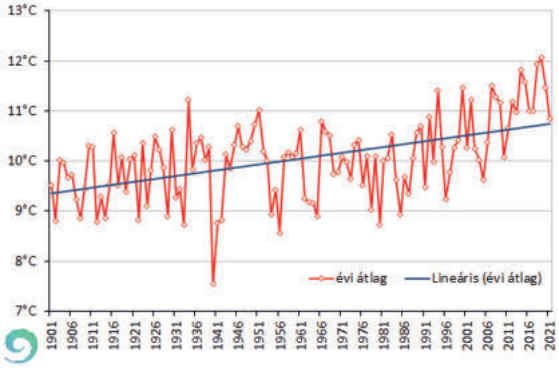
Állomás	Napsütés, óra		Sugárzás, kJ cm^{-2}	Hőmérséklet, °C						Csapadék, mm			Szél
	évszak összes	eltérés	évszakos összeg	évszak közép	eltérés	max	napja	min	napja	évszak összes	átlag %-ában	r ≥ 1 mm napok	viharos nap ($f_x \geq 15$ m s^{-1})
Szombathely	364	202	51	2,7	2,0	16,0	2022.02.17	-7,4	2022.01.12	59	70	12	12
Nagykanizsa			51	2,6	1,7	15,7	2022.01.01	-10,0	2022.01.25	96	75	15	7
Pér			49	2,9		15,6	2022.02.17	-8,7	2022.01.24	58	57	16	25
Siófok			50	3,2	2,2	14,7	2022.02.18	-7,9	2022.01.25	69	66	14	33
Pécs				3,3	2,0	16,4	2022.01.01	-9,4	2022.01.24	98	85	15	26
Budapest	403	168	51	3,0	2,0	15,4	2021.12.31	-9,6	2022.01.25	52	51	11	9
Miskolc	306	100	43	1,4	1,8	13,4	2022.02.17	-10,8	2022.01.25	54	55	9	5
Kékestető	426	247	52	-2,1	1,8	7,2	2022.01.01	-11,5	2022.01.24	48	33	13	51
Szolnok			53	2,6	2,0	15,5	2022.02.15	-14,2	2022.01.09	50	53	10	12
Szeged	382	152	51	2,8	2,0	17,2	2022.02.17	-11,4	2022.01.25	77	80	17	14
Nyíregyháza			42	1,3	1,5	12,7	2022.02.19	-10,5	2022.01.10	83	85	21	16
Debrecen	365	148	47	1,5	1,3	12,9	2022.02.11	-12,4	2022.01.13	59	60	14	6
Békéscsaba			46	2,1	1,5	15,3	2022.02.17	-14,8	2022.01.13	85	76	20	10

A 2021. év időjárása

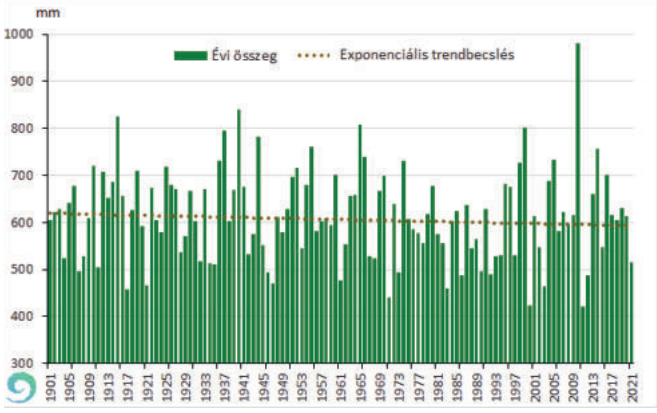
Marton Annamária
Országos Meteorológiai Szolgálat, marton.a@met.hu

Annak ellenére, hogy a globális átlaghőmérsékletre átmeneti hűtő hatással volt a 2020–2022-es La Niña esemény, a Meteorológiai Világszervezet (WMO) megerősítette, hogy hat globális adatbázis szerint 2021 még így is a hét legmelegebb év egyike. Az adatbázisok között megoszlottak a helyezések, az ERA5 globális reanalízis adatbázisa szerint az 5. legmelegebb évet hagytuk magunk mögött, míg más adatbázisok a 6-7. helyre sorolják..

Az ERA5 adatai alapján a globális évi középhőmérséklet 1,11 (±0,13) °C-kal haladta meg az iparosodás előtti (1850–1900) időszak átlagát. Európa nagy részén az átlagoshoz közeli időjárás, a meleg és hideg időjárású területek közötti majdnem egyenlő arányú megoszlás volt jellemző. A 2021-es naptári év középhőmérséklete 0,14 °C-kal haladja meg az 1991–2020-as átlagot, ezzel a 2021-es év nem tartozik az európai 10 legmelegebb év közé. Magyarországon a 2021-es évi középhőmérséklet országos átlagban 10,8 °C-nak adódott (*1. ábra*), így 0,1 °C-kal volt melegebb az 1991–2020-as éghajlati normálnál. 2021 az ellenőrzött, homogenizált (MASHv3.03) és interpolált (MISH v1.03) adatok alapján a 19. legmelegebb az elmúlt 121 évben, és egyben a legutóbbi tíz esztendőből a leghűvösebb. Az év során lehulló csapadék mennyisége országos átlagban a homogenizált adatok alapján 514 mm volt, mely az 1991–2020-as sokévi átlag 83%-a. A 2021-es év ezzel a 20. legszárazabb év lett 1901 óta. A március és június nagyon aszályos volt, de a csapadék mennyisége szeptemberben és októberben is jelentősen elmaradt az 1991–2020-as normálértéktől. Az elmúlt 121 évben, 1901 és 2021 között az évi csapadékösszegekhez illesztett exponenciális trend alapján mérsékelt, átlagosan 3,4%-os csökkenést tapasztaltunk, a csapadék csökkenése statisztikailag nem szignifikáns (*2. ábra*).

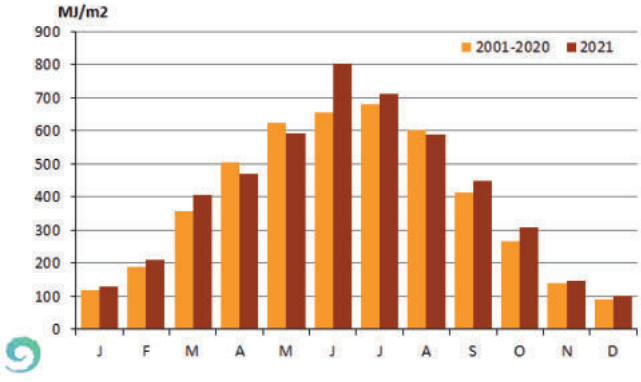


1. ábra. Az évi középhőmérséklet 1901 és 2021 között Magyarországon (homogenizált, interpolált országos átlag).



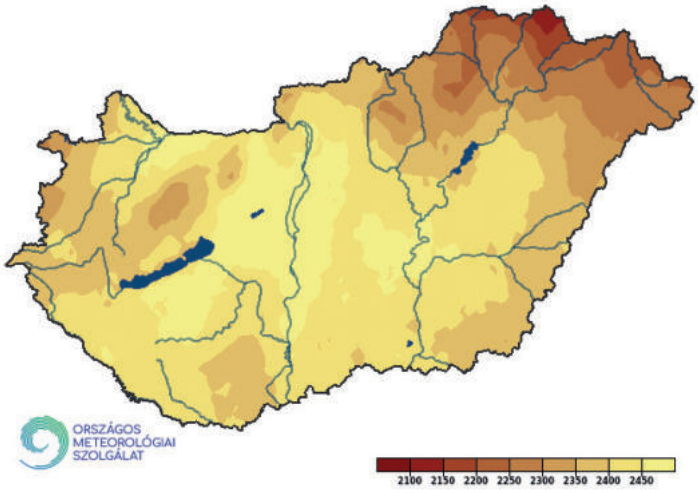
2. ábra. Az évi csapadékösszeg 1901 és 2021 között Magyarországon (homogenizált, interpolált országos átlag).

Globálsugárzás. A Napból közvetlenül érkező (direkt) sugárzás és az égboltról érkező szórt (diffúz) sugárzás összegét globálsugárzásnak nevezzük. Területi eloszlása a domborzati adottságok mellett az átlagos felhőborítottsággal van kapcsolatban. A legmagasabb értékeket a derült nyári hónapokban, a sokévi átlag szerint júliusban várjuk. A rendelkezésre álló (21 évet felölelő) homogenizált, interpolált adatok alapján 2021 a 2. legnapsütésesebb év volt. A legmagasabb havi összeget július helyett júniusban jegyeztük, ekkor jelentős eltérés mutatkozott (*3. ábra*). Március, július, szeptember és október is napfényesebb volt a megszokottnál. A sokéves átlagnál alacsonyabb havi értéket kaptunk áprilisban, májusban és augusztusban, de ez utóbbi csak minimálisan mértékben marad el a sokéves átlagtól.



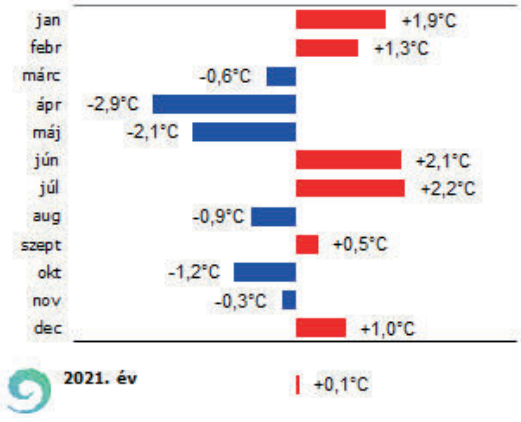
3. ábra. A globálsugárzás évi menete Magyarországon 2021-ben (homogenizált, interpolált országos átlagok).

Napfénytartam. 2021-ben a napsütéses órák éves összege hazánk területén 2100 és 2500 óra között változott. Az ország középső részén sütött a legtöbbet a nap (>2450 óra), míg a legkevesebb (<2150 óra) napsütéses óra az északkeleti megyékben volt jellemző. Még az északnyugati határszélen és a Bakonyban fordult elő kevesebb napsütés, a magasabban fekvő területeken 2300 óra körül alakult az éves napfénytartam (*4. ábra*).



4. ábra. A napsütéses órák száma 2021-ben.

Hőmérséklet. 2021-ben ugyanakkora számban fordultak elő az 1991-2020-as sokévi átlagnál magasabb és alacsonyabb középhőmérsékletű hónapok (*5. ábra*). Jobbára a téli és nyári hónapok voltak melegebbek, míg a tavaszi és



5. ábra. Az országos havi középhőmérséklet eltérése a sokévi (1991-2020-as) átlagtól 2021-ben (homogenizált, interpolált adatok alapján).

őszi hónapok hidegebbek az éghajlati normálnál. A sokéves átlagtól a legkisebb eltérést novemberben és szeptemberben tapasztaltuk (-0,3 °C és +0,5 °C). A legnagyobb eltérések negatív irányban áprilisban és májusban adódtak (-2,9 °C és -2,1 °C), míg a legnagyobb pozitív anomáliákat júniusban és júliusban tapasztaltuk (+2,1 °C és +2,2 °C). 2021 nyara az 5. legmelegebb volt 1901 óta, melyhez hozzájárult, hogy a július az 1., míg a június a 3. helyre került az 1901–2021-es időszakot felölelő sokévi adatsorban.

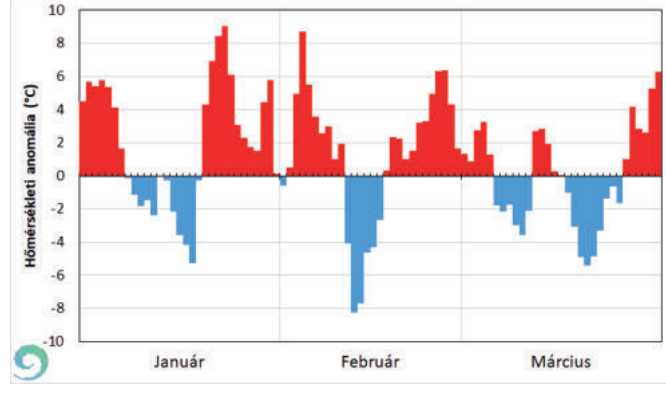
Enyhén indult a 2021-es év, a téli hónapokban a havi átlaghőmérséklet országos átlaga a sokévi átlag felett alakult. Az évszak során a legmagasabb hőmérsékletet Kiskunfélegyházán mértük február 26-án (22,4 °C), míg a legalacsonyabb hőmérsékletet Zabarban regisztrálták február 13-án (-25,8 °C).

Január első hetében a Kárpát-medence térségének időjárását több mediterrán ciklon alakította, aminek köszönhetően 4-6 °C-kal volt melegebb, mint az 1991–2020-as sokévi átlag. Ezután pár napig az ilyenkor szokásos közelében alakult a hőmérséklet, majd a hónap közepén egy Dél-Skandinávia felett örvénylő markáns ciklon hosszan elnyúló frontrendszerének hatására egyre hidegebb levegő áramlott hazánk fölé. A sarkvidéki levegő miatt 4 °C-kal a sokéves átlag alatt maradt a hőmérséklet. Január 20. után dél, délnyugat felől igen enyhe légtömegek érkeztek térségünkbe. A nappali hőmérséklet rendkívül gyorsan emelkedett, a következő napokban már kora tavaszias időjárás uralkodott: 22-én és 23-án országos átlagban 8,5 °C-kal volt melegebb, mint a sokévi átlag. Ezt követően kisebb mértékű lehűlés következett, majd újra melegedni kezdett az idő, és jelentősen meghaladta az ilyenkor szokásos hőmérsékleteket.

Februárban tovább folytatódott az átlagosnál melegebb időjárás. A hónap első hetében a Kárpát-medence térségét több melegfront is elérte, aminek köszönhetően délnyugati áramlással enyhe levegő árasztotta el hazánkat. Így a legenyhébb időszakban 9 °C-kal volt melegebb, mint az 1991–2020-as sokévi átlag. A következő dekádban egy mediterrán ciklon hidegfrontja mögött viharos északi, északnyugati széllel hideg légtömeg érkezett. A gyors lehűlésnek köszönhetően a sokévi átlag alá csökkent a hőmérséklet, a hónap leghidegebb időszakában 7 °C-kal volt hidegebb az ilyenkor szokásosnál. A hónap utolsó dekádjában egy anticiklon terült el hosszú ideig az ország felett. A nappali hőmérséklet fokozatosan emelkedett, a következő napokban a szokásosnál enyhébb, kora tavaszias időjárás uralkodott.

A tavasz a megszokottnál hidegebb volt, országosan 9,3 °C-os átlaghőmérséklet jellemezte, 1,9 °C-kal volt hidegebb a normálnál. Áprilisban közel 3 °C-kal, májusban mintegy 2 °C-kal maradt el a havi középhőmérséklet a sokéves átlagtól. Évszakos átlagban a legmelegebbet Szeged belterületén (10,9 °C), a leghidegebbet pedig Kékestető állomásunkon (4 °C) mértük.

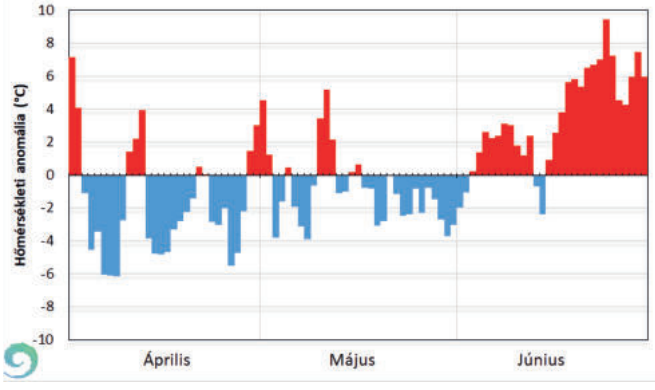
Márciusban a napi átlaghőmérséklet országos átlaga jócskán eltért a sokévi átlagtól. A hónap első napjaiban egy hatalmas kiterjedésű anticiklon alakította Európa időjárását, így a megszokottnál kicsit melegebb volt hazánkban. A következő héten több hidegfront vonult át az ország felett, melyek mögött sarkvidéki eredetű levegő árasztotta el hazánkat. Ennek hatására lehűlés következett. A sokévi átlag alá csökkent a hőmérséklet, mindössze 3-4 °C-kal volt hidegebb az ilyenkor szokásosnál. 12-én a csapadékkal együtt enyhébb légtömegek érkeztek a Kárpát-medencébe, de ez nem tartott sokáig. Az északias hideg áramlásnak köszönhetően térségünkben a hőmérséklet 10 napig a sokévi átlag alatt maradt, majd a hónap utolsó hetében enyhülés következett, anticiklonális hatásoknak



6. ábra. Napi országos középhőmérsékletek eltérése az (1991-2020) átlagtól; 2021. január, február, március.

köszönhetően. Erősödött a nappali felmelegedés mértéke, így a hónap utolsó napjaiban -6 °C-kal enyhébb volt az idő, mint az ilyenkor szokásos (*6. ábra*).

Az április az átlagosnál több fokkal melegebb idővel indult, 1-jén az országos átlag 15,6 °C volt, ami közel 7 fokkal magasabb az éghajlati normálnál. Április 2-án hideg, sarkvidéki eredetű légtömegek érték el hazánkat, a lehűlésnek köszönhetően éjszakánként többfelé fagyott, majd 6-án egy újabb hidegfront érkezett, melyet országszerte fagyos éjszakák követtek, néhol –10 °C-hoz közeli hőmérsékletekkel. Ezt követően egy ciklonrendszer előoldalán melegebb levegő áramlott térségünkbe, így rövid ideig a normálnál melegebbre váltott az idő. Április 13-án egy hullámzó hidegfront hatására jelentősen lehűlt az idő, mely után csak lassan, fokozatosan indult meg az enyhülés. A harmadik dekád elején egy újabb hidegfront miatt ismét átlag alatt alakultak az országos napi középhőmérsékletek. A hónap végén melegedés indult meg, így a hónap utolsó napjai a sokéves átlag felett alakultak. (*7. ábra*).



7. ábra. Napi országos középhőmérsékletek eltérése az (1991-2020) átlagtól; 2021. április, május, június.

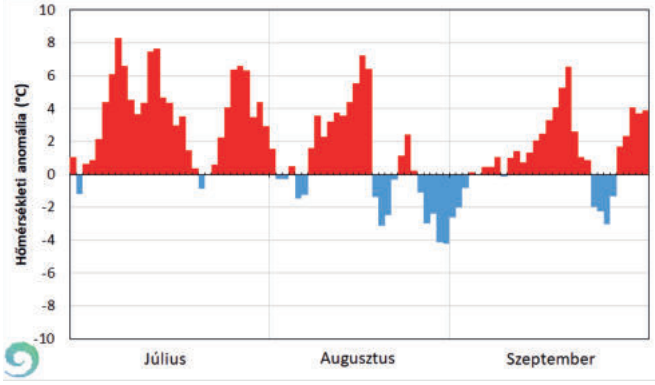
Április végén átmenetileg melegebbre fordult az idő, így május 2-án, 2021-ben először nagyobb területen 25 °C fölé emelkedett a hőmérséklet. Ezt követően északnyugat felől markáns hidegfront érte el az országot, ami véget vetett a nyárias napoknak. A hőmérséklet a legmelegebb órákban is általában 20 °C alatt maradt, fagyzugos helyeken pedig fagy is kialakult. 4-én Zabaron új országos napi minimumhőmérséklet rekordot, –3,5 °C mértünk. Május 10-12 között néhány napra ismét nyárias időben volt részünk, majd a 13-án átvonult hidegfrontot követően a hónap második fele végig gyakori frontátvonulásokkal és az átlagosnál hűvösebb idővel telt (*7. ábra*).

A 2021. nyár átlaghőmérséklete 22 °C volt, mely 1,2 °C-kal magasabb, mint az 1991–2020-as sokévi átlag. 1901 óta a 3. legmelegebb júniust hagytuk magunk mögött, míg a július az 1. helyre került a sokéves adatsorban. A nyár az ötödik legmelegebbnek adódott, történt ez annak ellenére, hogy az augusztus jelentősen elmaradt a megszokottól. Az országban a hőség által leginkább érintett területek az Alföld és a Dél-Dunántúl voltak. Kiemelkedően sok: 35-40 hőhullámos nap lépett fel a Körös-Maros közén, illetve a Nagykunságban. Idén nyáron országos átlagban a napi középhőmérséklet 22 napon érte el a 25 fokot. Ennél több ilyen nap csak 2015-ben és 2012-ben fordult elő.

Június első napjaiban még a sokévi átlag alatt maradtak a napi középhőmérsékletek (*7. ábra*). Ezt követően hosszú ideig a normál felett alakult a hőmérséklet. 13-15-e közt ismét hűvösebb volt időjárásunk, főképp a hajnali órákban, majd a hónap hátralevő részében végig pozitív anomália volt jellemző. Annyira megemelkedett a napi középhőmérséklet, hogy a hónap második felében egymást érték a hőségriasztások. A Kárpát-medence térsége tartósan a Nyugat-Európa fölött örvénylő ciklonok ún. előoldali áramlási rendszerében helyezkedett el. Ezzel az áramlással déli, délnyugati irányból több alkalommal igen meleg, afrikai eredetű légtömeg érkezett térségünk fölé. június 23-án és 24-én is új országos napi rekord született. Előbbi napon Berettyóújfalu és Dombegyház állomáson is 37,8 °C-ig emelkedett a hőmérséklet, míg 24-én 40,0 °C-kal tetőzött a hőség Fülöpházán.

Júliusban – az első és a harmadik dekád elejének kivételével – a sokéves átlag felett alakult a napi középhőmérséklet. Július 5-től egy nagykiterjedésű anticiklon határozta meg hazánk időjárását, így újabb hőhullám alakult ki, több napig 6–8 °C-kal a sokévi átlag feletti hőmérsékleteket mértünk. Július 8-án új országos napi rekord született, 40,2 °C-kal Adonyban. A hőséget egy hidegfront átvonulása enyhítette ugyan 10-én, de még így is 3–4 °C-kal a sokévi értékek felett maradt

a hőmérséklet. Ezt követően ismét jelentősen erősödött a nappali felmelegedés. A hónap közepén egy magassági hidegörvény hatására mérséklődött a meleg, majd egy hidegfront is átvonult hazánk felett, így a napi középhőmérsékletek néhány napig az évszakos átlag körül alakultak. Július 25-től délies áramlással ismét melegebb levegő érkezett térségünkbe, melynek hatására visszatért a hőség (*8. ábra*).



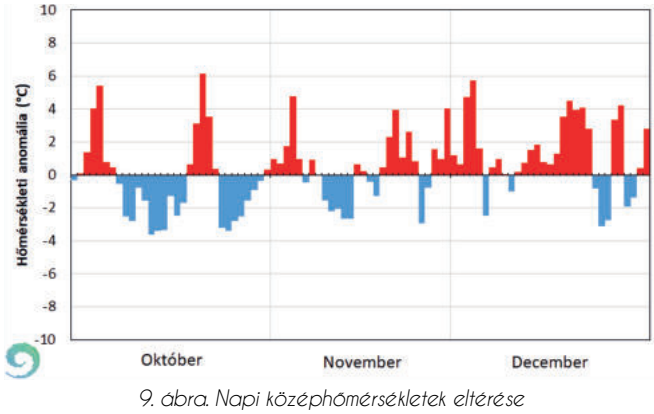
8. ábra. Napi országos középhőmérsékletek eltérése az (1991-2020) átlagtól; 2021. július, augusztus, szeptember.

Augusztus elején a napi átlaghőmérséklet a sokévi átlag alatt maradt, mert egy hullámzó frontrendszer alakította időjárásunkat (*8. ábra*). Ezt követően anticiklonális hatásoknak köszönhetően fokozatosan megerősödött a nappali felmelegedés, és a meleg, fülledt időt csak néha zavarták meg záporok, zivatarok. A hónap közepén egy hidegfront vonult át a Kárpát-medence felett, melynek hatására megszűnt a hőség. Ezután ismét enyhe melegedés kezdődött, így a harmadik dekád elején már a sokéves átlag közelébe került a napi középhőmérséklet. Augusztus 22-én késő este egy hidegfront érte el térségünket északnyugat felől, mögötte több fokkal hidegebb levegő áramlott be a Kárpát-medencébe, majd 26-tól egy Skandinávia felett örvénylő ciklon hidegfrontja volt hatással időjárásunkra. Ez az erőteljes lehűlés a hónap végéig a sokéves átlag alatt tartotta a hőmérsékletet. A leghidegebb napokban az átlaghőmérséklet 5–6 °C-kal a sokévi átlag alatt maradt.

Az átlagosnál kissé hűvösebben alakult a 2021-es ősz, középhőmérséklete 10,4 °C volt, mely 0,3 °C-kal alacsonyabb, mint az 1991–2020-as sokévi átlag. Az évszak során a legmagasabb hőmérsékletet Adonyban regisztrálták szeptember 15-én (33,2 °C), míg a legalacsonyabb hőmérsékletet Zabarban mérték november 25-én (-9,7 °C).

Szeptember elején egy anticiklonnak köszönhetően nyugodt, szinte eseménytelen időjárás uralkodott a Kárpát-medencében. A csendes, kora őszi időnek megfelelően a napi átlaghőmérséklet a sokévi átlag közelében mozgott, majd a második dekád elejétől elkezdett fokozatosan emelkedni, így a hónap közepén már 4–6 °C-kal többet mértünk az ilyenkor megszokottnál. Ezt követően egy északnyugat felől érkező hullámzó hidegfront hatására hűvösebbre fordult az idő, az átvonuló front mögött a megélénkülő széllel több fokkal hidegebb levegő áramlott a Kárpát-medencébe. A következő napokban újabb ciklonok vonultak át hazánk fölött. Az északias áramlás következtében érkezett hideg levegő miatt a harmadik dekád elején a napi átlaghőmérséklet 2–3 °C-kal a sokéves átlag alatt maradt. Ezt követően fokozatosan megerősödött a nappali felmelegedés, visszatért a nyáriasan meleg idő. A hónap végéig a normál felett maradt az átlaghőmérséklet (*8. ábra*).

Október elején gyorsan emelkedtek a napi középhőmérsékletek, így a megszokottnál melegebb napokban volt részünk. Október 6-án záporokkal, viharos széllökésekkel érkezett a lehűlés, ezt követően másfél hétig a napi átlaghőmérsékletek a sokéves átlag alatt maradtak. Fokozatosan anticiklon hatása alá került térségünk, melynek hatására lassan melegedni kezdtek a napok, és a harmadik dekád elején a sokéves átlag felett alakult a napi középhőmérséklet. A melegedés



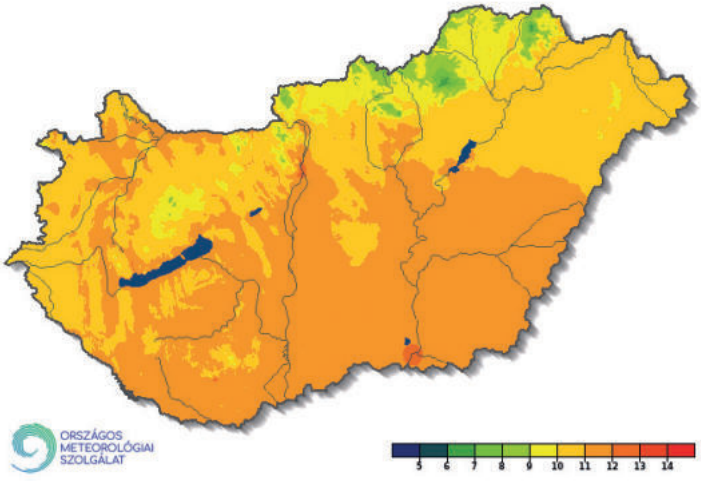
9. ábra. Napi középhőmérsékletek eltérése az (1991-2020) átlagtól; 2021. október, november, december.

csupán átmenetinek bizonyult, október 21-én este egy újabb hidegfront érkezett, ami jelentős lehűlést hozott. A harmadik dekádban egy anticiklon épült ki térségünkben, és az időjárás fokozatosan enyhülni kezdett, október 30-án elérte a sokéves átlagot (*9. ábra*).

November egészére elmondható, hogy egymást érték a frontok térségünkben. Először egy északnyugat felől érkező hullámzó hidegfront érkezett, majd 4-én elérte térségünket egy mediterrán ciklon melegfrontja, melynek köszönhetően 4 °C-kal volt melegebb a megszokottnál. Ezt követően továbbra is egymást érték a frontrendszerek. A hónap közepén a Baltikum fölött elhelyezkedő ciklon hidegfrontja révén szárazabb, hidegebb levegő érkezett, ezzel visszatértek az éjszakai fagyok. Később Oroszország felett épült ki egy anticiklon, melynek átmenetileg térségünk is befolyása alá került. November 18-án egy hideg, majd másnap rögtön egy melegfront érkezett, és okozott enyhülést hazánkban, így a napi átlaghőmérsékletek több napig az átlag fölött alakulhattak. 22-től egy Oroszország felett elhelyezkedő ciklon hidegfrontja okozott markáns lehűlést. November 24-e lett a hónap leghidegebb napja, 0 °C alatti átlaghőmérséklettel. A frontokban gazdag időjárásnak köszönhetően újra enyhülés kezdődött, a hónap végén a napi középhőmérséklet már átlag fölött alakult.

Decemberben a havi középhőmérséklet 1 °C-kal magasabb volt a szokásosnál, ezért a napi átlaghőmérsékletek országos átlagai is a sokévi érték felett mozogtak a hónap nagyobb részében. A hónap a szokásosnál melegebb napokkal kezdődött, egy ciklon melegszektora határozta meg az időjárást. Ehhez hasonló, az átlagnál 3–4 °C-kal magasabb hőmérsékleteket a hónap közepén is mértünk. Ekkor a Kárpát-medence időjárását elsősorban egy nyugat-európai anticiklon alakította, nyugodt, csendes időt hozva. A következő napokban egy nagy kiterjedésű, oroszországi központú ciklon hatására sarkvidéki eredetű, hideg és száraz levegő áramlott hazánk fölé. Karácsonykor, 24-én és 25-én időjárásunkat egy melegfront alakította, a szokásosnál melegebb napokat okozva. Ezt követően kisebb mértékű lehűlés következett, de 28-tól kezdve a nappali hőmérséklet fokozatosan emelkedett (*9. ábra*).

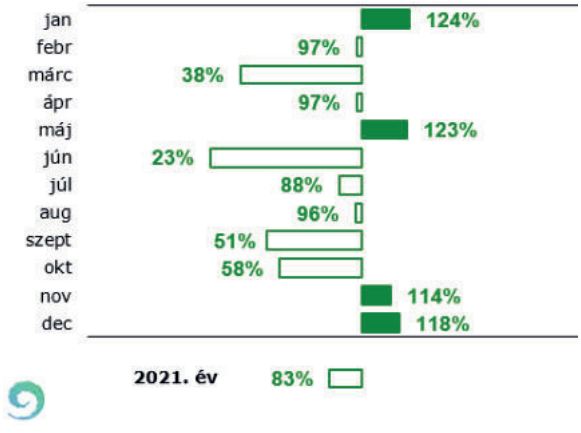
A 2021-es év során az évi középhőmérséklet területi eloszlása leginkább a domborzat hatását tükrözte. Az ország legnagyobb részét, így az alföldi tájainkat is 10–12 °C közötti értékek jellemezték (*10. ábra*), míg Szeged, Budapest és Pécs környékén 12 °C fölé emelkedett az évi középhőmérséklet. A Dunántúli-középhegységben 9–11 °C, míg az Északi-középhegységben jobbára 8–10 °C volt jellemző. A Mátra, a Bükk és a Zempléni-hegység legmagasabban fekvő régióiban az évi átlag 7 °C alatt maradt.



10. ábra. 2021. évi középhőmérséklet (°C) (homogenizált, interpolált adatok alapján).

Az év fontos jellemzője az éghajlati indexek számának alakulása, például a hideg és a meleg küszöbnapok száma. Fagyos napból ($T_{min} \leq 0$ °C) 97 nap volt, ez 7 nappal haladja meg az 1991–2020-as normált. Téli napból ($T_{max} \leq 0$ °C) 9 nap adódott a szokásos 24 helyett. A zord napok ($T_{min} \leq -10$ °C) száma mindössze 3 volt, míg a normál 8 nap. Zabar állomáson volt a legtöbb, itt 26 napot regisztráltunk. A nyári napok száma ($T_{max} \geq 25$ °C) meghaladta (94 nap) az 1991-2020-as átlagot (87 nap). A hőhullámos napok (Ta ≥ 25 °C) területi eloszlását mutató *10. ábra* szerint 2021 nyarán az Alföld déli részén, Békés megyében 30-35 hőhullámos nap fordult elő. 2021-ben hőségnapból ($T_{max} \geq 30$ °C) a normálnál (29 nap) jóval többet, összesen 42 napot jegyeztünk. Kübekháza gátőrház állomáson volt a legtöbb, összesen

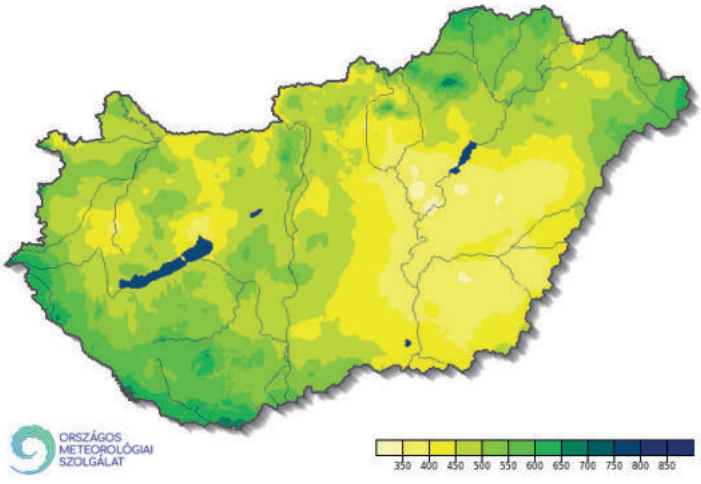
66 hőségnap jelentkezett. A forró napok száma ($T_{max} \geq 35$ °C) országos átlagban 5 nappal több volt, mint az 1991–2020-as átlag (3 nap).



11. ábra. Havi csapadékösszegek 2021-ban az 1991–2020-es normál százalékában (homogenizált, interpolált adatok alapján).

Csapadék. 2021-ben az országos évi csapadékösszeg 514 mm volt, mely az 1991–2020-as sokévi átlag 83%-a (*11. ábra*). A 2021-es év ezzel a 20. legszárazabb év lett 1901 óta. Januárban még a havi normál érték negyedével több csapadék hullott, de a februári csapadékösszeg már nem érte el a szokásos mennyiséget. Márciusban országos átlagban mindössze 12,9 mm-t regisztráltunk, ami az 1991–2020-as normálnak 38%-a, ezzel a március a 15. legszárazabb lett 1901 óta (*12. ábra*). Áprilisban a havi csapadékösszeg megfelelt az 1991–2020-as átlagnak, míg az utolsó tavaszi hónapban 79 mm érkezett, mely 23%-kal haladta meg az ilyenkor megszokott értéket. 1901 óta ez volt a legszárazabb június, országos átlagban 16 mm csapadék hullott, a szokásos csapadékmennyiség mindössze 23%-a. A júliusi és az augusztusi csapadékösszeg is elmaradt a normáltól (12% és 4%-kal), így a nyár a 23. legszárazabb lett a 121 éves adatsorunkban. Ősszel is folytatódott a csapadékszegény időjárás, szeptemberben a megszokott mennyiség felét, 30 mm-t regisztráltuk, míg októberben több mint 40%-kal volt kevesebb a csapadék. Az ősz utolsó hónapja már meghaladta a normál értéket (114%), majd decemberben is több csapadék (118%) hullott, mint szokott. Az év legnagyobb napi csapadékösszege 94,3 mm volt, amit július 2-án a Heves megyei Erdőtelek állomáson mértünk (*I. táblázat*).

Az ország nagy részén az évi csapadékösszeg 350-550 mm között alakult (*12. ábra*), térbeli eloszlása részben tükrözte a domborzati adottságok hatását. A délnyugati határszélen, és az ország északnyugati területein hullott a legtöbb csapadék, itt előfordultak 600 mm-t meghaladó területek is. A legmagasabb évi csapadékösszeget (760 mm) 2021-ben Miskolc Lillafüred-Jávorkút



12. ábra. A 2021. évi csapadékösszeg (homogenizált, interpolált adatok alapján).

Elem	Érték	Mérés helye	Mérés ideje
Legmagasabb mért hőmérséklet	40,2 °C	Adony	2021.07.08.
Legalacsonyabb mért hőmérséklet	-25,8 °C	Zabar	2021.02.23.
Legmagasabb minimum-hőmérséklet	26,0 °C	Apc	2021.07.14.
Legnagyobb évi csapadék-összeg	760 mm	Miskolc Lillafü-red-Jávorkút	
Legkisebb évi csapadék-összeg	359,7 mm	Jászladány	
Legnagyobb 24 órás csapadékösszeg	94,3 mm	Erdőtelek	2021.07.02.
Legvastagabb hótakaró	33 cm	Veszprém	2021.04.14.

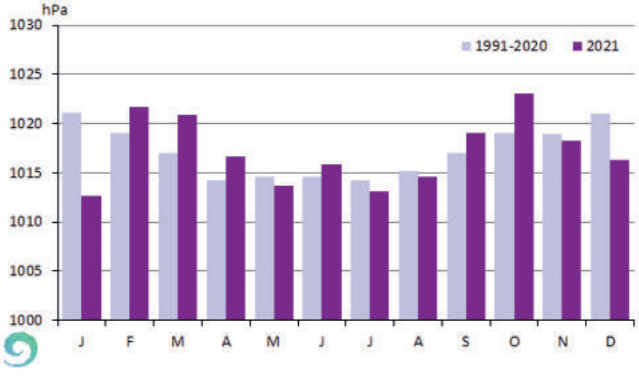
I. táblázat. Az Országos Meteorológiai Szolgálat mérései szerint a 2021-os év szélsőségei, a mérés helye és ideje.

állomáson összegeztük. A legszárazabb az Alföld volt, ahol 350-450 mm között alakult az éves csapadékmennyiség. A legkisebb évi csapadékösszeget a Jász-Nagykun-Szolnok megyei Jászladány állomáson jegyeztünk, ahol mindössze 359,7 mm hullott egész évben (*I. táblázat*).

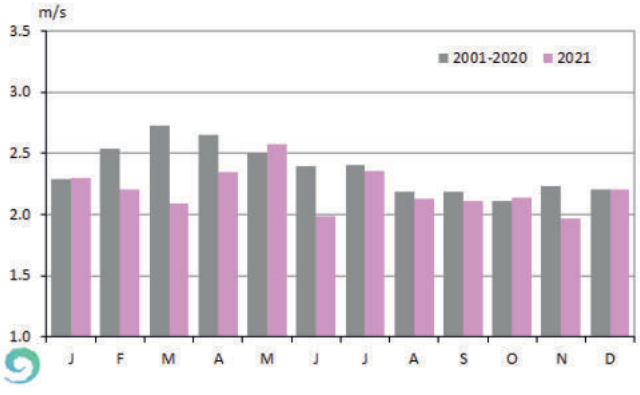
Az év során az állomások országos átlagában összesen 124 napon hullott csapadék, a legtöbb csapadékos nap (> 0,1 mm) májusban (17 nap) fordult elő. 9 nappal kevesebbet jegyeztünk azokból a napokból, amikor a csapadék mennyisége meghaladta az 1 mm-t (normál: 87 nap). 10 mm-t elérő napokból 4-gyel kevesebb volt, mint a megszokott (18 nap). 20 mm-t elérő napokból pedig 3 nappal kevesebb fordult elő, mint az 1991–2020-as átlag (5 nap). A rövid ideig tartó nyári felhőszakadások, jégesők több településen is jelentős károkat okoztak. Havas napból azonban több fordult elő a vártnál országos átlagban: 21 helyett 23 nap. A legtöbb havas napot 2021-ben Kékestető állomáson összegeztük (70 nap). Érdekesség, hogy a 2021-es évben a hóréteg legnagyobb vastagságát (33 cm) április 14-én mértük Bakonybél Somhegypuszta állomásunkon, míg a téli hónapokban csupán 25 cm volt a maximális hóvastagság (Hárskút, január 19.).

Légnyomás. A havi átlagos légnyomás értékek alapján a nagytérségű nyomási képződmények gyakoriságára következtethetünk. 2021-ben Budapest Pestszentlőrincen a tengerszinti légnyomás havi átlaga februárban, márciusban és októberben jóval a normál felett alakult, de áprilisban, júniusban és szeptemberben is meghaladta az átlagot. Ezeket az anomáliákat télen gyakran hidegpárnás helyzetek, míg az év többi részében tartósan fennmaradt anticiklonális helyzetek okozták. Ugyanakkor igen alacsony havi légnyomásérték adódott januárban és decemberben, ami az alacsony nyomású légköri képződmények nagyobb gyakoriságára, egyúttal élénkebb ciklontevékenységre utal (*13. ábra*). Ez egybevág azzal is, hogy a január majdnem 2 °C-kal, míg a december 1 °C-kal melegebb volt a megszokottnál.

Szél. A szélsebesség évi átlaga hazánk területén 1 és 6 m/s között változott, az országos átlag 2,4 m/s volt. A legmagasabb évi átlagok a Bakonyban fordultak elő, de a Dunántúli-középhegységben és a Soproni-hegységben is többfelé előfordultak 4 m/s-ot meghaladó értékek. A Tiszántúlon, ezen belül a Körös-Maros közén és a Hortobágyon jelentkeztek még az országos átlagnál szelesebb területek (3-4 m/s). Budapest Pestszentlőrinc állomáson a havi átlagos szélsebesség éves menetében (*14. ábra*) általában márciusban jelentkezik a maximum, melyet az április követ, míg a minimumot októberben veszi fel. 2021-ben a havi átlagos szélsebesség májusban volt a legnagyobb (2,6 m/s), júniusban és novemberben a legkisebb (~2 m/s).



13. ábra. A tengerszinti légnyomás havi átlagai Budapest Pestszentlőrincen 2021-ban.



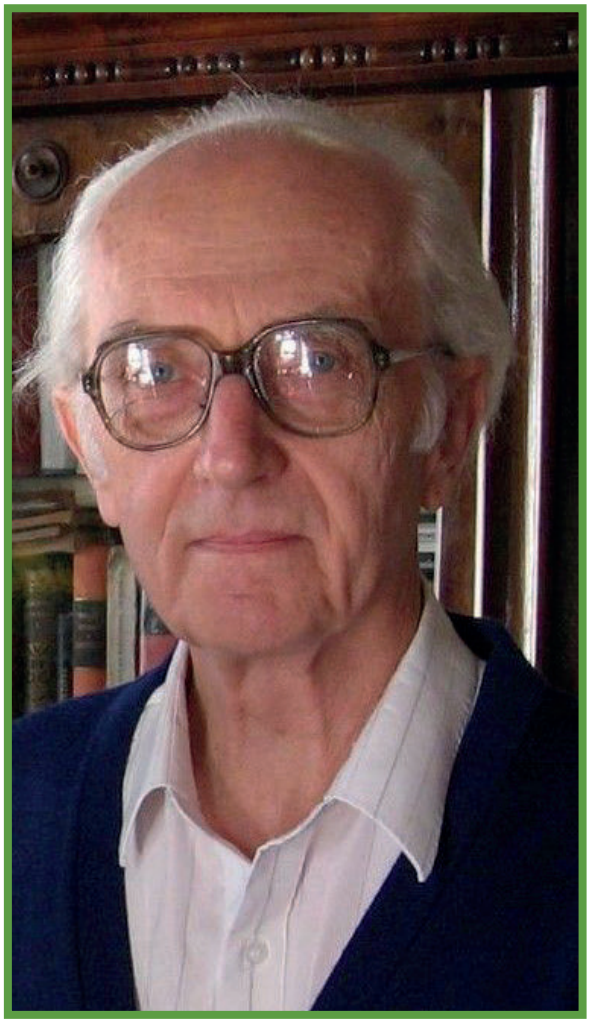
14. ábra. A szélsebesség havi átlagai Budapest Pestszentlőrincen 2021-ban.

Hírek

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

Dr. Felméry Lászlóra emlékezünk

2022.01.04. ■ **Felméry László** (Budapest, 1931. július 17.- Budapest, 2021. december 21.) 1953-ban szerzett földrajz-történelem szakos tanári oklevelet az ELTE-n. Később, 1962-ben, elvégezte a matematikus szakot is. Meteorológus. 1991-ben bekövetkezett nyugdíjazásáig az ELTE TTK Meteorológiai Tanszék docense. Egyetemi doktori fokozatot 1962-ben szerzett „Vizsgálatok a talaj-közeli légrétegek nedvesség viszonyairól" című értekezésével. Oktatói pályafutása során meteorológus és földrajz szakos hallgatók generációinak oktatott éghajlattant, tartott klimatológiai gyakorlatokat. Rendszeresen részt vett terepgyakorlatokon. Az 1960-as években vezetésével tanulmányozták a Bakony éghajlatát. Egyetemi, jegyzeteket írt, felelőse és oktatója volt a Magyar Honvédség megbízásából szervezett Meteorológus II. szintű, felsőfokú tiszti tanfolyamoknak. Jegyzetei közül a legtöbbet forgatott a Dobosi Zoltánnal közösen írt Klimatológia volt. A nemzetközi szakirodalomban való eligazodás segítette „Meteorológiai szakszövegek orosz és angol nyelven" című jegyzete. A Magyar Meteorológiai Társaságnak aktív tagja volt, egy időben választmányi tagként. A Felsőoktatás Kiváló Oktatója. 1996-ban a környezetvédelmi miniszter Pro Meteorologia Emlékplakettel tüntette ki. Arany-Gyémánt- és Vasdiplomás.



2021 az eddigi hét legmelegebb év egyike a WMO összesített adatai szerint

Genf, 2022.01.19. ■ Bár a globális átlaghőmérsékletre átmeneti hűtő hatással voltak a 2020–2022-es La Niña események, a Meteorológiai Világszervezet (WMO) megerősítette, hogy hat globális adatbázis szerint 2021 még így is a hét legmelegebb év egyike. A WMO kiemeli, hogy a globális felmelegedés és a hosszú távú éghajlati változások várhatóan folytatódnak az üvegházhatású gázok rekordmagas légköri koncentrációja miatt.

A teljes cikk elolvasható a WMO honlapján, a QR kód beolvasásával.

110 éve született Dési Frigyes, az OMSZ első elnöke

2022.01.12. ■ **Dési Frigyes** 1950-től volt az Országos Meteorológiai Intézet igazgatója (1953-ig alezredesi rangban, mint az OMI parancsnoka), majd 1970-től az Országos Meteorológiai Szolgálat elnöke. Nevéhez fűződik az Aerológiai Obszervatórium, a későbbi KLFI létrehozása Budapest Pestszentlőrincen 1955-ben. Kutató bázisokat alakított ki Martonvásáron, Kecskeméten (Agrometeorológiai Obszervatórium) és Siófokon (Viharjelző Obszervatórium). Az Intézetből Szolgálat lett szervezett központi hivatallal és három intézettel 1970-ben. Főbb kutatási területei a légkör egyensúlyi feltételeinek értelmezése, különös tekintettel a zivatarok előrejelzésére. Mindezek mellett az ELTE Meteorológiai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára (1953-1974), a Magyar Meteorológiai Társaságnak 1955-1959 és 1964-1973 között elnöke volt.

180 éve született Konkoly-Thege Miklós csillagász, meteorológus

2022.01.20. ■ 180 éve, 1842. január 20-án született **Konkoly-Thege Miklós** a Meteorológiai és Földdelejességi Intézet ötödik igazgatója. A meteorológiával jó barátja, Schenzl Guidó által került közelebbi kapcsolatba. A Schenzl halála után háttérbe szoruló meteorológiai kutatásokat a Magyar Tudományos Akadémia 1890-ben a kiváló és állhatatos szervezőként ismert Konkoly kinevezésével kívánta fellendíteni. Sikerült. Igazgatósága alatt a Meteorológiai Intézet jelentős fejlődésen ment keresztül, nem túlzás azt állítani, hogy világszínvonalúvá fejlesztette azt.

Az éghajlatváltozás veszélyt jelent az emberiség jólétére és a bolygóra

2022.03.01. ■ Az ember okozta éghajlatváltozás veszélyes és széles körű természeti károkat okoz, és világszerte emberek milliárdjainak életére van hatással a kockázatok csökkentésére tett erőfeszítések ellenére. Az éghajlatváltozással foglalkozó kormányközi testület (IPCC) legutóbbi jelentése szerint a legsúlyosabban azokat az embereket és ökoszisztémákat érinti, amelyek kevésbé képesek alkalmazkodni.

Az IPCC hatodik értékelő jelentés elérhető a QR kód beolvasásával.

Március 23.: meteorológiai világnap

2022.03.23. ■ A Meteorológiai Világszervezet (WMO) 191 tagja és a nemzetközi meteorológus közösség minden évben megünnepli a WMO Egyezmény 1950. március 23-ai hatályba lépésének évfordulóját. A meteorológiai világnap alkalmából az Országos Meteorológiai Szolgálat által rendezett ünnepségen ilyenkor adják át a miniszteri kitüntetéseket, a Schenzl Guidó Díjakat és Pro Meteorológia Emlékplaketteket, valamint az „Innováció a meteorológiáért" díjat. Köszöntik továbbá az OMSZ legkiválóbb társadalmi észlelőit, és a legjobb amatőr észlelőt, aki az „Év MET-ÉSZ észlelője" címet kapja.

Minden évben egy-egy aktuális meteorológiai témakör kerül előtérbe. Az idei év jelmondata „Early warning and early action", azaz „Korai figyelmeztetés, korai cselekvés".

Az Országos Meteorológiai Szolgálat díjátadó és megemlékező ünnepségét 2022. március 23-án délelőtt tartja a Szolgálat dísztermében.

Kislexikon

Sarkadi Noémi
Pécsi Tudományegyetem, sarkadin@gamma.ttk.pte.hu

gyökérmélység: az a talajmélység, amelyből egy teljesen kifejlett növény kivonhatja a szükséges víz-, és tápanyagmennyiséget. (*In: Mátyás Cs. et al.: A klímaváltozáshoz alkalmazkodás támogatása az erdészetben: az agrárklíma döntéstámogató rendszer*)

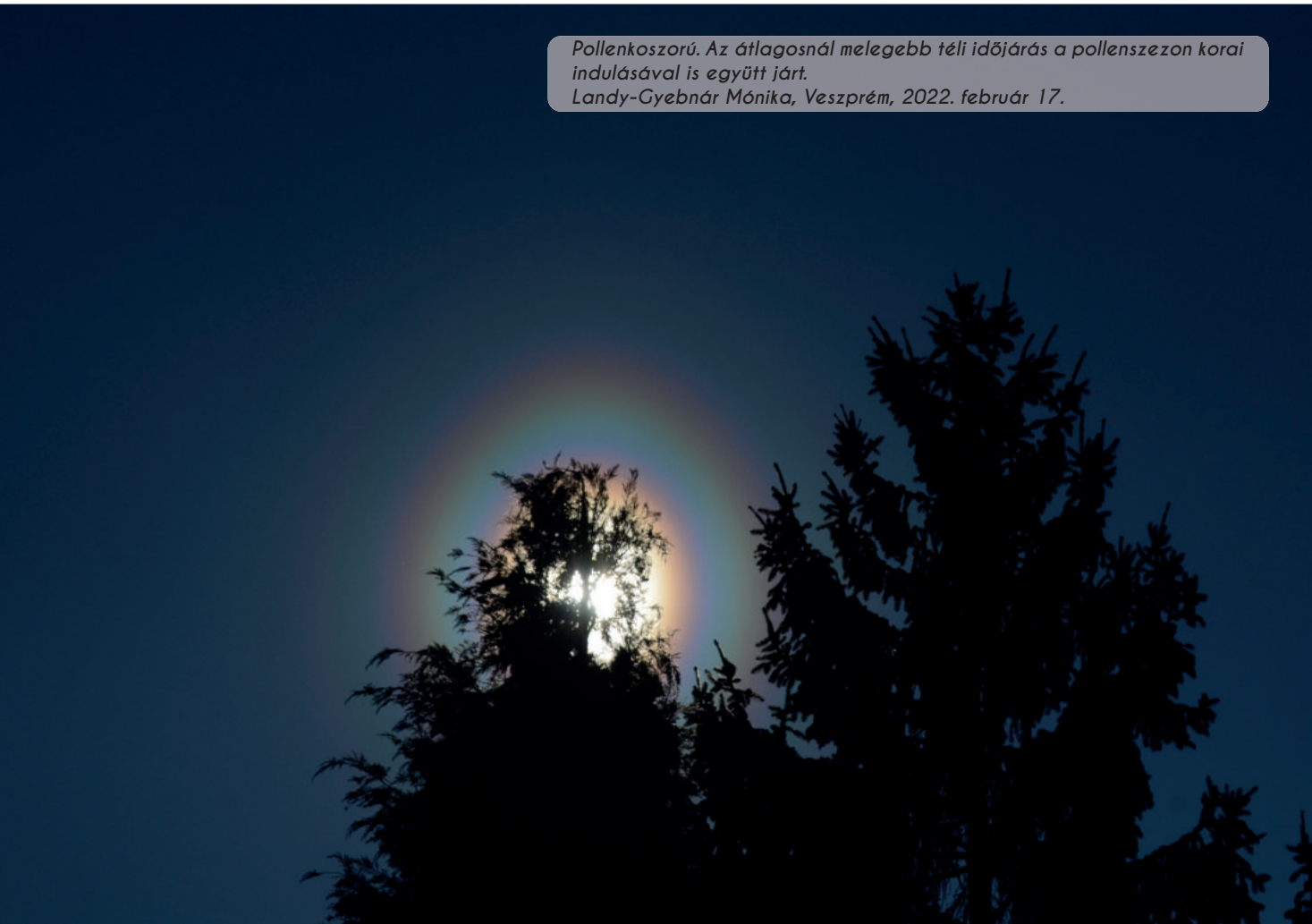
fedvény: térinformatikai fogalom. A térinformatikában adott szempont szerint csoportosított, összetartozó elemek összessége, vagy más néven rétege. (*In: Mátyás Cs. et al.: A klímaváltozáshoz alkalmazkodás támogatása az erdészetben: az agrárklíma döntéstámogató rendszer*)

termőhelyi potenciál: a termelékenység potenciális szintje, amelyet alapvetően az adott hely fizikai tulajdonságai (talaj- és víz minősége), valamint klimatológiai viszonyai határoznak meg. (*In: Mátyás Cs. et al.: A klímaváltozáshoz alkalmazkodás támogatása az erdészetben: az agrárklíma döntéstámogató rendszer*)

fotovoltaikus: a fotovoltaikus jelenség lényege, hogy a napsugárzás bizonyos elektrokémiai folyamatok során képes áramot termelni. A napelemek működése is ezen az elven alapul. (*In: Mészáros P.: Éghajlatváltozás hatása az energiaellátás-biztonságra*)

Éjszakai havas táj a Hargitán holdkoszorúval. A február különösen sok havat és zúzmarát eredményezett a térségben.
Csergő Nándor, Madarasi-Hargita, 2022. február 18.

Pollenkoszorú. Az átlagosnál melegebb téli időjárás a pollenszezon korai indulásával is együtt járt.
Landy-Gyebnár Mónika, Veszprém, 2022. február 17.



METEOSZKÓP

Az Országos Meteorológiai Szolgálat beszélgetős, interaktív műsora.
Minden hónap utolsó csütörtökén 13:30-tól az OMSZ Facebook oldalán

@orszagosmeteorologiaiszolgalat

Kövess minket Facebookon és nézd a Meteoszkópot élőben!

MAGYAR METEOROLÓGIAI TÁRSASÁG
MMT
ALAPÍTVA 1925

Magyar Meteorológiai Társaság

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

www.mettars.hu