



Összetett extrém események vizsgálata – szeles és csapadékos időjárás Magyarországon

Bordi Sára, Szabó Péter, Pongrácz Rita

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

DOI: 10.56474/légkor.2024.K.3

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

Analysis of compound events – extreme wind and precipitation in Hungary

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

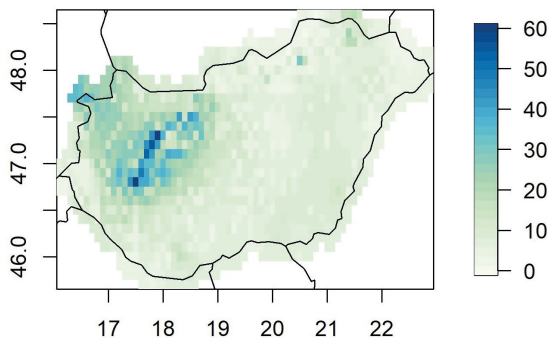
csapadék együtt) vizsgáltuk rácspontonként az évszázad végéig. A modellszimulációkat a HuClim adatbázis segítségével a 2001–2020 időszakra validáltuk, majd hibakorrigáltuk a projekciók kiértékelésének megkezdése előtt. A módszertani részletek *Bordi (2023)* diplomamunkájában olvashatók.

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

1. táblázat. Az elemzéshez felhasznált modellszimulációk.

Múltra vonatkozó eredmények

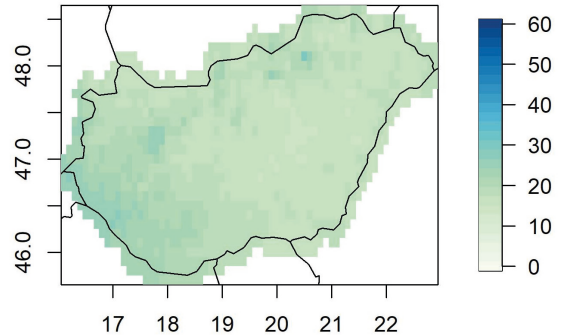
Az elmúlt húsz éves időszak alapján Magyarországon a szélviharos napok éves száma nagy mértékben függ attól, hogy az ország mely területét vizsgáljuk (1. ábra). Míg az Alföldön viszonylag kevés szélviharos esemény volt jellemző – évente kevesebb, mint 10 nap, egyes részein (pl. Szabolcs-Szatmár-Bereg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



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

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

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



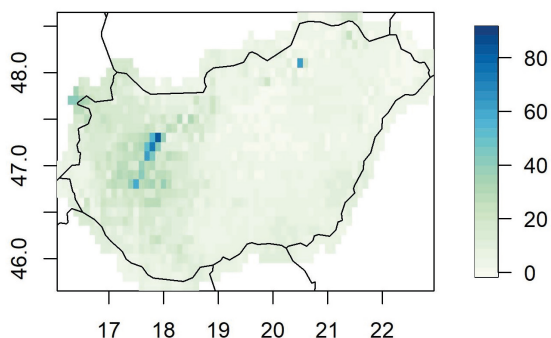
2. ábra. Extrém csapadékos napok (napi csapadékmennyiség > 10 mm) éves átlagos száma Magyarország területén a HuClim adatbázis alapján, 2001–2020.

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

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

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

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



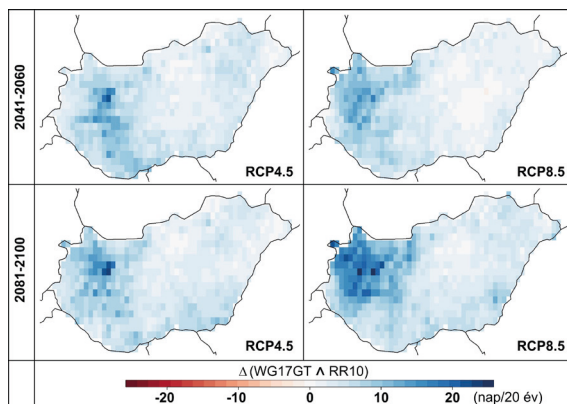
3. ábra. Összetett extrém szeles-csapadékos napok (napi maximális szélsebesség > 17 m/s és napi csapadékmennyiség > 10 mm) száma a vizsgált 20 év alatt Magyarország területén a HuClim adatbázis alapján, 2001–2020.

Jövőre vonatkozó eredmények

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

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

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

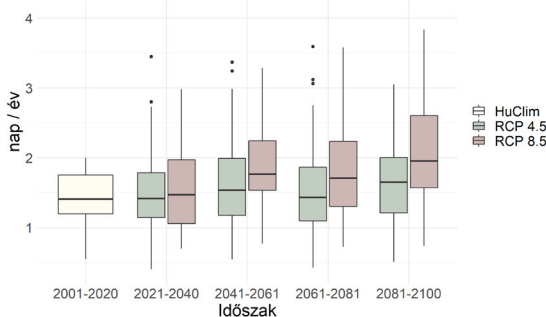


4. ábra. Összetett extrém szeles-csapadékos események előfordulási számának változása a 2041–2060 és a 2081–2100 időszakokra hat modellszimuláció átlaga alapján az RCP4.5 és az RCP8.5 forgatókönyv figyelembevételével, referencia időszak: 2001–2020.

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

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

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



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

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalomjegyzék

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Internetes hivatkozások

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

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