

## ÚJ KLÍMASZCENÁRIÓK – FELLÉLEGEZHETNEK BÜKKÖSEINK?

Gálos Borbála<sup>1</sup> és Somogyi Zoltán<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar

<sup>2</sup>NAIK, Erdészeti Tudományos Intézet

### Kivonat

A klímaváltozás erdei ökoszisztémákra gyakorolt hatásainak az alkalmazkodást segítő stratégiák kidolgozásához megfelelő pontosságú becsléséhez az éghajlati tendenciák megbízható előrejelzése szükséges. Tanulmányunkban azt elemeztük, hogy a különböző klímaszcenáriók és az azokra a különböző klímodellekkel kapott eredmények szórása mennyire befolyásolja az erdészeti klímahatás vizsgálatok számára megfogalmazott következtetéseket. A vizsgálatban a 21. század végéig az IPCC legújabb, sugárzási kényszer változásán alapuló scenárióin (ún. RCP4.5 és RCP8.5) és az A1B forgatókönyvön alapuló klímaprojekciókat használtuk fel, melyekből a bükkösök számára alkalmas makroklimát, ill. a mortalitást okozó szélsőséges aszályokat számszerűsítő hőmérséklet-csapadék indexeket (FAI, EQmod, T1b) képeztünk.

Míg az A1B scenárió a késő tavaszi és nyári hónapok melegedését és szárazabbá válását jelzi, az RCP forgatókönyvek esetén egyes modellek a csapadékösszeg erőteljes csökkenését, mások annak növekedését mutatják az 1971-2000-es referencia időszakhoz képest. Mivel azonban az alkalmazott scenáriótól és modelltől függetlenül a hőmérséklet növekedése nagyon erőteljes lesz, a csapadékváltozás-becslések nagy szórása és ellentétes előjele ellenére az elemzett indexek mindegyike az ariditás fokozódására utal a 21. század vége felé. A modellek többsége szerint már a kisebb hőmérséklet-emelkedést valószínűsítő (RCP4.5) forgatókönyv esetén is eltűnnek a bükkösök számára makroklimatikusan alkalmas területek Zala megyéből, és gyakrabban fordulhatnak elő szélsőségesen meleg és száraz periódusok. Az erdészeti károkkal összefüggést mutató indexek felvehetnek olyan értékeket, melyek az eddigi legszárazabb, de már a bükk mortalitását okozó aszályos periódusnál szélsőségebb aszályokra utalnak. Ez azt valószínűsíti, hogy a klímaelőrejelítések bizonytalanságától függetlenül egyértelmű hatások és az eddigieknél súlyosabb erdészeti károk várhatók, ami indokolja az alkalmazkodást már kisebb mértékű klímaváltozás esetén is.

*Kulcsszavak:* éghajlatváltozás, klímaszcenárió, bükkös klíma, meteorológiai aszály, aszálygyakoriság.

### NEW CLIMATE SCENARIOS – SMALLER DROUGHT RISK FOR EUROPEAN BEECH?

#### Abstract

Impact assessments and development of adaptation measures in forestry require robust information on long-term climate tendencies. To analyse how climate change scenarios and the uncertainty of climate models might affect conclusions of forestry impact studies, results of regional climate model ensembles run on representative concentration pathways (RCP4.5 and RCP8.5) and emission scenario (A1B) of the IPCC were used by the end of the 21<sup>st</sup> century from which temperature-precipitation indices (FAI, EQmod, T1b) were calculated that have been used to define suitable macroclimate and mortality thresholds for extreme droughts for European beech for Zala County (SW Hungary).

*Levelező szerző/Correspondence:*

Gálos Borbála, 9400 Sopron, Bajcsy Zsilinszky u. 4.; galos.borbala@uni-sopron.hu



Our results demonstrate that, in contrast to the robust warming and drying tendency of summers for the A1B scenario, the sign of the changes of precipitation projected by the RCP scenarios is rather unclear, and the simulated precipitation changes have a rather wide range and uncertainty. Despite these, all climate models agree in a significant increase of temperature that leads to more and more arid climate conditions by the end of the century. As a consequence, the macro-climatically suitable areas for beech are expected to disappear from the investigated region even assuming the lowest radiative forcing. Independently from the applied scenario, climate model and drought index, it is likely that more frequent drought periods will occur that are hotter than the most extreme event observed in the last century, so that the drought risks in forestry can be larger than what has ever been observed so far. Our results confirm that despite their uncertainty, climate change projections can already be robust enough to detect potential impacts and to support the development of adaptation measures in forestry.

*Keywords:* climate change, climate projection, beech climate, meteorological drought, drought frequency.

## BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedek aszályai súlyos károkat okoztak az erdei ökoszisztémákban Európa szerte (Jung 2009, Lindner et al. 2010, Spinoni et al. 2016). A szárazsági erdőhatáron, ahol a fajok elterjedését az elérhető vízmennyiség limitálja, az összefüggő aszályos periódusok abiotikus és biotikus károk láncolatához vezettek (Mátyás et al. 2010, Csóka et al. 2011, Berki et al. 2014, Rasztovits et al. 2014, Janik et al. 2016). Ezt támasztja alá a 2000-2003-as szélsőségesen aszályos időszak Zala megyében, melynek hatására a kártevők (zöld karc-súdíszbogár, *Agrius viridis*; bóbítás bükkészű, *Taphrorychus bicolor*) tömegszaporodása a vízhiány miatt legyengült bükkösök pusztulását okozta (Csóka et al. 2009, Lakatos & Molnár 2009, Molnár et al. 2010). A kártevőknek/kórokozóknak kedvező meleg-csapadékszegény periódusok következtében új, vagy a bükkösökben eddig kevésbé jellemző fajok is tömege-sen és egyre gyakrabban fellépnek (Csóka et al. 2009, 2011).

A jövőben várható hatások becsléséhez és az alkalmazkodást segítő erdészeti stratégiák kidolgozását célzó kutatásokhoz (Czimer & Gálos 2016, Illés & Fonyó 2016, Somogyi 2016, Führer 2017) az éghajlati tendenciák megbízható előrevetítése szükséges. A klimatikus átlagok változásánál nagyobb kockázatot jelentenek az erdőknek az egyre szélsőségesebbé váló csapadékhiányos időszakok (Hlásny et al. 2014, Allen et al. 2015, Diffenbaugh et al. 2015). Az aszályok gyakoriságát Magyarországra eddig az IPCC A1B kibocsátási forgatókönyvének feltételezésével vizsgáltuk (Gálos et al. 2007, 2015, Pongrácz et al. 2014), mely alapján hatásbecslések készültek az erdők elterjedésére (Móricz et al. 2013), szénforgalmára (Somogyi 2016) és vízháztartása (Csáki et al. 2014).

Az IPCC ötödik Helyzetértékelő Jelentéséhez (IPCC 2013) új, sugárzási kényszer változásán alapuló scenáriókat fejlesztettek ki (Moss et al. 2010). Az ezekkel futtatott regionális klímamodell eredményeit Magyarországra, erdészeti hatáskutatás céljára még nem értékelték ki és hasonlították össze a korábbi kibocsátási forgatókönyveken alapuló klíma-előrevetítésekkel. Az ilyen modelleredményekkel kapcsolatos általános, de nem feltétlenül megalapozott kritika, hogy azok forgatókönyvenként is és modellenként is eltérők és

nagy szórásúak, vagyis az előrebecslések bizonytalansága nagy, és ez lehetetlenné teszi az alkalmazkodást elősegítő döntések meghozatalát.

E cikk célja ezért éppen az, hogy megvizsgáljuk, befolyásolja-e az éghajlati tendenciákból (1) a bükkösök számára alkalmas makroklimára, valamint (2) a mortalitást okozó aszályos periódusok gyakoriságára és szélsőségességére levont következtetéseket a feltételezett klímaszcenárió, a klímodell eredmények szórása, valamint az alkalmazott aszályindex.

## ANYAG ÉS MÓDSZER

### Klímaadatok és –előrejelzések

Az éghajlati tendenciákat Zala megye térségére értékeltük (1. ábra), ahol a 2000-2003-as években erős aszály, és ennek következtében jelentős fapusztulás volt megfigyelhető. Az 1961-2010-es időszak hőmérséklet- és csapadékviszonyait rácsra interpolált meteorológiai állomásadatokkal (Lakatos et al. 2013) jellemeztük, kiegészítve az Országos Meteorológiai Szolgálat állomásadataival. A 2099-ig várható klimatikus tendenciákat regionális klímodellek eredményei alapján elemeztük (1. táblázat). A változásokat 30 éves jövőbeli átlagidőszakokra (2021-2050, 2070-2099) határoztuk meg, az 1971-2000-es referencia periódushoz képest.

A modelleket validálták (Jacob et al. 2013, Kotlarski et al. 2014), és széleskörűen alkalmazzák klíma- és hatáskutatáshoz. Az RCP-kre futtatott modell együttesek az A1B-sekhez képest finomabb felbontásúak és új, vagy továbbfejlesztett modelleket is tartalmaznak, ennek ellenére a becsült tendenciák összehasonlíthatók (Pfeifer et al. 2015).

1. táblázat: Az elemzésbe bevont klímaadatbázisok főbb jellemzői.

Table 1: Applied climate data and model simulations.

Adatok típusa	Rácsra interpolált meteorológiai állomásadatok	Regionális klímodell szimulációk eredményei	
Forgatókönyv és a szimulációk száma		A1B: 12 db	RCP4.5: 10 db RCP8.5: 10 db
Térbeli lépték	0.1° × 0.1°	0.22° × 0.22°	0.11° × 0.11°
Időszak	1961-2010	1971-2099	1971-2099
Változók és időbeli léptékük	Havi hőmérséklet átlagok és csapadékösszegek		
Adatok forrása	CarpatClim projekt [URL1]	Ensembles projekt [URL2]	Euro-Cordex projekt [URL3]

### Az alkalmazott származtatott indexek

Az elemzések során havi átlaghőmérsékletekből (T) és csapadékösszegekből (P) származtatott indexeket (1-3-as képletek) alkalmaztunk.

$$FAI = \frac{T_{júl-aug}}{P_{máj-júl} + P_{júl-aug}} * 100 \quad (1)$$

$$EQ_{mod} = \frac{T_{júl}}{P_{ápr-okt}} * 1000 \quad (2)$$

$$TI_b = \frac{0.2 * P_{márc} + 0.5 * P_{ápr} + P_{máj} + P_{jún} + P_{júl} + 0.8 * P_{aug}}{(T_{jún} + T_{júl} + T_{aug}) / 3} \quad (3)$$

Ezekre az indexekre azért esett a választás, mert a klímaprojekciók outputjaként hozzáférhető hőmérséklet- és csapadékadatokból a jövőre nézve is kiszámolhatók az értékeik (szemben a relatív páratartalom- és talajnedvesség adatokkal, ahol a mérések és klímamodell eredmények egyaránt hiányosak és nagy bizonytalansággal terheltek), és mert az eddigi vizsgálatok mindegyikük esetében ki tudtak mutatni valamilyen összefüggést az index-értékek és a Zala-megyei bükkpusztulás mértéke között.

(1) A FAI index (Führer 2010, Führer et al. 2011) esetében, ha a 3 éves mozgóátlag több egymást követő évben 7 feletti, a kárterület jelentősen megnő (Janik et al. 2016). Führer (2010) az erdészeti klímaosztályokat (Borhidi 1961, Járó 1966, Mátyás & Czímber 2000) is a FAI segítségével definiálta és határolta le, ahol egy-egy osztály szélessége 1,25 FAI egység.

(2) Az EQmod (módosított Ellenberg index; Franke & Köstner 2007) 4 éves mozgóátlaga és a károsított terület között Rasztovits et al. (2014) szerint exponenciális jellegű összefüggés van, és az index 65-ös értéke felett súlyos aszálykár valószínűsíthető.

(3) A TI<sub>b</sub> (bükk tolerancia index; Berki et al. 2009) 2000-2003-as átlaga, 11,2 az az eddigi legalacsonyabb érték, amely a Somogy- és Zala-megyei bükkösökben az eddigi legnagyobb károkkal egyidőben volt megfigyelhető.

### Az elemzések során alkalmazott aszály-értelmezések és feltételezések

A klímaváltozás lehetséges hatásaira való következtetés során a fenti indexekkel leírható meteorológiai aszályértelmezéseket használtuk. Az EQmod és a TI<sub>b</sub> indexek mortalitásra utaló határértékeit a Somogy- és Zala-megyei bükkös társulásokra vonatkozó hőmérséklet- és csapadékértékekből származtatva határozták meg (Rasztovits et al. 2014, Berki et al. 2009). A Zala megye átlagára számított index értékek ettől eltérőek, azonban megye szinten is ugyanúgy a 2000-2003-as periódus bizonyult az eddigi legsúlyosabb aszálynak. Ezért azt feltételeztük, hogy ha az EQmod (TI<sub>b</sub>) felveszi eddigi legmagasabb (legalacsonyabb) 4 éves

megyei átlagértékét, vagy annál szélsőségesebbet, akkor az a zalai bükkösökben is pusztulást okoz.

A klímamodellek alkalmazásából adódó feltételezések:

- A modellek elegendően jól visszaadják szélsőséges események gyakoriságát.
- Az egyes modellek által a historikus időszakra szimulált hőmérséklet- és csapadék értékek (így a belőlük származtatott index-értékek) nem egyeznek a mért adatokkal, de ez az ún. szisztematikus hiba nem változik a jövőbeni éghajlati viszonyok között.
- Az előző két pont alapján feltételezhetjük, hogy ha a megfigyelések alapján a referencia időszak legaszályosabb 4 egymás utáni éve mortalitáshoz vezetett, akkor minden modell historikus időszakában a legszélsőségesebb egymás utáni 4 év kárt okoz, ezért az ehhez tartozó EQmod és T1b értéket tekintettük a kritikus határnak. (Az egyes modelleknél a modellezési bizonytalanságból adódóan nem mindig a 2000-2003-as időszak volt a legszélsőségesebb 4 év.)
- Ha a szimulált jövőbeli 4 éves időszakok csapadék- és hőmérsékletviszonyai szélsőségesebbek, mint a szimulált historikus időszak legszélsőségesebb 4 éve, akkor azok a valóságban is az eddigi megfigyeltnél extrémebb aszályt eredményeznek.
- A vizsgált három scenárió, valamint a scenáriókon belül minden modell által becsült klíma bekövetkezési esélye egyforma.

## Statisztikai elemzések

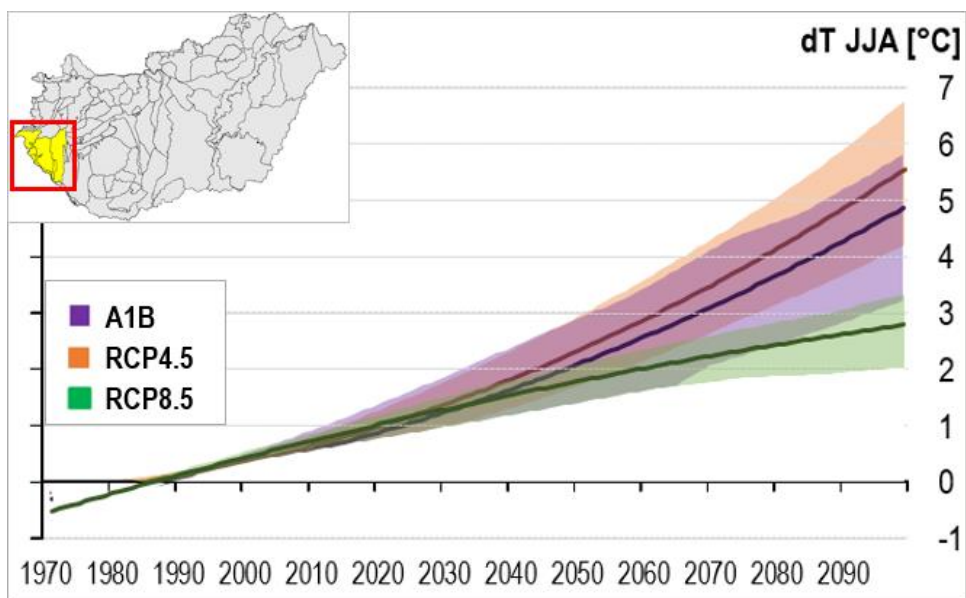
Minden forgatókönyvre kiszámoltuk a modelleredmények 66 %-át tartalmazó tartományt, mely az IPCC definíciója alapján a valószínű változás tartománya (Mastrandrea et al. 2010). Minden egyes modell eredményeire vizsgáltuk (1) a változás előjelét, valamint (2) szignifikanciáját a Mann-Whitney-Wilcoxon (U-) teszttel (szignifikancia szint: 0.85). Az U-tesztet az R statisztikai szoftverrel végeztük (R Core Team 2012). Pfeifer et al. (2015) alapján a változás robusztusnak tekinthető, ha a modellek legalább 66 %-a előjelben egyező és szignifikáns változást mutat.

## EREDMÉNYEK

### Zala megyében várható hőmérséklet és csapadéktendenciák

A Zala megye éves, ill. késő tavaszi és nyári (a júniusi, júliusi és augusztusi időszakra számított) átlaghőmérséklete az országos átlaghőmérséklet tendenciájával egyező, szignifikáns növekedést mutat. A század közepéig mindhárom forgatókönyv 1.5 – 3 °C-kal melegebb nyarakkal számol, mint az 1971-2000-es átlag (1. ábra). A feltételezett globális

sugárzási kényszer változásának megfelelően a század második felében az RCP8.5 szcenárió nagyobb, a RCP4.5 kisebb hőmérséklet változást vetít előre, mint az A1B. Az RCP8.5-nél az elemzésbe bevont modellek több mint 80 %-a szerint a hőmérséklet növekedés már 2060-ra meghaladja a 2 °C-ot. Az A1B esetén ez az érték 2070-re, az RCP4.5 esetén a század végére várható. Az évszakok közül a nyarak hőmérséklete emelkedik legjobban. A hatások elemzésekor azt is figyelembe kell venni, hogy a meteorológiai mérések alapján az 1971-2000-es referencia időszak is már 0,2 °C-kal melegebb volt, mint az 1901-1930-as átlag.



1. ábra: A nyári (JJA = június, július, augusztusi) hőmérsékletváltozás (dT) várható tendenciái Zala megyében az RCP4.5, RCP8.5 és A1B forgatókönyvek alapján. Referencia: az 1971-2000 időszak átlaga. Színes tartományok: a modelleredmények 66 %-a.

Figure 1: Expected tendency of the change of the summer (June-July-August) mean temperature (dT) in Zala county based on the RCP4.5, RCP8.5 and A1B scenarios. Reference: mean of 1971-2000 period. Shaded area: 66 % range of the simulations.

Csapadék esetén az eredmények szórása nagy, statisztikailag szignifikáns változás a 30 éves átlagos összegek között nem mutatható ki. Az A1B és az RCP forgatókönyvek szerint is a század vége felé egyre nagyobb a valószínűsége annak, hogy a bükkösök számára fontos késő tavaszi és nyári hónapok melegebbek és szárazabbak lesznek, mint az 1971-2000-es átlag, ugyanakkor az RCP4.5 feltételezésével futtatott 10 modellből 6 a csapadék-összeg csökkenését, 4 a növekedését prognosztizálja (2. táblázat). A nyári hónapok az RCP8.5 alapján a század közepéig csapadékosabbak, 2070-2099-re a modellek 80 %-a szerint szárazabbak lehetnek a referenciaperiódushoz képest.

Az eredmények értelmezésekor figyelembe kell venni, hogy a havi és évszakos csapadékösszegek elemzése nem ad információt a csapadékontenzitás változásáról.

Előfordulhat – különösen a nyári hónapokban –, hogy heves esőzések formájában 1-2 nap alatt lehullik a teljes nyári csapadékmennyiség, melyet hosszabb csapadékmentes időszak követ. Így az átlag nem változik, viszont a lefolyás nő, a csapadék hasznosulása romlik, a növények által felvehető vízmennyiség csökken.

### A makroklimatikus viszonyok változása a bükk számára kritikus hónapokban

Klímaszcenáriótól és modelltől függetlenül a súlyozott hőmérsékletek és csapadékok hányadosából képzett indexek értékeinek változása is megerősíti, hogy az elmúlt 50 év időszorában megfigyelt melegedő és szárazodó tendencia várhatóan a 21. században fokozódni fog. A FAI értékek alapján 2070-2099-re még a kisebb változást feltételező RCP4.5 forgatókönyv esetén is a modellek fele szerint a vizsgált régió teljes területén az erdészeti klímaosztályok közti átlagos különbségeknek megfelelő klímaváltozás történik majd (2. táblázat). Ez azt jelenti, hogy a térség makroklímája már enyhébb mértékű klímaváltozás esetén sem lesz alkalmas a bükknek. Sőt, az RCP8.5 és az A1B szcenáriók 60, illetve 92 %-os valószínűséggel 2 klímaosztály-változást jeleznek, ami a mai bükkös makroklíma helyén a kocsánytalan tölgyes ill. cseres-, a gyertyános-tölgyes klíma helyén pedig az erdőssztyepp klímának felel meg.

2. táblázat: A modellek azon hányada (%), mely szerint az adott időszak szárazabb ( $dP < 0$ ), mint az 1971-2000-es átlag, illetve a referencia periódushoz képest legalább egy klímaosztály-váltás ( $dFAI \geq 1,25$ ) várható.

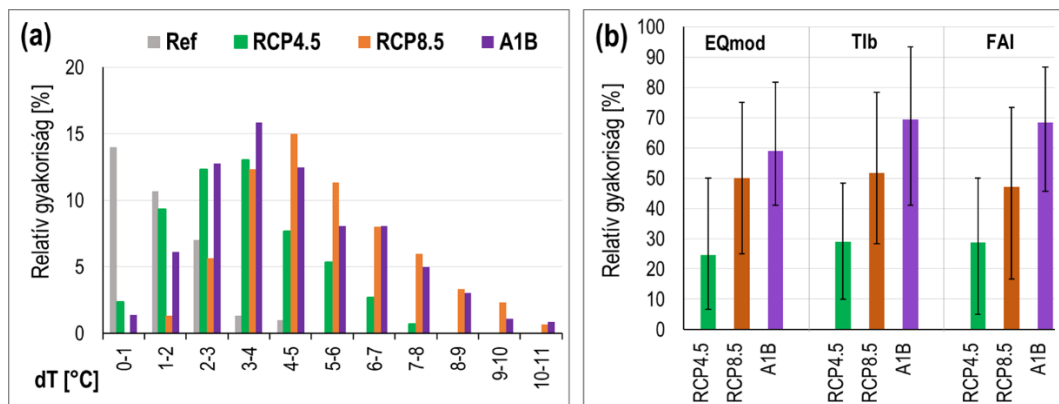
Table 2: Agreement of the simulations (%) in terms of negative precipitation anomaly ( $dP < 0$ ), and a shift of the forest climate zones in the direction of the warmer and drier macroclimate ( $dFAI \geq 1.25$ ). Reference period: 1971-2000.

	2021-2050 vs. 1971-2000			2070-2099 vs. 1971-2000		
	RCP4.5	RCP8.5	A1B	RCP4.5	RCP8.5	A1B
<b>dP &lt; 0</b>	60 %	20 %	83 %	60 %	80 %	92 %
<b>dFAI <math>\geq 1,25</math></b>	20 %	0 %	58 %	50 %	80 %	92 %

### Szélsőségesen meleg és száraz időszakok várható gyakorisága

Az alkalmazott klímaszcenáriótól és modelltől függetlenül jellemző, hogy a század végére gyakoribbá válnak a forró aszályok. Míg 1971-2000-ben az átlagosnál szárazabb nyarak többsége 1-2 °C-kal volt melegebb, mint a referencia időszak hőmérsékletátlaga, 2070-2099-re ez az érték 3-5 °C is lehet, és a legszélsőségesebb esetekben akár a 10-11 °C-ot is elérheti (2a. ábra). Ezt a tendenciát az indexek is mutatják. Azok az periódusok, melyek indexértékei szélsőségesnek számítottak a 20. század végén és átlagos visszatérési gyakoriságuk 10 év volt (az eloszlás 90. percentilise feletti), a 21. század végére az A1B

forogatókönyv átlagos becslése alapján az időszak kétharmadában, az RCP8.5 átlaga alapján minden második évben megjelenhetnek (2b. ábra). A kisebb változást mutató RCP4.5 szcenárió esetén a 3-szor előforduló esemény átlagosan 6-8-szor következhet be.



2. ábra: (a) Az 1971-2000-es átlagnál szárazabb nyarak hőmérséklet anomáliáinak gyakorisága (%) az 1971-2000-es (Ref), valamint a 2070-2099-es időszakban az RCP4.5, RCP8.5, és az A1B forgatókönyvekre. (b) A referencia időszakban átlagosan 10 évente előforduló szélsőségesen meleg és száraz időszakok relatív gyakorisága 2070-2099-ben, az EQmod és a Tlb 4 éves, valamint a FAI 3 éves mozgóátlagának alapján, a vizsgált 3 forgatókönyvre. Színezett oszlopok: a modelledmények átlaga.

Hibasávok: a modelledmények 66%-a.

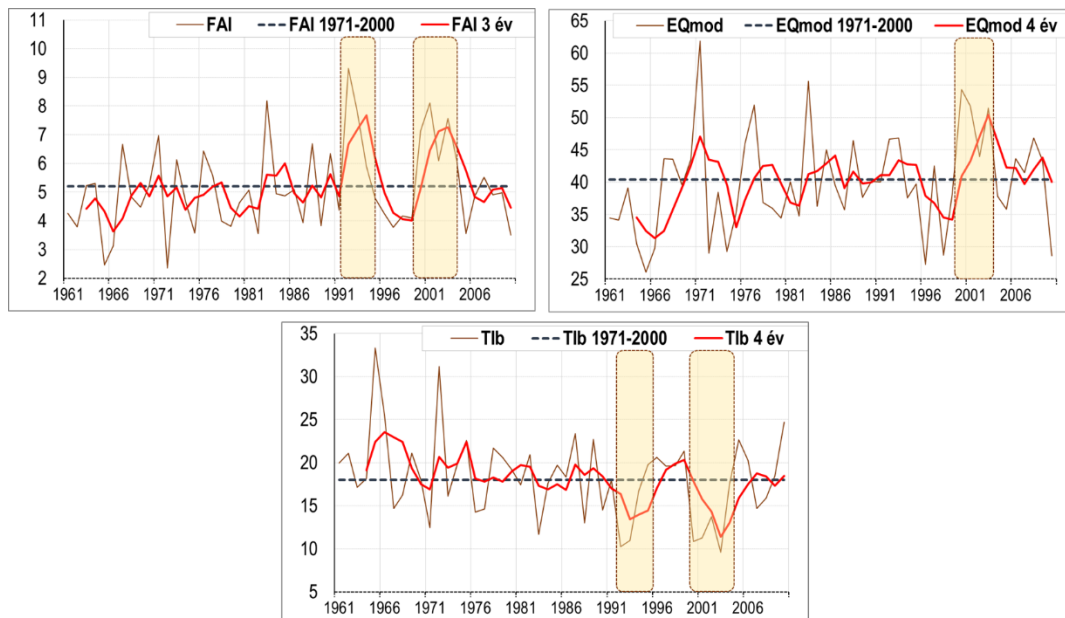
Figure 2: (a) Relative frequency of the temperature anomalies of summer droughts in 1971-2000 (Ref) and in 2070-2099 for the RCP4.5, RCP8.5 and A1B scenarios.

(b) Relative frequency of extreme warm and dry events, based on moving averages for consecutive 3-year (FAI) or 4-year (EQmod, Tlb) periodic index values, exceeding the 90th percentile of the analysed indices by climate change scenarios. Columns: ensemble mean of the projected changes. Error bars: 66 % range of the simulations.

## Mortalitást okozó összefüggő aszályos periódusok gyakorisága

Az erdészeti káradatok idősorai alapján a 2000-2003-as időszakban fordult elő a Zala megyei bükkösökben az eddig detektált legsúlyosabb aszálykár. Az elemzésbe bevont hőmérséklet és csapadékindexek kiugró értékei is alátámasztják, hogy a meteorológiai mérések kezdete óta ez volt a legszélsőségesebb 4 éves aszályos periódus (3. ábra). Az extrém magas értékeket mutató FAI és az extrém alacsony értékeket mutató Tlb indexek az 1992-1993-as időszakban is szélsőségesen meleg és száraz körülményekre utalnak, azonban itt csak a nyári hónapok időjárása volt extrém, ezért ezek a szélsőségek sem a vegetációs időszak csapadékával számoló (és az aszályt az extrém magas értékkel jellemző) EQmod indexnél, sem a bükkösökben detektált károkból (Janik et al. 2016) nem mutatkoznak meg.

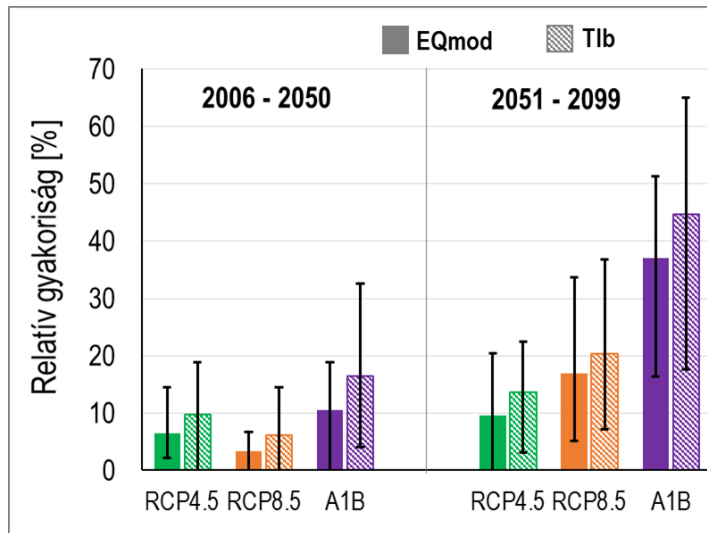




3. ábra: A FAI, az EQmod és a Tlb indexek és mozgóátlagaik idősorai és 30 éves átlagértékei Zala megyében. Színes sávok: összefüggő szélsőségesen meleg és száraz időszakok.

Figure 3: Observed time series of climate indices (EQmod, FAI, Tlb), their moving averages and 30-year means in Zala County. Shaded areas: consecutive extreme warm and dry periods.

A kár nagyságával összefüggést mutató 4 éves EQmod és Tlb értékeivel (Rasztovits et al. 2014) számszerűsítettük a 21. században a 2000-2003-as aszálynál szélsőségesebb eseményeknek a relatív gyakoriságát (4. ábra). A század közepéig még az RCP4.5 szcenárió esetén is a 10 modellből 9 szerint lesz legalább egy olyan aszályos periódus, ami súlyosabb, mint a 2000-2003-as aszály. A század végére a modellek több mint 80 %-a azt mutatja, hogy előfordulhatnak olyan magas EQmod és alacsony Tlb értékek, amelyek meghaladják a historikus klímában szimulált értékeket. Ez azt jelenti, hogy az A1B forgatókönyv esetén átlagosan 18, az RCP8.5 esetén 8 olyan időszak fordulhat elő, amelynek EQmod indexe szélsőségesebb aszályos időszakra utal, mint az eddigi legsúlyosabb erdészeti kárt okozó esemény (4. ábra). A Tlb alapján számított relatív gyakoriságok mindkét időszakra és mindhárom szcenárióra magasabbak, de két vizsgált index által mutatott tendencia között nincs szignifikáns különbség.



4. ábra: A historikus időszak legsúlyosabb aszályos időszakánál szélsőségesebb események aránya (%) a század első és második felében, az EQmod és a Tlb 4 éves mozgóátlagai alapján, a vizsgált 3 forgatókönyvre. Színezett oszlopok: a modelleredmények átlaga. Hibasávok: a modelleredmények 66 %-a.  
 Figure 4: Relative frequency of events (i.e. % of the first and second half of the century) exceeding the severity of the most extreme drought of the historical time period (calculated for the 4-year mean of the EQmod and Tlb indices) for the analysed three climate change scenarios. Columns: mean of the projections. Error bars: 66 % range of the simulations.

A 2000-2003-as aszály egyedülálló abban is, hogy a megfigyelések alapján csak ebben az időszakban utal minden vizsgált index értéke együttesen az átlagnál szárazabb körülményekre (3. ábra). A klímamodellek többsége ugyanúgy jelzi, hogy a biológiai hatás szempontjából meghatározó aszályos periódusok átlagos hossza a 21. század vége felé nő. Már a kisebb változást feltételező RCP4.5 scenárió esetén is a modellek 60 %-a (a pesszimistább RCP8.5 és A1B scenáriók esetén több mint 80 %-a) szerint várható olyan hosszúságú aszály is, ami a historikus klímában nem fordult elő. A modelleredmények nagy szórása ellenére ebből arra következtethetünk, hogy a 21. század második felében nagy valószínűséggel lesznek 4 évnél hosszabb összefüggő, és feltehetően fapusztulással járó aszályos periódusok is.

## ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

A fent bemutatott eredmények nagy bizonyossággal mutatják, hogy a 21. század vége felé Zala megye klímája a jelenleginél melegebb és a modellek többsége szerint szárazabb lesz. A vizsgált forgatókönyvek közül az A1B esetén a legnagyobb a késő tavaszi-nyári csapadékösszegek csökkenése és a szélsőséges események gyakoriságában várható változás. Az új klímascenáriók alapján futtatott modellek kisebb mértékű és előjelben kevésbé

egyértelmű csapadékváltozásokat jeleznek. Azonban a szignifikáns hőmérsékletemelkedés intenzívebb párolgáshoz vezethet (Cook et al. 2014, Csáki et al. 2014), mely több csapadék esetén is aridabb viszonyokat, és a felvehető vízmennyiség csökkenését eredményezheti (ennek mértékének pontos számszerűsítése további kutatást igényel). Amennyiben Janik (2017) alapján fennáll, hogy a hőségnapok is hatással lehetnek a bükkfák egészségi állapotára, akkor a szélsőségesen magas hőmérsékletek gyakoriságának növekedése hozzájárulhat az egészségi állapot romlásához.

A bükkösök szempontjából kritikus hónapok hőmérséklet- és csapadékviszonyaiban akkora mértékű változás várható, hogy a 2070-2099-es időszakra még az enyhébb változást feltételező RCP4.5 forgatókönyvnél is eltűnnek a fafaj számára makroklimatikusan alkalmas területek. Mivel a térség bükköseinek döntő része a bükkös – gyertyános-tölgyes klímaosztályok határán helyezkedik el, ez már korábban, kisebb mértékű szárazodás esetén is bekövetkezhet. Az RCP8.5, valamint A1B scenáriók esetén a modellek több mint 60, illetve 90 %-a nem egy, hanem két klímaosztály változást jelez. A makroklima változásának hatását lokálisan, a termőhelyi tényezők közül az északi kitettség tompíthatja, illetve a sekély termőrétegű, kedvezőtlen vízháztartású talaj (Bidló et al. 2017) súlyosbíthatja. Az erdőművelés szintén befolyásolhatja a mikroklimatikus viszonyokat, mely rövidtávon és lokális szinten tompíthatja a kedvezőtlené váló makroklima hatásait.

A klímaszcenáriók lehetséges változási irányokat, tendenciákat jelölnek, feltételezésekkel élnek. A sugárzási kényszer növekedését okozó globális hatások komplexitása és előrejelezhetetlensége miatt nem számszerűsíthető, hogy melyik forgatókönyv fog nagyobb eséllyel bekövetkezni. A rendelkezésre álló finom felbontású klímamodell szimulációk köre is folyamatosan bővül, amit további vizsgálatainkba már be tudunk majd vonni. Az új scenáriókra az elemzéseinkhez használt, Európa területére futtatott modelleken kívül a Kárpát-medencére a RegCM4 modellel is készültek szimulációk (Bartholy & Pongrácz 2017), melyek eredményei az általunk vizsgált 10 szimuláció szórásstartományán belül vannak. Bizonytalanság adódhat a fafajok toleranciahatárának számszerűsítéséből is, melynek csökkentéséhez megfelelő mérések, az aszály-mortalitás összefüggés megbízhatóbb előrevetítéséhez pedig az abszolút határértékekkel dolgozó indexek helyett a klímamodellezés számára értelmezhető függvények lennének szükségesek.

A fentiek jelzik, hogy a klímaváltozás előrejelzése nagy bizonytalansággal terhelt, ami indokolja a becslések szórásstartományának figyelembe vételét a hatáselemzés során. Azonban az eredmények alátámasztják, hogy a várható melegedés mértéke oly mértékű még a legkisebb melegedést feltételező scenáriónál is, hogy az alkalmazott scenáriótól függetlenül, valamint a modelleredmények szórása és az egyéb módszerek bizonytalanságai ellenére egyértelműen kimondható, hogy a század vége felé növekvő gyakorisággal fordulhatnak elő olyan aszályos periódusok, melyek szélsőségesebbek és hosszabbak, mint a térségben az eddigi legnagyobb erdészeti kárt eredményező aszály. Somogyi (2017) elemzései alapján már a kisebb változást feltételező klímaszcenárió esetén is drasztikus mértékű mortalitás várható, mely az erdők klímaváltozás mérsékelő hatásának, valamint egyéb ökoszisztéma szolgáltatásainak megszűnéséhez vezethet.

Mindezek alapján megállapítható, hogy mind a korábbi, mind az újabb IPCC klíma-projekciók a hazai bükkösök életfeltételeinek súlyos romlását vetítik előre, valamint hogy e projekciók már a klímodellek jelenlegi pontossága mellett is lehetővé tesznek az erdészeti klímahatás vizsgálatok számára olyan következtetéseket, melyeket az alkalmazkodást, és az arra való felkészülést segítő döntések során javasolt figyelembe venni.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönjük Daniela Jacob, Andreas Hänsler és Claas Teichmann (GERICS Climate Service Center Germany) támogatását a klímodell eredményekhez történő hozzáférés biztosításában. A kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-16-4-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja, valamint az Agrárklíma.2 (VKSZ 12-1-2013-0034) projekt támogatta.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- Allen C.D., Breshears D.D. & McDowell. N.G. 2015: On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6(8): 129. DOI: [10.1890/ES15-00203.1](https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1)
- Bartholy J. & Pongrácz R. 2017: A közelmúlt és a jövő országos éghajlati trendjei. *Erdészeti Lapok* 152(5): 134–136.
- Berki I., Rasztovits E., Móricz N. & Mátyás Cs. 2009: Determination of the drought tolerance limit of beech forests and forecasting their future distribution in Hungary. *Cereal Research Communications* 37: 613–616.
- Berki I., Rasztovits E. & Móricz N. 2014: Erdőállományok egészségi állapotának értékelése – egy új megközelítés. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 149–155.
- Bidló A., Gálos B. & Horváth A. 2017: Observed response of vulnerable forest ecosystems to ongoing site condition changes. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 19, EGU2017-5087.
- Borhidi A. 1961: Klimadiagramme und klimazonale Karte Ungarns. *Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis, Sectio Biologica* 4: 21–50.
- Cook B.I., Smerdon J.E., Seager R. & Coats S. 2014: Global warming and 21<sup>st</sup> century drying. *Climate Dynamics* 43(9-10): 2607–2627. DOI: [10.1007/s00382-014-2075-y](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2075-y)
- Csáki P., Kalicz P., Csóka G., Brolly G., Czimber, K. & Gribovszki Z. 2014: Különböző felszínborítások hidrológiai hatásai a klímaváltozás tükrében Zala megye példáján. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 65–76.
- Czimber K. & Gálos B. 2016: A new decision support system to analyse the impacts of climate change on the Hungarian forestry and agricultural sectors. *Scandinavian Journal of Forest Research* 37(1): 664–673. DOI: [10.1080/02827581.2016.1212088](https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1212088)
- Csóka, Gy. & Hirka A. 2011: Alien and invasive forest insects in Hungary (a review). *Proceedings of the „Biotic Risks and Climate Change in Forests” 10th IUFRO Workshop of WP 7.03.10 “Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe”, September 20-23, 2010, Freiburg, Germany. Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 89: 54–60.

- Csóka Gy., Koltay A., Hirka A. & Janik G. 2009: Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyeseink és bükköseink egészségi állapotára. *Klíma-21* füzetek 57: 64–73.
- Diffenbaugh N.S., Swain D.L. & Touma D. 2015: Anthropogenic Warming Has Increased Drought Risk in California. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(13): 3931–3936. DOI: [10.1073/pnas.1422385112](https://doi.org/10.1073/pnas.1422385112)
- Franke J. & Köstner B. 2007: Effects of recent climate trends on the distribution of potential natural vegetation in Central Germany. *International Journal of Biometeorology* 52(2): 139–147. DOI: [10.1007/s00484-007-0096-5](https://doi.org/10.1007/s00484-007-0096-5)
- Führer E. 2010: A fák növekedése és a klíma. "Klíma-21" Füzetek 61: 98–107.
- Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A. & Szabados I. 2011: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás* 115: 205–216.
- Führer E. 2017: Az erdészeti klímaosztályok új lehatárolása öko-fiziológiai alapon. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai – III.). *Erdészeti Lapok* 6: 173–175.
- Gálos B., Lorenz P. & Jacob D. 2007: Will dry events occur more often in Hungary in the future? *Environmental Research Letters* 2(3): 034006. (9 pp.) DOI: [10.1088/1748-9326/2/3/034006](https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/3/034006)
- Gálos B., Führer E., Czímber K., Gulyás K., Bidló A., Häsler A. et al. 2015: Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás* 119(4): 425–441.
- Hlásny T., Mátyás Cs., Seidl R., Kulla L., Mergaicová K., Trombik J. et al. 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Lesnícky časopis – Forestry Journal* 60(1): 5–18. DOI: [10.2478/forj-2014-0001](https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001)
- Illés G. & Fonyó T. 2016: A klímaváltozás fatermésre gyakorolt várható hatásának becslése az AGRATÉR projektben. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 25–34. DOI: [10.17164/ek.2016.003](https://doi.org/10.17164/ek.2016.003)
- IPCC 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K. & Boschung J. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacob D., et 38 coauthors EURO-CORDEX, 2013: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14(2): 563–578. DOI: [10.1007/s10113-013-0499-2](https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2)
- Janik G., Hirka A., Koltay A., Juhász J. & Csóka Gy. 2016: 50 év biotikus kárai a magyar bükkösökben. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 45–60. DOI: [10.17164/EK.2016.005](https://doi.org/10.17164/EK.2016.005)
- Janik G. 2017: A magyarországi bükkösök hosszú távú egészségi állapot trendjei. Ph.D. dolgozat (bírálat alatt)
- Járó Z. 1966: A termőhely. In: Babos, I., Szodfridt, I., Tóth, B., Prosz, H. S., Járó, Z., Király, L. *Erdészeti termőhelyfeltárás és térképezés*. Budapest. 19–116.
- Jones C.F.G. & Arsar G. 2011: The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX, An international downscaling link to CMIP5. *CLIVAR Exchanges* (special issue) 56: 34–40.
- Jung T. 2009: Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climatic extremes. *Forest Pathology* 39(2): 73–94. DOI: [10.1111/j.1439-0329.2008.00566.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2008.00566.x)
- Kotlarski S., Keuler K., Christensen O.B., Colette A., Déqué M., Gobiet A. et al. 2014: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development* 7(4): 1297–1333. DOI: [10.5194/gmd-7-1297-2014](https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014)
- Lakatos F. & Molnár M. 2009: Mass Mortality of Beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-West Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 5: 75–82.
- Lakatos M., Szentimrey T., Bihari Z. & Szalai S. 2013: Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data. *Időjárás* 117: 143–158.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J. et al. 2010: Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259(4): 698–709. DOI: [10.1016/j.foreco.2009.09.023](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023)



- Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J. et al. 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Mátyás Cs. & Czímber K. 2000: Zonális erdőtakaró mezoklíma szintű modellezése: lehetőségek a klímaváltozás hatásainak előrejelzésére. III. Erdő és Klíma Konferencia Debrecen, DE TTK Meteorológia Tanszék, 83–97.
- Mátyás Cs., Führer E., Berki I., Csóka Gy., Drüsler Á., Lakatos F. et al. 2010. Erdők a szárazsági határon. "Klíma-21" Füzetek 61: 84–97.
- Molnár M., Brück-Dyckhoff C., Petercord R. & Lakatos F. 2010: A zöld karcsúdíszbogár (*Agrilus viridis* L.) szerepe a bükkösök pusztulásában. *Növényvédelem* 46(11): 522–528.
- Móricz N., Rasztovits E., Gálos B., Berki I., Eredics A. & Loibl W. 2013: Modeling the Potential Distribution of Three Climate Zonal Tree Species for Present and Future Climate in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 9(1): 85–96. DOI: [10.2478/aslh-2013-0007](https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0007)
- Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P. et al. 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747–756. DOI: [10.1038/nature08823](https://doi.org/10.1038/nature08823)
- Pfeifer S., Bülow K., Gobiet A., Hänsler A., Mudelsee M., Otto J. et al. 2015: Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. *Atmosphere* 6(5): 677–698. DOI: [10.3390/atmos6050677](https://doi.org/10.3390/atmos6050677)
- Pongrácz R., Bartholy J. & Kis A. 2014: Estimation of future precipitation conditions for Hungary with special focus on dry periods. *Időjárás* 118: 305–321.
- R CORE TEAM 2012: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>
- Rasztovits E., Berki I., Mátyás Cs., Czímber K., Pötzelsberger E. & Móricz N. 2014: The incorporation of extreme drought events improves models for beech persistence at its distribution limit. *Annals of Forest Science* 71(2): 201–210. DOI: [10.1007/s13595-013-0346-0](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0346-0)
- Somogyi Z. 2016: Projected effects of climate change on the carbon stocks of European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in Zala County, Hungary. *Lesnícky časopis - Forestry Journal* 62: 3–14. DOI: [10.1515/forj-2016-0001](https://doi.org/10.1515/forj-2016-0001)
- Somogyi Z. 2017: Az elővigyázatosság elve és az éghajlatváltozás – Mire figyelmeztetnek az erdők? *Magyar Tudomány* 6: 252–657.
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J. & Barbosa P. 2016: Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 27748 EN. DOI: [10.2788/450449](https://doi.org/10.2788/450449)
- URL1 [www.carpatclim-eu.org](http://www.carpatclim-eu.org) Letöltés ideje: 2013. október.
- URL2 <http://ensembles-eu.metoffice.com/> Letöltés ideje: 2012. május.
- URL3 <https://verc.enes.org/data/data-metadata-service/search-and-download/cordex-access> Letöltés ideje: 2016. november.

Érkezett: 2017. november 1.  
Közlésre elfogadva: 2017. november 21.