

A KLÍMAVÁLTOZÁS MIATTI FAPUSZTULÁS TOVÁBB GYORSÍTHATJA A KLÍMAVÁLTOZÁST

Somogyi Zoltán

NAIK Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

A klímaváltozásnak az erdőkre gyakorolt egyik legjelentősebb potenciális hatása az erdők szénegyenlegének jelentős megváltozása. A lehetséges változásokat a CASMOFOR szénkörforgalmi modellel becsültük három hazai fafajra, 2 regionális klímaváltozási és három fakitermelési forgatókönyv szerint. A modellezéshez becsültük a várható szárazodás miatti mortalitás mértékét, valamint a fanövekedés és a fajösszetétel várható megváltozását. A mortalitást eddigi hazai aszályelemzési adatokból, a többi változást az Országos Erdőállomány Adattár termőhelyi adatait felhasználó *ceteris paribus* elemzéssel határoztuk meg. A modellezés többi paraméterét illetően szükséges feltételezéseknél – ahol csak lehetett – konzervatív megközelítést alkalmaztunk. Az eredmények a klímaváltozás hatására nagyon jelentős mortalitás-növekedést, fajösszetétel-változást és egyértelmű fanövekedés-csökkenést jósolnak; a fakitermelés mértékének változtatása ehhez képest elhanyagolható jelentőségű. Mindez az ország jelenlegi összes üvegház gáz kibocsátásának nagyságrendjét elérő kibocsátást eredményezhet, ami akár teljesen ellensúlyozhatja a nem erdészeti szektorban kifejtett kibocsátás-csökkentési erőfeszítéseket.

Kulcsszavak: aszály, mortalitás, fanövekedés, fajösszetétel, szénforgalom, üvegház gáz kibocsátás.

CLIMATE-CHANGE INDUCED FOREST DECLINE CAN FURTHER ENHANCE CLIMATE CHANGE

Abstract

Changes in the forest carbon cycle are among the projected risks of climate change. In this study, these changes were estimated for three important Hungarian tree species for two regional climate change scenarios and three wood harvesting scenarios using the carbon accounting model CASMOFOR. The effects of changing local climate type on species composition and tree growth were studied under *ceteris paribus* conditions using appropriate site-related forest inventory information. The effect of projected droughts on mortality was modelled using empirical results of a previous study, while conservative assumptions were applied for the effect of climate change on several less important model parameters. Results demonstrate dramatically increasing mortality, considerably changing species composition and significant drop of tree growth as the risk of drought increases. As a combined effect of all these processes, country-level emissions from forests are projected to reach the order of magnitude of the current total economy-wide greenhouse gas emissions by the second half of the century. By providing positive feedback, these emissions can considerably offset mitigation efforts in non-forestry sectors.

Keywords: drought, mortality, tree growth, species composition, carbon cycle, greenhouse gas emissions.

BEVEZETÉS

Az erdők globálisan is jelentős szénforgalmát a klímaváltozás sok-sok más tényezővel együtt, és sok-sok folyamaton és összefüggésen keresztül jelentősen megváltoztathatja. A változások számszerűsítése két okból nagyon fontos: egyrészt azért, hogy tudjuk, milyen kedvező vagy kedvezőtlen hatásokkal számolhatunk a jövőben, másrészt pedig azért, hogy azon gondolkodhassunk, hogy milyen teendők lehetnek a klímaváltozás akadályozására (az ún. mitigációra) az erdők kezelése révén.

Az erdők szénforgalma kapcsán a leggyakrabban a biomasszát és az erdőre oly jellemző, a mesterséges rendszerekben csak nagyon magas költséggel megvalósítható elnyelést szokták figyelembe venni. A teljes szénforgalom helyes becsléséhez azonban figyelmet kell szentelni a holt fa, az avar, a talaj, valamint a fatermékekben tárolt szénmennyiség változására, és az összes széntárolóból származó kibocsátásokra is. Több korábbi tanulmány (Zimmermann et al. 2013; hazánkban pl. Móricz et al. 2013) már felvetette, hogy a növekvő aszályok miatt a jövőben a fafajok potenciális termőhelye megváltozhat; ennek hatására lokálisan különböző mértékű erdőpusztulások léphetnek fel, ez pedig üvegház gáz kibocsátással járhat.

A cikkben összefoglalt kutatás célja annak becslése volt, hogy 2010-2100 között kétféle mértékű regionális klímaváltozást és háromféle fakitermelési stratégiát feltételező (összesen 27) forgatókönyv esetén mekkora mortalitás várható, mennyire változhat meg több fontos fafajunk állományainak potenciális fajösszetétele és növekedése, és mindezek hatására hogyan változhat meg az erdők hazai szénegyenlege az évszázad végéig három fafaj (bükk: B, kocsánytalan tölgy: KTT, cser: CS) esetében.

MÓDSZEREK ÉS ADATOK

Szcenáriók és klímaadatok

A scenáriók (forgatókönyvek) olyan folyamatok jövőbeli alakulására kialakított feltételezések, amelyek felhasználásával más folyamatok lehetséges alakulását lehet vizsgálni. A szénforgalom alakulását vizsgáltuk klímaváltozást nem feltételező (ún. referencia) körülmények között, valamint egy „konzervatív”, nagyobb kárral járó, 2100-ig 5 fokos felmelegedést, a másik egy „kedvezőbbnek” tekinthető, 2,5 fokos hőmérséklet-emelkedést feltételező klímaváltozási forgatókönyvben. Ilyen felmelegedéseket tételez fel az IPCC (2013) ún. RCP4.5 ill. RCP8.5 scenáriója alapján levezetett, országos átlagként kezelt két forgatókönyv (URL1). Mindkét forgatókönyvnél a modellek által becsült változásokat (melyeknél feltételeztük, hogy azok országon belül nagyon hasonlóak vagy azonosak) a historikus országos trendhez adva kaptuk a projekcióhoz szükséges jövőbeli klíma-adatokat. A múltbéli klímára nézve a CARPATCLIM adatbázis (URL2) 1961-2010-es, szintén havi, országos átlag adatait használtuk.

Vizsgáltuk azt is, hogy az erdők kezelésében végrehajtott változtatásoknak milyen hatása lehet az erdők szénlekötésére. Szakértői becslés alapján három, különböző fakitermelési intenzitást feltételező scenárió hatását vizsgáltuk: (1) „business as usual” scenárió (az eddigi, a modellezés során az erdőnevelési modelltablák adatain alapuló értékek változatlan módon történő alkalmazása); (2) hozam-maximalizálási (az gazdaság „zöldítését” segítő ún. „bioökonómiai”), az energia- és termékelőállításban az eddigieknél nagyobb szerepet játszó fakitermelést feltételező scenárió, melynél 2010-2030. között az 1-3. fatermési osztályokban 30%-kal, a 4-ben 20%-kal, az 5-ben 10%-kal nő, majd konstans marad; (3) „természetvédelemi” (inkább az erdők állapotára, semmint a fakitermelésre koncentráló) scenárió, melynél a fakitermelés 2010-2030. között az egyes fatermési osztályokban 30, 25, 20, 15, 10, ill. 5%-kal csökkenő majd konstans marad.

Szénkörforgalmi modell

A fenti scenáriók modellezéséhez szükséges, az erdei folyamatokat jól közelítő, de kényyszerű egyszerűsítéseket is alkalmazó szénkörforgalmi modell a feladat elvégzése céljából továbbfejlesztett CASMOFOR modell volt (Somogyi 2016, URL3). Ez a modell éves lépésekben számolja az összes széntároló (földfeletti és föld alatti biomassza, holtfa, avar, talaj, fatermékek) széntartalmát, valamint annak változását. A modell a hazai legfontosabb fafajokra 6-6 fatermési osztályban fatermési táblákat és számos további – amennyire lehet – szintén hazai adatokon alapuló, a hazai üvegház gáz leltárban is alkalmazott, és az IPCC (2006) módszertanával konzisztens paraméterrel (pl. fasűrűség, földfeletti és földalatti növekedési és biomassza-jellemzők, holtfa és avar korhadási sebessége stb.) dolgozik. A klímaváltozás hatásának modellezésére a fanövekedési sebesség, a lebomlás és a gyökér/hajtás arány nagyságát, továbbá mortalitás esetén a fajösszetételt az elemzés feltételezései és eredményei (l. lejjebb) alapján időben fokozatosan változtattuk. A modellben alkalmazott – szintén fafajspecifikus, a fatermési osztálytól függő – vágáskorokat a fafajok fenti sorrendjében maximum 120, 110, ill. 100 évben határoztuk meg.

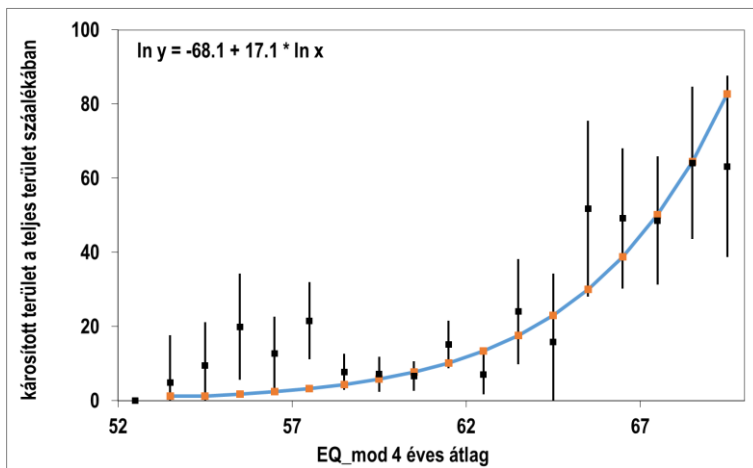
Az aszály-függő jövőbeli mortalitás becslése

Mortalitáson e tanulmányban annak a faanyagnak a mennyiségét értjük, ami fapusztulás következtében holt fává válik, és vagy elég különböző erdőtüzekben (üvegház gáz kibocsátást eredményezve), vagy lebomlik az erdei lebontó folyamatok következtében. A modellezés során feltételeztük, hogy a klímaváltozás közvetlenül vagy közvetve az aszály hatására eredményezhet mortalitást (közvetlenül, kiszáradás által, valamilyen kárláncolat útján vagy erdőtüzek kialakulásán keresztül).

Az aszálykárok becsléséhez a Rasztovcics et al. (2014) által azonosított aszály-mortalitás összefüggést találtuk alkalmazhatónak, melyben a Zala-megyében károsított bükk erdőterület relatív nagyságát az ún. módosított Ellenberg-index 4 éves átlagának (EQ_mod) függvényében ábrázolták. Az index értéke Ellenberg (1986) és Franke and Köstner (2007) módszere alapján:

$$EQ_mod = T_{\text{július}} / P_{\text{április-október}} * 1000 \quad (1)$$

ahol $T_{\text{július}}$ a júliusi átlaghőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), $P_{\text{április-október}}$ pedig az április-október hónapok összesített csapadékmennyisége. Annak érdekében, hogy tetszőleges index-értékhez tudjunk mortalitást számolni, az adatokra egy exponenciális görbét illesztettünk (1. ábra).

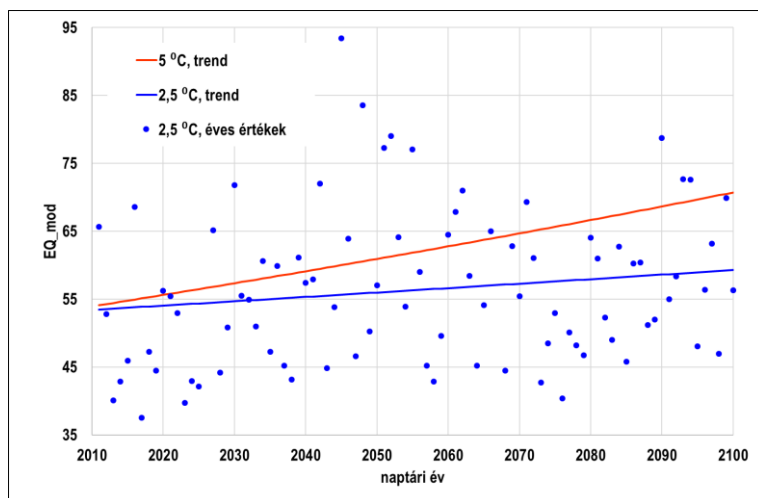


1. ábra: A Rasztovcics et al. (2014) által azonosított EQ_mod – mortalitás összefüggés (a hozzájuk tartozó 95%-os konfidencia-intervallumokkal, feketével), az azokra illesztett függvény (sárga pontokkal és kék görbével), valamint annak paramétereit. A lineáris regressziós illesztés R2-értéke 0,82.

Figure1: Generalized relationship between EQ_mod and mortality (together with 95% confidence intervals, in black) using a regression function (in yellow dots and blue curve) and its parameters, based on Rasztovcics et al. (2014). The R2 of the linear fit is 0.82.

Az aszály hatásának nagysága az éves értékeknél jobban függ attól, hogy az egymás utáni évek mennyire aszályosak. Az 1. ábra 4 egymás utáni év EQ_mod átlagaihoz rendel károsítási mértéket. A modellezésnél azzal számoltunk, hogy az éves átlagnál jóval magasabb 60-as értékig (amelyre az ábrán kb. 6,7%-os mortalitás adódik) az aszály által károsított területek nagysága elhanyagolható, és a CASMOFOR modellben alkalmazott mortalitási feltételezéseket (a gyérités előtt álló állományoknál, két gyérités között összesen 4% mortalitás) alkalmaztuk. A 60-as érték fölötti extra mortalitást viszont, melyet a görbe vonala mentén számoltunk, már a görbéről vettük és aszály-mortalitásnak tekintettük. (Egyéb adat hiányában a fenti görbét alkalmaztuk minden, az elemzésben használt fafajra, minden fatermési osztályban és minden korosztályra, az ország teljes területére.)

A fenti módszer alkalmazásához szükséges volt becsülni az EQ_mod index jövőbeli értékeit; ezeket a fenti klímaváltozási forgatókönyvek adatai segítségével tudtuk elvégezni. Az utóbbi évtizedekben – nagyobb léptékű aszálykarak nélküli években – az EQ_mod éves értékei kb. 55-ös átlag mellett 40 és 70 között változtak. A számítások ugyanakkor azt mutatják, hogy az éves átlagos EQ_mod értékek a fent kiválasztott mindkét klímaváltozási forgatókönyv esetén igen jelentősen megnövekednek majd (2. ábra). Egyes évekre azonban ennél sokkal magasabbak lehetnek az index-értékek (amiket az ábrán a 2,5°C hőmérséklet-növekedéssel számoló scenárióra nézve pontok mutatnak), és jóval a 60-as EQ_mod értékek fölött lehetnek. Az éves értékek növekedése természetesen a 4 éves átlagértékek növekedését is maga után vonja.



2. ábra: A jövőre becsült éves EQ_mod értékek trendje a két klímaváltozás-szenárióra, valamint a 2100-ig 2,5 °C-os hőmérséklet-emelkedéssel számoló scenárióra becsült éves EQ_mod értékek. Ez utóbbi értékek csak a jövőben (mindkét scenáriónál) feltételezett szórás szemléltetését szolgálják.

Figure 2: Projected trend of EQ_mod for two climate change scenarios, and the projected annual EQ_mod values for the scenario assuming a temperature increase of 2.5 °C until 2100. These latter values are only shown to demonstrate the extent of assumed future variability for both trends.

A jövőbeli mortalitás becslésekor azt nem lehet megjósolni, hogy egy-egy évben mekkora lesz az aszály (vagy lesz-e egyáltalán). A modellezés során a 4 éves EQ_mod értékek trendjei (melyek a klímaváltozási forgatókönyveket definiálták) és historikus szórása (4,87) alapján (a ± 3 szórás tartományán belül normál eloszlást feltételezve) kiszámoltuk, hogy egy-egy jövőbeli évben a 4 éves EQ_mod átlagoknak mekkora a valószínűsége, és ez alapján mekkora lehet a Rasztovcics (2014)-féle adatokra illesztett görbéből számított éves (terület-egységre jutó) mortalitás. Az éves mortalitásokból kiszámolható, hogy az idő előrehaladtával mekkora lesz a kumulatív mortalitás. Az egyes évek bizonytalansága ellenére minél inkább előrehaladunk az időben, annál inkább válik pontosabbá a becsült kumulatív mortalitás nagysága.

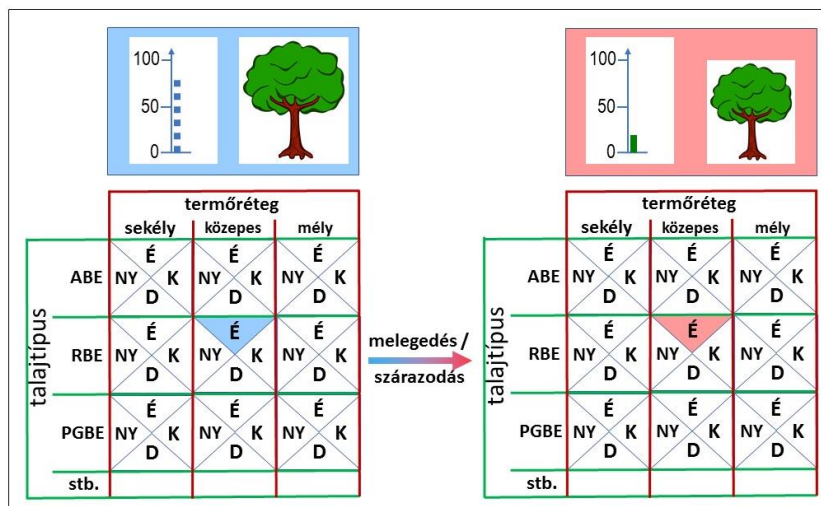


A mortalitás a gyakorlatban kétféle formában jelentkezik. Bizonyos mértékig, amíg a fák viszonylag egyenletes eloszlásban pusztulnak el, a mortalitást tekinthetjük úgy, mint olyan gyérülést („egyedmortalitás”), amelynél az elhalt fákat kitermeljük, a megmaradó állományt nem kell felújítani, és a megmaradt fák továbbra is növekednek. A modellezés során feltételeztük, hogy az egyedmortalitás 15%-os mérték alatt valódi mortalitásként jelentkezik, afelül pedig 50%-os mortalitásig gyérítésként kezelik úgy, hogy a kitermelt fák 30%-a nem hasznosítható száradékfa, és a hasznosított faanyagból is legnagyobbbrészt tűzifa lesz. 50% mortalitási mértéken felül („állomány-mortalitás”) feltételeztük, hogy olyan kevés fa marad a területen, hogy célszerűbb teljes mértékben letermelni a megmaradt fákat is, majd (akár az eredeti, akár más fafajokkal) felújítani a területet. Az ilyen területeken feltételeztük, hogy a kitermelt faanyag 20%-a hasznosítható.

Fanövekedés és fafajösszetétel

A fanövekedés modellezése a referencia-szcenárióban (a CASMOFOR modellbe beépített) fatermési táblákkal történt. A fanövekedés jövőbeli, a klímaváltozás miatt végbemenő megváltozására nézve az OEA 2003-as adatainak felhasználásával *ceteris paribus* elvrelé épített elemzéseket végeztünk. Ezek során olyan állomány-csoportok fafajösszetételét és átlagmagasságának változását hasonlítottunk össze, amelyeknek azonosak voltak az OEA-ban rögzített termőhelyi jellemzői, de eltérő volt a klímátípusa. Az összehasonlíthatóság érdekében az elemzésnél minden egyes termőhelyi típusban a többletvízhatástól független hidrológiai viszonyú, >50% elegyarányú (tehát uralkodó helyzetben lévő) fafajsorok hibaszűrt adataival számoltunk. A vizsgálat menete az alábbi volt:

- (1). az OEA-ban kimutatott klímátípus, talajtípus, termőréteg vastagság, fizikai talajféleség (Járó 1966), valamint a kitétség kategóriák (esetenként megfelelően módosított) kombinációiból (az erdészetben szokásos szóhasználatától némileg eltérő) termőhelyi típusokat képeztünk. Ilyen típus pl. a 3. ábrán látható bükkös klímátípus, rozsdabarna erdőtalaj (RBE), közepes mélység és északi kitétség. A klímátípusok a B: bükkös; GY-KTT: gyertyános-kocsánytalan tölgyes; CS: cseres; ESZTY: erdőssztyepp (Borhidi 1961, Járó 1966). A talajtípusok (és azok kódjai) a hazai erdészeti gyakorlat szerintiek. Az OEA „termőréteg vastagsága” kategóriái helyett, azoknak a (klímátípust is figyelembe vevő) összevonásával a sekély (0-40cm), közepesen mély (40-60cm) és mély (60cm) kategóriákat alkalmaztunk. Az OEA-ban szereplő kitétség-kategóriákat (É, ÉK; K, DK; D, DNY; NY, ÉNY) a felsorolás sorrendjében, két-két kategóriát összevonva (É, K, D és NY) alkalmaztuk.



3. ábra: *Ceteris paribus* feltételek szemléltetése. A fajok potenciális részarányának (a fenti sor ábráin a bal oldali grafikonok, %-os skálával) és az azonos fajfajú állományok potenciális átlagos magasságának (a fenti sor ábráin a jobb oldali képek) klímaváltozás hatására történő változását olyan esetekben becsültük, amikor a talajtípus, a termőréteg vastagsága és a kitétség, továbbá a hidrológiai viszonyok (az ábrán nem mutatva) állandók (az ábra alsó sorában színezett háromszöggel mutatott közép mély rozsdabarna erdőtalajon, É kitétségekben), és csak a klímátípust változtatjuk. A bal és a jobb oldali ábrák között a klímátípus egy egységnyit változik, vagyis pl. B-ből (baloldalt) a melegebb és szárazabb GY-KTT-be (jobboldalt) (l. még az 5. ábrát és az 1. táblázatot is).

Figure 3: Demonstrating *ceteris paribus* conditions. Changes, due to assumed climate change, of potential species composition (in % in the graphs on the left part of the two top figures) and average tree growth (right part of the two top figures) were estimated when soil type, rooting depth and aspect (as well as hydrological conditions, not shown) were kept constant (in the coloured triangles as examples: RBE = Rusty brown forest soil; „közepes” = rooting depth 40-60cm; „É” = North), and climate type was changed. The difference between the left and right figures is one climate type towards warmer and dryer type (see also Figure 5 and Table 1).

- (2). Minden termőhelyi típusra azok összterülete és a fajajások területének felhasználásával fajarányokat számoltunk.
- (3). A famagassággal kapcsolatos számításoknál a kor hatásának kiküszöbölésére a fenti fajajások mindegyikére, fajonként az ERTI fatermési táblák segítségével (URL4) az OEA-beli kor- és átlagmagasság adatokból (fafaj-specifikus) referencia-korra becsült átlagmagasságokat (az angol terminológia szerint az ún. site indexet, l. Skovsgaard & Vanclay 2008) számoltunk.
- (4). Fajonként minden, legalább 15 (gyakran több tíz-több ezer) erdőrészlettel rendelkező termőhelyi típusra kiszámoltuk az adott típusba eső fajajások fenti átlagmagasságainak területtel súlyozott átlagát (**H**) és szórását. A **H**-értékeket az egy-egy termőhelyi típusra jellemző potenciális famagasságnak tekintettük.

- (5). Fafajonként és minden olyan termőhely-típusra, amelynél szomszédos klímátípusokra lehetett potenciális famagasságot számítani (összesen 274 ilyen kombinációt kaptunk), kiszámoltuk a szomszédos klímátípusokra kapott **H**-értékek különbségét (ΔH).
- (6). Fafajonként ezután azt vizsgáltuk, hogy az egyébként azonos (pl. a 3. ábra szerinti) termőhelyi típusokban a *klímátípus megváltoztatásának hatására* (pl. B→GY-KTT váltás esetén) mennyivel változik a fafajösszetétel és **H**. Ez utóbbi esetében, a vizsgált hatás statisztikai szignifikanciájának becslése érdekében – feltételezve, hogy a különböző kitettségű és talajtípusú állományok a klíma megváltozásának hatására hasonló ΔH -t szenvednek el – klímátípus-váltás csoportonként és talajmélység-kategóriák kombinációiban kiszámoltuk az előző lépésben kapott ΔH értékek átlagát (ΔH **átlag**).
- (7). Egy-egy kombináción belül 5 vagy annál nagyobb elemszám esetén végül egymintás t-próbával ellenőriztük, hogy a ΔH **átlag** eltér-e a null-hipotézisnek tekintett nulla értéktől.

A szervesanyag lebomlás sebessége, gyökér/hajtás arány

A szervesanyag lebomlási sebességére és a gyökér/hajtás arány megváltozására nézve még kevés tapasztalati adat áll rendelkezésre. Előbbi becslésénél abból indultunk ki (felhasználva Führer E. pers. comm. véleményét is), hogy minél magasabb a hőmérséklet, annál gyorsabb a holt szervesanyag lebomlása, de csak egy bizonyos mértékig, ugyanis a lebomlás a nedvesség mértékétől is függ. A lebomlási ráta, továbbá a gyökér-hajtás arány *változását* általában hasonló *irányúnak* és *mértékűnek* vettük, mint a fanövekedési sebesség változását.

Statisztikai adatok

A szénkörforgalmi modell futtatásához szükséges fafajonkénti, fatermési- és korosztályonkénti, a modellezett időszak elejére (2009) vonatkozó erdőterület adatokat az Országos Erdőállomány Adattárból (OEA) vettük. A modell megfelelő kalibrálásának alapjául szolgáló fakészlet, fakitermelési és növedék adatok (amikre a 2000-2015. közötti időszakra a modellel levezetett becsléseknek a hivatalos statisztikákhoz történő illesztéséhez volt szükség) szintén az OEA-ból származnak.

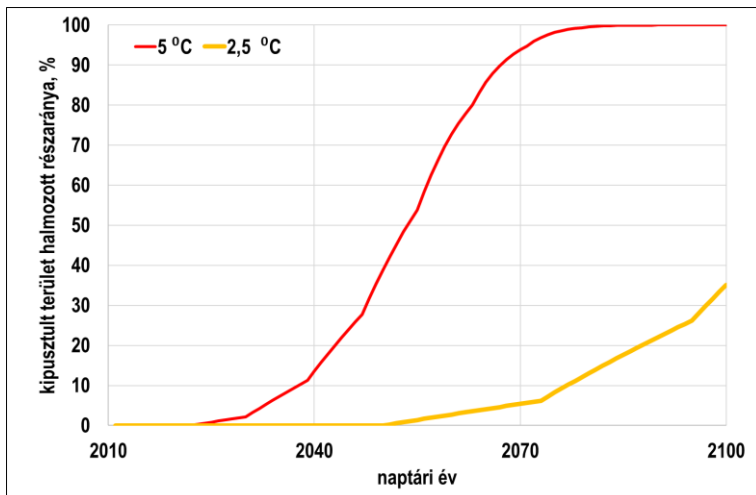
EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

Mortalitás, fafajösszetétel és fanövekedés változás

Az alkalmazott, több elemében konzervatív megközelítés a halmazott állomány-mortalitásra jelentős, az erdőkre nézve nagyon komoly veszélyt sejtető mortalitást prognosztizál mindkét klímaváltozási scenárió esetében (4. ábra). A projekció szerint az évszázad végére

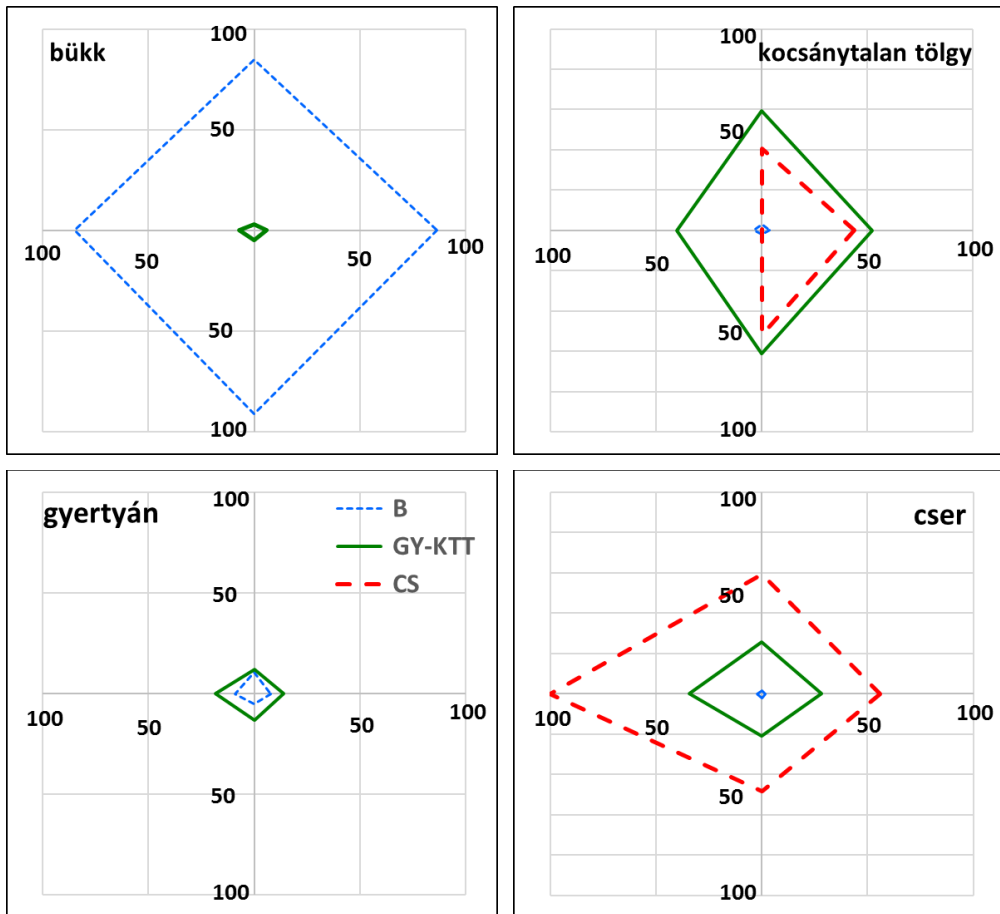
még a kisebb hőmérséklet-emelkedéssel számoló scenárió esetében is kipusztul az erdők harmada, ráadásul a kipusztult terület nagysága növekvő mértékű lesz.

A módszer többek között azért konzervatív, mert az alapjául szolgáló regressziós görbe (melynek alkalmazása egybevág Somogyi (2016) korábbi feltételezésével is) az EQ_mod esetek többségében alábecslést jelent. (A aszály-károk mértéke a Csóka et al. 2016 által talált összefüggésben is hasonló emelkedés jelentkezik.) A pontokra illesztett görbe alapján emellett, szintén a *konzervativizmus* érdekében figyelmen kívül hagytuk, hogy Csóka et al. (2007), Csóka et al. (2009), Berki et al. (2014), Berki et al. (2017), valamint Berki & Mátyás (2017) szerint már most is van kimutatható hatása az eddigi szárazodásnak, és az Országos Erdőkár Nyilvántartási Rendszerben rögzített aszálykárok mennyisége (talán a klíma megváltozása miatt) szintén lassan, de egyértelműnek tűnő módon már eddig is növekedett Magyarországon (Hirka 2016, Csóka et al. 2016).



4. ábra: A prognosztizált halmozott mortalitás időbeli alakulása a két klímaváltozási scenárióra.
 Figure4: Projected cumulative mortality over time for the two climate change scenario.

Fentiekkel összhangban van a másik vizsgálat eredménye, mely szerint a melegebb és szárazabb klímátípusba történő átmenet - egyébként változatlan feltételek mellett - egyértelmű és jelentős mértékű fajokösszetétel-változást eredményez. A kapott (itt nem részletezett, talajtípustól, kitétségtől és a termőrétegtől is függő) eredmények szerint, melyeket az 5. ábra szemléltet, a bükk gyakorlatilag csak a B klímazónában fordul elő domináns fajként. A klímátípus-váltás hatását az ábra a szomszédos klímátípusokban azonosítható részarányok különbségével jelzi (így pl. a bal felső grafikonon a bükk faj részaránya a B klímátípusban (kék szaggatott vonalak) közel 100%, a GY-KTT klímátípusban (zöld folytonos vonal) viszont ennél 80-85%-kal kevesebb).



5. ábra: Négy fontos fafaj (az ábrák felső részein: B=bükk; KTT: kocsánytalan tölgy; GY=gyertyán; CS=cser) részarányának változása a klímátípus-váltás (I. az ábra közepéhez közeli jelmagyarázat) hatására a négy fő égtáj (minden ábrán felül É, jobbra K, lent D és balra NY) szerint többletvízhatástól függetlenül, agyagbemosódásos barna erdőtalaj típusú, 60 cm-nél mélyebb talajon. Az ábrák tengelyein (a négy égtáj irányában) a fafaj (terület alapján számolt) részaránya látható (százalékban). Az azonos klímátípusokban az egyes égtájakra becsült értékeket a jobb láthatóság érdekében összekötöttük. További magyarázatot I. a szövegben.

Figure 5: Changes of ratio of four important tree species („bükk”=European beech; „kocsánytalan tölgy”=Sessile oak; „gyertyán”=Hornbeam; and „cser”=Turkey oak) due to change of climate type („B”=Beech climate type; „GY-KTT”=Hornbeam-oak climate type; „CS”=Turkey oak climate type; see colour code in the middle of the figure) for four aspect categories (in the four cardinal directions; North is up) on Brown forest soils with clay illuviation where the rooting depth is more than 60 cm. All four axes show area-based species rate (in %). Data points of the same climate type in the four axes are connected for better visibility.

A kocsánytalan tölgy (a jobb felső grafikonon zölddel) dominánsan jelenik meg a GY-KTT klímátípusban, de a részaránya jelentősen csökken a CS klímátípusban (piros szaggatott vonal); a gyertyán előfordul a B klímátípusban is (kék szaggatott vonal), de sokkal nagyobb mértékben a GY-KTT klímátípusban (zöld folytonos vonal), viszont eltűnik a neki már túl

meleg és száraz CS klímátípusból; végül a cser már viszonylag jelentős részaránytal megtalálható a GY-KTT klímátípusban (zöld folytonos vonal), de igazán a CS klímátípusban éri jól magát (piros szaggatott vonal). (Az egyes fafajok tényleges előfordulása nem korlátozódik egy klímátípusra, és ha több fafajból lehet választani, a bükköt, a kocsánytalan tölgyet, a csert és a gyertyánt általában ebben a sorrendben választják, így az erdőgazdálkodási gyakorlat nem okolható a fent kimutatott fajösszetétel-változásokért.)

A famagasság-vizsgálat eredményeit tekintve a viszonylag kevés adat és nagy szórás ellenére egyértelműen látszik, hogy a famagasság a melegebb és szárazabb klímátípusra történő váltás hatására minden esetben csökken (vagyis ΔH átlag < 0), amikor ΔH átlag 0-tól való eltérése szignifikáns és jelentős (1. táblázat). A nem szignifikáns ΔH átlag értékek közül 22 negatív és csak 7 pozitív, ami a fenti megállapítást tovább erősíti.

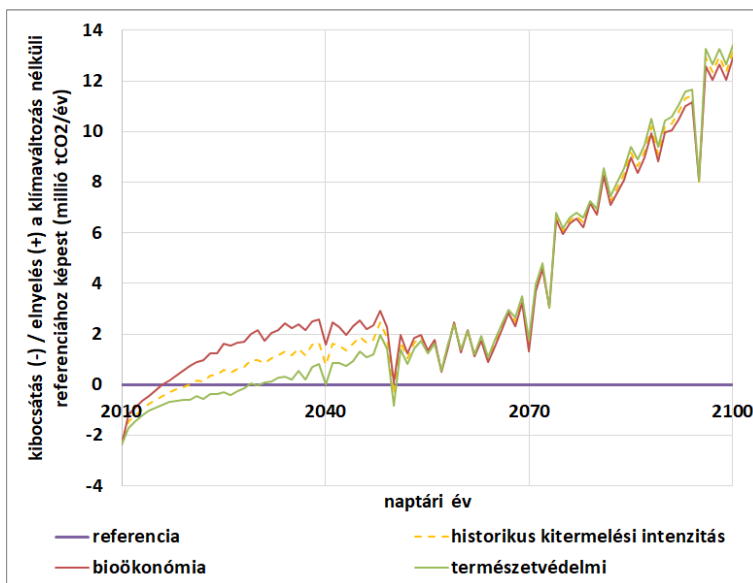
1. táblázat: A referencia-korra becsült potenciális famagasságok átlagos változása (ΔH átlag) a klímátípus-váltás hatására talajmélység-kategóriánként. A táblázat csak azokat az eseteket mutatja, amelyeknél ΔH átlag statisztikailag szignifikánsan eltért a nullától. STD: szórás; N: elemszám az adott klímátípus-váltás kategóriában.

Table 1: Average difference of potential mean tree height at reference age (ΔH átlag) due to change of climate type by rooting depth categories. The table only shows cases where the value of ΔH átlag is significantly different from zero. STD = standard deviation; N = number of cases in the given climate type change category. („Fafaj”= species; „A”=Black locust; „FF”=Black pine; „EF”=Scots pine; „Klímátípus-váltás”=change of climate type; „közepesen mély”=rooting depth is 40-60cm; „mély”=rooting depth >60cm; all other words as before.)

Fafaj (eredet)	Klímátípus-váltás	Talajmélység-kategória					
		közepesen mély			mély		
		ΔH átlag (m)	STD	N	ΔH átlag (m)	STD	N
A	GY-KTT→CS	-1,19	1,48	28	-0,90	1,47	21
FF	B→GY-KTT				-2,21	2,74	9
CS	GY-KTT→CS	-3,00	0,99	15	-2,37	1,72	14
EF	GY-KTT→CS	-1,45	0,80	6	-1,73	0,86	9
GY	B→GY-KTT	-1,65	1,06	15			
KTT (mag)	GY-KTT→CS				-2,48	2,21	16
KTT (sarj)	GY-KTT→CS	-3,82	1,35	9	-2,32	0,92	11

Üvegház gáz kibocsátás többlet

A szénforgalmi modellezési eredmények bükk esetében azt mutatják, hogy a referencia szcenárióhoz képest (amit a 6. ábrán az x-tengely szemléltet) a klímaváltozás feltételezése esetén egy rövid ideig még többlet-elnyelés is megfigyelhető (ez részben a bükk jelenlegi korosztály-eloszlásával magyarázható). Két évtized múlva azonban a melegedés hatására többlet kibocsátás keletkezik, ami 2070. után lényegesen felgyorsul és az évszázad végére eléri a 2017-es teljes (a földhasználati szektor nélkül számított) hazai kibocsátásnak (61,1 millió t CO₂ egyenérték, URL5) több mint az ötödét. A három vizsgált fafajra kapott hasonló eredményeket összeadva (melyek a hazai erdőknek csak kisebb részét teszik ki) az adódik, hogy az évszázad végére a pusztuló erdőkből a jelenlegi teljes hazai kibocsátás nagyságrendjét érhetik el a kibocsátások még a kisebb melegedéssel számoló klímaváltozási szcenárió esetén is, ami igen jelentős pozitív visszacsatolást eredményezhet és nagymértékben tovább fokozhatja a globális klímaváltozást. A fakitermelési szcenáriók közötti különbségeknek, továbbá a fanövekedés-csökkenésnek és más erdei folyamatok megváltozásának hosszabb távon ehhez képest elhanyagolható hatása van a kibocsátások és elnyelések alakulására (6. ábra).



6. ábra: A bükk fafaj összes széntárólójából származó (a klímaváltozás nélküli „referencia” szcenárióhoz képest számolt) többlet CO₂ kibocsátás a 2100-ig 2,5 °C-os hőmérséklet-emelkedéssel számoló klímaváltozási szcenárió esetén, a fakitermelési szcenáriók függvényében.

Figure 6: Additional emissions, relative to the reference scenario that assumes no climate change, from all carbon pools of all European beech forests due to climate change assuming a temperature increase of 2.5 °C by 2100 by three harvest scenarios („historikus”: historical; „bioökonómiai”: assumes an increase of about 20% by 2030; „természetvédelmi”: assumes a decrease of about 20% by 2030).

Megjegyzendő, hogy az állomány-mortalitás fenti 50%-os határértékének növelése esetén a véghasználat elmaradása csökkenti ugyan az azonnali emissziót, de a mortalitás miatt elpusztult fák növekedésének elmaradása később növedék-visszaesést jelent, ami a szénlekötések elmaradását eredményezi. A határérték megválasztásának (és több más modellparaméter itt nem elemzett esetleges hibájának) ezért, továbbá természetesen elsősorban a klímaváltozás óriási hatása miatt viszonylag kicsi a jelentősége.

ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

A becsléseknél az alkalmazott módszertanból eredő hibalehetőségek hatásának csökkentése érdekében számos olyan módszertani elemet alkalmaztunk, amelyek a kibocsátások alábecsléséhez vezethetnek. További kibocsátás-alábecslést eredményez az, hogy erdőtüzeknél a széndioxid mellett N-oxidok, metán és más üvegház gázok is felszabadulnak, amik szintén jelentősen emelhetik a légköri hőmérsékletet. A konzervatív megközelítést igazolja – és a módszertani kérdések fontosságát lényegesen csökkenti – az az eredmény, hogy még a konzervatív megközelítés esetén is drasztikusnak, és az elővigyázatosság elve (Somogyi 2017) alapján nagyon figyelmeztetőnek lehet nevezni az eredményeket. A kibocsátás-többlet jelentősen ronthatja az esetleges (nemcsak az erdőkre kiterjedő) mitigációs erőfeszítések hatásfokát, ill. akár teljes egészében ellensúlyozhatják azokat.

A kibocsátások mértékére kapott becslés annak ellenére nagyjából konzisztens a Somogyi (2016) által kapott eredményekkel, hogy azok a Móricz et al. (2013) alapján levezetett mortalitási feltételezésekből adódtak. Ennél fontosabbnak érezzük azt kiemelni, hogy a mostani becslések már sokkal inkább tapasztalati adatokon (Rasztovics et al. 2014) alapulnak, és a mortalitást illetően konzisztensek Csóka et al. (2016) és Berki & Mátyás (2017) adataival is.

A kibocsátások mértékének elemzésekor figyelembe kell venni, hogy a CASMOFOR paraméterei közül csak a fent részletezetteket lehetett összefüggésbe hozni a klímaváltozással. Ugyanakkor e paraméterek a modell az összes, a szénkörfogalom modellezéséhez szükséges és jelenleg rendelkezésre álló információt számszerűsítik, és ebben az értelemben a „legjobbakknak” számítanak. Ennél is fontosabb azonban az, hogy – a klímaváltozás hatásának drasztikussága miatt – a modellezett eredményekből levonható következtetések szempontjából a legnagyobb jelentősége annak van, hogy a jövőben végül milyen klímaváltozást kell majd elszenvednie a fáknek.

A modellezés több folyamat (pl. a fanövekedés) esetében nem tudott figyelembe venni néhány olyan további, a vizsgáltakkal sok esetben szimultán módon ható tényezőt, amelyek hatása a jelentős lehet. Az egyik ilyen, a fák növekedését befolyásoló tényező az ún. széndioxid trágyázási effektus. Földi léptékben – úrfelvételek és ökoszisztéma modellek segítségével – megállapították, hogy ez a hatás a levélfelület index (LAI) növekedésével mérhető „zöldülés” kiváltásában a múltban 70%-ban volt felelős, míg a N-trágyázási effektus csak 9%-ban (Zhu et al. 2016). Ezt látszik igazolni az, hogy a fák a tanulmányban a melegedés



és szárazodás hatására kimutatott növekedés-csökkenése ellenére az elmúlt időszakban gyorsabban nőttek, mint korábban (Somogyi 2008). Egyelőre nem világos, hogy a széndioxid trágyázási effektus milyen hatással lesz a szénkészletekre a jövőben; úgy tűnik, hogy mindenképpen pozitív hatású, de legfeljebb addig, amíg a fák képesek a túlélésre. Egyelőre nem tudjuk, hogy a túlélés lehetőségeit a széndioxid trágyázási effektus kitolja-e, vagy éppen ellenkezőleg, előrehozza, és így összességében mégis többlet-kibocsátásokat eredményez-e. Az viszont valószínűsíthető, hogy a trágyázási effektus átmenetileg pozitív hatását később ellensúlyozza majd az effektus eredményeként létrejött nagyobb biomasszájú fák elpusztulásából származó nagyobb kibocsátás.

A módszertani bizonytalanságokon túlmenően az eredmények értékeléséhez fontos elemezni azt, hogy a feltételezett klímaváltozási scenáriók mekkora klímátípus-eltolódást jelenthetnek. A regionális klíma-modellekkel 2100-ra jósolt kb. 2,5, ill. 5,0 °C hőmérséklet-emelkedés mellett a csapadék-mennyiség változása várhatóan kisebb lesz majd, az éven belüli eloszlása lehet, hogy változik; mindazonáltal a becslések továbbra is nagyon bizonytalanok. Ismerjük azonban, hogy egy-egy, a hazai erdőgazdálkodásban alkalmazott klímátípus között *átlagosan* kb. 0,8 °C (0,2...1,3 °C) és kb. 57 mm (32...86 mm) éves csapadék-mennyiség-különbség van (Mátyás & Czímber 2000); a vegetációs időn belüli csapadék-mennyiség-különbségek átlaga az országos éven belüli eloszlás alkalmazásával kb. 35 mm. Az EQ_mod képletét megfelelő országos átlagokra ($T_{\text{július}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ és $P_{\text{április-október}} = 372 \text{ mm}$) alkalmazva 53,8-es index-érték adódik; a fenti átlagos értékekkel számolva egy klímátípus-eltolódás 61,7-es (éves) EQ_mod értéket eredményez. Ha $T_{\text{július}}$ értékét 2,5 °C-al növeljük meg és $P_{\text{április-október}}$ értéke változatlan marad, EQ_mod értéke 60,5-ra nő; $T_{\text{július}}$ értékének 5 °C-al és $P_{\text{április-október}}$ 10%-kal történő emelkedése 61,1-et eredményez, vagyis mindkét esetben majdnem kb. egy klímátípusnyi eltolódással kellene számolni. Ha viszont a vegetációs időszakon belüli csapadék mennyisége a jövőben esetleg nem nő, hanem csökken, akkor ilyen eltolódáshoz már 2,5 fokos hőmérséklet-emelkedés is elegendő; az évszázad végéig az 5 fokos melegedés viszont mindenképpen a (legalább) egy klímátípusnyi eltolódás, és az abból adódó drasztikus mértékű mortalitás és üvegház gáz kibocsátás reális veszélyét jelenti. (A fenti számítás nyilvánvalóan egy egyszerűsített modellt, nem veszi figyelembe a hőmérséklet-emelkedésből származó vegetációs időszak hossz-növekedést és sok más hasonló jelenséget, és csak a várható változások nagyságrendjének demonstrálására szolgál.)

A kapott eredmények azt mutatják, hogy a tanulmányban feltételezett klímaváltozás hatása sokkal nagyobb, mint a fakitermelési intenzitás változtatásáé. Ez azt is jelenti, hogy a klímaváltozáshoz történő alkalmazkodás során meg kell ugyan kísérlni minden olyan mitigációs lehetőség kihasználását, amire az erdészeti szektor képes, de valódi eredmények csak az egész emberiség összefogásával képzelhetők el. Ezek között a lehetőségek között van az, hogy az erdőkből kitermelt faanyag mennyiségét addig csökkentjük, amíg lehet, és ezzel időlegesen elhalasszuk a fákban tárolt szén levegőbe kerülését (vagyis átmeneti elnyelés-többletet érünk el), és hogy megfelelő fafaj-megválasztással és állomány-nevelési módszerekkel csökkentjük az aszály-mortalitás kockázatát.

Az eredmények arra is felhívják a figyelmet, hogy szükséges volna fokozni a fapusztulás lehetséges mértékére, valamint okaira és akadályozására vonatkozó kutatások intenzitását. Fontos az erdőtüzek akadályozásával kapcsolatos felkészülés és kutatómunka. Végül fontos az is, hogy az eredményeket erdőgazdálkodók és mások is minél többen megismerhessék annak érdekében, hogy a figyelem az eddigieknél is jobban az erdők védelmére és a klímaváltozáshoz történő adaptációra irányulhasson.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás különböző fázisaiban nagy segítségemre volt adatokkal, munkával, vitával vagy véleménnyel: Berki Imre és Gálos Borbála (Soproni Egyetem), valamint Csóka György és Rasztovcics Ervin (NAIK ERTI). Szintén köszönöm az EU és magyar Adófizetőknek a lehetőséget, hogy adójukból a VKSZ_12-1-2013-0034-AGRÁRKLÍMA.2 projekten keresztül egy fontos, az erdők életét a jövőben nagyon jelentősen meghatározó jelenségnek: a klímaváltozásnak a szénkörforgalomra gyakorolt hatását vizsgálhattam. Köszönöm a lektornak is értékes megjegyzéseit.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Berki I., Rasztovcics E. & Móricz N. 2014: Erdőállományok egészségi állapotának értékelése – egy új megközelítés. Erdészettudományi Közlemények 4(2): 149–155.
- Berki I., Rasztovcics E., Móricz N. & Kolozs L. 2016: The Role of Tree Mortality in Vitality Assessment of Sessile Oak Forests. South-east Eur for 7(2): 91–97. DOI: [10.15177/see-for.16-14](https://doi.org/10.15177/see-for.16-14)
- Berki I. & Mátyás Cs. 2017: A szárazodás befolyásolta kigyérülés a kocsánytalan tölgy példáján. Kézirat, Sopron.
- Borhidi A. 1961: Klimadiagramme und klimazonale Karte Ungarns. Annales Universitatis Scientiarum Budapestinensis de Rolando Eötvös Nominatae. Sectio biologica 4: 21–50.
- Csóka Gy., Koltay A., Hirka A. & Janik G. 2007: Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyeseink és bükköseink egészségi állapotára. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): Erdő és Klíma V. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, 229–239.
- Csóka Gy., Koltay A., Hirka A. & Janik G. 2009: Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyeseink és bükköseink egészségi állapotára. Klíma-21 füzetek 57: 64–73.
- Csóka Gy. et al. 2016: Aszály-mortalitás összefüggések. Nem publikált adatok.
- Ellenberg H. 1986: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen, 4th edn. Fischer, Stuttgart.
- 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: 139–147. DOI: [10.1007/s00484-007-0096-5](https://doi.org/10.1007/s00484-007-0096-5)
- Hirka A. (eds) 2016: A 2015. évi biotikus és abiotikus erdőgazdasági károk, valamint a 2016-ban várható károsítások. NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, NÉBIH Erdészeti Igazgatóság, Budapest.
- 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, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Járó Z. 1966: A termőhely. In: Babos I., Proszk H.S., Járó Z., Király L., Szodfridt I. & Tóth B.: Erdészeti termőhelyfeltárás és térképezés. Akadémiai Kiadó, Budapest, 19–116.
- Mátyás Cs. & Czimer K. 2000: Zonális erdőtakaró és a klímaváltozás hatásainak modellezése: lehetőségek és korlátok mezoklíma szinten. In: Kiricsi A. (ed): Erdő és Klíma III. Debreceni Egyetem, TTK Meteorológiai Tanszék, Debrecen, 83–97.
- Móricz N., Rasztovcics E., Gálos B., Berki I., Eredics A. & Loibl W. 2013: Modelling 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)
- Rasztovcics E., Berki I., Mátyás Cs., Czimer 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)
- Skovsgaard J.P. & Vanclay J.K. 2008: Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 81(1): 13–31. DOI: [10.1093/forestry/cpm041](https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041)
- Somogyi Z. 2008: Recent trends of tree growth in relation to climate change in Hungary. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 4: 17–27.
- Somogyi Z., 2016: Projected effects of climate change on the carbon stocks of European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in Zala County, Hungary. *Lesnicki casopis - 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: 652–657.
- Zhu Z. et al. 2016: Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change* 6(8): 791–795. DOI: [10.1038/nclimate3004](https://doi.org/10.1038/nclimate3004)
- Zimmermann N.E., Schmatz D.R. & Psomas A. 2013: Climate Change Scenarios to 2100 and Implications for Forest Management. In: Fitzgerald J. & Lindner M. (eds) 2013: Adapting to climate change in European forests – Results of the MOTIVE project. Pensoft Publishers, Sofia, 9–14.

On-line irodalom

- URL1: Earth System Grid Federation (ESGF): <https://esgf-data.dkrz.de/search/esgf-dkrz/> (2018. 08.hó).
- URL2: CARPATCLIM adatbázis: www.carpatclim-eu.org (2018. 08. hó)
- URL3: Carbon Sequestration Model for Forestations (CASMOFOR): <http://www.scientia.hu/casmofofor> (2018. 08. hó).
- URL4: ERTI fatermési táblák www.scientia.hu/casmofofor/creditsH.php (2018. 08. hó)
- URL5: National Inventory Report, Hungary: http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/10116.php (2018. 08. hó)

Érkezett: 2018. május 2.
Közlésre elfogadva: 2018. május 31.