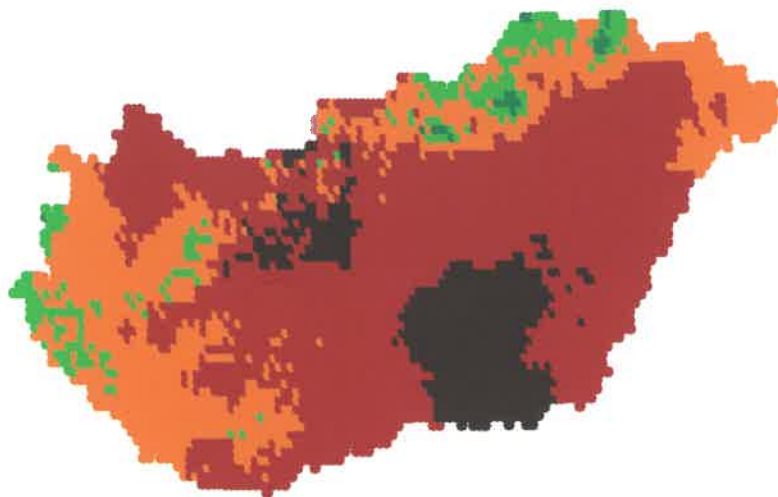


A NAIK Erdészeti Tudományos Intézet és a
Soproni Egyetem Erdőmérnöki Karának tudományos lapja

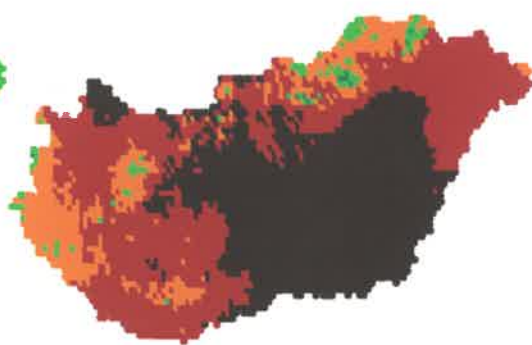
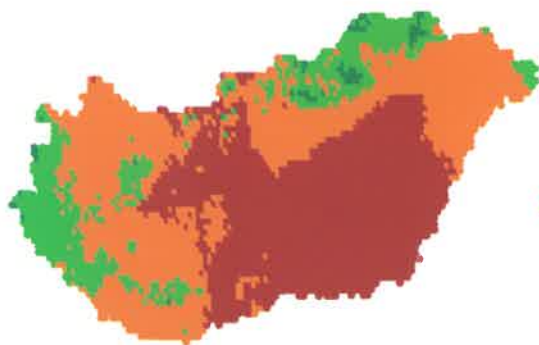
1574
D

2021-2050
Átlagos becslés



Optimista becslés

Pesszimista becslés



● bükkös

● gyertyános-tölgyes

● kocsánytalan tölgyes ill. cseres

● erdőssztyep

● sztyep

Címlapkép:

Az erdészeti klímaosztályok várható előfordulása a 2021-2050-es időperiódus átlagában. A kategóriák lehatárolása az erdészeti szárazsági mutató (FAI; Führer 2010) alapján történt.

Felső ábrarész: 12 klímamodell szimuláció átlagos becslése, alsó ábrarész: egy optimista és egy pesszimista előrejelzés, az IPCC A1B kibocsátási forgatókönyvének feltételezésével (Gálos & Führer 2018, ebben a kötetben)

Macroclimatically suitable zones for climate indicator tree species for the time period 2021-2050. Categories are defined by the Forestry Aridity Index (Führer 2010). Top: mean projection of 12 regional climate model simulations based on the A1B emission scenario of the IPCC. Bottom: an optimistic and a pessimistic projection indicating the 66 % range of the simulation results (Gálos & Führer 2018)

Erdészettudományi Közlemények

8. évfolyam 1. szám



2018

Főszerkesztő:

Csóka György (NAIK ERTI)

Helyettes főszerkesztő:

Lakatos Ferenc (SOE EMK)

Szerkesztők:

Hirka Anikó (NAIK ERTI), *Király Gergely* (SOE EMK) és *Molnár Miklós* (SOE EMK)

A szerkesztőbizottság társelnökei:

Borovics Attila (NAIK ERTI) és *Náhlík András* (SOE EMK)

A szerkesztőbizottság tagjai:

Albert Levente (SOE EMK)

Duska József (MEGOSZ)

Führer Ernő (NAIK ERTI)

Göbölös Péter (Gyulaj Zrt.)

Gribovszki Zoltán (SOE EMK)

Jánoska Ferenc (SOE EMK)

Kolozs László (NÉBIH EI)

Kovács Gábor (SOE EMK)

Szabados Ildikó (FM)

Szepesi András (FM)

Felelős kiadó:

Borovics Attila

NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, 9600 Sárvár, Várkerület 30/A.

Címlapterv:

Griffes Grafika Stúdió

4027 Debrecen, Ibolya u. 8. III/10.

www.griffes.hu

ISSN 2062-6711

DOI: 10.17164/EK.2018.V8N1

A kötet megjelenését az Agrárklíma.2 VKSZ_12-1-2013-0034 projekt támogatta

Nyomdai munkák:

Lővér-Print Nyomdaiipari Kft.

9400 Sopron, Ady Endre u. 5.

Ügyvezető igazgató: Szabó Árpád

loverprint@t-online.hu

A klímaváltozás kihívásai az erdészetben

válogatás az Agrárklíma.2 projekt eredményeiből

Szakmai vezető és a kötet szerkesztője:

Mátyás Csaba (SOE EMK)

Technikai szerkesztők:

Király Angéla (SOE EMK)

Molnár Miklós (SOE EMK)

ISSN 2062-6711

DOI: 10.17164/EK.2018.V8N1

Készült az Agrárklíma.2 VKSZ_12-1-2013-0034 számú projekt keretében

Soproni Egyetem Kiadó

Nyomdai munkák:

Lővér-Print Nyomdaipari Kft.

9400 Sopron, Ady Endre u. 5.

Ügyvezető igazgató: Szabó Árpád

loverprint@t-online.hu

2018

SZÉCHENYI 



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

NEMZETI KUTATÁSI,
FEJLESZTÉSI ÉS
INNOVÁCIÓS ALAP

BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

**A kutató-fejlesztő munkát és kiadvány megjelenését támogatta az
Agrárklíma.2 VKSZ_12-1-2013-0034
NKFI Alapból megvalósuló projekt**

Konzorciumvezető:

Lajta-Hanság Zrt.

Konzorciumi tagok:

Soproni Egyetem (korábban Nyugat-magyarországi Egyetem)
Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központ, Erdészeti Tudományos Intézet
SEFAG Erdészeti és Faipari Zrt.
CH-Imperial Ingatlanforgalmazó és Szolgáltató Zrt.
Eötvös Lóránd Tudományegyetem
Szent István Egyetem
DigiTerra Informatikai Szolgáltató Kft.

Projekt menedzser:

Bakos István

Projekt menedzser helyettes:

Bidló András

Projekt asszisztens:

Király Angéla

Szakmai vezető:

Mátyás Csaba

Részprojekt vezetők:

Borovics Attila

Náhlík András

Lakatos Ferenc

Neményi Miklós

TARTALOMJEGYZÉK

<i>Mátyás Csaba:</i> A gyorsuló idő sodrában – a klímaváltozás kihívása	9-10
<i>Hirka Anikó, Pödör Zoltán, Garamszegi Balázs és Csóka György:</i> A magyarországi erdei aszálykárok fél évszázados trendjei (1962-2011)	11-25
<i>Führer Ernő:</i> A klímaértékelés erdészeti vonatkozásai	27-42
<i>Gálos Borbála és Führer Ernő:</i> A klíma erdészeti célú előrevetítése	43-55
<i>Bidló András és Horváth Adrienn:</i> Talajok szerepe a klímaváltozásban	57-71
<i>Herceg András, Kalicz Péter, Kisfaludi Balázs és Gribovszki Zoltán:</i> Egy Thornthwaite típusú vízmérleg modell az éghajlatváltozás hidrológiai hatásainak elemzéséhez	73-92
<i>Czímber Kornél, Mátyás Csaba, Bidló András és Gálos Borbála:</i> A „Járó-tábla” (avagy az egyes termőhelytípusokon alkalmazható célállományok és azok növekedésének) közelítése gépi tanulási módszerrel	93-103
<i>Illés Gábor:</i> A klímaváltozás nyomán bekövetkező fatermés-változás becslése a kocsánytalan tölgy példáján	105-118
<i>Berki Imre, Móricz Norbert, Rasztovits Ervin, Gulyás Krisztina, Garamszegi Balázs, Horváth Adrienn, Balázs Pál és Lakatos Bence:</i> Fapusztulás és gyorsuló növekedés kocsánytalan tölgyeseinkben	119-130
<i>Mátyás Csaba, Kóczán-Horváth Anikó, Antoine Kremer és Cuauhtémoc Saenz-Romero:</i> Kocsánytalan tölgy populációk fiatalkori magassági növekedése szimulált klímaváltozás hatására, egy származási kísérletsorozatban	131-148
<i>Csóka György, Hirka Anikó, Csepelényi Mariann, Szőcs Levente, Molnár Miklós, Tuba Katalin, Hillebrand Rudolf és Lakatos Ferenc:</i> Erdői rovarok reakciói a klímaváltozásra (esettanulmányok)	149-162

- Bartha Dénes, Berki Imre, Lengyel Attila, Rasztovits Ervin, Tiborcz Viktor és Zagyvai Gergely:*
Erdőtársulások és fafajaik átrendeződési lehetőségei a változó klímában 163-195
- Zagyvai Gergely, Eredics Attila, Csiszár Ágnes, Korda Márton, Lengyel Attila, Tiborcz Viktor és Bartha Dénes:*
Lécek növényzetét meghatározó tényezők vizsgálata különös tekintettel a mikroklímára 197-210
- Somogyi Zoltán:*
A klímaváltozás miatti fapusztulás tovább gyorsíthatja a klímaváltozást 211-226
- Polgár András, Pécsinger Judit, Horváth Adrienn, Szakálosné Mátyás Katalin, Horváth Attila László, Rumpf János és Kovács Zoltán:*
Erdészeti technológiák szénlábnyom és előrevetített klímakockázata 227-245
- Jankó Ferenc, Bertalan Laura, Pappné Vancsó Judit, Ormos Balázs, Németh Nikoletta és Hoschek Mónika:*
Az éghajlatváltozás kérdése a magyar erdőgazdálkodók körében 247-263

CONTENTS

Csaba Mátyás: In the whirl of passing time	9-10
Anikó Hirka, Zoltán Pödör, Balázs Garamszegi and György Csóka: 50 years trends of the forest drought damage in Hungary (1962-2011)	11-25
Ernő Führer: Forestry aspects of climate evaluation	27-42
Borbála Gálos and Ernő Führer: Climate projections for forestry in Hungary	43-55
András Bidló and Adrienn Horváth: Role of soils in climate change	57-71
András Herceg, Péter Kalicz, Balázs Kisfaludi and Zoltán Gribovszki: A Thornthwaite-type water balance model for the analysis of the hydrological impact of climate change	73-92
Kornél Czímber, Csaba Mátyás, András Bidló and Borbála Gálos: Machine learning approximation of Járó -table (table of applicable targeted forest stands and their growth for each forest site)	93-103
Gábor Illés: Predicting the climate change induced yield potential changes of sessile oak stands	105-118
Imre Berki, Norbert Móricz, Ervin Rasztoivits, Krisztina Gulyás, Balázs Garamszegi, Adrienn Horváth, Pál Balázs and Bence Lakatos: Mortality and accelerating growth in sessile oak sites	119-130
Csaba Mátyás, Anikó Kóczán-Horváth, Kremer Antoine and Saenz-Romero Cuauhtémoc: Juvenile height growth response of sessile oak populations to simulated climatic change based on provenance test data	131-148
György Csóka, Anikó Hirka, Mariann Csepelényi, Levente Szőcs, Miklós Molnár, Katalin Tuba, Rudolf Hillebrand and Ferenc Lakatos: Response of forest insects to the climate change (case studies)	149-162

- Dénes Bartha, Imre Berki, Attila Lengyel, Ervin Rasztoivits, Viktor Tiborcz and Gergely Zagyvai:*
 Estimated shifts of forest communities and tree species during changing climate 163-195
- Gergely Zagyvai, Attila Eredics, Ágnes Csiszár, Márton Korda, Attila Lengyel, Viktor Tiborcz and Dénes Bartha:*
 Studies on factors influencing forest gap vegetation with special attention to the microclimate 197-210
- Zoltán Somogyi:*
 Climate-change induced forest decline can further enhance climate change 211-226
- András Polgár, Judit Pécsinger, Adrienn Horváth, Katalin Szakálosné Mátyás, László Horváth Attila, János Rumpf and Zoltán Kovács:*
 Carbon footprint and predicted climate risk of forest technologies 227-245
- Ferenc Jankó, Laura Bertalan, Judit Pappné Vancsó, Balázs Ormos, Nikoletta Németh and Mónika Hoschek:*
 Climate change attitudes and adaptation of Hungarian forest managers 247-263

A GYORSULÓ IDŐ SODRÁBAN – A KLÍMAVÁLTOZÁS KIHÍVÁSA

Rendkívüli időket élünk. Az én életem során, azaz születésem óta, az emberiség létszáma – megháromszorozódott. Amikor születtem, még senki sem hallott sem széndioxid-kibocsátásról, sem biodiverzitás krízisről vagy az éghajlat változásáról.

A gyorsuló idő fogalmát a technológia és a gazdaság szédítő iramú növekedése szülte, egy fényes jövő ígézetében. Időközben eszmélni kezdtünk, a klímaváltozás baljóslatú híre egy-két évtizede hivatlanul kezdett beszivárogni a köztudatba. Kezdetben a külföldi híradásokon nevelkedett „vájtfülűek” képzelgéseként legyintettünk rá. Úgy tűnt, mintha az erdők világa mindentől távol, saját törvényei szerint létezne. Ahogy teltek az évek, egyre súlyosabb csapások sora figyelmeztetett arra, hogy hosszú távra berendezett, szabályozott és biztonságos világunkban sem rejtőzhetünk el előle.

Saját szakmai alapelveinket elődeink a tartamosság szilárd alapkövére építhették. A „meisseneni földeken”¹ született gondolatot az eltelt három évszázad alatt sokféle kihívás érte, de napjaink klímaváltozása valamennyi közül a legnagyobb és legsúlyosabb. Mindaz, amire méltán lehettünk büszkék, amit sziklaszilárdnak hittünk, biztonságában megrendülni készül. Az állandónak gondolt termőhely, de fafajaink viselkedése, tűrőképessége is hirtelen változásba kezdett az egész életközösséggel együtt. Mintha lázadás indult volna a mindent szabályozó és kihasználó ember ellen.

Kihívás, szó szerint: a természet hívta ki szakmánkat egy soha nem tapasztalt feladat megoldására. Keressük benne a pozitívot, sopánkodás helyett. Először is, emlékeztet az időnként elfelejtett alázatra. Hogy nincsenek ingyen lakomák. Rákényszerít, hogy jobban megismerjük az erdei életközösséget, fafajaink képességeit és tűréshatárait. A gyorsuló éghajlat változás maga után vonja a talaj és a hidrológiai viszonyok változását, de fafajaink fatermési táblákban rögzített növekedési ütemének változását is! Erdei károsítóink virulenciája erősödik, az eddig ismertek mellett pedig egyre újabbak jelennek meg. Sok berögződött elképzelésünket, szabályunkat felül kell vizsgáljuk, újakat kell megfogalmaznunk. Ez volt a most záruló Agrárklíma.2 projekt kitűzött feladata, melynek beszámolóját tartja kezében az olvasó. A kiadvány azonban nem tételes jelentéseket tartalmaz az elért eredményekről. A kutató-fejlesztő munka részletes eredményei helyett egy válogatást mutatunk be az érdeklődő szakember számára. Ebből kiderül, hogy a legtöbb tématerületen komoly előrehaladás van, de a jövőre vonatkozó előrejelzések továbbra is bizonytalanok maradnak.

Biztos és végleges eredményekre nem várhatunk, a bizonytalansággal együtt kell élnünk. Mert az idő sürget és nincsenek kítaposott utak. A jövőről pedig csak sejtéseink lehetnek. A száguldó klímaváltozás megfékezése pedig valamennyiünk felelőssége, közvetlen

¹ Idézet Carlowitz 1713-ban, a tartamosságról írt művéből (Mátyás Cs., Magyar Tudomány, 1994)

munkaterületünkön ugyanúgy, mint társadalmi, politikai szinten is. Ezzel a kihívással csak közös erőfeszítéssel, szakmai összefogással birkózhatunk meg. Meggyőződésem, hogy mindez vissza fogja állítani a szaktudás, a helyi tapasztalat és a felelősségteljes döntés szabadságát és tekintélyét.

Mátyás Csaba
az Agrárklíma.2 projekt szakmai vezetője

A MAGYARORSZÁGI ERDEI ASZÁLYKÁROK FÉL ÉVSZÁZADOS TRENDJEI (1962-2011)

Hirka **Anikó**¹, Pödör **Zoltán**², Garamszegi **Balázs**³ és Csóka **György**¹

¹NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, Erdővédelmi Osztály

²Soproni Egyetem, Informatikai és Gazdasági Intézet

³NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, Ökológiai Osztály

Kivonat

Az 1962-2011 közötti 50 évben Magyarországon az aszályok gyakorisága nőtt. A növekvő trenden túl az időszak második felében a kifejezetten extrém aszályok is egyre gyakoribbá váltak. Ezzel szoros összefüggésben jelentősen növekedtek az erdeinkben bekövetkező aszálykárok is. Az évente bejelentett aszálykárok rendkívül szoros, szignifikáns összefüggést mutattak a két vizsgált aszályindex (Pálfai-féle és Forestry Aridity Index) éves értékeivel. Ezek az összefüggések mindkét aszályindex esetében exponenciális jellegűek voltak. A korábbiaktól eltérően az aszálykárok az utóbbi időszakban nemcsak síkvidéki fiatalosokban, hanem hegyvidéki, idősebb, őshonos állományokban is fellépnek. Bizonyított, hogy a kocsánytalan tölgyesek és a bükkösök egészségi állapotában az aszályok döntő szerepet játszanak. A megnövekedett gyakoriságú és mértékű aszályok közvetlen károkozásuk mellett súlyos közvetett hatással is bírnak, ami jellemzően kárláncolatok formájában jelenik meg. Az aszályosság általában pozitívan hat számos rovarfaj tömeges elszaporodására. Az aszálystressz miatt legyengült állományokban tömegesen léphetnek fel, és okozhatnak tömeges fapusztulást olyan kórokozók, amik kedvező időjárású időszakban csak kisebb jelentőséggel bírnak. Amennyiben az aszályok (és egyéb más időjárási extrémítások) gyakorisága és súlyossága a jövőben növekedni fog, erdeinkben az eddigieknél is erősebb kárnyomás, és további jelentős egészségi állapot romlás prognosztizálható. Ebből kiindulva az erdőgazdálkodási/erdőművelési beavatkozások az erdők ellenálló/visszaszerző képességének növelésére kell, hogy irányuljanak. A reaktív erdővédelmi szemléletet a hosszú távú, proaktív megközelítésnek kell felváltania.

Kulcsszavak: erdei aszálykár, aszály index, aszálystressz, kárláncolat, növekvő kárnyomás.

50 YEARS TRENDS OF THE FOREST DROUGHT DAMAGE IN HUNGARY (1962-2011)

Abstract

The frequency of droughts increased in Hungary between 1962 and 2011. On top of this increasing trend, the extreme droughts had become more and more frequent. As a response for this, forest drought damage also showed an increasing trend. The yearly values of the forest drought damage showed a significant response for the yearly values of two drought indices (Pálfai and Forest Aridity index). Drought damage is reported not only from younger lowland stands, but also from older native stands of montane regions. It is proven that droughts play a decisive role in the health of sessile oak and beech stands. On top of their direct impacts, droughts have major indirect effects on forest health, manifesting in "damage chains". Droughts regularly have positive effects on outbreaks of many forest insects. The trees and stands weakened by drought stress can successfully be attacked by pathogens which are less aggressive amid better weather conditions. If the frequency and severity of droughts (and other weather extremes) increase (as it is predicted), our forests will suffer from an even higher damage pressure, so further negative health trends can be predicted in Hungarian forests. Therefore the forest management/sylviculture should aim at increasing forest resistance/resilience. The reactive forest protection should be changed for a long term proactive approach.

Keywords: forest drought damage, drought indices, drought stress, damage chain, increasing damage pressure.

Levelező szerző/Correspondence:

Hirka Anikó, 3232 Mátrafüred, Hegyalja u. 18.; e-mail: hirkaa@erti.hu

BEVEZETÉS

A klímaváltozás környezetünk szinte minden élettelen és élő elemére, így erdeinkre is jelentős hatással van. Leginkább azok az erdőterületek érintettek, ahol az adott terület fafaja(i) az elterjedésének szárazsági határán helyezkedik el (Mátyás et al. 2010). A klímaváltozás egyik legmeghatározóbb eleme az aszályos időjárási periódusok gyakoriságának és hosszának növekedése (Carnicer et al. 2011, Hlásny et al. 2014, Bendixsen et al. 2015, Assal et al. 2016, Hubbart et al. 2016). A mezőgazdasági és az erdei aszálykárok témája régóta foglalkoztatja mind a gyakorlati szakembereket, mind pedig a kutatókat (Bús 1995, Csóka et al. 2007, 2009, Hirka és Csóka 2010, Mátyás et al. 2010). Az aszálykár leggyakoribb közvetlen és jól érzékelhető hatása a lombzat idő előtti lehullása (Bréda et al. 2006), ill. a fák növedécsökkenése (Führer 1995, Lindner et al. 2014). Súlyosabb esetben, több éven át tartó aszály esetén egyes fák, ill. állományok pusztulása is bekövetkezhet (Thomas et al. 2002, Suarez et al. 2004, Allen et al. 2010, Poulos 2014, Schwantes et al. 2016).

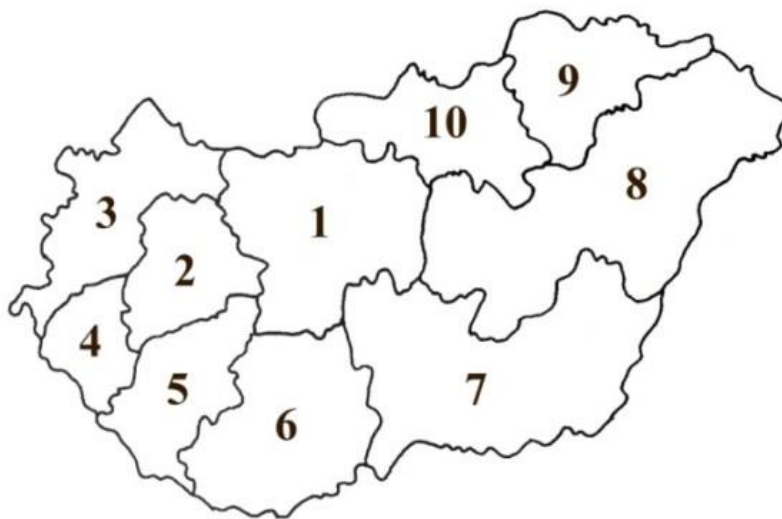
A fentiekből kiindulva az erdei aszálykárok jövőben várható mértékének előrejelzése (amire elsősorban a meglévő hosszú távú, visszamenőleges adatsorok biztosítanak lehetőséget), a várható károk mértékének lehetőség szerinti meghatározása nagy jelentőséggel bír az erdőgazdálkodás hosszú távú tervezése, illetve a károk kockázatának mérséklése szempontjából.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Az éves aszálykárok idősorának értékelése előtt magát a kiváltó meteorológiai-éghajlati háttérrel is vizsgáltuk Magyarország térségére, a Pálfai-féle aszályindex, PAI (Pálfai 2002) és a Forestry Aridity Index, FAI (Führer et al. 2011) segítségével. A későbbiekben bemutatott Pettitt-féle töréspont-elemzéssel (Sneyers 1992; Mares & Mares, 1994) igyekeztünk a klimatikus adatokat a károk intenzitásában kimutatható változásokkal ok-okozati viszonyba hozni. Az elmúlt évtizedek aszályperiódusainak területi változékonyságát is összehasonlítottuk két kivágtatás példáján. Az intenzívebb aszálykárok területi fellépéséhez igazodva az Északi-középhegység (ÉKHG) és a Nyugat-Dunántúl (NYDT) regionális idősorát képeztük, melyek rendre az É.sz. 47,75°– 48,50°, K.h. 19,00°– 21,50°, illetve az É.sz. 46,00°– 47,25°, K.h. 17,00°– 18,50° földrajzi szélességi és hosszúsági körök által határolt területek átlagát jelentik a CARPATCLIM projekt (Szalai et al. 2013) 1961-2010. időszakra elérhető rácshálós éghajlati adatainak felhasználásával.

A meteorológiai-éghajlati háttér vizsgálata után elvégeztük az aszálykárok idősorának értékelését is. Az 1960-as évek elejétől 2011-ig az erdőgazdálkodók évente 4 alkalommal kötelesek voltak az ún. „Erdővédelmi Jelzőlapok” kitöltésével adatokat szolgáltatni az erdőkben előforduló károkról, ezen belül az aszálykárok kiterjedéséről is. 2012-től kezdve az adatgyűjtés módszere némileg változott, ezért ennek az első 50 évnek az adatait használ-

tuk fel az elemzésekhez. Az éves aszálykárokat a Kormányhivatalok 10 Erdészeti Igazgatóságának illetékességi területe szerint csoportosítottuk (1. ábra).



1. ábra: A KH Erdészeti Igazgatóságainak illetékességi területei.
Figure 1: Regions of the Forestry Directorates.

Az aszálykárokat évenként összegeztük, az évenkénti értékeket összevetettük a Pálfai-féle aszályindex-szel (Pálfai 2002), illetve a FAI-val (Führer et al. 2011).

Az 1962-2011-es időszakot két egyenlő részre osztva (1962-1986, illetve 1987-2011), ábrázoltuk a bejelentett károk nagyságát, Erdészeti Igazgatóságok szerinti bontásban.

Töréspont elemzést alkalmaztunk az idősorokban kimutatható jelentős változások detektálására. A vizsgálatok során a cél az volt, hogy objektív módon felosszuk az idősort két részre úgy, hogy a részek adatsorai között statisztikailag igazolható, szignifikáns különbség legyen. A töréspont az idősor azon pontja (pontjai), amikor ez az eltérés a két részidőszak között maximális és statisztikailag kimutatható.

A szakirodalom több módszert is ismer töréspontok kimutatására, mint például a részidőszakok átlagértékeinek összehasonlításán alapuló Student-féle t-teszt, a Wilcoxon teszt, vagy a Pettitt-féle nemparaméteres megközelítés (Sneyers 1992; Mares & Mares, 1994). Figyelembe véve, hogy adatsoraink nem minden esetben normális eloszlásúak nemparaméteres próbákat alkalmaztunk. Elemzésünkben a változások kimutatására a Pettitt-féle töréspont vizsgálatot alkalmaztuk. Ez a nemparaméteres próba a Mann-Whitney teszten alapulva hasonlít össze két mintát. A lehetséges töréspont előtti és mögötti időszakok adatainak eloszlásait összehasonlítva keresi a statisztikailag szignifikáns eltérést adó töréspontokat. A töréspont vizsgálatokat elvégeztük a Student-féle t-teszten alapuló megközelítés nemparaméteres változatával, a Wilcoxon teszttel is.

EREDMÉNYEK

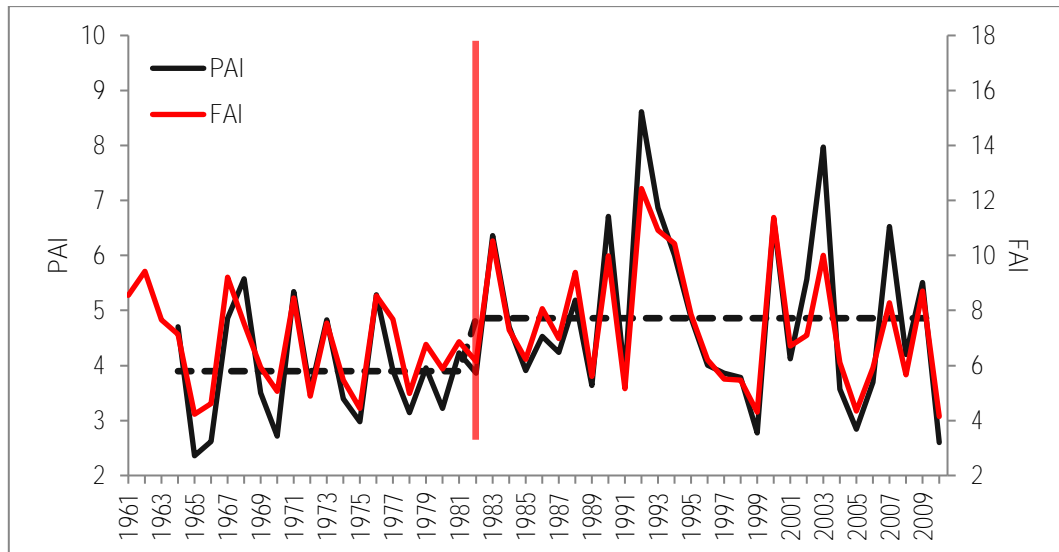
Az alkalmazott statisztikai próba segítségével definiálható töréspontokat és az így meghatározott részdíszorok néhány statisztikai jellemzőjét az 1. táblázat tartalmazza. Magukat a klímaadatokat grafikonon is ábrázoltuk az 1961-2010 közötti időszakra (2-3. ábra), lehetőséget adva egyben a PAI és FAI indexek közötti, illetve a PAI esetén az említett regionális különbségek jobb áttekintésére is.

A táblázatban közölt adatok és a grafikonok is az aszályesemények gyakoriságának és erélyének növekedését mutatják az 1980-as évek elejétől kezdődően. A grafikonok egyben a PAI és FAI indexek jó együttfutását is szemléltetik. Ennek ellenére, a FAI adatok esetén a szignifikáns töréspontok hiánya, láthatóan az erre az indexre jellemző 1976 és 1983 közötti „fokozatosabb átmenetnek” köszönhető (2. ábra). A regionális különbségek első-sorban az 1990-es évek eleji (Északi-középhegység) és a 2003-as (Dunántúl) aszályok intenzitásában figyelhetők meg (3. ábra). A grafikonokról szintén látható, hogy a Pettitt-teszt segítségével kimutatott töréspontok nem csupán a görbék magasabb átlagértékek irányába történő elmozdulását, de sokkal inkább az éves aszályértékek száraz extrém értékek irányába történő aszimmetrikus eltolódását jelentik (4. ábra).

1. táblázat: Az aszályindexek (Pálfai-féle – PAI és Forest Aridity Index – FAI) időszakaiban Pettitt-teszt segítségével azonosított töréspontok és az így definiált részdíszorok (P_1 , P_2) néhány statisztikai jellemzője Magyarország területére (HUN) és két regionális kivágatra (Északi-középhegység – ÉKKG és Nyugat-Dunántúl – NYDT). A vastag szedés szignifikáns változásokat jelöl ($p < 0,05$).

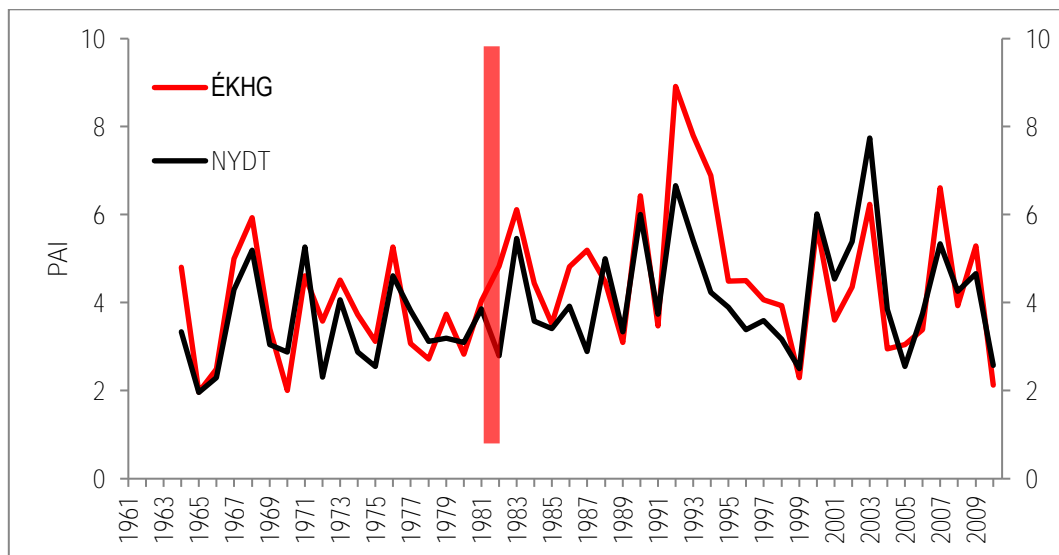
Table 1: Breakpoints defined with the Pettitt test in the time series of the Aridity Indices (PAI – Pálfai; FAI – Forest Aridity Index) and certain statistical characteristics of the time periods defined from these (P_1 , P_2) for the territory of Hungary (HUN) and two regional quadrangles (Mountains of Medium Height (ÉKKG) and Western Transdanubia (NYDT)). Bold text indicates significant changes ($p < 0,05$).

	PAI						FAI					
	HUN		ÉKKG		NYDT		HUN		ÉKKG		NYDT	
töréspont	1982		1981		1982		1995		1996		1982	
p-érték	0,19		0,31		0,09		1,05		0,93		0,95	
átlag $P_1 P_2$	3,90	4,86	3,69	4,69	3,43	4,26	7,35	6,73	7,09	6,08	6,73	7,65
szórás $P_1 P_2$	1,01	1,55	1,17	1,60	0,97	1,31	2,09	2,06	2,19	1,61	1,61	2,53



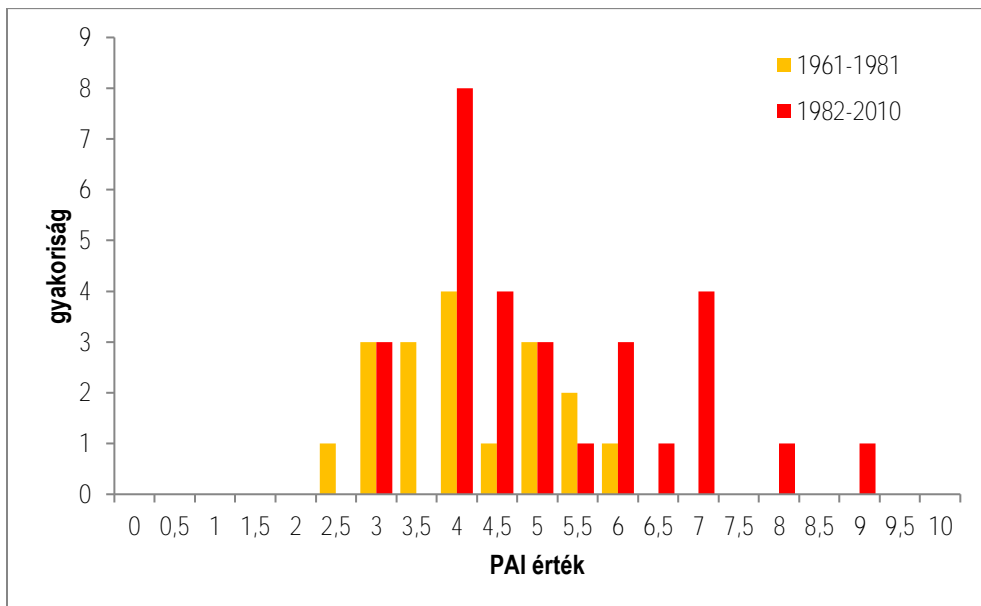
2. ábra: A Pálfi (PAI) és a Forest Aridity Index (FAI) magyarországi átlagos idősorai 1961 és 2010 között, a töréspont által meghatározott részdőszakok PAI átlagaival. (Adatok forrása: CARPATCLIM.)

Figure 2: Time series of the yearly averages of the Pálfi and the Forest Aridity Indices between 1962 and 2010 with the averages of PAI for the two periods defined with the breakpoint analysis. (Source of data: CARPATCLIM.)



3. ábra: A Pálfi-féle aszályindex (PAI) idősorai 1961 és 2010 között az Északi-középhegység (ÉKHG) és a Nyugat-Dunántúl (NYDT) térségére. (Adatok forrása: CARPATCLIM.)

Figure 3: Time series of the Pálfi Aridity Index between 1961 and 2010 for the Northern Mountains of Medium Height (ÉKHG) and for Western Transdanubia (NYDT). (Source of data: CARPATCLIM.)



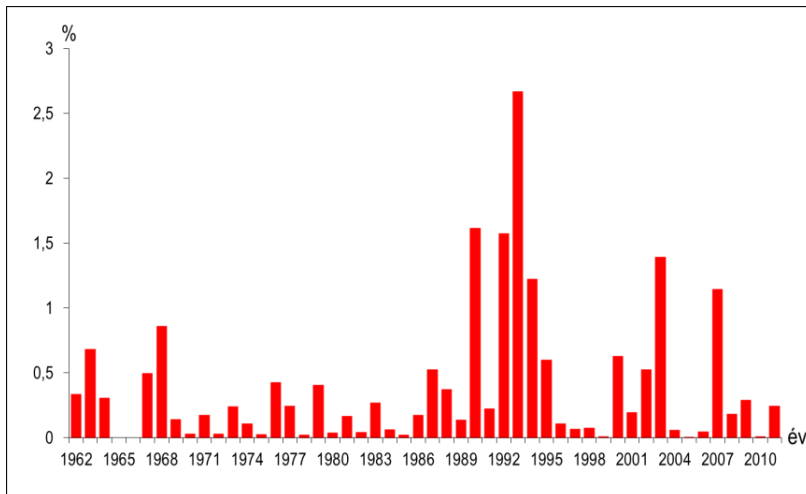
4. ábra: A Pálfi-féle aszályindex (PAI) országos átlagértékeinek eloszlása a töréspont-elemzés által meghatározott 1961-1981 és 1982-2010 időszakokra.

Figure 4: Frequency distribution of the yearly average values of the Pálfi Drought Index for two time periods (1961-1981 and 1982-210) defined by the breakpoint analysis.

A magyarországi erdőkárok a '60-as évektől napjainkig növekvő tendenciát mutatnak, ezen belül a biotikus és abiotikus károk is növekednek (Hirka et al. 2009).

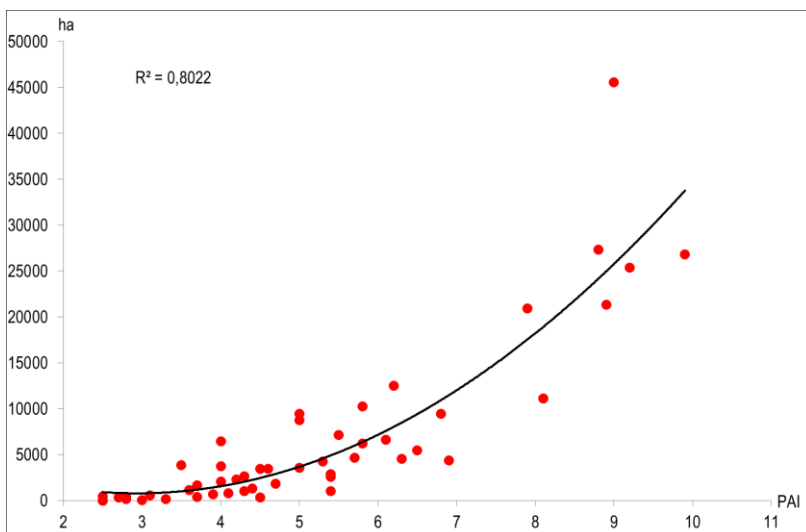
A jelentett károk esetében az aszálykárok alatt erdei fáknál az idő előtt bekövetkező lombszáradást, lombhullást értjük, amely más biotikus okokra közvetlenül nem vezethető vissza. Az aszály hatása általában ritkán vezet közvetlenül az adott évben a faegyed elpusztulásához, de gyengíti a fák ellenálló képességét, melynek következtében egyes rovarok és kórokozók károsítása felerősödhet. Az adott évben történő fapusztulás (kiszáradás) általában a fiatalabb faegyedek esetében jellemző. Emellett jelentős növedékvesztés is kialakulhat (Führer 1995).

Az 1962-2011-es időszakban az aszálykárok évente eltérő mértékben, éves átlagban 6269 ha-on sújtották a magyar erdőket (5. ábra). Egyes években nincs, vagy alig érzékelhető a kár, míg más években több 10 ezer ha-ról is jelentik. Ez az abiotikus kárforma jelentkezett eddig legnagyobb területen erdeinkben, 1993-ban, több mint 45 ezer ha-on. Az időszak második felében egy emelkedő tendencia figyelhető meg. Az évek közötti jelentős változatosság egyébként más országokban, így pl. Finnországban is jellemző (Muukonen et al. 2015).



5. ábra: Éves összesített aszálykárok Magyarországon az erdőterület arányában 1962 és 2011 között. (Adatok forrása: Erdészeti Tudományos Intézet erdőkár adatbázis.)

Figure 5: Forest drought damage in the Hungarian Forests between 1962 and 2011 in percentage of the actual forest land. (Source of data: forest damage database of the Forest Research Institute.)

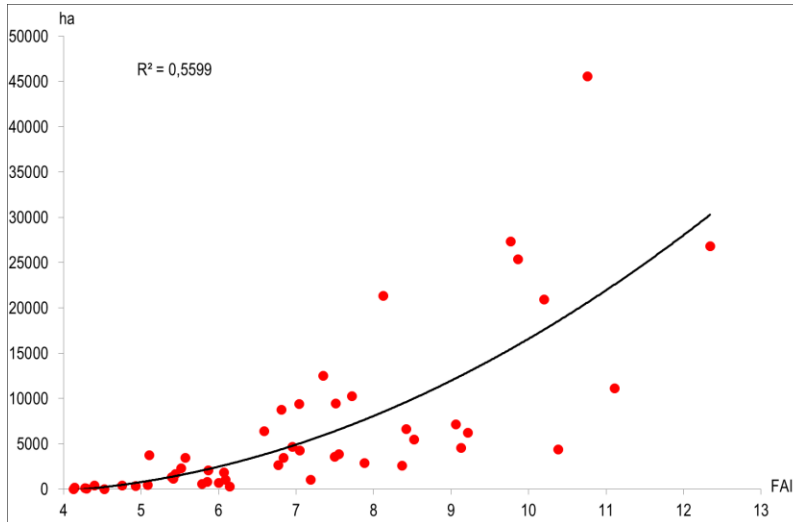


6. ábra: Összefüggés a Pálfi-féle aszályindex és az erdei aszálykárok között. (Adatok forrása: Erdészeti Tudományos Intézet erdőkár adatbázis; Dr. Pálfi Imre.)

Figure 6: Correlation of the Pálfi Aridity Index and the yearly forest drought damage. (Source of data: forest damage database of the Forest Research Institute; Dr. Imre Pálfi.)

Az éves káradatok összevetése a PAI-val, ill. a FAI-val, mindkét esetben szoros, szignifikáns összefüggést adott ($R^2=0,80$, ill. $R^2=0,56$) $p<0,001$ szinten (6., 7. ábra). Aszályos években tehát a jelentett aszálykárok nagysága is magas, sőt az is megfigyelhető, hogy ha

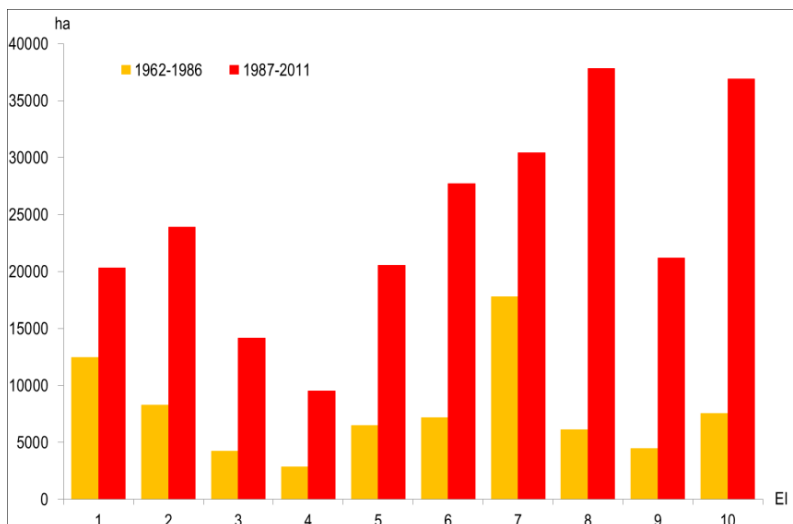
egymást követik az aszályos évek (pl. 1992-1993-ban), akkor kiugróan magas aszálykárak alakulhatnak ki. Megjegyzendő továbbá, hogy ezek az összefüggések exponenciális jellegűek.



7. ábra: Összefüggés a Forest Aridity Index és az erdei aszálykárak között.

(Adatok forrása: Erdészeti Tudományos Intézet erdőkár adatbázis; Dr. Führer Ernő.)

Figure 7: Correlation of the Forest Aridity Index and the yearly forest drought damage.
(Source of data: forest damage database of the Forest Research Institute; Dr. Ernő Führer.)



8. ábra: Erdei aszálykárak Magyarországon az 1962-1986 és az 1987-2011-es időszakokban a KH Erdészeti Igazgatóságai szerint. (Adatok forrása: Erdészeti Tudományos Intézet erdőkár adatbázis.)

Figure 8: Average values of forest drought damage for two periods (1962-1986; 1987-2011) by Forestry Directorates. (Source of data: forest damage database of the Forest Research Institute.)

Az aszálykárók területi megoszlása változatos képet mutat (8. ábra). Egyes Erdészeti Igazgatóságok (EI) területén az aszálykárók az 1962-2011-es időszakban kisebb mértékben emelkedtek (pl. 1, 7 EI), míg másokban (pl. 5, 10 EI) erőteljes növekedés volt megfigyelhető. Amennyiben az időszakot két egyenlő részre osztjuk, megfigyelhető, hogy különbségek vannak a két időszakban az egyes EI-k esetében. Mindegyik EI esetében megállapítható, hogy az utóbbi 25 év aszálykárai meghaladták az előző 25 év aszálykárait. A legjelentősebb növekedés a 8-as és 10-es EI esetében figyelhető meg. A legnagyobb arányú növekedés nem az alföldi „klasszikus” aszályos területeken, mint pl. a Duna-Tisza közén volt, hanem a hegyvidéki területeken (pl. Mátra, Cserhát, Börzsöny).

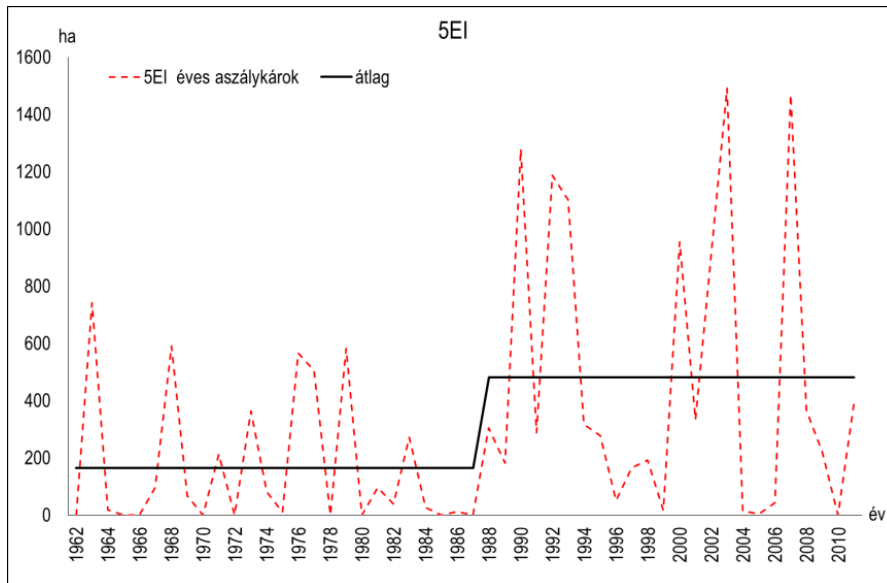
Az egyes részigazgatóságok közötti jelentős különbségek statisztikai elemzésére a Pettitt-féle töréspont vizsgálatot alkalmaztuk. A töréspont elemzéséhez 50 éves adatsorok álltak rendelkezésre 10 helyről, amikből országosan egyesített adatsort is képeztünk.

A kapott eredmények azt mutatják (2. táblázat), hogy a 1, 3 és 7-es régiók kivételével az ország jelentős részén (2, 4, 5, 6, 8, 9, 10 EI területek), beleértve az országos átlagot is, szignifikáns növekedés adódott. A legszorosabb összefüggést mutató terület, ill. az összeített adatsor idősor adatait grafikonon is ábráztuk (9., 10. ábra). A töréspont vizsgálatot elvégeztük a Student-féle t-teszten alapuló megközelítés nemparaméteres változatával, a Wilcoxon teszttel is. A két megközelítés ugyanazt az eredményt hozta.

2. táblázat: Pettitt-teszt eredményei (TP=töréspont, EI=Erdészeti Igazgatóság, átlag1, átlag2: a töréspont előtti és az azt követő időszak átlaga). A szignifikáns értékek vastagon szedve.

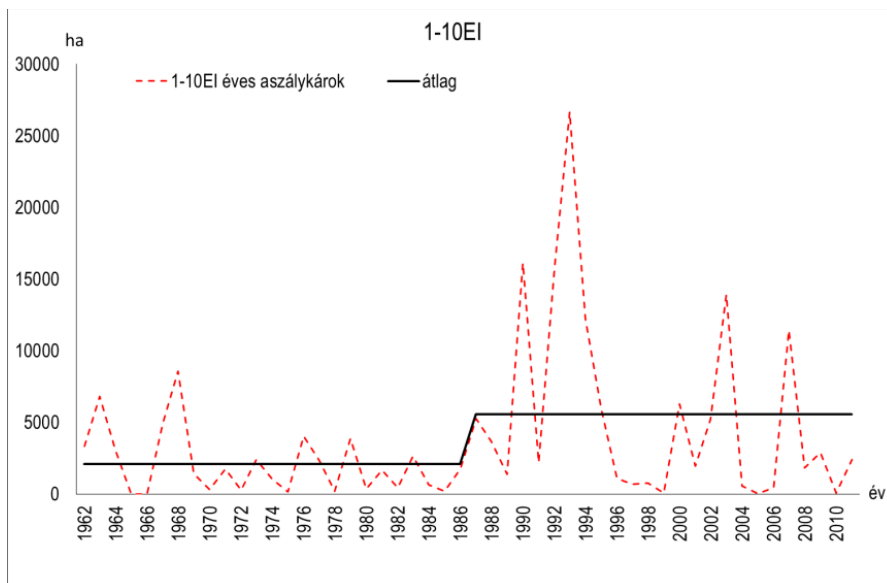
Table 2: Results of the Pettitt breakpoint analysis (TP= breakpoint; EK=Forestry Directorate; „átlag1” and „átlag2” averages of the periods before and after the breakpoint). The significant values are given in bold.

EI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1-10
TP (év)	1995	1989	1989	1989	1987	1985	1995	1985	1988	1989	1986
p-érték	0,95	0,15	0,53	0,32	0,03	0,33	1,03	0,15	0,13	0,11	0,36
átlag1	454,9	207,0	104,1	68,2	164,5	192,7	627,5	156,9	114,3	182,2	2075,8
átlag2	277,8	609,4	364,5	246,0	481,9	620,3	496,6	847,0	532,7	957,2	5545,4
különbség	-177,1	402,4	260,4	177,8	317,5	427,6	-130,9	690,1	418,5	775,0	3469,6



9. ábra: Pettitt-féle töréspont elemzés eredménye az 5EI aszálykár adatainak felhasználásával. (Adatok forrása: Erdészeti Tudományos Intézet erdőkár adatbázis.)

Figure 9: Results of the Pettitt breakpoint analysis for Forestry Directorate 5. (Source of data: forest damage database of the Forest Research Institute.)



10. ábra: Pettitt-féle töréspont elemzés eredménye az 1-10EI aszálykár adatainak felhasználásával. (Adatok forrása: Erdészeti Tudományos Intézet erdőkár adatbázis.)

Figure 10: Results of the Pettitt breakpoint analysis for Forestry Directorate 1-10. (Source of data: forest damage database of the Forest Research Institute.)

MEGVITATÁS

Magyarországon az utóbbi, mintegy 3 évtizedben jelentősen növekedett az aszályok gyakorisága és súlyossága. Nem meglepő módon, ezzel szoros összefüggésben drasztikusan növekedett az erdei aszálykárók mértéke is. Külön is megjegyzendő, hogy az éves aszálykárók nagysága mindkét aszályindex-szel (PAI és FAI) közel exponenciális összefüggést mutat. Továbbá az is, hogy az erdei aszálykárók az utóbbi időkben már egyáltalán nem korlátozódnak a síkvidéki mesterséges erdőfelújításokra, ahogyan az korábban jellemző volt, hanem akár hegyvidéki őshonos fafajú állományainkban is jelentősek lehetnek. Hazai tanulmányok is bizonyítják, hogy a kocsánytalan tölgyesek és a bükkösök egészségi állapotát az időjárási viszonyok (nevezetesen az aszályos időszakok) alapvetően befolyásolják (Csóka et al. 2007; Janik et al. 2016).

A tíz régióból hétben szignifikáns, egyben pedig nem szignifikáns növekedést mutatkozott (2. táblázat). Két régióban (1, 7) mutatkozott nem szignifikáns csökkenés a töréspontok által meghatározott első és második időszak átlaga között. Ez a tény (még ha a két régióban a csökkenés nem is volt szignifikáns) felhívja figyelmet a régiónkénti változatoság jelentőségére.

Sajnos a teljes vizsgált időszakra vonatkozóan nem volt lehetőségünk finomabb felbontásban vizsgálni azt, hogy az erdei aszálykárók milyen fafajú és korú állományban jelentkeztek. Ennek ismerete azért lehetne hasznos, mert pl. a FAI kifejezetten a folyónövedék kulminációja utáni korosztályokban, a fő növekedési szakaszra épít, így az idősebb állományok éven belüli fő szervesanyag-képzési időszakára érzékeny. A PAI ezzel szemben egy tágabb időszak változóiból képzett index, így a fiatalabb állományokban bekövetkező aszálykároknak jobb prediktora lehet. A két aszályindex összehasonlításánál ezeket a szempontokat mindenkor figyelembe kell venni, azzal együtt is, hogy az összesített erdei aszálykárokat mindkét index rendkívül nagy mértékben magyarázza. Mivel a magyar erdők túlnyomó része többlet vízhatástól független termőhelyen tenyészik (azaz vízháztartásában a helyi csapadékra utalt) a növekvő mértékű aszályosság növekedésükre és egészségi állapotukra is jelentős negatív hatást gyakorol. A közvetlenül, az adott évben kiváltott fapusztulás elsősorban a fiatalabb állományokra (különösen az erdősítésekre) jellemző, de a hosszabb távon jelentkező közvetett hatások idősebb állományokat is sújthatnak. Az aszálynak az erdőben – a közvetlen hatások mellett – számos egyéb hatása is ismert, többek között meghatározó szerepe van az erdei rovarok népességének, és így az általuk okozott károk alakulásában (Mattson & Haack 1987; Leskó et al. 1994; Szentkirályi et al. 1994, 1997; Csóka & Leskó 1995; Csóka 1996, 1997ab; Klapwijk et al. 2013; Kolb et al. 2016). A teljesség igénye nélkül hazai példa erre a zöld karcsúdíszbogár (*Agrilus viridis*) 2000-es évek elején, Zalában kialakult, korábban nem tapasztalt tömegszaporodása (Lakatos & Molnár 2009; Molnár et al. 2010), vagy akár a gyapjaslepke kártételeinek vertikális kiterjedése, ill. tömeges fellépése bükkösökben a 2000-es évek közepén (Csóka & Hirka 2009; Csóka et al. 2015). További példaként említhető, hogy az Európában area-expanziót mutató tölgy búcsújáró lepke népességének fluktuációiban is az aszályosság meghatáro-

zó, pozitív szerepet játszik (Csóka et al. 2018). Az aszályos időjárás elősegítheti idegenhonos rovarfajok megtelepedését és terjedését (Csóka et al. 2012, Csóka & Hirka 2011), de egyes nem őshonos kórokozók (pl. *Chalara fraxinea*) tömeges fellépését és jelentős károkozását is. Ugyanakkor egyes, korábról is ismert kórokozók jelentősége is megnövekedhet az aszályos időjárás következtében, mint pl. a *Biscogniauxia mediterranea* (Jurc & Ogris 2006, Vettrano et al. 2002) és a *Cenangium ferruginosum* esetében (Jurc et al. 2000, Kunca & Leontovic 2013), ill. pusztulási folyamatot generálhat lombos- és fenyőállományokban egyaránt (Koltay 1995, 2002, Pernek et al. 2012).

Ismételten megjegyzendő, hogy általában nem az aszályosság önmagában okoz jelentős fapusztulást (kivéve a fiatal állományokat), hanem az aszálystressz miatt legyengült faegyedeken/állományokban fellépő kárláncolatok, amelyekben fafajtól, helytől, időtől függően más-más közreműködő fajok játszhatnak jelentős szerepet. Okkal feltételezhető, hogy a gyakoribbá és súlyosabbá váló aszályok miatt egyre gyakoribbá fognak válni ezek a kárláncolatok is, ami az erdők egészségi állapotának jelentős romlásához, tömeges fapusztuláshoz is vezethet. Ezt támasztja alá az a tény is, hogy vizsgált időszakban nemcsak az aszálykárok (illetve más abiotikus erdőkárok), hanem a biotikus erdőkárok területe is növekedett.

Amennyiben a jövőben a klímaváltozás következtében számítani lehet fokozódó aszályos időjárásra (Gálos et al. 2007), akkor az aszálykárok további, kimagasló növekedése is várható. A más időjárási extrém szituációk (kései fagyok, viharok, ónos, eső, stb.) gyakoriságának növekedése várhatóan még tovább súlyosbítja a helyzetet. Ennek megfelelően a kárrizikó csökkentésére, valamint az ellenálló-, illetve visszaszerző-képesség javítására irányuló erdőgazdálkodásnak, erdőművelésnek az eddigieknél sokkal nagyobb teret kell kapnia. A reaktív (a kialakult helyzetre rövidtávon reagáló) erdőművelés/erdővédelem helyett a proaktív (hosszú távú megelőző) szemlélet elfogadása és gyakorlása teljességgel elkerülhetetlennek látszik.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az aszálykárokkal kapcsolatos kutatómunkánkat a VKSZ_12-1-2013-0034-Agrárklíma.2 projekt támogatásával végeztük. Köszönettel tartozunk Dr. Pálfai Imrének és Dr. Führer Ernőnek, akik rendelkezésünkre bocsátották az általuk kifejlesztett aszályindexek adatait.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., et al. 2010: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660–684. DOI: [10.1016/j.foreco.2009.09.001](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001)

- Assal T.J., Anderson P.J. & Sibold J. 2016: Spatial and temporal trends of drought effects in a heterogeneous semi-arid forest ecosystem. *Forest Ecology and Management* 365: 137–151. DOI: [10.1016/j.foreco.2016.01.017](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.017)
- Bendixsen D.P., Hallgren S.W. & Frazier A.E. 2015: Stress factors associated with forest decline in xeric oak forests of south-central United States. *Forest Ecology and Management* 347: 40–48. DOI: [10.1016/j.foreco.2015.03.015](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.015)
- Bréda N., Huc R., Granier A. & Dreyer E. 2006: Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625–644. DOI: [10.1051/forest:2006042](https://doi.org/10.1051/forest:2006042)
- Bús M. 1995: Az erdei aszálykár és a fafajok szárazságtűrésének vizsgálata a Bakonyban és a Balatonfelvidéken. In: Tar K., Berki I. & Kiss Gy. (eds): **Erdő és klíma I. kötet**, Noszvaj, 209–216.
- Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sánchez G. & Penuelas J. 2011: Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 1–5. DOI: [10.1073/pnas.1010070108](https://doi.org/10.1073/pnas.1010070108)
- Csóka Gy. 1996: **Aszályos évek-fokozódó rovarkárok** erdeinkben. *Növényvédelem* 32(11): 545–551.
- Csóka Gy. 1997a: **Aszályosság és az erdei rovarkárok**. In: Tar K. & Szilágyi K. (eds): **Erdő és Klíma II. kötet**, Sopron, 90–93.
- Csóka Gy. 1997b: Increased insect damage in Hungarian forests under drought impact. *Biologia* 52(2): 1–4.
- Csóka Gy. & Hirka A. 2009: A gyapjaslepke (*Lymantria dispar* L.) legutóbbi tömegszaporodása Magyarországon. *Növényvédelem* 45(4): 196–201.
- Csóka Gy. & Hirka A. 2011: Alien and invasive forest insects in Hungary (a review). In: Delb H. & Pontual S. (eds): *Biotic Risks and Climate Change in Forests*, Proceedings of the 10th IUFRO Workshop of WP 7.03.10 „Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe”, September 20–23, 2010, Freiburg, Germany, 54–60.
- Csóka Gy., Hirka A. & Szócs L. 2012: **Rovarglobalizáció a magyar erdőkben**. *Erdészettudományi közlemények* 2(1): 187–198.
- Csóka Gy., Hirka A., Szócs L., Móricz N., Rasztovíts E. & Pödör Z. 2018: Weather-dependent fluctuations in the abundance of the oak processionary moth, *Thaumetopoea processionea* (Lepidoptera: Notodontidae). *European Journal of Entomology* 115: 249–255. DOI: [10.14411/eje.2018.024](https://doi.org/10.14411/eje.2018.024)
- 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. kötet**, Sopron, 229–239.
- Csóka Gy., Koltay A., Hirka A. & Janik G. 2009: Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyesek és bükkösök egészségi állapotára. *Klíma-21 Füzetek* 57: 64–73.
- Csóka Gy. & Leskó K. 1995: Klimatikus anomáliákat indikáló erdei rovarok. In: Tar K., Berki I. & Kiss Gy. (eds): **Erdő és klíma I. kötet**, Noszvaj, 163–170.
- Csóka Gy., Pödör Z., Nagy Gy. & Hirka A. 2015: Canopy recovery of pedunculate oak, Turkey oak and beech trees after severe defoliation by gypsy moth (*Lymantria dispar*): Case study from Western Hungary. *Forestry Journal (Lesnicki Casopis)* 61: 143–148. DOI: [10.1515/forj-2015-0022](https://doi.org/10.1515/forj-2015-0022)
- Führer E. 1995: Az időjárás változásának hatása az erdő fatermő képességére és egészségi állapotára. *Erdészeti Lapok* 130(6): 176–178.
- Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A. & Szabados I. 2011: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás* 115(3): 205–2016.
- Gálos B., Lorenz Ph. & Jacob D. 2007: Will dry events occur more often in Hungary in the future? *Environmental Research Letters* 2(3): 034006. DOI: [10.1088/1748-9326/2/3/034006](https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/3/034006)
- Hirka A. & Csóka Gy. 2010: Abiotikus károk Magyarország erdeiben. *Növényvédelem* 46(11): 513–517.
- Hirka A., Csóka Gy. & Szabóky Cs. 2009: Mit gondolnak az erdei rovarok a klímaváltozásról? In: Lakatos F. & Kúri B. (eds): **NYME Erdőmérnöki Kar, Kari Tudományos Konferencia Kiadvány**, Sopron, 172–175.
- Hlásny T., Mátyás Cs., Seidl R., Kulla L., Merganičova K., Trombik J., et al. 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Forestry Journal (Lesnicki Casopis)* 60: 5–18. DOI: [10.2478/forj-2014-0001](https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001)



- Hubbart J.A., Guyette R. & Muzika R-M. 2016: More than Drought: Precipitation Variance, Excessive Wetness, Pathogens and the Future of the Western Edge of the Eastern Deciduous Forest. *Science of Total Environment* 566-567: 463–467. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.05.108](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.108)
- 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)
- Jurc D., Jurc M., Sieber T.N. & Bojovic S. 2000: Endophytic *Cenangium ferruginosum* (Ascomycota) as a Reservoir for an Epidemic of *Cenangium* Dieback in Austrian Pine. *Phyton*, Special issue: „Root-soil interactions” 40(4): 103–108.
- Jurc D. & Ogris N. 2006: First reported outbreak of charcoal disease caused by *Biscogniauxia mediterranea* on Turkey oak in Slovenia. *Plant Pathology* 55: 299. DOI: [10.1111/j.1365-3059.2005.01297.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2005.01297.x)
- Klapwijk M.J., Csóka Gy., Hirka A. & Björkman Ch. 2013: Forest insects and climate change: long-term trends in herbivore damage. *Ecology and Evolution* 3(12): 4183–4196. DOI: [10.1002/ece3.717](https://doi.org/10.1002/ece3.717)
- Kolb T.E., Fettig Ch.J., Ayres M.P., Bentz B.J., Hicke J.A., Mathiasen R., et al. 2016: Observed and anticipated impacts of drought on forest insects and diseases in the United States. *Forest Ecology and Management* DOI: [10.1016/j.foreco.2016.04.051](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.051)
- Koltay A. 1995: Abiotikus és biotikus tényezők szerepe a feketefenyő állományok pusztulásában. In: Tar K., Berki I. & Kiss Gy. (eds): *Erdő és klíma I. kötet*, Noszvaj, 236–240.
- Koltay A. 2002: A magyarországi feketefenyő hajtáspusztulás történeti áttekintése. *Erdészeti Kutatások* 90: 247–254.
- Kunca A. & Leontovic R. 2013: Pines dieback caused by *Cenangium ferruginosum* Fr. in Slovakia in 2012. *Folia Oecologica* 40(2): 220–224.
- Lakatos F. & Molnár M. 2009: Mass mortality of beech (*Fagus sylvatica*) in South-West Hungary. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 5: 75–82.
- Leskő K., Szentkirályi F. & Kádár F. 1994: Gyapjaslepke (*Lymantria dispar* L.) populációk fluktuációs mintázatai 1963-1993 közötti időszakban Magyarországon. *Erdészeti Kutatások* 84: 163–176.
- Lindner M., Fitzgerald J. B., Zimmermann N. E., Reyer Ch., Delzon S., van der Maaten E., et al. 2014: Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146: 69–83. DOI: [10.1016/j.jenvman.2014.07.030](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030)
- Mares C. & Mares I. 1994: Climate change-points in the precipitation time series from Romania. In: *Atmospheric Physics and Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields* (Proceedings of the meeting), Rome, 176–180.
- Mattson J.W. & Haack R.A. 1987: The Role of Drought in Outbreaks of Plant-eating Insects. *Bioscience* 37: 110–118. DOI: [10.2307/1310365](https://doi.org/10.2307/1310365)
- Mátyás Cs., Führer E., Berki I., Csóka Gy., Drüszler 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.
- Muukonen P., Nevalainen S., Lindgren M. & Peltoniemi M. 2015: Spatial occurrence of drought-associated damages in Finnish boreal forests: results from forest condition monitoring and GIS analysis. *Boreal Environment Research* 20: 172–180.
- Pálfai I. 2002: Az aszály befolyásoló tényezői és mérőszámai. *Vízügyi Közlemények* 3: 258–263.
- Pernek M., Novak Agbaba S., Lackovic N., Dod N., Lukic I. & Wirth S. 2012: The role of biotic factors on pine (*Pinus* spp.) decline in north Dalmatia. *Sumarski list* 136: 343–354.
- Poulos H.M. 2014: Tree mortality from a short-duration freezing event and global-change-type drought in a Southwestern piñon-juniper woodland, USA. *PeerJ* 2: e404. DOI: [10.7717/peerj.404](https://doi.org/10.7717/peerj.404)
- Schwantes A.M., Swenson J.J. & Jackson R.B. 2016: Quantifying drought-induced tree mortality in the open canopy woodlands of central Texas. *Remote Sensing of Environment* 181: 54–64. DOI: [10.1016/j.rse.2016.03.027](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.027)

- Sneyers R. 1992: On the use of statistical analysis for the objective determination of climate change. *Meteorologische Zeitschrift* 1(5): 247–256. DOI: [10.1127/metz/1/1992/247](https://doi.org/10.1127/metz/1/1992/247)
- Suarez M.L., Ghermandi L. & Kitzberger Th. 2004: Factors predisposing episodic drought-induced tree mortality in *Nothofagus* – site, climatic sensitivity and growth trends. *Journal of Ecology* 92: 954–966. DOI: [10.1111/j.1365-2745.2004.00941.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2004.00941.x)
- Szentkirályi F., Leskó K. & Kádár F. 1994: Jeleznek-e klímaváltozást a fénycsapdás rovargyűjtések? In: Tar K., Berki I. & Kiss Gy. (eds): *Erdő és klíma I. kötet*, Noszvaj, 171–177.
- Szentkirályi F., Leskó K. & Kádár F. 1997: Aszályos évek hatása rovarpopulációk hosszú távú fluktuációs mintázatára. In: Tar K. & Szilágyi K. (eds) 1997: *Erdő és Klíma II. kötet*, Sopron, 94–98.
- Thomas F.M., Blank R. & Hartmann G. 2002: Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277–307. DOI: [10.1046/j.1439-0329.2002.00291.x](https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2002.00291.x)
- Vettrano A.M., Barzanti G.P., Bianco M.C., Ragazzi A., Capretti P., Paoletti E., et al. 2002: Occurrence of *Phytophthora* species in oak stands in Italy and their association with declining oak trees. *Forest Pathology* 32: 19–28. DOI: [10.1046/j.1439-0329.2002.00264.x](https://doi.org/10.1046/j.1439-0329.2002.00264.x)

On-line irodalom

- Szalai S., Auer I., Hiebl J., Milkovich J., Radim T., Stepanek P., et al. 2013: Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report. www.carpatclim-eu.org.

*Érkezett: 2018. május 1.
Közlésre elfogadva: 2018. május 28.*



Lendvai szőlőhegyek

Fotó: Jankó Ferenc (SOE)

A KLÍMAÉRTÉKELÉS ERDÉSZETI VONATKOZÁSAI

Führer Ernő

NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, Erdőművelési és Ökológiai Osztály – Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar

Kivonat

A klíma igen dinamikusan változó termőhelyi tényezővé vált, ezért szükséges az erdészeti klímaosztályozás ártértékelése, az eddigieknél tudományosabb, öko-fiziológiai alapokra helyezése. A klíma egzakt értékelése céljából kidolgoztunk egy olyan mutatószámot (erdészeti szárazsági mutatószám), mely alapján most már egzakt meteorológiai adatokkal tudjuk az erdészeti gyakorlatban alkalmazott klímakategóriákat jellemezni, térbelileg lehatárolni, és változásukat nyomon követni. Az erdészeti szárazsági mutató segítségével pontosíthatjuk az erdészeti adattár egyes erdőrészeleink klímabesorolását, ami önmagában is ágazatunk egyik legjelentősebb innovációs eredményének tekinthető. Az adattári klímabesorolás felülvizsgálata azért is fontos, mert a klímakategóriáknak általános erdőgazdálkodási összefüggései is vannak, azaz hozzájuk ökológiai, erdőművelési (technológiai) és ökonomiai feltételek kapcsolódnak. Az ezek között fennálló összefüggések mélyreható ismerete lehetővé teszi az erdészeti termőhely-tipológia korszerűsítését. Erre támaszkodva pedig kifejleszhető egy olyan Erdészeti Döntéstámogató Rendszer, melynek gyakorlati alkalmazásával az erdőgazdálkodás bizonyos kompromisszumok árán képes lesz a jövőbeni klímaváltozás kihívásainak megfelelni.

Kulcsszavak: erdészeti klímaosztályozás, erdészeti szárazsági mutató, erdészeti klímakategóriák.

FORESTRY ASPECTS OF CLIMATE EVALUATION

Abstract

In contrast to the other site factors, climate has shown a relative fast changes in the last decades. This emphasised the need of the rethink of the existing forest climate classification based on a more scientific, ecophysiological approach. For the more exact assessment of the climate, a new indicator (Forestry Aridity Index; FAI) has been developed that characterizes the forest climate categories with meteorological variables, thus the area of these categories and its observed and expected changes can be captured. FAI enables the more accurate climate categorization of the forest regions in the forest inventory, which is one of the most important innovation in the forestry sector. Revision of the climate classification of the inventory is important, since the categories have also general forest management contexts, i.e. ecological, management and economic conditions are associated with them. In-depth understanding of these relationships allows the renewal of forestry site typology. Based on this, it is possible to develop a Decision Support System for forestry that can be applied to adapt to climate change its impacts.

Keywords: climate classification in forestry, Forestry Aridity Index, forest climate categories.

KLÍMA ÉS AZ ERDŐ KAPCSOLATA

Már csaknem 150 éve köztudott, hogy a klíma, mint fontos termőhelyi tényező, nagymértékben és sokoldalúan hat az erdőkre. Nemcsak az egyes fafajok elterjedését és ezen keresztül az erdők összetételét határozza meg, hanem az éghajlat jellege az erdők átlagos szervesanyag-termelését, sőt a faanyag műszaki felhasználhatóságát is befolyásolja. Természetesen a rövidebb, néhány évre vagy évszakokra kiterjedő időszakok meteorológiai viszonyai is hatással vannak az erdők évi növedékére, magtermésére, egészségi állapotának alakulására, az erdei fauna fejlődésére, a tűzveszély fokozódására vagy csökkenésére, a fakitermelés és anyagmozgatás mikéntjére és a felújítási munkákra. Ezért a szakszerű és tartamos erdőgazdálkodás, valamint az erdők területének növelése indokolja a klimatikus tényezőknek, elsősorban a hőmérsékleti és csapadékviszonyoknak, valamint e két tényező változásának és változékonyságának alaposabb ismeretét.

A környezeti tényezők és az erdőtársulások között sokoldalú kölcsönhatás érvényesül, hő-, víz- és tápanyagforgalmuk általában dinamikus egyensúlyban van, amiben nemcsak a klíma erdőre gyakorolt hatása, hanem az erdő klímaszabályozó szerepe is megnyilvánul (Bonan 2008). Az erdő lokális léptékben a csapadék eloszlását, a levegő és a talaj hőmérsékleti változásait, a légáramlást és a levegő nedvességét befolyásolva különleges adottságokat teremt. Alapvető fontosságú kérdés jelenleg, hogy amikor klímánk már az elmúlt 50 évben is nagymértékben változott (Lakatos & Bihari 2011) és a jövőben az egyes előrejelzések alapján jelentősen változni fog (Bartholy et al. 2007, Gálos et al. 2015), akkor az erdei ökoszisztémák sajátos összetételük és szerkezetük révén miként tudnak e gyors folyamatokhoz alkalmazkodni és azokat működésükön keresztül befolyásolni.

Ezért az erdőben lezajló öko-fiziológiai folyamatok erdészeti aspektusainak feltárása, melyben szerepet kap a fafajok elterjedésének, vitalitásának és szervesanyag-termelésének (növedék) az eddigieknél alaposabb megismerése, a jövőbeli szakszerű és fenntartható erdőgazdálkodás megalapozását szolgálhatja.

ERDÉSZETI KLÍMAOSZTÁLYOZÁS MAGYARORSZÁGON

A klímát valamely hely, terület vagy kisebb-nagyobb földrajzi egység (táj, tájcsoport stb.) átlagos időjárásaként definiálhatjuk. Az átlagos szó jelzi, hogy az időjárás rendkívül változó, ezért az időjárási elemekből csak bizonyos mértékig lehet az éghajlatra következtetni. Az erdésznek azonban mindig az erdőgazdálkodás elvárásaira kell tekintettel lennie, amikor a klímát értékeli. Ennek megfelelően hazai vonatkozásban az alábbi, időben is egymásra épülő szempontok mentén fejlődött az erdészeti klímaértékelés.

Az erdő jelenlétének mérlegelése

Klimatikus szempontból leggyakrabban a hőmérséklettel és a csapadékkal jellemzünk egy-egy területet, de emellett nagyon szoros a kapcsolat a relatív légnedvesség és az erdők megjelenése között is. A transzspiráció intenzitása, a termőhely vízgazdálkodása ugyanis összefügg a relatív páratartalommal, aminek nagysága sok egyéb tényező mellett leginkább a hőmérsékletnek és a transzspirációhoz szükséges vizet szolgáltató csapadéknak a függvénye. Már a múlt század elején Kaminszki (1924) térségünk erdősültségét a 13 órakor mért relatív páratartalom 79-68%-áig terjedő évi középértékeivel, ill. a 13 órakor mért 64-50%-áig terjedő júliusi középértékekkel hozta kapcsolatba, vagyis a természetes erdősültségű területeknek legalább ilyen relatív légnedvességeknek kell lennie. Mivel hazánkban a 14 órás légnedvesség alacsonyabb a 13 óránál, ezért nálunk ezt az értéket vették számításba. Eszerint, a múlt századi megfigyelések alapján a kérdéses időpontban még az alföldi területek nagy része is elérte az 50%-os relatív páratartalmat, azaz a csapadéktól függő vízellátottság lehetővé teszi a zárt erdőtakaró jelenlétét (Magyar 1960). Az Alföld középső részén, ahol a júliusi 14 órás relatív páratartalom 50% alatti, már csak az erdő- és a sztyep klíma átmenete, az erdőssztyep klíma figyelhető meg. A sokéves csapadék azonban e területeken is eléri az 500 és 550 mm-t, ami még nem tekinthető a Köppen-féle szárazsági határ ($P=2(T+14)$) alapján sztyepterületnek (Köppen 1931). Ugyanis jelenleg az Alföldön a sokéves átlagcsapadék centiméterben kifejezett nagysága mindenhol nagyobb a 14-gyel növelt sokéves átlaghőmérséklet kétszeresénél. Az Alföld középső részén azonban az egyes évek több mint 30%-ában már sztyeplíma fordul elő, azaz szárazság uralkodik. Viszont, amilyen arányban kileng az Alföld klímája a szárazság irányába, ugyanolyan arányú kilengés figyelhető meg az ellenkező irányba is. Szerencsére az éves csapadékeloszlás nem tekinthető kedvezőtlennek, hiszen a nyári hónapokban esik a legtöbb csapadék.

A klímazonális fafajok elterjedésének figyelembevétele

Az 1960-70-es években, Kaminszki eredményeire építve Magyarországra kidolgozott erdészeti klímaosztályozás is a légnedvesség alapján történt. Hazai megfigyelések alapján az erdők zonális elterjedése és a júliusi 65%-os légnedvesség átlagvonala egybeesik (Járó 1962). Mivel a légnedvesség napi menetében az éjszakai órák, az évi menetében pedig a téli és tavaszi hónapok jelentős kiegyenlítést okoznak, ezért az átlagos adatok kevésbé jellemzik a fák számára döntő vízleadás mértékét. Így a zonális fafajok elterjedésének szétválasztására a júliusi 14 órás relatív páratartalom tűnt a legalkalmasabb mutatószámra (Járó 1972). Ezt alátámasztja Stefanovits (1963) azon megállapítása is, miszerint „az 50%-os légnedvességet jelentő vonal szinte tökéletes hasonmása annak, amit akkor kapunk, ha a csernozjom területeket határoljuk körül egy vonallal.” Ez a talajtanban ismert megállapítás alátámasztja azt a feltételezést, miszerint erdőtalajok elsősorban zonális erdőtársulások alatt alakulhattak ki.

A relatív légnedvesség havonkénti átlagai általában egy júliusi minimumot és egy decemberi maximumot mutatnak, ennek ellenére igen instabil meteorológiai elemnek mondható, mert mind térben, mind időben igen gyorsan változhat. Időbeli alakulását a termodinamikai (felmelegedés és lehűlés) és a cirkulációs (légáramlatok páraszállítása) folyamatok jelentősen befolyásolják. Mindenesetre, ami a területi eloszlását illeti, megfigyelhető, hogy általában a legalacsonyabb páratartalmú területeink egybeesnek a legmelegebb tájainkkal, viszont a téli (december) legnagyobb párateltségű területeink nem a leghidegebbek. Minthogy az év legmelegebb hónapjában a legalacsonyabb a levegő relatív nedvessége, természetes, hogy ekkor a vegetációk, köztük a faállományok párologtatása igen intenzív. Amennyiben a talajban a transzspirációhoz szükséges vízmennyiség nem áll a fafajok rendelkezésére, úgy egy bizonyos mértéken felül ennek kedvezőtlen hatása a növedékkiesésen és vitalitás-csökkenésen keresztül is megnyilvánulhat.

Tekintettel arra, hogy területi és időbeli változatosságuk miatt a légnedvességi átlagok is, hasonlóan a többi meteorológiai paraméterhez, csak korlátozott mértékben használhatók, odavezetett, hogy egy adott terület klímájának megállapítása közvetett úton, ún. klímaérzékeny fafajokkal történjék. Magyarországon erre alkalmas fafaj a bükk, a gyertyán, a kocsánytalan tölgy és a cser. 62 meteorológiai állomás adatai és környezetében lévő erdőtársulás alapján azt a következtetést vonták le, hogy bükkös klíma ott van, ahol a júliusi 14 órás légnedvesség átlaga 60%-nál magasabb, gyertyános-tölgyes a klíma, ahol 55% és 60% közötti, kocsánytalan tölgyes ill. cseres klíma 50-55% légnedvesség mellett jellemző, míg ahol 50% alatti ez az érték, az már fafajjal nem jellemezhető, ún. erdőssztyep klímájú (Járó 1972). Ezen értékeket további klímaállomások bevonásával a későbbiekben felülvizsgáltuk, és a fenti határokat 2%-kal lejjebb húztuk meg (Führer & Járó 2000). E klímaosztályozás még ma is szerves részét képezi az erdészeti termőhely-tipológiának.

A fafajok éven belüli növekedését és vitalitását tekintetbe vevő értékelés

A XXI. század legnagyobb kihívásai közé tartozik a klímaváltozás. Ennek számos következménye látható az erdőgazdálkodás vonatkozásában is, a korábbi céloktól eltérően általános kérdésként fogalmazódik meg a kutatás felé, hogy

- mik és milyenek az erdei ökoszisztémák reakciói a változatos és egyre inkább változó környezetre?
- erdőgazdálkodás révén hogyan teljesíthetjük az ökológiai és ökonómiai funkciók egyidejű érvényesítését?
- mi módon marad és lesz ágazatunk versenyképes?

A feltett kérdések megválaszolásához ezért az eddigiektől eltérően elengedhetetlen a klíma olyan értékelése, amely figyelembe veszi az erdő legfontosabb produktumának, a faanyagának a képződésével összefüggő öko-fiziológiai folyamatokat, és bizonyos mértékig az erdei fák életképességét befolyásoló klimatikus körülményeket is. A fák és a faállományok

növekedési feltételeinek minél alaposabb feltárása a klímaváltozás ökonómiai következményei (Führer et al. 2013) és az erdők klímavédelmi szerepe miatt is egyre inkább sürgető kutatási feladattá válik. Az erdészeti termőhely-tipológiában alkalmazott klímaértékelés továbbfejlesztése még azért is szükséges, mert

- a fajok elterjedése a 200 évre visszatekintő szakszerű erdőgazdálkodás miatt módosult,
- a relatív légnedvesség-mérések az erdészeti kiértékelésekhez megfelelő területi eloszlásban nem állnak rendelkezésünkre,
- az erdészeti klímakategóriák jellemzéséhez nincs elegendő egzakt meteorológiai adat, ami megalapozná a jövőre vonatkozó klíma-előrejelzéseket.

Ezért olyan klímaosztályozásra van szükség, amely támaszkodva a múlt eredményeire:

1. a fajok elterjedése mellett figyelembe veszi
 - azok növekedési szakaszainak (fő növekedési periódus: V–VIII. hó) időjárási viszonyait,
 - a fajok egészségi állapotát jelentősen befolyásoló időszakok (kritikus periódus: VII–VIII. hó) időjárási körülményeit,
2. továbbá olyan meteorológiai adatokra épít,
 - melyeket az országban sok helyen, nagy pontossággal hosszú idő óta mérnek és nem matematikai modellek segítségével számítanak,
 - területi és időbeli extrapolálásuk nagy biztonsággal megoldható,
 - származtatott index képzésére alkalmazhatóak,
 - és amelyek korszerű adatbázisokban a felhasználók számára rendelkezésre állnak.

A növekedés és szervesanyag-képzés öko-fiziológiai folyamatainak megvilágítása

A fák éves növekedésének vizsgálatakor meg kell különböztetni a tényleges növekedési periódust és az erdészeti gyakorlatban az időjárás jellemzésére sematikusán használatos vegetációs periódust (IV-X. hónapok). Vegetációs időszak alatt azt a periódust értjük, amelyben a potenciális növekedés megvalósulhat. A mérsékelt övi klímában általában a kései és a korai fagyok közötti időszakot értjük alatta (Linderholm 2006). A növekedési periódus pedig az az időszak, amiben a fák tényleges növekedése (hajtás- vagy vastagsági) bekövetkezik, vagy egyéb fiziológiai folyamatok, mint pl. a rügszerkezet képződése megvalósul. Tekintettel arra, hogy Magyarország természetföldrajzi viszonyai jelentősen eltérnek Európa más országaitól, nagyobb hangsúlyt adunk a tudományos háttér megvilágításánál a magyarországi tanulmányok ismertetésének. Magyarországon több fajon végzett törzsvastagsági növekedésment-megfigyelések igazolták, hogy a vastagsági szervesanyag-képzés több



mint 80%-a a május és augusztus közötti időszakban, a többi pedig e hónapokat megelőzően és utána történik (Szőnyi 1962, Halupáné 1967, Járó & Tátraaljaié 1985, Führer 1995, Manninger 2004, Führer et al. 2016). Ebben az ún. fő növekedési szakaszban a fák fotoszintézise intenzív, továbbá víz- és tápanyag-hasznosítása nagy. Természetesen a teljes növekedési periódus tényleges hossza, azaz kezdete és befejeződése közötti időszak az időjárási viszonyoktól függően évről évre változhat. A vastagsági növekedés maximális mértéke Magyarország természetföldrajzi viszonyai mellett szinte valamennyi fafajnál júniusra tehető. A nettó fotoszintézis mértéke ebben a hónapban a legnagyobb, ami nagyban függ az időjárástól. A fák vastagsági növekedésének mértéke tehát a fotoszintézist közvetlenül befolyásoló tényezőktől, elsősorban az időjárástól függ (Lyr & Hoffmann 1992). Különösen érzékenyen reagálnak az éven belüli növekedésükön keresztül a fák az olyan időjárási szélsőségekre, mint amilyen pl. az aszály vagy az asszimiláló felület rovar- és/vagy gombakárosítás miatti csökkenése. Magyarországon, mint állandósult éghajlati jellemvonás, gyakran fordul elő nyáron csapadékhiány és magas hőmérséklet. E tényezők külön-külön is, de főleg ha együtt lépnek fel, jelentősen mérséklik a szervesanyag-képzés intenzitását, csökkentik annak nagyságát, továbbá befolyásolják a korai és kései pászták arányát is.

A *hőmérséklet* különbözőképpen hat a növekedési folyamatokra. Magyarországi megfigyelések szerint is 5 °C felett indul meg a legtöbb lombos fa átmérő-növekedése, de intenzívebb szervesanyag-képzés csak a 10 °C-os átlaghőmérsékletet meghaladó napok bekövetkezését követően figyelhető meg (Szőnyi 1962, Halupáné 1967). Az egyes fafajok szervesanyag-képzésének optimális hőmérsékleti tartománya más és más, pl. bükk esetében 13 és 23 °C, a molyhos tölgynél pedig 17-27 °C közé esik (Pisek et al. 1969). Magyarországon májusban egyáltalán nem és júniusban is csak ritkán, bár az utóbbi években egyre gyakrabban lépi túl a nappali hőmérséklet ezen értékhatárt. Júliusban és augusztusban viszont már a havi átlaghőmérséklet is megközelíti a fotoszintézis optimális hőmérséklet-tartományának felső határértékét. A nappali maximális értékek pedig egyre gyakrabban elérik azt a kritikus szintet (35-40 °C), amikor a fotoszintézis mértéke drasztikusan lecsökken. Ezért a júliust és augusztust élettani szempontból kritikus hónapoknak tekintjük. Magas hőmérséklet esetében továbbá igen nagy a légzés energiaszükséglete is (Larcher 2001). A kambium osztódását nagymértékben befolyásolja még a fitohormonok közül az auxin, amely felelős az évgyűrűn belüli korai, illetve kései pászták kialakulásáért (Hoffmann & Lyr 1992). A kezdeti magasabb auxinszint a korai pászták képződésének, a későbbi alacsonyabb szint pedig a kései pászták kialakulásának kedvez. A növekedést a levegő hőmérséklete mellett befolyásolja még a talaj hőmérséklete is (Körner 1999, Baldocchi et al. 2005). Több kutatás is bizonyította, hogy 4 °C alatti talajhőmérsékletnél nincsen gyökérvégződés (Tranquillini 1979, Körner 1999). Baldocchi et al. (2005) úgy találták, hogy a lomblevelű erdőkben a növekedés (szervesanyag-képzés) csak akkor kezdődik, ha a talajhőmérséklet az átlagos éves léghőmérséklet fölé emelkedik. Ez utóbbi érték a magyarországi bükkösök előfordulási területére vonatkoztatva 8,8 °C ($\pm 0,9$ °C).

A változó hőmérsékleti viszonyok mellett a fák szervesanyag-képzését a *vízellátottság* befolyásolja leginkább, aminek forrása a magyarországi erdők 85 %-ában a csapadék. A

Kárpát-medencében a legmelegebb hőmérsékletűnek számító Magyarországon a fák növekedését a gyakori vízhiány korlátozza. Az erdő éves vízforgalmával és a vele szorosan összefüggő szervesanyag-képzéssel kapcsolatosan számos tanulmány jelent meg Magyarországon (Járó 1989, Führer 1994, 1995, 2008, Führer & Járó 2000, Führer 2017). A fák éves vastagsági növekedésének három (kezdeti, fő és befejező növekedési) szakasza különíthető el (1. ábra). Ezen szakaszok csapadékviszonyainak értékelésénél azonban mindig figyelembe kell venni, hogy az erdőben, időben és térben egyaránt sok tényező kölcsönhatása érvényesül egyszerre. E tényezők fel is erősíthetik, de ki is egyenlíthetik a szélsőséges csapadékviszonyok hatását. Az októbertől májusig terjedő időszakot vízforgalmi szempontból *tárolási szakasznak*, a növekedés szempontjából pedig *nyugalmi (XI–III. hó) ill. kezdeti (IV. hó) növekedési szakasznak* nevezzük, attól függően, hogy a vegetációs periódus mikor kezdődik. Ebben az időszakban a korona- és az avar-intercepcióval csökkentett csapadék nagy része a talajba szivárog, és azt fokozatosan feltölti. Fiziológiai vízfelhasználás vagy egyéb veszteség az elfolyáson, illetve a mélybeszivárgáson kívül csekély. A téli és tavaszi csapadékhiány hatása a növekedésre nehezen határozható meg, hiszen a transzspirációs folyamatok csak később indulnak el. Ha viszont az áprilisi csapadékhiány nagy, és ez magas hőmérséklettel is együtt jár, akkor ennek hatása már jobban érzékelhető a fák növekedésében, különösen csemete- vagy fiatalos korban. A május–augusztusi hónapok alatti szakaszt *fő vízfelhasználási*, ill. a *fő növekedési szakasznak* nevezzük. Ekkor a korona- és az avar-intercepcióval csökkentett csapadék csak a talaj felső rétegeibe tud beszivárogni, és a tárolási időszakban feltöltődött vízzel együtt elsősorban a szervesanyag-képzésre, kisebb mennyiségben pedig egyéb fiziológiai folyamatokra fordítódik. Ebben a ciklusban realizálódik az erdő növedékének csaknem 80% -a, ezért a szélsőséges időjárási viszonyok, elsősorban a csapadékhiány hatása is ekkor érzékelhető leginkább, elsősorban növedékkiesés, vagyis *részleges aszálykár* révén. Augusztust követő 2 hónap (szeptember–október) a *befejező növekedési szakasz*. Ekkor a korona- és az avar-intercepcióval csökkentett csapadék a talaj felső rétegeit tölti csak fel, pótolja az intenzív vízfelhasználás hiányát, és elsősorban a vastagsági növekedésen kívüli egyéb életfolyamatok (termésképzés stb.) vízigényét elégíti ki. A kevesebb csapadék csak kismértékű növedékkiesést eredményezhet. A *befejező növekedési szakasz* növedéke fajlagosan és abszolút értelemben is általában akkor nagyobb, ha a *fő növekedési szakasz* alatt a kedvezőtlen időjárási viszonyok miatt növedékkiesés jelentkezik. Ha a *fő* és *befejező növekedési szakasz* igen nagy csapadékhiánya kiugróan magas július–augusztusi hőmérséklettel párosul, akkor nemcsak növedékvesztés következhet be, hanem a fák szervesanyag-képzése szinte teljesen leáll. E folyamat azért következik be, mert a fák a transzspirációjukkal saját hőháztartásukat tartják egyensúlyban. Drasztikus mértékű szárazság esetében a fák fiziológiai legyengülése oly mértékű lehet, hogy azok elpusztulhatnak és az ilyen állományokban nagymértékű törzsszámcsökkenés lesz megfigyelhető. Magyarországon általában az ún. határtermőhelyekre ültetett nemesnyárasokra és lucosokra jellemző ez az ún. *teljes aszálykár*.

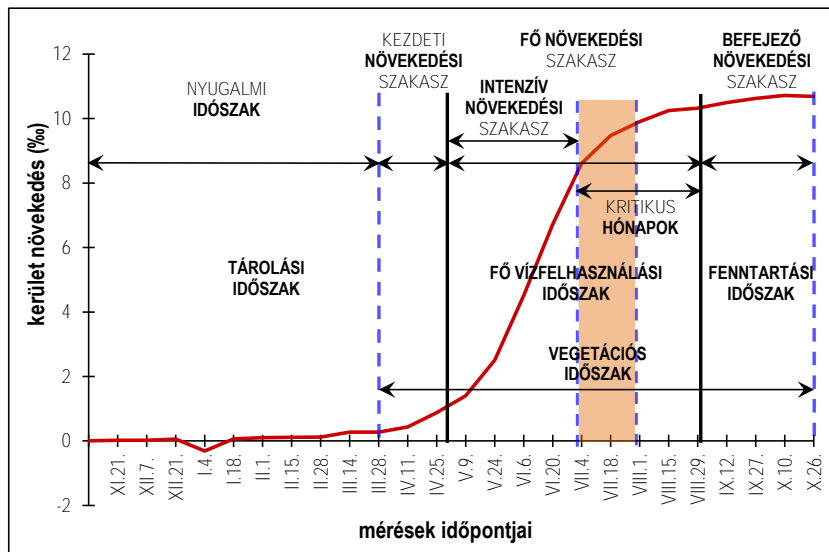
Ezért az erdészeti termőhely-tipológiában alapvetően szükséges klímaértékeléshez egy olyan mutatószámot kell alkalmazni, amely figyelembe veszi a fák növekedése és a klíma

közötti ok-okozati kapcsolatot befolyásoló periódusok időjárás körülményeit, és olyan meteorológiai jellemzőkre épít, amelyeket hosszú idő óta az országban sok helyen rögzítenek, és amelyek térbeli és időbeli kiterjesztése, azaz területi és időbeli extrapolálásuk nagy biztonsággal megoldható. Ilyen az egyszerűsített *erdészeti szárazsági mutató* (Forestry Aridity Index, röviden FAI) (Führer 2010), melynek képlete a következő:

$$FAI = 100 \cdot \frac{T_{\text{átlag(VII-VIII)}} [^{\circ}\text{C}]}{P_{V+VI+2 \cdot VII+VIII} [\text{mm}]} \quad (1)$$

ahol $T_{\text{átlag(VII-VIII)}}$ a kritikus hónapok (július és augusztus) átlaghőmérséklete;

$P_{V+VI+2 \cdot VII+VIII}$ a fő növekedési szakasz csapadékösszege, melyben a legmelegebb és a legalacsonyabb páratartalmú július csapadéka dupla súllyszámmal szerepel.



1. ábra: Növekedési görbe az öko-fiziológiai (vízfelhasználás) szempontból fontosabb periódusok bemutatásával.

Figure 1: Mean annual cycle of the basal area increment of the tree species in Hungary. The most relevant periods for the water use of the trees are indicated.

ERDÉSZETI KLÍMAOSZTÁLYOK LEHATÁROLÁSA A FAI ALAPJÁN

Hasonlóan, ahogy Járó (1972) a relatív légnedvességi adatokkal tette, 94 hazai meteorológiai állomás 1901-től 2000-ig tartó meteorológiai méréseinek adatbázisára, mindenhol a leghosszabb havi csapadék és hőmérsékleti idősorokra építve vizsgáltuk az egyszerűsített erdészeti szárazsági mutató használhatóságát. Az adatokból számított átlagos FAI mutatók

és a térség zonális faállományai alapján nagy biztonsággal meghúzhatjuk az erdészeti klímahatárokat. E szerint a klíma

- *Bükkös*, ahol a FAI-érték 4,750 vagy az alatti.
- *Gyertyános-tölgyes*, ahol a FAI érték 4,751 és 6,000 közötti,
- *Kocsánytalan tölgyes, ill. cseres*, ahol a FAI érték 6,001 és 7,250 közötti, és
- *Erdőssztyep*, ahol a FAI érték nagyobb, mint 7,250.

E határértékek helyességét az erdészeti adatbázis több mint 11 ezer bükkös erdőrészlétére és mintegy 23 ezer kocsánytalan tölgyes, ill. cseres erdőrészlétére extrapolált 1961-1990 közötti havi csapadék- és hőmérsékleti adatokból számított FAI-értékekkel is igazoltuk. Természetesen a klímaosztályok szétválasztására megadott határértékek nem olyan élesek, mint amit a számok mutatnak. A mezo- és a mikroklimatikus adottságok miatt átfedések vannak, ezért a FAI alapján történő klímaosztály-elhatárolás helyi szintű pontosítása indokolt. Ehhez figyelembe kell venni az adott időszak alatti időjárás évenkénti változékonyságát és a szélsőséges körülmények (kiugró csapadék- vagy hőmérsékleti viszonyok) előfordulásának gyakoriságát is. Vagyis az átlagos FAI értékeken belül lényeges, hogy egy, a klíma jellemzésére szükséges minimálisan 30 éves periódus alatt hányszor fordult elő pl. bükkös, gyertyános-tölgyes, cseres vagy erdőssztyep klímájú év, és milyen ezek eloszlása. Ennek megfelelően a több tízezer erdőrészletre extrapolált korrigált adatok alapján az egyes klímakategóriák határainál a klímabesorolása megerősítéséhez javasolt még ún. kiegészítő kritériumokat is figyelembe venni. Ha ezek nem teljesülnek, akkor, tekintettel a melegedő klímátendenciákra, mindig a melegebb és szárazabb klímakategória megállapítása a javasolt. Ennek megfelelően

- gyertyános-tölgyes és nem bükkös klímakategóriáról beszélünk, ha a megadott FAI értékhatár teljesülése mellett, a vizsgált időszakon belül a bükkös klímájú évek előfordulása kisebb, mint 40%, a bükkös és gyertyános-tölgyes klímájú évek együttes előfordulása pedig kisebb, mint 70%,
- kocsánytalan tölgyes ill. cseres és nem és gyertyános-tölgyes klímakategóriáról beszélünk, ha a megadott FAI értékhatár teljesülése mellett, a vizsgált időszakon belül a bükkös és gyertyános-tölgyes klímájú évek együttes előfordulása kisebb, mint 50%,
- erdőssztyep és nem kocsánytalan tölgyes ill. cseres klímakategóriáról beszélünk, ha a megadott FAI értékhatár teljesülése mellett, a vizsgált időszakon belül az erdőssztyep klímájú évek előfordulása nagyobb, mint 60 %, az erdőssztyep és kocsánytalan tölgyes ill. cseres klímájú évek együttes előfordulása pedig nagyobb, mint 75%.

AZ ERDÉSZETI SZÁRAZSÁGI MUTATÓ GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

Az erdészeti szárazsági mutató egzakt meteorológiai adatok segítségével lehetővé teszi egy hely, egy táj, vagy esetleg még nagyobb földrajzi térség átlagos klímájának és annak

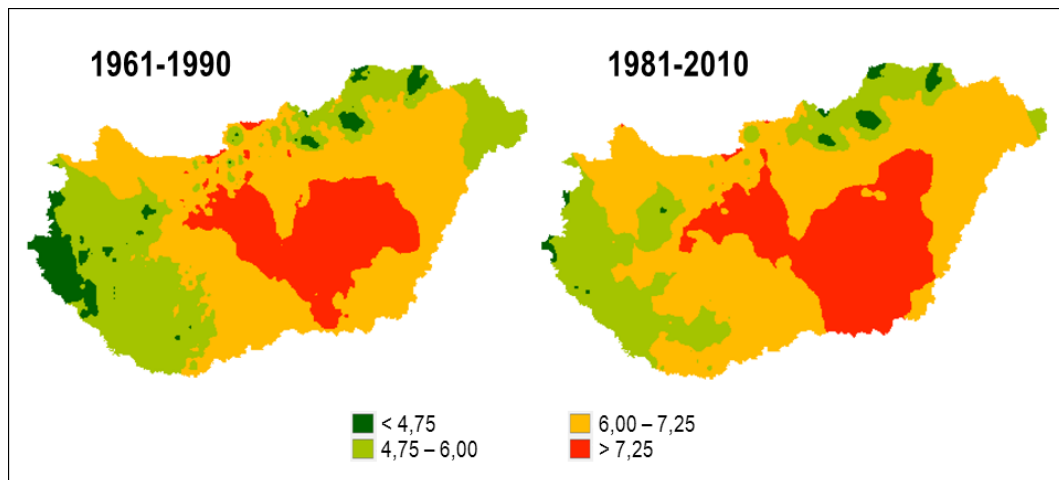
változékonyságának jellemzését, még hozzá úgy, hogy abban kifejezésre jut a két legfontosabb, legegyszerűbben mérhető időjárási tényezőnek, a hőmérsékletnek és a csapadéknak a faállományok fejlődésére gyakorolt hatása. A klímakategóriák lehatárolásával továbbá mód nyílik azok klíma- és időjárási viszonyainak jellemzésére is (Führer et al. 2011, 2017b).

A klíma és az erdő kapcsolatának alaposabb feltárása azonban a gyakorlat számára rendkívül fontos, mert az idáig csak feltételezésekre alapozott alkalmazási, ill. hasznosítási célok mellett új irányokat is kijelöl.

Az erdészeti klímaosztályok területi megoszlása az országban

Az erdészeti szárazsági mutató országos kiterjesztésű meghatározásához a földrajzi koordináta rendszerben, 1/6 fokos rácsbontásban először meteorológiai adatbázist hoztunk létre (OTKA CK 80305/80335). Az adatbázis tartalmazza az elmúlt 50 évre (1961-2010) vonatkozóan a havi minimum, maximum és átlaghőmérséklet, a havi csapadék, valamint a relatív nedvesség adatait, melyek az OMSZ meteorológiai mérőállomásain mért adatok alapján a rácsközpontok (4426 db) koordinátáihoz lettek interpolálva. Az adatbázisra alapozva vizsgáltuk az egyszerűsített erdészeti szárazsági mutató használhatóságát, lehatároltuk és meteorológiai szempontból jellemeztük az erdészeti klímaosztályokat (Führer 2017, Führer et al. 2017b). A lehatárolás elvi szempontjait figyelembe véve 1961-től 1990-ig terjedő, a klímaváltozás szempontjából ún. bázis időszak alatt az ország területének 5,5%-a bükkös, 28,9%-a gyertyános-tölgyes, 46,5%-a kocsánytalan tölgyes ill. cseres és 19,1%-a erdőssztyep erdészeti klímakategóriába tartozott (2. ábra). A rákövetkező, 1981-től 2010-ig terjedő időszakal történt összehasonlítás azt mutatja, hogy a FAI szerinti klímaosztályok területváltozása az elmúlt 50 év alatt egyértelműen kedvezőtlen irányú. Amíg a bükkös klímakategória aránya 2,1%-ra, a gyertyános-tölgyesé pedig 21,0%-ra csökkent, addig a kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímaosztályé 51,8%-ra, az erdőssztyep klímaosztály területe pedig 25,1%-ra növekedett.

Az elemzésekből az elmúlt 50 év viszonylatában megállapítható, hogy az erdészeti szárazsági mutató változása, melyben a kritikus hónapok és a fő növekedési szakasz időjárási viszonyainak összhatása jut kifejezésre, az egyes országrészekben eltérő. Nagy általánosságban mondhatjuk, hogy 50 év alatt Dél-, Délnyugat- és Nyugat-Dunántúlon, valamint az Alföld déli és északkeleti részén növekvő trendű a változás és ennek mértéke több mint 1 FAI-érték, azaz csaknem egy klímakategóriát átfedő nagyságú. A Nagyalföld középső részein pedig éppen fordított a helyzet, az évenkénti FAI-értékek trendje csökken, azaz a klíma kedvezőbb irányba változik, de ennek mértéke alacsony. Ez azért van így, mert a hőmérséklet növekedése mellett a csapadék mennyisége is nőtt 1981-2010-ben az 1961-1990-eshez képest. A többi országrészben viszont a felmelegedés és a kisebb mértékű csapadéknövekedés miatt inkább stagnálás figyelhető meg.



2. ábra: Erdészeti klímaosztályok előfordulása az 1961-1990 és az 1981-2010 időszakok átlagos FAI-értékei alapján.

Figure 2: Macroclimatically suitable areas for the climate indicator tree species in the recent decades in Hungary based on the Forestry Aridity Index. The characteristic FAI threshold values are the following:

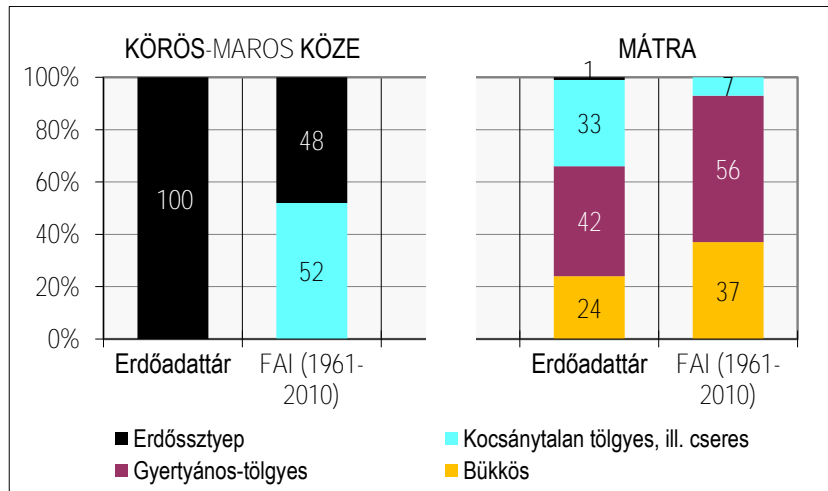
Beech climate category: $FAI \leq 4.75$, Hornbeam-oak climate category: $4.75 < FAI \leq 6.0$,

Sessile oak – Turkey oak climate category: $6.0 < FAI \leq 7.25$,

Forest steppe climate category: $7.25 < FAI \leq 8.50$.

Adattári klímabesorolások pontosítása

Az Erdőadattárban szereplő erdőrészekre az egzakt meteorológiai paraméterek (FAI) alapján megállapított klímakategóriák jelentősen eltérhetnek az adattári, elsősorban a fafajok elterjedésével jellemezhető kategóriáktól (3. ábra). Például a Nagyalföld délkeleti részén fekvő Körös-Maros köze erdészeti tájban az adattár mindenhol, még a magyar-román határ közelében is erdősztyep klímabesorolást ad. Ezzel szemben a FAI alapú besorolás ennél kedvezőbb képet mutat, azaz a terület több mint 50%-a kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímájú. A Mátra erdészeti tájban is hasonló a helyzet, vagyis a szárazabb és melegebb klímakategóriák aránya az Erdőadattárban magasabb, mint amit a FAI alapján számított értékek mutatnak, a változatos domborzati viszonyok és a hegyvidéki jelleg miatt azonban itt több klímakategória fordul elő.



3. ábra: A Körös-Maros közze és a Mátra erdészeti tájak erdőinek klímakategóriák szerinti megoszlása az Erdőadattár és a FAI-értékek alapján.

Figure 3: Share of climate categories at forest areas in Körös-Maros közze and Mátra forest regions according to the National Forestry Database and the FAI.

Az adattári klímabesorolás felülvizsgálata azért is fontos, mert a klímakategóriáknak általános erdőgazdálkodási összefüggései is vannak, azaz hozzájuk ökológiai, erdőművelési (technológiai) és ökonómiai feltételek kapcsolódnak (Führer & Járó 2000):

- A viszonylag hűvösebb és nedvesebb bükkös és gyertyános-tölgyes klímájú területek az erdőtenyészet számára optimális körülményeket jelentenek, rajtuk természetes, részben természetszerű, nagy stabilitású ökoszisztémák (bükkösök, gyertyános-tölgyesek) élnek. A kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímájú területek már csak közepes adottságúak, az erdőssztyep klímában természetes, ill. természetszerű erdők már csak az ártereken és a felszínhez közeli talajvízű termőhelyeken alakulnak ki.
- Erdőművelés tekintetében, bükkös klímában teljes mértékben, a gyertyános-tölgyes klímában pedig nagyrészt természetes úton, magról, az eredeti populációkat megtartva lehet felújítani az őshonos fafajú és szerkezetű erdőket. A kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímában tenyésző erdők felújítása már csak kisebb részben történik természetes úton, nagyobb részben mesterséges úton, csemetével. Az erdőssztyep klímájú termőhelyek erdei mesterséges felújítású kultúrerdők, melyek fenntartása szakszerű beavatkozást igényel.
- A különböző klímakategóriák erdőinek ökonómiai értéke is eltérő. A bükkös és gyertyános-tölgyes klímájú erdők fahozama (növedéke) nagy, ökonómiai értéke magas. A kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímában tenyésző erdők fahozama általában közepes, a termesztési költségek magasabbak, ökonómiai értékük közepes, vagy gyenge. Az erdőssztyep klímájú erdők termesztési költségigénye magas, a fahozam

a termőhelytől függően igen változó, az ökonómiai érték pedig a fahozamtól függően gyakran gyenge.

Ezért mindenképpen javasoljuk az erdészeti igazgatás felé, hogy az egyes erdőrészek jelenlegi és távlati klímabesorolásának az eddiginél biztosabb meghatározása érdekében az erdészeti adattárban nyilvántartott, az erdőgazdálkodás szempontjából fontos paraméterek közé vegye be az erdészeti szárazsági mutatót is. *Az új erdészeti klímaértékelés ily módon történő továbbfejlesztése és gyakorlati bevezetése az erdészeti ágazat (kutatás, igazgatás és gyakorlat) szükségeszerű és egyik legfontosabb innovatív eredménye.*

Az új klímaértékelés további felhasználási lehetőségei

A FAI segítségével történő erdészeti klímaértékelés a már bemutatott gyakorlati felhasználásokon kívül több területen hozott új kutatási eredményt, melyek jórészt e tematikus kötetben ismertetésre kerülnek. Ezek közül három kiemelendő:

- egyrészt a globális klímaváltozás hatása miatt az erdészeti klímakategóriák területében várható módosulások rövid és hosszú távú előre jelzése (Führer et al. 2011, 2017a, Gálos & Führer 2018),
- másrészt az új klímaértékelés beépítése a Magyarországon működő erdészeti termőhely-tipológia rendszerébe és így annak Erdészeti Döntéstámogató Rendszerré (EDTR) történő továbbfejlesztése (Mátyás 2017, Mátyás et al. 2018),
- végül pedig a klímaváltozáshoz alkalmazkodó szaporítóanyag-gazdálkodás megalapozása (Borovics 2018).

ÖSSZEFOGLALÁS

A tartamos erdőgazdálkodás eredményessége elsősorban a termőhely termőképességének optimális hasznosításán múlik. Mivel a klíma igen dinamikusan változó termőhelyi tényezővé vált, ezért szükséges az erdészeti klímaosztályozás átértékelése, az eddigieknél tudományosabb, öko-fiziológiai alapokra helyezése. Az erdőgazdálkodás csak így lesz képes a klímaváltozás következményeire megfelelő válaszokat adni.

A klíma egzakt értékelése céljából kidolgoztunk egy olyan mutatószámot (FAI), mely nem csak a klímazonális fafajok elterjedésének klímaviszonyait, hanem a növekedésüket meghatározó időszakok időjárási körülményeit is számításba veszi. A mutatószám alapján most már egzakt meteorológiai adatokkal tudjuk az erdészeti klímakategóriákat jellemezni és térbelileg is lehatárolni, továbbá a változást nyomon követni. Ennek megfelelően az 1961-1990-es időszakban az ország területének 5,5% -a bükkös, 28,9%-a gyertyános-tölgyes, 46,5% -a

kocsánytalan tölgyes ill. cseres és 19,1%-a erdőssztyep erdészeti klímakategóriába tartozott. A rákövetkező, 1981-től 2010-ig terjedő időszak alatt egyértelműen kedvezőtlen irányú a változás. Amíg a bükkös klímakategória aránya 2,1%-ra, a gyertyános-tölgyesé pedig 21,0%-ra csökkent, addig a kocsánytalan tölgyes, ill. cseres klímaosztályé 51,8%-ra, az erdőssztyep klímaosztályé pedig 25,1%-ra növekedett.

A kimunkált erdészeti szárazsági mutató segítségével pontosíthatjuk az erdészeti adattár egyes erdőrészeink klímabesorolását. Ez önmagában is ágazatunk egyik legjelentősebb innovációs eredményének tekinthető. Ugyanis a klímakategóriáknak nemcsak ökológiai, hanem erdőművelési és ökonómiai vonatkozásai is vannak. Csak az ezek között fennálló összefüggések mélyreható ismerete teszi lehetővé az erdészeti termőhely-tipológia korszerűsítését. Erre támaszkodva pedig kifejleszhető egy olyan Erdészeti Döntéstámogató Rendszer, melynek gyakorlati alkalmazásával az erdőgazdálkodás bizonyos kompromisszumok árán képes lesz a jövőbeni klímaváltozás kihívásainak megfelelni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A téma az Agrárklíma 2 projekt (VKSZ_12-1-2013-0034) keretében valósult meg. A korábbi megalapozó eredmények az OTKA CK 80305-80335 számú projektek keretében születtek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Baldocchi D.D., Black T.A., Curtis P.S., Falge E., Fuentes J.D., Granier A. et al. 2005: Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology* 49(6): 377–387. DOI: [10.1007/s00484-005-0256-4](https://doi.org/10.1007/s00484-005-0256-4)
- Bartholy J., Pongrácz R. & Gelybó Gy. 2007: Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. *Applied Ecology and Environmental Research* 5(1): 1–17. DOI: [10.15666/aeer/0501_001017](https://doi.org/10.15666/aeer/0501_001017)
- Bonan G.B. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320: 1444–1449. DOI: [10.1126/science.1155121](https://doi.org/10.1126/science.1155121)
- Borovics A. 2018: A jövő már elkezdődött. *Erdészeti Lapok* 153(1): 2–5.
- Führer E. 1994: Csapadékmérések bükkös-, kocsánytalantölgyes és lucfenyves ökoszisztémában. *Erdészeti Kutatások* 84: 11–35.
- Führer E. 1995: Az időjárás változásának hatása az erdő fatermőképességére és egészségi állapotára. *Erdészeti Lapok* 130(6): 176–178.
- Führer E. 2008: Erdőgazdaság. In: Harnos Zs., Gaál M. & Hufnagel L. (eds): *Klímaváltozásról mindenkinek*. Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar, Matematikai és Informatikai Tanszék, Budapest, 90–102.
- Führer E. 2010: A fák növekedése és a klíma. „KLÍMA-21” Füzetek 61: 98–107.

- Führer E. 2017: Az erdészeti klímaosztályok új lehatárolása öko-fiziológiai alapon. *Erdészeti Lapok* 152(6): 173–174.
- Führer E. & Járó Z. 2000: Az aszály és a belvíz érvényesülése a Nagyalföld erdőművelésében. *Erdészeti Tudományos Intézet Kiadványai* 12. Erdészeti Tudományos Intézet, Budapest.
- Führer E., Horváth L., Jagodics A, Machon A. & Szabados I. 2011: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás* 115(3): 205–216.
- Führer E., Jagodics A., Juhász I., Marosi Gy. & Horváth L. 2013: Ecological and economical impacts of climate change on Hungarian forestry practice. *Időjárás* 117(2): 159–174.
- Führer E., Edelenyi M., Horváth L., Jagodics A., Jereb L., Kern Z. et al. 2016: Effect of weather conditions on annual and intra-annual basal area increments of a beech stand in the Sopron Mountains in Hungary. *Időjárás* 120(2): 127–161.
- Führer E., Gálos B., Rasztoivits E., Jagodics A. & Mátyás Cs. 2017a: Erdészeti klímaosztályok területének várható változása. *Erdészeti Lapok* 152(6): 174–177.
- Führer E., Horváth L., Moring A., Pödör Z. & Jagodics A. 2017b: Az erdészeti szárazsági mutató (FAI) segítségével lehatárolt erdészeti klímaosztályok/klimakategóriák jellemzése. *Erdészeti Lapok* 152(9): 270–272.
- Gálos B., Führer E., Czímber K., Gulyás K., Bidló A., Hänsler A. et al. 2015: Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás* 119(4): 425–441.
- Gálos B. & Führer E. 2018: A klíma erdészeti célú előrejelzése. *Erdészettudományi Közlemények* 8(1): 43–55. DOI: [10.17164/EK.2018.003](https://doi.org/10.17164/EK.2018.003)
- Halupa L.-né 1967: Adatok a sziki tölgyesek növekedési menetének vizsgálatából. *Erdészeti Kutatások* 63: 95–108.
- Hoffmann G. & Lyr H. 1992: Phytohormone und synthetische Wachstumsregulatoren. In: Lyr H., Fiedler H.J. & Tranquillini W. (eds): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Gustav Fischer Verlag Jena/Stuttgart, 345–369.
- Járó Z. 1962: Termőhelyi tényezők ismertetése. In: Majer A. (ed): *Erdő- és termőhelytipológiai útmutató. Országos Erdészeti Főigazgatóság*. Budapest, 11–68.
- Járó Z. 1972: A termőhely fogalma. In: Danszky I. (ed): *Erdőművelés I. Mezőgazdasági Kiadó*, Budapest, 47–87.
- Járó Z. 1989: Az erdő vízforgalma. *Az Erdő* 38: 352–355.
- Járó Z. & Tátraaljai E.-né 1985: A fák éves növekedése. *Erdészeti Kutatások* 76-77: 221–234.
- Kaminszki A. 1924: Kelet-Európa klímátartományai, összehasonlítva az erdők elterjedésével. Petrograd (orosz nyelven).
- Köppen W. 1931: *Grundriss der Klimakunde*. Walter de Gruyter & Co, Berlin/Leipzig.
- Körner Ch. 1999: *Alpine plant life*. Springer, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-642-18970-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18970-8)
- Lakatos M. & Bihari Z. 2011: A közelmúlt megfigyelt hőmérsékleti és csapadéktendenciái. In: Bartholy J., Bozó L. & Haszpra L. (eds): *Klímaváltozás – 2011, Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére*. MTA-ELTE Meteorológia Tanszék, Budapest, 146–169.
- Larcher W. 2001: *Ökophysiologie der Pflanzen*. 6. Auflage. UTB, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Linderholm H.W. 2006: Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology* 137(1-2): 1–14. DOI: [10.1016/j.agrformet.2006.03.006](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.006)
- Lyr H. & Hoffmann G. 1992: Wachstum – Einflussfaktoren. In: Lyr H., Fiedler H.J. & Tranquillini W. (eds): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Gustav Fischer Verlag, Jena/Stuttgart, 397–437.
- Magyar P. 1960: *Alföldfásítás*. I. kötet: Általános és leíró rész. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Manninger M. 2004: Erdei fák éves és korszaki növekedésmentete és kapcsolódása egyes ökológiai tényezők-höz. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): *Erdő és klíma IV*. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 151–162.
- Mátyás Cs. 2017: Az eDTR alapvető célkitűzései és működése. *Erdészeti Lapok* 152(10): 306–307.
- Mátyás Cs., Berki I., Bidló A., Csóka Gy., Czímber K., Führer E. et al. 2018: Sustainability of forest cover under climate change on the temperate-continental xeric limits. *Forests* (megjelenés alatt)



- Pisek A., Larcher W., Moser W. & Pack I. 1969: Kardinale Temperaturbereiche der Photosynthese und Grenztemperaturen des Lebens der Blätter verschiedener Spermatophyten. III. Temperaturabhängigkeit und optimaler Temperaturbereich der Netto-Photosynthese. *Flora B* 158: 608–630. DOI: [10.1016/S0367-1801\(17\)30246-6](https://doi.org/10.1016/S0367-1801(17)30246-6)
- Stefanovits P. 1963: Magyarország talajai. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Szönyi L. 1962: Adatok néhány fafaj vastagsági növekedéséhez. *Az Erdő* 11: 289–300.
- Tranquillini W. 1979: Physiological ecology of the alpine timberline. *Ecological Studies* 31. Springer, Heidelberg/New York. DOI: [10.1007/978-3-642-67107-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67107-4)

*Érkezett: 2018. május 4.
Közlésre elfogadva: 2018. május 28.*

A KLÍMA ERDÉSZETI CÉLÚ ELŐREVETÍTÉSE

Gálos Borbála¹ és Führer Ernő²

¹Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar

²NAIK, Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

A fajmegválasztás és az erdészeti célú döntéstámogatás megalapozásához az éghajlati tendenciák hosszútávú előrejelzése szükséges. Cikkünk célja a fajok elterjedése, vitalitása, növekedése és szervesanyag-produkciója (növedéke) szempontjából meghatározó hónapok klimatikus viszonyaiban várható változás értékelése. A várható klíma becslése 12 regionális klímaszimuláció eredményeinek együttes elemzésével történt, az IPCC A1B kibocsátási forgatókönyvnek feltételezésével. Az erdészeti klímakategóriákat az erdészeti szárazsági mutató (FAI) alapján definiáltuk és határoztuk le. Az aszályos évek gyakoriságát és 30 éves jövőbeli periódusokra becsült változását szintén a FAI segítségével határoztuk meg.

A 21. századi klímaelőbecslések alapján az átlaghőmérséklet emelkedése és a csapadékmennyiség csökkenése az erdészeti szempontból meghatározó időszakok közül a kritikus hónapokban (július-augusztus) a legnagyobb, de jelentős a fő növekedési periódusban (május-augusztus) is. A század közepére előrejelített klimatikus viszonyok mellett az olyan klímaadottságú területek, ahol a természetes előfordulású zárt erdők még eredményesen termeszthetők, nagymértékben csökkenhetnek, a jövedelmező gazdálkodásra kevésbé alkalmas erdőssztyep klímájú területek nagysága pedig jelentősen (a jelenlegi erdőterület több mint egyharmadára) növekedhet. Az eddigi erdőssztyep klímakategória területének fele (az ország területének több mint 10%-a) a mainál még melegebb és szárazabb (sztyep klímájú) lehet. Az átlagos klimatikus viszonyok változásával egyidejűleg az 1981-2010-es periódushoz képest 2021-2050-re az aszályos és a szélsőségesen aszályos évek száma megduplázódhat, mely az érzékeny fajok mortalitásának kockázatát fokozza.

A jövőbeli időszakokra várható klíma alapját képezi a projekt keretében kifejlesztett döntéstámogató rendszernek is, mely egy adott területre meghatározza az erdészeti klímakategóriát és ennek, valamint a többi termőhelyi tényezőnek alapján javasol célállományt.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, klímaszcenárió, erdészeti klímakategória, FAI, aszálygyakoriság.

CLIMATE PROJECTIONS FOR FORESTRY IN HUNGARY

Abstract

Tree species selection and decision support in forestry require long term climate projections. Our study is focusing on the future temperature and precipitation conditions for the months that are determining and limiting the distribution, vitality, growth and production of forests. For the 21st century, results of 12 regional climate model simulations were analyzed assuming the A1B emission scenario of the IPCC. Forest climate categories as well as the droughts were defined based on the forestry aridity index (FAI).

Increase of temperature and decrease of precipitation are expected to be the largest in the critical period (July-August), but they are also significant in the main growing period (May-August). In the Hungarian lowland the drier conditions (Forest steppe climate category) are expected to expand (replacing the former Oak climate category) and cover more than 35% of the total forest area. This will result also in novel combinations of site factors that have not existed in Hungary before. Based on the mean estimations, these so called 'Steppe climate category' can reach more than 10% of the country until the middle

of the century. In absence of surplus water, these climate conditions will not be suitable for managed forests any more. Additionally to the changes of the climatic means, the total number of droughts and extremely droughts can be doubled for the period 2021-2050 relative to 1981-2010. Water scarcity and extremely high temperatures can enhance the drought risk thus can lead to severe impact on the vitality, growth and organic matter production of the trees.

Based on the expected climate conditions the Agroclimate Decision Support System defines the forestry climate category for the selected region and makes suggestion for the tree species composition.

Keywords: climate change, climate projection, forest climate categories, forestry aridity index, drought frequency.

BEVEZETÉS

A Kárpát-medencére vonatkozóan a regionális klíma-előrebecslések az éves és az évszakos átlaghőmérsékletek szignifikáns növekedését jelzik (Bartholy et al. 2014). A hőmérsékletemelkedés mértéke a 21. század vége felé erősödik, az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület A1B kibocsátási forgatókönyve (IPCC 2007) alapján a nyarak a 2071-2100-as időszakra több mint 3,5 °C-kal melegebbek lehetnek az 1981-2010-es periódushoz képest (Gálos et al. 2015). Az éves csapadékösszegek alig mutatnak változást, azonban a csapadék éven belüli eloszlása jelentősen átalakulhat (Pongrácz et al. 2011). A téli csapadék mennyisége a század végére több mint 10-15%-kal növekedhet, ezzel szemben a nyarak csapadékösszege csökkenhet, melynek mértéke a 2071-2100-as időszakra a 20%-ot is meghaladhatja a 20. század végéhez képest (Gálos et al. 2015). Az IPCC ötödik Helyzetértékelő Jelentéséhez (IPCC 2013) készített új, sugárzási kényszer változásán alapuló forgatókönyvek (RCP) feltételezésével készített előrejelzések is megerősítik, hogy Európa északi része melegebbé és csapadékosabbá, míg a Mediterrán térség melegebbé és szárazabbá válhat (Jacob et al. 2013). Az átmeneti zónában, így Magyarországon is, a csapadékváltozások előjele kevésbé egyértelmű, inkább klímamodell- és évszakfüggő, a melegedő tendencia azonban jelentős (Bartholy & Pongrácz 2017, Gálos & Somogyi 2017).

Az erdei ökoszisztémák működése szempontjából a hőmérséklet- és csapadékátlagok változása mellett fontos még, hogy a jövőben gyakrabban fordulnak-e elő az eddigi sokéves átlagnál jóval szárazabb nyarak. Ha a nyári hónapokban az egyes fafajok által felvehető vízmennyiség a szükségesnél kisebb, akkor ez hazánkban a fafajok természetességének limitáló tényezőjévé válhat (Mátyás et al. 2010). Ha az összefüggő száraz periódusokat még szélsőségesen magas hőmérsékleti viszonyok is jellemzik, akkor abiotikus és biotikus kárláncolat indulhat el, ami súlyosan érinti az erdők egészségi állapotát, szervesanyag-képzését, vízháztartását, szénforgalmát, végső esetben elterjedését is (Mátyás et al. 2010, Führer 2010, Móricz et al. 2013, Berki et al. 2014, Somogyi 2016, 2018, Janik et al. 2016, Illés & Fonyó 2016, Czimer & Gálos 2016, Mátyás 2017, Csáki et al. 2018). Szélsőséges esetekben a kártevők/kórokozók elszaporodása tömeges mortalitáshoz vezethet (Csóka et al. 2009, 2011, Molnár et al. 2010, Rasztovits et al. 2014).

A jövőben várható következmények becsléséhez, a fafajmegválasztás és az erdészeti célú döntéstámogatás megalapozásához ezért az éghajlati tendenciák megbízható előrejelzése szükséges. Az általános klímaprojekciókkal kapcsolatos tanulmányok azonban többnyire az éves és évszakonkénti hőmérséklet- és csapadékatlagokra, valamint a küszöbnapok számával számszerűsített szélsőséges időjárási események gyakoriságára koncentrálnak. Ezért figyelmünket cikkünkben a fafajok elterjedése, vitalitása, növekedése és szervesanyag-produkciója (növedéke), azaz az erdőgazdálkodás szempontjából meghatározó hónapok klimatikus viszonyaiban várható változás értékelésére irányítjuk.

ADAT ÉS MÓDSZER

A várható klíma becslése 12 regionális klímaszimuláció eredményeinek együttes elemzésével történt, az Agrárklíma.2 projektben alkalmazott 30 éves jövőbeli időszakokra (2021-2050, 2041-2070, 2071-2100), az A1B IPCC-SRES kibocsátási forgatókönyv feltételezésével [URL1]. A változások nagyságát az 1981-2010-es referencia periódushoz képest állapítottuk meg, melyhez az Országos Meteorológiai Szolgálat $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ -os rácsra interpolált állomásadatait vettük alapul ([URL2], NKFP6-00047/2005).

Először a fák fejlődése és növekedése szempontjából fontos éven belüli periódusok, a vegetációs (április- október) és a fő növekedési (május-augusztus) időszakok, továbbá a kritikus hónapok (július-augusztus) átlaghőmérsékleteinek és csapadékösszegeinek változását értékeltük (Führer 2010). A 30 éves időszakokra meghatároztuk a 12 szimuláció átlagos eredményét, valamint a valószínű változás tartományát, mely az IPCC definíciója alapján a modelleredmények 66%-át tartalmazza (Mastrandrea et al. 2010), és számszerűsíti a klíma előrejelzések szórását, szükségszerű bizonytalanságát (Barholý & Pongrácz 2017).

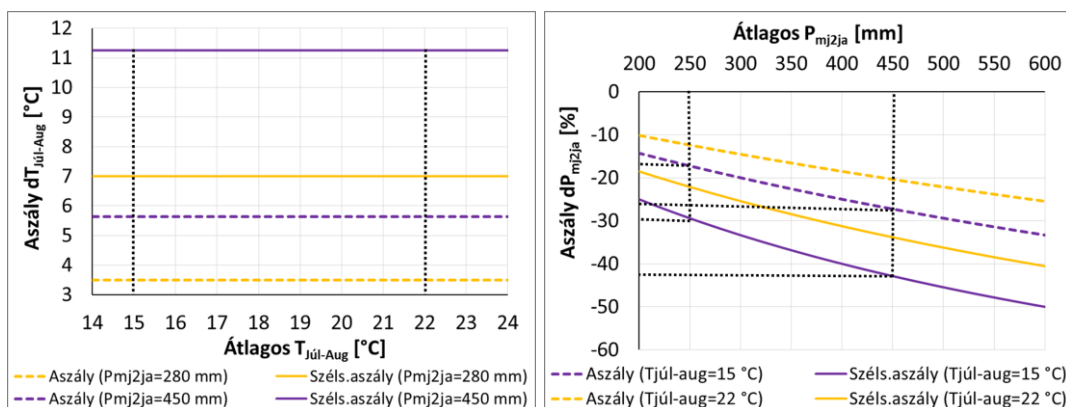
Az erdészeti klímakategóriákat az erdészeti szárazsági mutató (FAI) alapján definiáltuk és határoztuk le (Führer 2010). Az erdőssztyep és a sztyep klímakategória határának kijelöléséhez a FAI osztályozásban következetesen használt 1,25-ös értékhatár különbséget alkalmazva, a sztyep klíma alsó határértékét Führer (2017) a 8,50 FAI értéknél húzta meg. Ennek megfelelően, a regionális klímamodellek eredményei alapján vizsgáltuk a FAI szerint lehatárolt erdészeti klímakategóriák területének várható változását. Mivel a klímamodellek a csapadékmennyiséget a hőmérsékletnél nagyobb bizonytalansággal becslik, a várható területarányokat az 1981-2010-es időszakhoz képest $1,5^\circ\text{C}$ -os, 2°C -os és 3°C -os július-augusztusi átlaghőmérséklet-emelkedés és konstans csapadékmennyiség feltételezésével is meghatároztuk. Ennek alapja, hogy nem csupán az A1B-t, hanem az IPCC új, RCP4.5-ös és RCP8.5-ös forgatókönyveit is figyelembe véve 2050-re, klímascenáriótól és modelltől függetlenül a nyarak legalább $1,5^\circ\text{C}$ -kal melegebbek lehetnek, mint az 1981-2010-es átlag. A 2°C -os nyári hőmérséklet-emelkedés scenáriótól függetlenül 2050-2060-ra átlagos

becslésnek tekinthető, 2070-2080-ra pedig az A1B, valamint az RCP8.5 forgatókönyvek esetén is 3 °C-os melegedés valószínűsíthető (Gálos & Somogyi 2017).

A szélsőségesen meleg és száraz évek gyakoriságát és a 30 éves jövőbeli periódusokra várható változását a FAI segítségével definiáltuk és becsültük, az alábbi kritériumok szerint (a kritériumok hazai klimatikus viszonyok mellett érvényesek):

- (1) aszályos év: a FAI értéke legalább 1, de kevesebb, mint 2 klímakategóriának megfelelő FAI különbséggel meghaladja az 1981-2010-es időszak átlagos FAI értékét ($1,25 \leq dFAI_{\text{adott év-(1981-2010)}} < 2,5$).
- (2) szélsőségesen aszályos év: a FAI értéke legalább 2 klímakategóriának megfelelő FAI különbséggel meghaladja az 1981-2010-es időszak átlagos FAI értékét ($2,5 \leq dFAI_{\text{adott év-(1981-2010)}})$.

Az 1. ábra mutatja, hogy konstans csapadékösszeg vagy hőmérséklet esetén mekkora hőmérséklet vagy csapadék anomália szükséges ahhoz, hogy egy vagy kettő klímakategória-romlás *mindenképpen* bekövetkezzen. Függetlenül az átlaghőmérséklettől, az ország legalacsonyabb átlagcsapadékú helyein (pl. ahol a FAI képletben szereplő súlyozott csapadékösszeg $P_{mj2ja}=250$ mm), ahhoz, hogy a FAI érték 1 kategóriával növekedjen, a hőmérsékletnek 3,5 °C-kal, 2 kategória esetében pedig 7 °C-kal kell emelkednie. A magasabb átlagcsapadékú helyeken (pl. ahol $P_{mj2ja}=450$ mm) pedig már jóval több, azaz 1 klímakategória-változáshoz 5,6 °C-kal, 2 kategória-változáshoz pedig 11,2 °C-kal kellene a hőmérsékletnek emelkednie. Tehát szárazabb klímában már kisebb hőmérséklet-emelkedés is a FAI alapján definiált aszályt okozhat, míg nedvesebb klímában csak a szélsőséges hőmérsékletek vezetnek kategóriaváltáshoz.



1. ábra: Állandó csapadékösszeg (P_{mj2ja} ; bal oldali ábrarész) és hőmérséklet ($T_{j\ddot{u}l-aug}$; jobb oldali ábrarész) feltételezése mellett az a hőmérsékletváltozás (dT ; bal oldali ábrarész) és relatív csapadék-változás (dP ; jobb oldali ábrarész), ami aszályt (+ 1,25 FAI), illetve szélsőséges aszályt (+ 2,5 FAI) eredményez.

Figure 1: Temperature change (left) and relative precipitation change (right) that leads to drought and extreme drought, assuming constant precipitation (left) and temperature (right).

Amennyiben állandó hőmérséklet mellett kizárólag a csapadék-változás okozza az aszályt, akkor alacsony átlaghőmérsékletű (pl. ahol $T_{ja}=15\text{ °C}$) és alacsonyabb átlagcsapadékú (pl. ahol $P_{mj2ja}=250\text{ mm}$) helyeken 1 klímakategória-változáshoz 17%-os, 2 kategória-változáshoz pedig 30%-os csapadék-csökkenésnek kell bekövetkeznie. Hűvösebb (pl. $T_{ja}=15\text{ °C}$), de magasabb átlagcsapadékú (pl. $P_{mj2ja}=450\text{ mm}$) és helyen 1 klímakategória-változáshoz 27%-os, 2 kategória-változáshoz pedig 43%-os csapadék-csökkenésnek kell bekövetkeznie. Míg magasabb átlaghőmérsékletű ($T_{ja}=22\text{ °C}$) helyen ezek az értékek kisebbek, és már 20 ill. 34%-os csapadék-csökkenés is aszályos ill. szélsőséges aszályos időszakot jelez. Természetesen a valóságban a két tényező együttesen fejt ki hatását, így a sokévi átlaghoz képest a kisebb hőmérséklet-emelkedés és csapadék-csökkenés együttes fellépése is már aszályos körülményt eredményezhet.

Az átlaghőmérsékletek és csapadékösszegek, valamint az aszálygyakoriság változását klímakategóriánként 3-3 reprezentatív erdészeti tájra elemeztük, az eredményekből a cikk a főbb tendenciákat jellemző példákat emeli ki.

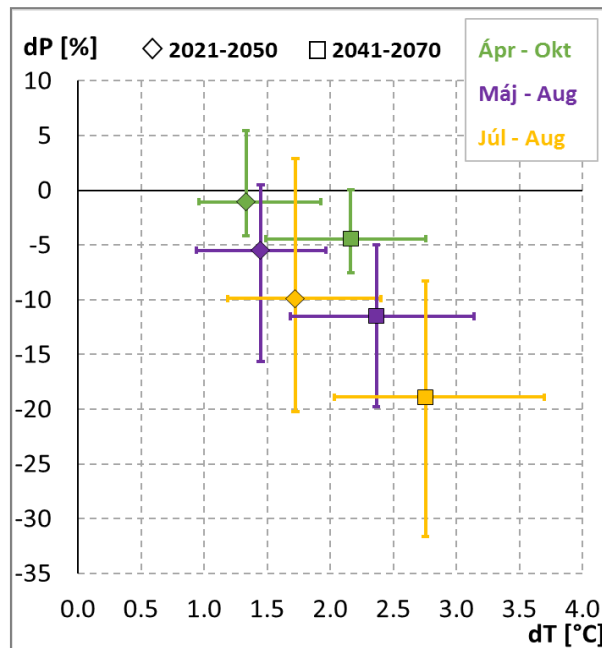
EREDMÉNYEK

A makroklimatikus viszonyok változása az erdőgazdálkodás szempontjából meghatározó hónapokban

A klímakategóriától és az elemzett régiótól függetlenül a fajok számára meghatározó hónapok átlaghőmérséklete az 1981-2010-es időszakhoz képest szignifikáns növekedést mutat (2. ábra). Például a gyertyános tölgyes klímakategóriájú Nyugat-Zselic térségében mindegyik vizsgált jövőbeli periódusra a kritikus hónapok (július-augusztus) hőmérséklete emelkedik a legjobban (az átlagos becslés szerint $1,7\text{ °C}$ -kal 2021-2050-re és $2,8\text{ °C}$ -kal 2041-2070-re). A vegetációs időszakokban 2021-2050-re $1,4\text{ °C}$ -kal, 2041-2070-re pedig $2,2\text{ °C}$ -kal lehet melegebb az átlaghőmérséklet a mai körülményekhez képest.

Csapadék esetén az eredmények szórása nagy, viszont 1981-2010-hez képest a modellek többsége szárazodó tendenciára utal. A legnagyobb csapadék-csökkenés itt is a kritikus hónapokban várható. A század vége felé egyre nagyobb a valószínűsége annak is, hogy a fajok számára fontos késő tavaszi és nyári hónapok melegebbek és szárazabbak lesznek, mint az 1981-2010-es átlag.

Több hónap csapadékösszegeinek elemzése sajnos nem ad információt a csapadékintenzitás változásáról. Ha heves esőzések formájában 1-2 nap alatt hullik le a csapadék nagy része, amit hosszabb csapadékmentes időszak követ, akkor a periódus átlaga nem változik, viszont a lefolyás nagysága nő, ezzel együtt a csapadék hasznosulása romlik, azaz a növények által felvehető vízmennyiség csökken.

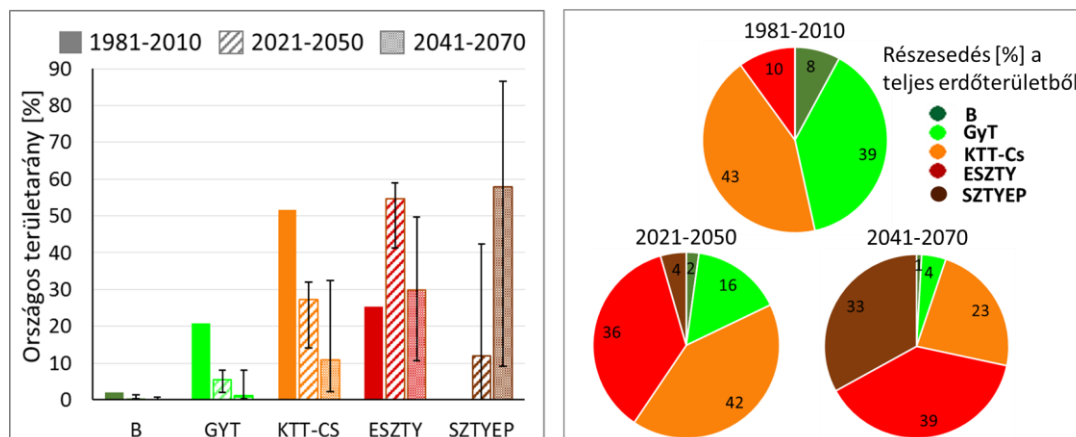


2. ábra: A vegetációs időszak (ápr-okt), a fő növekedési szakasz (máj- aug) és a kritikus hónapok (júl- aug) átlaghőmérsékletének (dT) és csapadékösszegének (dP) várható változása 30 éves jövőbeli időszakokra, az 1981-2010-es referencia periódushoz képest (A1B forgatókönyv alapján). Régió: Nyugat-Zselic, GyT klíma. Pontok: a modellszimulációk eredményeinek átlaga. Hibasávok: a valószínű változás tartománya (a modelleredmények 66%-át magában foglaló tartomány).

Figure 2: Expected temperature (dT) and precipitation (dP) change for the vegetation period (April-October), mean growing phase (May-August) and critical months (July-August) based on the A1B scenario. Reference: mean of 1981-2010 period. Case study area: South-Hungary. Dots: ensemble mean of the projected changes. Error bars: 66% range of the simulations.

Az erdészeti klímakategóriák területarányának várható változása

Az erdészeti klímakategóriák területarányának 21. század első felére-közepére vonatkozó előrebecslése szerint (3. ábra) az 1981-2010-es periódushoz képest a bükk-termesztés számára optimális területek (bükkös klíma) drasztikusan csökkennek (a jelenlegi teljes erdőterület 4%-áról 2%-ára), az erdőssztyep klímájú területek kiterjedése pedig jelentősen nő (a klímodellek átlagos becslése alapján a jelenlegi teljes erdőterület 10%-áról 36%-ára). A magasabban fekvő hegyvidékek makroklimája még alkalmas lehet a bükk számára, de a dombvidékeken már a gyertyános-tölgyes klíma is visszaszorul a kocsánytalan tölgyes ill. cseres klímának helyet adva, melynek országos összterülete megfelelődik, majd a 2041-2070-es időszakra várhatóan még tovább csökken. A pesszimistább előrevetítések a század közepére a síkvidékek teljes területére már erdőssztyep klímát jeleznek (4. ábra).



3. ábra: Az erdészeti klímakategóriák országos területaránya (bal oldali ábrarész) és részesedése a jelenlegi teljes erdőterületből (jobb oldali ábrarész) 1981-2010-ben, valamint az A1B kibocsátási forgatókönyv feltételezésével a 2021-2050-es és a 2041-2070-es időszakban. Színezett oszlopok és körcikkek: a modellszimulációk eredményeinek átlaga. Hibasávok: a valószínű változás tartománya (a modelledmények 66%-át magában foglaló tartomány).

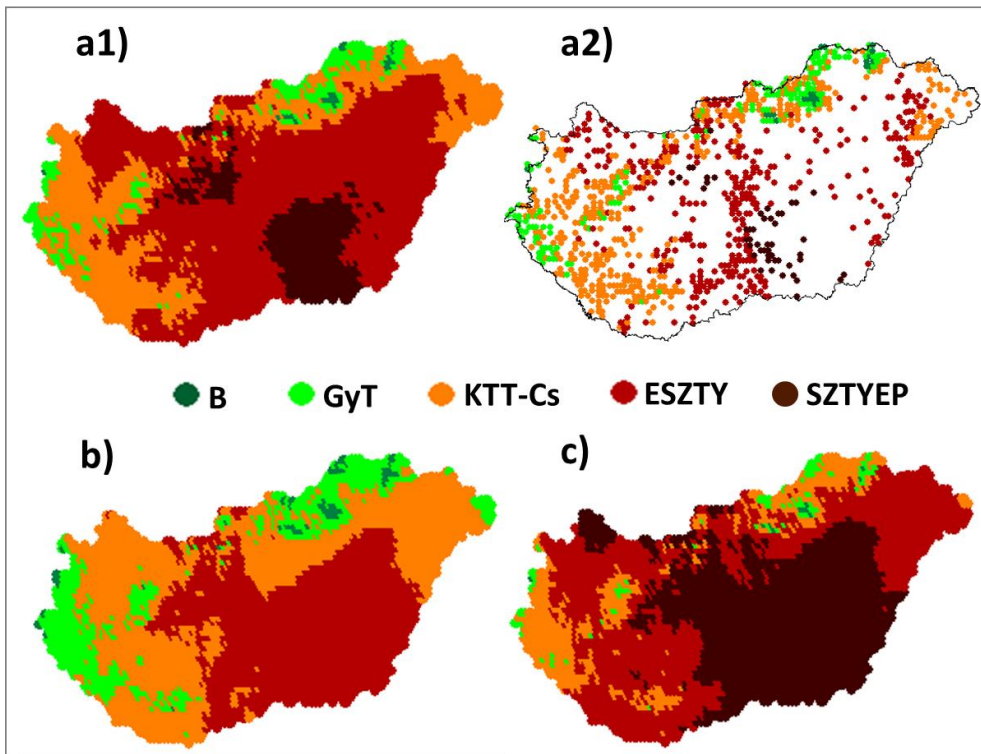
Figure 3: Total area of macroclimatically suitable zones for climate indicator tree species in Hungary (left) and their ratio of the total forest area (right) for 1981-2010, 2021-2050 and 2041-2070. Columns: ensemble mean of the projected changes. Error bars: 66% range of the simulations (emission scenario: A1B).

Előfordulhatnak azonban olyan klimatikus körülmények is, melyek eddig Magyarországon nem voltak jellemzőek. Ez vetette fel az új erdészeti klímakategória (sztyep) bevezetésének szükségességét, melynek területaránya a 12 klímaszimuláció átlagos becslése szerint a 2021-2050-es időszakra elérheti a jelenlegi teljes erdőterület 4%-át (az ország területének 11%-át), majd a század második felében még tovább növekedhet (3. ábra). Az elkövetkezendő 30 évben ebbe a klímakategóriába várhatóan az Alsó-Tiszai-ártér erdészeti tájat teljesen, a Mezőföld, a Körös-Maros köze és a Duna-Tisza közti hátság erdészeti tájaknak pedig egyes területeit sorolhatjuk majd (4. ábra).

Ha feltételezzük, hogy a május-augusztus hónapok csapadékmennyisége a 21. század során nem változik, csak a kritikus hónapok hőmérséklete emelkedik, a bükkösök számára alkalmas makroklima akkor is csak a jelenlegi erdőterület kevesebb, mint 2%-án, az Északi-középhegység és a Kőszegi-hegység magasabban fekvő területein fordulhat elő (5. ábra). 2050-re, klímaszcenáriótól és modelltől függetlenül a nyarak legalább 1,5 °C-kal melegebbek lehetnek, mint az 1981-2010-es átlag. Már 1,5 °C-os hőmérséklet növekedés mellett is Belső-Somogyi-homokvidék és a Déli-Bakony gyertyános-tölgyes klímájú erdőterületeinek döntő része köcsánytalan-tölgyes ill. cseres klímájú lehet, valamint a Kisalföld és a Kiskunság erdőterületein erdősztyep klíma várható. 2 °C-os nyári hőmérséklet-emelkedés esetén, amely scenáriótól függetlenül 2050-2060-ra átlagos becslésnek tekinthető, foltokban már megjelenik a sztyep klíma. Ha a nyarak 3 °C-kal melegebbek (2070-2080 körül), még akkor

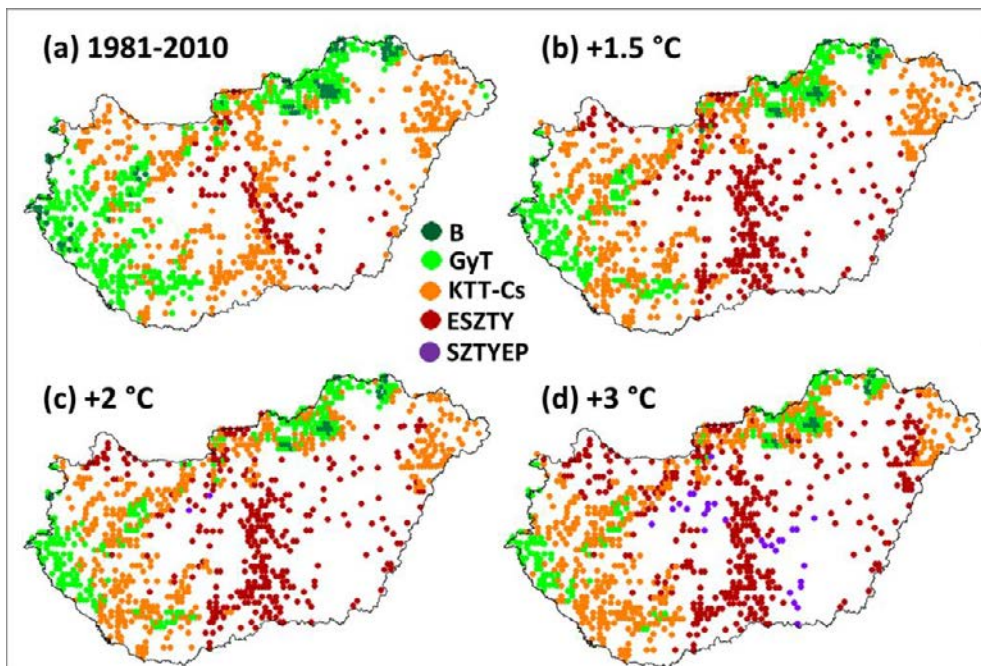
is, ha a csapadékösszeg nem csökken, az Alsó-Tisza, a Nagykunság és a Mezőföld erdőterületei sztyep klímájúak lehetnek, és a mai gyertyános-tölgyes klíma döntő részének helyén cseres tölgyes, a cseres tölgyeseken pedig erdőssztyep klíma várható.

Látható, hogy már 1. ábrán szereplő értékeknél jóval kisebb mértékű hőmérséklet emelkedések is klímakategória váltást eredményezhetnek. A látszólagos ellentmondás oka, hogy az 1. ábra érzékenységvizsgálatánál legalább 1,25-ös (a FAI definíció szerint 1 klímakategória) FAI különbséget vártunk el, míg a valóságban az érintett térségek közelebb helyezkednek el a klímakategóriák határához.



4. ábra: Az erdészeti klímakategóriák várható előfordulása a 2021-2050-es időperiódus átlagában az A1B kibocsátási forgatókönyv feltételezésével. (a1-2): 12 modellszimuláció átlagos becslése az ország teljes területére, valamint a $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ -os rácsháló erdőterületekre eső pontjaira, (b)-(c): a valószínű változás tartománya (a modelleredmények 66%-át magában foglaló tartomány).

Figure 4: Projected shift of macroclimatically suitable zones for climate indicator tree species for 2021-2050 based on the Forestry Aridity Index. (a) Mean of the projections. (b)-(c): 66% range of the simulation results (emission scenario: A1B).

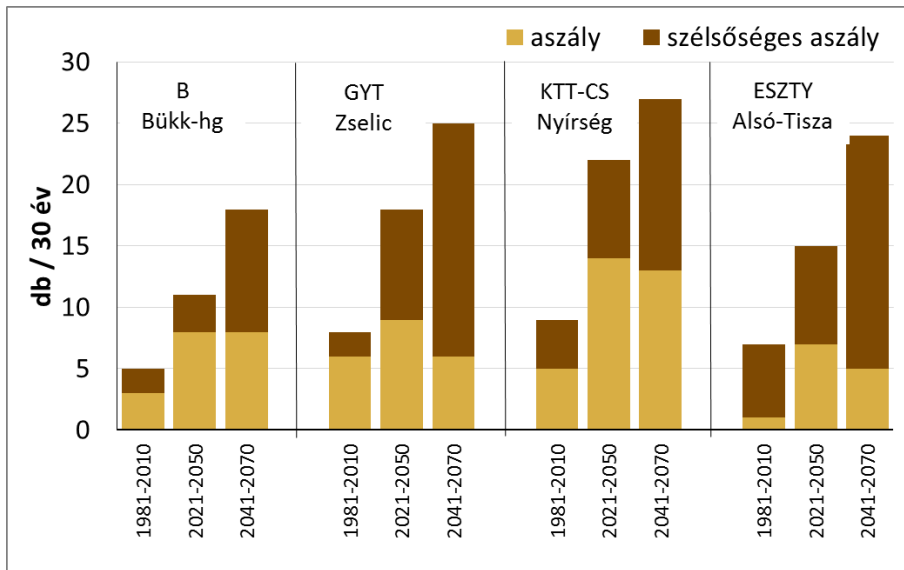


5. ábra: Az erdészeti klímakategóriák a $0,05^\circ * 0,05^\circ$ -os rácsháló erdőterületekre eső pontján (a) 1981-2010-ben, valamint várható előfordulásuk az 1981-2010-es július-augusztusi átlaghőmérséklet (b) $1,5^\circ\text{C}$ -os, (c) 2°C -os, (d) 3°C -os növekedése és konstans csapadékmennyiség esetén.

Figure 5: Macroclimatically suitable zones for climate indicator tree species in (a) 1981-2010 and assuming constant precipitation amount and (a) 1.5°C , (b) 2°C , (c) 3°C increase of the July-August temperature mean relative to 1981-2010.

Szélsőségesen száraz és meleg időszakok várható gyakorisága

A klímamodellek átlagos becslése alapján a 21. század közepére nem csak gyakoribbak, hanem szélsőségesebbek és hosszabbak is lehetnek azok a periódusok, melyekben a fő növekedési időszak jelentősen szárazabb és melegebb, mint az 1981-2010-es átlag. Ez a tendencia klímakategóriától függetlenül jelentkezik, de mértéke a földrajzi helyzettől függően pl. erdészeti tájanként más és más lehet (6. ábra). Míg az 1981-2010-es periódushoz képest 2021-2050-re a FAI alapján, magyarországi klimatikus körülményekre definiált aszályos és a szélsőségesen aszályos évek száma mindenhol megduplázódik, addig a 2041-2070-es időszakra már megháromszorozódik, vagy akár megnégyszereződik. Tovább rontja a helyzetet az, hogy amíg az évszázad első felében az aszályos évek száma nagyobb a szélsőségesen aszályos évekenél, addig az évszázad közepétől már fordított a helyzet, a vizsgált térségek többségében már a szélsőségesen aszályos évek lehetnek a gyakoribbak.



6. ábra: A FAI alapján definiált aszályos és szélsőséges aszályos évek száma 30 éves időszakokra (jövőre: A1B kibocsátási forgatókönyv feltételezésével, 12 klímamodell szimuláció átlagos eredménye alapján).

Figure 6: Total number of moderate and severe droughts defined by the Forestry Aridity Index for 30-year periods (A1B emission scenario, mean projection of 12 regional climate model simulations).

ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

A 21. századi klímaelőrebecslések alapján az elmúlt 50 év során megfigyelt melegedő és szárazodó tendencia várhatóan a 21. században is folytatódni, sőt fokozódni fog. Az átlaghőmérséklet emelkedése és a csapadékmennyiség csökkenése az egyes fajok elterjedése, vitalitása, növekedése és szervesanyag-termelése (növekedés) szempontjából fontos időszakok közül a kritikus hónapokban (július-augusztus) a legnagyobb, de jelentős a fő növekedési periódusban (május-augusztus) is. A magasabb hőmérséklet növekedést serkentő hatása azonban csak addig érvényesül, ameddig a transzspirációhoz szükséges talajból felvehető vízmennyiség rendelkezésre áll.

Azonban az egyre inkább egyenlőtlené váló csapadékeloszlás miatt még konstans, vagy növekvő csapadékösszeg mellett sem kizárt, hogy több szélsőségesen aszályos periódus fog a jövőben előfordulni, mely nemcsak a növekedés csökkenését, hanem a mortalitás kockázatának növekedését is eredményezheti (Somogyi 2018).

A század közepére előrevetített klimatikus viszonyok mellett az olyan klímaadottságú területek, ahol a természetes előfordulású zárt erdők még eredményesen termeszthetők, nagymértékben csökkenhetnek, a jövedelmező gazdálkodásra kevésbé alkalmas erdős-

sztyep klímájú területek nagysága pedig jelentősen (jelenlegi erdőterület több mint egyharmadára) növekedhet. Az eddigi erdőssztyep klímakategória területének fele (az ország területének több mint 10%-a) a mainál még melegebb és szárazabb (sztyep klímájú) lehet. Az új klímakategória tervezett hasznosításához pontosan fel kell mérni, mely területeken várható előfordulása, ugyanis ha ott a természetbe vont fafajok számára egyéb vízforrás nem áll rendelkezésre, akkor a mai erdészeti szabályozás mellett (természetesség, fafajmegválasztás és üzemmód kérdései) az erdőtakaró fenntartása is kétségessé válhat. A komplex értékeléshez ezért a klíma mellett a többi termőhelyi és biotikus tényező együttes elemzése is szükséges.

Az erdészeti szempontjából fontos időszakok klimatikus viszonyainak változása az Agrárklíma.2 projekt többi résztermáiban folytatott hatásvizsgálatokhoz szolgáltat alapszámot. Az alkalmazott klíma modellek azonban szükségszerűen feltételezéseken alapszanak, bizonytalansággal terheltek, így csak lehetséges forgatókönyvként értelmezendők. Azonban a hőmérsékletek szignifikáns emelkedését, az ariditás fokozódását és a bükk számára makroklimatikusan alkalmas területek drasztikus csökkenését, a század végére teljes eltűnését nem csak a projektben használt A1B-re, hanem az új scenáriókra (RCP4.5, RCP8.5) futtatott modellek eredményei is egyértelműen jelzik (Gálos & Somogyi 2017).

A projekt keretében kifejlesztett döntéstámogató rendszer a cikkünkben ismertetett, jövőbeli időszakokra várható FAI-értékek alapján egy adott területen meghatározza az erdészeti klímakategóriát és ez, valamint egyéb termőhelyi tényezők alapján javasol célállományt. A modelleredmények felbontása mikroklíma meghatározást nem tesz lehetővé, azonban ha a felhasználó rendelkezik egy adott erdőrészletben mért legalább 20 éves megbízható meteorológiai idősorral, a klíma modellek által jelzett változási tendencia ehhez képest számítható és értelmezhető.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást az Agrárklíma.2 (VKSZ 12-1-2013-0034) projekt támogatta. Köszönjük Czímber Kornélnak és Balázs Pálnak a térinformatikai háttérrel és segítségnyújtást.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bartholy J., Pongrácz R. & Pieczka I. 2014: How the climate will change in this century? *Hungarian Geographical Bulletin* 63: 55–67. DOI: [10.15201/hungeobull.63.1.5](https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.5)
- Bartholy J. & Pongrácz R. 2017: A közelmúlt és a jövő országos éghajlati trendjei. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai II.) *Erdészeti Lapok* 152(5): 134–136.
- Berki I., Rasztovíts E. & Móricz N. 2014: Erdőállományok egészségi állapotának értékelése – egy új megközelítés. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 149–155.
- Csáki P., Szinetár M.M., Herceg A., Kalicz P. & Gribovszki Z. 2018. Climate change impacts on the water balance – case studies in Hungarian watersheds. *Időjárás* 122(1): 81–99. DOI: [10.28974/idojaras.2018.1.6](https://doi.org/10.28974/idojaras.2018.1.6)

- Czimer 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* 31(7): 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). *Biotic Risks and Climate Changes in Forest. 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.
- 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* 152(6): 173–174.
- Führer E., Horváth I., Moring A., Pödör Z. & Jagodics A. 2017: Az erdészeti szárazsági mutató (FAI) segítségével lehatárolt erdészeti klímaosztályok/klímakategóriák jellemzése. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai IV.) *Erdészeti Lapok* 152(9): 270–272.
- Führer E., Gálos B., Rasztovits E., Jagodics A. & Mátyás Cs. 2017: Erdészeti klímaosztályok területének várható változása. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai III.) *Erdészeti Lapok* 152(6): 174–177.
- Gálos B. & Somogyi Z. 2017: Új klímaszcenáriók – fellélegezhetnek bükköseink? *Erdészettudományi Közlemények* 7(2): 85–98. DOI: [10.17164/EK.2017.006](https://doi.org/10.17164/EK.2017.006)
- Gálos B., Führer E., Czimer 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.
- Illés G. & Fonyó T. 2016: A klímaváltozás fatermesre 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)
- Jacob D., et 38 coauthors EURO-CORDEX, 2013: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14: 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)
- 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.
- 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., Führer E., Berki I., Csóka Gy., Drüsler Á., Lakatos F. et al. 2010: Erdők a szárazsági határon. *Klíma-21 füzetek* 61: 84–97.
- Mátyás Cs. 2017: Alkalmazkodás a törvények, társadalmi elvárások és az ökológiai kihívások kereszttüzében. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai I.) *Erdészeti Lapok* 152(4): 102–106.
- Molnár M., Brück-Dyckhoff C., Petercord R. & Lakatos F. 2010: A zöld karc súdíszbogár (*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: 85–96. DOI: [10.2478/aslh-2013-0007](https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0007)
- Pongrácz R., Bartholy J. & Miklós E. 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research* 9(4): 387–398. DOI: [10.15666/aeer/0904_387398](https://doi.org/10.15666/aeer/0904_387398)

- 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: 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. 2018: A klímaváltozás miatti fapusztulás tovább gyorsíthatja a klímaváltozást. *Erdészettudományi Közlemények* 8(1): 213–228. DOI: [10.17164/EK.2018.013](https://doi.org/10.17164/EK.2018.013)

On-line források

- URL1: The ENSEMBLES project. <http://ensembles-eu.metoffice.com/> Letöltés ideje: 2012. május.
- URL2: CARPATKLIM, Climate of the Carpathian Region. www.carpatclim-eu.org Letöltés ideje: 2013. október.

*Érkezett: 2018. május 3.
Közlésre elfogadva: 2018. május 28.*



Somfalva, külterület

Fotó: Jankó Ferenc (SOE)

TALAJOK SZEREPE A KLÍMAVÁLTOZÁSBAN

Bidló András és Horváth Adrienn

Soproni Egyetem, Környezet- és Földtudományi Intézet

Kivonat

A klímaváltozás jelentős hatással lesz erdőállományainkra. Ez a hatás egyrészt közvetlenül érvényesül, hiszen a klíma az egyik legfontosabb termőhelyi tényező, másrészt más termőhelyi tényezők, mint a hidrológiai- és a talajviszonyok megváltoztatásán keresztül. Utóbbiakban bekövetkező változások egy része viszonylag gyors, egyes esetekben akár egy vegetációs időszak alatt is jelentős változás történhet, más tényezők, hosszabb időszak, akár több száz év alatt jelentkezhetnek. Munkánkban felmértük, hogy a klimatikus változások milyen hatással lehetnek a talajokra. A klímaváltozás hatása elsősorban a talajképző folyamatok megváltozásán keresztül jelentkezhet, így ezek értékelésével mutattuk be a várható változásokat. A talajképző folyamatok megváltozása mellett, értékeltük az erdőállományok anyagforgalmában bekövetkező lehetséges változásokat is.

A termőhelyi tényezők megváltozása és az új – sztyep – klímakategória megjelenése új termőhely típus változatok megjelenését is magával vonzza. Munkánk második részében ismertetjük, hogy milyen termőhelytípus változatok megjelenésével számolhatunk, illetve ezekre milyen alapon adhatunk fajaj-javaslatot. A bevezetés alatt álló Döntés Támogató Rendszernek (DTR) megkönnyíti a jövőben alkalmazható fajok kiválasztását.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, termőhelyváltozás, fajajválasztás, talaj.

ROLE OF SOILS IN CLIMATE CHANGE

Abstract

Climate change will have a significant impact on forest cover of Hungary. Climate is one of the most important site factors therefore, it has a direct influence on forests. On the other hand, the climate has an indirect impact on the change of other site factors, such as hydrological and soil conditions. Some changes occur relatively fast, thus a significant change may happen during a single vegetation period. Some other factors need longer periods or hundred of years for transformation. During our research, we estimated the impact of climate change on soils. Soils not only create the foundations of human, animal and plant life but also have a very important role in regulation and production. Significant changes in soil-forming processes may emerge as a result of climate change. Along with the change in soil-forming processes, we also evaluated possible changes in the nutrient cycle of forest stands.

The appearance of changing site factors and the emergence of a new climate category – steppe – will determine new site type variants. To summarize, we described what kind of site type variants can be expected in the future and what kind of criteria are needed for a tree species proposal. It provides a good basis for a Decision Supporting System (DTR) which will facilitate the selection of tree species in the future.

Keywords: climate change, site change, tree species selection, soil.

BEVEZETÉS

Az egyes fafajok, illetve erdőállományok előfordulását, növekedését és egészségi állapotát alapvetően meghatározzák a termőhelyi körülmények. A hazai erdészeti termőhelyosztályozás alapvetően a klíma, a hidrológia és talaj értékelésével foglalkozik, ugyanakkor figyelembe veszi a tengerszint feletti magasság, a kitettség, a lejtőszög és az alapkőzet szerepét is (Babos et al. 1966).

A termőhelyi tényezőket sokáig állandónak tekintették, azonban az elmúlt évtizedekben megfigyelhettük az egyes tényezők hosszabb, vagy rövidebb idő alatt bekövetkező változását. Az első publikációk elsősorban a hidrológiai viszonyok, azaz a talajvízszint változását jelezték (Magyar 1993, Szodfridt 1994, Jankó 2013), de az elmúlt évtizedben – részben a VKSZ Agrárklíma 2 projekt eredményei alapján – a klíma változását is vizsgáljuk.

A klimatikus tényezők és a talajok között igen szoros kölcsönhatás van, egyrészt a légköri hőmérséklet korrelál a talajhőmérséklettel, másrészt a talaj igen nagy mennyiségű vizet képes tárolni, amely párolgásával jelentősen befolyásolja a helyi klimatikus viszonyokat. Ugyanakkor a talajok kialakulását és tulajdonságait alapvetően meghatározzák a klimatikus körülmények, részben közvetlenül (pl. a csapadék beszivárgásával), részben közvetve (a vegetáción keresztül) (Schachtschabel et al. 1982, Stefanovits et al. 1999). Ha megváltoznak a klimatikus körülmények, akkor rövidebb-hosszabb idő után a talajok átalakulásával számolhatunk.

A jelenlegi ismereteink szerint (Bartholy et al. 2017) az utóbbi három évtizedben, éves átlagban 1,2-1,8 °C, nyáron 2 °C hőmérséklet növekedéssel kell számolnunk. Ezzel egyidejűleg nőtt a meleg szélsőségek (aszályok) száma és aránya. Az éves csapadék mennyisége csak kis mértékben változott, de nőtt a száraz időszakok hossza, illetve a lehulló csapadék intenzitása. A különböző előre becslések – bár eltérő mértékben – de ezen tendenciák fennmaradását, illetve részben erősödését vetítik előre. A klímaváltozás hatására a talajokban közvetlenül két változás következik be, egyrészt növekszik a talajok hőmérséklete, másrészt csökkeni fog a talajok nedvességtartalma. Németországi adatok azt mutatják (Koch 2010), hogy 1951 óta a talajok hőmérséklete 100 cm mélységben átlagosan +0,037 °C-al növekedett évenként.

A csapadék mennyisége és eloszlása, valamint a hőmérséklet változása elsősorban a talajok víz- és tápanyagháztartására hat. Megváltozik a talajok víztartalma, a párolgás és a talajvíz képződésének mértéke. Ugyanez érvényes a talajok anyagforgalmára és az egyes anyagok (pl. nitrát) kimosódására. Ezzel egyidejűleg megváltozhat a talajtömörödés és az erózió mértéke is.

Vizsgálataink során elsősorban a többletvízhatástól független termőhelyeken álló erdőállományokban – ilyen a hazai erdőállományok 80%-a (AESZ 2002) – bekövetkező változásokat kívántuk megbecsülni, mivel ma még nem tudjuk, hogy a jövőben a talajvíz szintje miként változik meg. Irodalmi adatok és saját tapasztalataink alapján áttekintettük, hogy a klimatikus változások miként befolyásolhatják a talajképző folyamatok megjelenését. Az ér-

tékelést nagyban megkönnyítette, hogy a magyarországi talajosztályozási rendszer genetikai és tájféldrajzi elveken nyugszik (Stefanovits et al. 1999), ahol az egyes osztályok elkülönítése a talajképző folyamatok megjelenése és ezek hatása alapján történik. Ez lehetővé teszi, hogy az egyes talajtípusok közötti különbség megjelenését és a klimatikus viszonyok kapcsolatát jobban ki tudjuk mutatni. Munkánk során a különböző talajképző folyamatokat értékeltük.

Munkánk második részében foglalkozunk azzal, hogy milyen hatással lesz az erdőállományok anyagforgalmára a klímaváltozás, illetve miként egészíthetjük ki a jelenlegi termőhelytípus változatokat.

EREDMÉNYEK

Változás a talajképződési folyamatokban

Az egyes talajképződési folyamatok időbeni lefolyása igen eltérő lehet. A talajokban lejátszódó kémiai reakciók (pl. komplexképződés, ioncsere, szorpció) akár néhány tized másodperc alatt megtörténhetnek. Más folyamatok (pl. ionok hidrolízise, gócképződés) inkább percek, vagy napok alatt zajlanak le, és végül vannak olyan folyamatok, mint pl. az ásványok képződése amelyek több év, vagy akár ezer év alatt zajlanak le (Stefanovits et al. 1999.) Ennek megfelelően a klímaváltozás hatására a talajokban bekövetkező változások, illetve átalakulások is igen hosszú időtávlatúak lehetnek, de vannak olyan hatások (pl. erózió), amelyek igen rövid idő alatt megváltoztathatják a talaj tulajdonságait. A következőkben a korábban ismertetett módon megpróbáljuk meghatározni, hogy milyen változások következhetnek be a talajképződésben a klímaváltozás hatására és ennek milyen hatása lehet a talajok tulajdonságára. Az alábbiakban nem tárgyaljuk az összes talajképző folyamatot, hanem csak azokat, amelyekre jelentősebben hathat a klímaváltozás.

Mállás

A talajképződés első lépcsője a mállás, ami magába foglalja a kőzetek aprózódását (fizikai mállás), az ásványok átalakulását (kémiai mállás), illetve az ezekhez kapcsolódó biológiai folyamatokat (biológiai mállás). A mállási folyamatok nem választhatók egyértelműen külön a talajképződés többi folyamatától, ebben a részben csak a szűkebb értelemben vett mállási folyamatokat tárgyaljuk (Stefanovits et al. 1999). A kőzetek aprózódását elsősorban fizikai folyamatok segítik elő (1. ábra). Ezen folyamatok nagy része szoros kapcsolatban áll az időjárással. Mérsékelt égövben az egyik leghatékonyabb mállási folyamat a fagy okozta aprózódás, amelyet a víz megfagyásakor történő kitérülése okoz. Ez a hatás elsősorban olyan helyeken erős, ahol éjszakai fagy után, nappal a hőmérséklet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ felé emelkedik, így a fagy-olvadás folyamat gyakran ismétlődik, ilyen terület jelenleg hazánk is. A téli hőmérséklet növekedésével, ritkábbá válhatnak a fagyok, így ez a hatás kis

mértékben csökkenhet. Hasonló aprózódást vált ki a kőzetek felszínének felmelegedése. A direkt napsugárzás hatására a kőzetek felszíne jelentősen felmelegedhet, ami az egyes ásványok kitágulását eredményezheti. Mivel a különböző színű ásványok, illetve a kőzetek belseje és külseje eltérő mértékben melegszik fel, valamint az egyes ásványoknak eltérő a tágulási együtthatója, a kőzeten belül igen nagy feszültségek keletkezhetnek, ami elősegíti az aprózódást. Ezt a típust sivatagi aprózódásnak nevezzük, mivel elsősorban a száraz területeken fordul elő. A nyári hőmérséklet emelkedésével számolnunk kell ezen aprózódási folyamat erősödésével. Összességében kijelenthetjük, hogy bár a klímaváltozás befolyásolni fogja a kőzetek fizikai mállásának mértékét, ez a hatás viszonylag kicsi, és a különféle hatások részben kiegyenlítik egymást.



1. ábra: Bazalt aprózódása, Boszorkánykő (Salgótarján).

Figure 1: Physical weathering of basalt Boszorkánykő (Salgótarján).

A kémiai mállás elsősorban az elsődleges szilikátok (pl. földpátok) másodlagos szilikátokká (pl. agyagásványok) való átalakulását foglalja magába, ami elsősorban hidrolízissel és hidratációval történik. Mindkét folyamat víz jelenlétében történik csak meg, így száraz talajokon nem léphet fel az átalakulás. Bár a hőmérséklet emelkedés gyorsítja a folyamatot, az víz nélkül nem történhet meg. Ennek megfelelően hazánk nedvesebb tájain, az év egy részében gyorsulhat a folyamat, a szárazabb tájakon lassulni fog a kémiai mállás.

Szerves anyag felhalmozódása

A Föld egyik legfontosabb széntárolói a talajok. A talajok szerves anyagában mintegy 1500 milliárd tonna szén tárolódik, ami ötször annyi mint a föld feletti biomasszában és kétszer annyi, mint a légkörben tárolt szén mennyisége. A talajban tárolt szerves szén a talajélőlényekből (pl. gombák, algák, giliszták, rovarok) valamint az elhalt és átalakult állati- és növénymaradványokból áll. A talajokban található szerves anyag alapvető fontosságú a talaj termőképessége szempontjából és jelentős hatást gyakorol több talajtulajdonságra és funkcióra, amelyek közül a tápelemkörforgalmat, a talaj szűrési és pufferolási képességét, a biológiai aktivitás növelését és a talaj szerkezetére gyakorolt hatást érdemes kiemelni. A talajok szerves anyagtartalmát (általános névvel humusz) a talajtípus, a klíma, a domborzat, a talajvíz előfordulása, a növényzet típusa és a gazdálkodási mód határozza meg. Jelentős befolyásoló tényező a talajra kerülő szerves anyag mennyisége és minősége valamint a talajélőlények aktivitása.

A talajra kerülő szerves anyag mennyiségét alapvetően a felszín felett keletkező biomassza mennyisége befolyásolja. A növények az általuk a légkörből felvett széndioxid egyik felét a fotoszintézis során szerves anyaggá alakítják át, a másik felét légzéssel (pl. gyökér légzés) újból a légkörbe bocsátják ki. Hazai viszonyok között – többletvízhatástól független hidrológiai kategóriában – legtermékenyebbnek a bükkös klímában található erdőállományok tekinthetők, így itt a legnagyobb a keletkező szerves anyag mennyisége (Führer et al. 2011). Ugyanakkor a talajban tárolt szervesanyag mennyiségét elsősorban nem a rá kerülő szerves anyag mennyisége, hanem annak lebomlása határozza meg. A hazai talajfejlődési folyamatok vizsgálata azt mutatja, hogy a lebomlást elsősorban két tényező a téli hideg és a nyári szárazság akadályozza. Vizsgálataink azt mutatják, hogy azonos alapközeten (pl. löszön) kialakult talajok esetén a szárazabb területeken keletkező csernozjom talajok lényegesen több szerves szént tartalmaznak, mint a nedves területeken, erdők alatt képződő barna erdőtalajok. Ezen eredmények egybevágnak az egyes erdőállományokra vonatkozó adatokkal (Führer et al. 2014). Ezek alapján feltételezhetjük, hogy bár a klímaváltozás hatására csökken a biomassza produkció, a talajokban felhalmozódott szerves szén mennyisége – a lebomlási folyamatok gátlódása miatt – akár növekedhet is. A nemzetközi irodalom általában ezzel ellentétes hatást, azaz talaj szerves anyag tartalmának csökkenését jelzi előre (Blum 2007). A 2003-as, szélsőségesen meleg év jelentősen növelte a talaj széndioxid kibocsátását (EU 2011). Kérdéses, hogy ez a növekedés a hazai szárazabb körülmények között is fellép-e, ahol a mikrobiológiai aktivitást nem elsősorban a hőmérséklet, hanem a szárazság gátolja.

Más a helyzet a többletvizes termőhelyeken. A hazai lúp és réti talajokon gyakran a víz telítettség miatt fellépő oxigén hiány gátolja meg a szerves anyag lebomlását, amely folyamat eredménye a talajokban képződő tőzeg réteg. Hansági vizsgálataink is azt mutatták, hogy e réteg több ezer évig is tárolja a növények által (Bidló et al. 2018) a levegőből felvett szenet (2. ábra). Ugyanakkor e tőzeges szint lebomlása a talajvízszint csökkenés eredményeképpen néhány évtized alatt is megtörténhet.



2. ábra: A hansági Csikos-éger kotus láptalaja és a rajta található éger állomány
Figure 2: Alder stand on peat soil in Hanság, Csikos-éger

A hansági Csíkos-égeresben végzett vizsgálataink azt mutatták, hogy a talajban a szerves szén, 4-5 ezer évvel ezelőtt elhalt növényekből is származhat. A szerves szintek ugyanakkor a vízszint süllyedés után akár néhány évtizeden belül lebomolhatnak a talaj megnövekedett oxigén tartalmának köszönhetően fellépő mikrobiológiai bomlás eredményeképpen. A klímaváltozás egyik nagy kérdése, hogy a globális felmelegedés hatására olvadó fagyott talajok, illetve kiszáradó lápok milyen mennyiségben bocsájtanak ki – a szerves anyag lebomlása miatt – CO₂-ot és egyéb vegyületeket. Az így kibocsátott CO₂ mennyiségét az EU területén évente 100 millió tonnára becsülik (EU 2011). Mivel hazánkban a lápok lecsapolása már korábban megtörtént, ma már viszonylag kis mennyiségű CO₂ kibocsátással kell számolnunk ebből a forrásból, ugyanakkor, ha a talajvízszint csökkeni fog és új területek száradnak ki, a kibocsátás növekedhet.

Az európai talajok mintegy 75 milliárd tonna szerves szenet tartalmaznak, ami 275 milliárd tonna CO₂-nek felel meg (EU 2011). Figyelembe véve, hogy az európai CO₂ emisszió évente mintegy 4 milliárd tonna, igen fontos, hogy a talajok szerves szén tartalmát megőrizzük, illetve növeljük. Vizsgálataink azt mutatták, hogy a szántóföldeken történő erdősítések, nem csak a biomasszában kötik meg a CO₂-t, hanem hosszabb távon növelik a talajban tárolt szerves anyag, így szén mennyiségét is (Bidló et al. 2014). A klímaváltozáshoz való adaptáció során bekövetkező művelés váltáskor, illetve ezen belül a művelési módok megválasztásánál figyelembe kellene venni nem csak a biomasszában, hanem a talajokban megkötött szén mennyiségét (Somogyi et al. 2013). Ugyanakkor a különböző vizsgálatok azt mutatják, hogy a legtöbb országban csökken a talajokban tárolt szerves szén mennyisége (EU 2011). A talajokban tárolt szerves szén mennyiségét tovább csökkentheti a sivatagosodás és az erózió is.

Kilúgzás

A kilúgzás alatt általában a szénsavas mésszel azonosan, vagy annál könnyebben oldódó anyagoknak a talajszelvényből, vagy annak valamely szintjéből történő kimosódását értjük (Stefanovits et al. 1999). A kilúgzás mértékét elsősorban a talajban lefelé áramló víz mennyisége határozza meg, de erősen befolyásolja a kémhatás és a redoxi viszonyok is. A talajban lefelé áramló víz mennyisége a csapadék mennyiségétől és az evapotranspiráció mértékétől függ. Erdőállományokban erősebb a kilúgzás, mert a fák gyökere mélyebb rétegekből veszi fel a vizet, mint a lágyszárú növényeké, így több a lefelé áramló víz mennyisége, ezzel egyidejűleg a fák avartakarója savanyúbb kémhatású, ami szintén a kilúgzás erősödését vonja maga után.

A klímaváltozás eredményeképpen – feltételezve, hogy a növényzet összetétele jelentősen nem változik – azzal számolhatunk, hogy az evapotranszpiráció növekedni fog. 2 °C-os hőmérséklet emelkedés átlagos becslés alapján 5-6%-os növekedést eredményez az aktuális párolgásban, így ennyivel csökken a lefelé áramló víz mennyisége (Csáki et al. 2018), ami a kilúgzás csökkenéséhez fog vezetni. Mivel a kilúgzási folyamatok hatására



bekövetkező CaCO_3 veszteség igen hosszú – több évszázadon át tartó – folyamat, ez nem jelenti talajaink gyorsabb átalakulását. Ugyanakkor a talajok mésztartalma kevésbé fog csökkenni, ami a vízháztartás romlását hozhatja magával.

Agyagosodás

A talajképződési folyamatokban jelentős az elsődleges – főleg szilikátos ásványok – átalakulása agyagásványokká (Stefanovits et al. 1999). Ennek eredményeképpen nő a talajban található agyagásványok mennyisége, ami javítja a talaj víz- és tápanyagtároló képességét. 1 m² talaj felszín alatt, akár 50-200 kg agyag is keletkezhet. Az igen lassú folyamat egyik előfeltétele a kilúgzás megléte, ennek megfelelően a klímaváltozás hatására a folyamat csökkenni fog, de ez az egyes talajok tulajdonságában jelentős változást nem eredményez. Az agyagosodás változása főleg a barna erdőtalajok és közethatású talajok átalakulását befolyásolhatja, amely hazánk erdőterületének, közel 59%-át érintheti (AESZ 2002)

Agyagbemosódás és podzolosodás

Mindkét folyamat kapcsolódik a talajok kilúgzásához és a lefelé áramló vízhez. Agyagbemosódás alatt az A-szint agyagtartalmának lefelé áramlását és a B-szintben való felhalmozódását értjük (Stefanovits et al. 1999). Ezen folyamat eredményeképpen jöttek létre hazánk legtermékenyebb erdei taljai, az agyagbemosódásos barna erdőtalajok. Viszonylag lassú folyamatról van szó, amely elsősorban hazánk csapadékosabb részein jelent csak meg, ennek megfelelően a szárazodással az agyagbemosódás mértéke csökkenni fog, de ez nem jelent jelentősebb változást a talaj tulajdonságaiban. Hasonlóan igaz a podzolosodásra is, azaz az agyagásványok szétesésére, mivel hazánkban már a jelenlegi klimatikus viszonyok sem teszik lehetővé podzol talajok létrejöttét, ilyenekkel a hűvösebb és csapadékosabb klimatikus viszonyok között találkozhatunk, ennek megfelelően a változás nem lesz jelentős.

Szikesedés

Hazánkban az elmúlt évszázadok vízrendezése és a klíma változása jelentős hatással volt talajaink szikesedésére. A szikes talajok képződésében elsősorban a száraz klímának és a felszín közeli, oldott sókat tartalmazó talajvíznek van kiemelt szerepe (Tóth et al. 2006). Ott, ahol a potenciális evapotranspiráció meghaladja a csapadék mennyiségét és van felszín közeli talajvíz, a talajban felfelé irányuló vízmozgás alakulhat ki, amely magával viszi a talajban található oldott sókat is. A szárazabb időjárás növelheti a felfelé áramló víz mennyiségét, így fokozódhat a szikesek elhalmozódása a felső szintekben. Ugyanakkor a talajvízszint süllyedése ettől eltérő eredménnyel jár, mivel a mélyebb talajvízszint már nem teszi lehetővé a felszín közeli só utánpótlást. Ennek megfelelően azokon a területeken, ahol

csökken a talajvíz szintje, csökkenhet a szikesedés mértéke, hiszen az év egy részében (pl. télen) lefelé irányuló víz áramlás van a talajban, ami a sókat is magával viszi. Az elmúlt évtizedekben – elsősorban a vízrendezés hatása miatt – hazánkban csökkent a sziksók felhalmozódása a felsőbb talajrétegekben (Margóczy et al. 2009). Ennek megfelelően – különösen a Duna-Tisza közén – csökkent a szikesedés mértéke (Tóth et al. 2001). Ma még nem tudjuk előrebecsülni, hogy milyen hatása lesz a klímaváltozásnak a talajvíz szintjére, így ennek megfelelően nehéz előre megmondani a szikesedés mértékének változását. A jelenlegi adatok azt mutatják, hogy vannak olyan területek, ahol nőtt a talajvíz szintje, de nagyobb kiterjedésűek azon területek, ahol csökkent. A változást elsősorban a helyi domborzati és vízrajzi adottságok határozzák meg. Összességében kijelenthetjük, hogy a szikesedés mértékének változása – ma még – nem becsülhető módon határozza meg erdőállományaink jövőjét.

Erózió

A talajok fejlődése során vannak olyan folyamatok is, amelyek hatására a talajokban igen rövid idő alatt következik be jelentős változás. Ezek általában a talajok leromlását, degradációját okozzák. A talaj degradációban kiemelt szerepet játszanak az eróziós folyamatok, amelyek között különválasztjuk a víz okozta eróziót, illetve a szél okozta deflációt (Stefanovits et al. 1999). A vízerózió előfeltétele a hirtelen lehulló nagy mennyiségű csapadék, vagy a tartós csapadék. Mindkét esetben a talajba, vagy annak egyes rétegeibe nem képes már a víz beszivárogni, amely eredményeképpen lejtős területeken megindul a talajszemcsék elmozdulása. A vízeróziót több tényező, így a növényborítottság mértéke, a talaj víztartalma, a talaj humusztartalma, a talajszemcsék mérete, a lejtő szöge és hossza is befolyásolja. A jövőben a vízeróziós károk növekedésével kell számolnunk, mivel az előrejelzések alapján nő a csapadékok intenzitása (extrém esők megjelenése), a száraz időszakok megjelenése miatt csökkenhet a vegetáció borítottság, illetve a jobban felmelegedő talajfelszín kiszáradása is növeli a kockázatot. Európa területének 16%-át veszélyezteti a vízerózió, különösen a szárazabb területeken, ahol a száraz időszakot jelentős csapadékok követik, számolhatunk a vízeróziós károk növekedésével (EU 2011). A vízerózió során elsősorban a talaj felső rétegeinek finom anyaga szállítódik el, ami azt jelenti, hogy csökken a talaj humusz- és tápanyagtartalma. Az erózió miatti sekélyebb termőréteg kevesebb vizet képes tárolni, így romlik az állományok vízellátottsága. A Keszthelyi-hegységben végzett vizsgálataink azt mutatták, hogy a feketefenyő állományok pusztulása elsősorban ott lépett fel, ahol a korábbi legeltetés miatt sekély termőrétegű köves-sziklás vázталajok, illetve rendzina talajok fordulnak elő (3. ábra). A vízerózió csökkentésére érdemes már most megfelelő intézkedéseket tenni.



3. ábra: Köves-sziklás váztalaj és pusztuló fekete fenyő állomány a Keszthelyi-hegységben.
Figure 3: Stony rocky skeletal soil and dying black pine stand in Keszthely Mountains.

Defláció

A defláció (szélerózió) mértékét elsősorban a szél sebessége és örvényessége határozza meg, befolyásoló tényezői között a deflációs területek hosszát, a talaj szemcseösszetételét, szerkezetességét, és szervesanyag-tartalmát, a talaj felszín érdességét és nedvességtartalmát, valamint a növényborítottság mértékét szokták kiemelni (Stefanovits et al. 1999). A klímaváltozás hatására növekedni fog a jelentős sebességű szelek gyakorisága, valamint az alföldi területeken csökkeni fog a növényborítottság mértéke. Az egyes talajtípusokon eltérő az ún. kritikus sebesség, amely már megindítja az egyes talajszemcséket, míg homoktalajokon ez az érték 6,5 m/sec körüli, addig a kötött réti talajokon 9,6 m/sec is lehet (Lóki et al. 2005, Bartus et al. 2013). Ha a szél sebesége nő, akkor gyakrabban alakulhat ki olyan helyzet, amely már deflációval járhat. Mivel már jelenleg is a leggyakrabban az alföldi területeken lépnek fel deflációs károk, ezeken a területeken növekedhet a károkozás. Ez kettős hatással járhat, egyrészt csökken a termőréteg vastagsága, másrészt a szél által felkapott talajszemcsék jelentős kárt okozhatnak a „homokveréssel”, illetve a facsometék betemetésével. A szélerózió hatással van az emberi egészségre is, a porterhelés közvetlen veszélyt, illetve légzőszervi megbetegedést okozhat. Mivel a széleróziós károk mértéke a szélesebesség – növénytakaró kapcsolattól függ, igen nehéz megbecsülni a károkozás mértékének változását. Ugyanakkor érdemes kiemelni, hogy a múlt század elejéig az Alföld egyes részein alapvető probléma volt a defláció.

A korábbi vizsgálatokból tudjuk, hogy a megfelelő növénytakaró, különösen az erdősávok jelentősen csökkenthetik a defláció mértékét (Zentay 1989, Lóki 2003, Bartus et al. 2013). Hazánkban már a XIX. század első felében jelentős mezővédő erdősáv telepítés volt a szélcsökkentés (Keresztesi 1971), illetve a kedvező mikroklíma megteremtése érdekében (Kort 1988). Érdemes lenne megfontolni – különös tekintettel a klímaváltozás hatásainak csökkentésére – az erdősáv telepítések felújítását.

A klímaváltozás hatása az erdőállományok anyagforgalmára

A természetes erdők anyagforgalma közel egyensúlyi állapotban van. A növények által a légkörből származó széndioxid, a talajból felvett víz és mineralizált tápanyag mennyisége közel azonos a körforgalomba visszakerülő anyagok mennyiségével (Larcher 1994). Természetesen ezt az egyensúlyt a természeti „katasztrófák” pl. egy-egy idős fa kidőlése, az erdőtüzek, az abiotikus és biotikus károk megjelenése hosszabb – rövidebb ideig módosíthatja, illetve egyik irányba (pl. lebomlási folyamatok megerősödése) eltolhatja, de a természetes ökoszisztémák ezeket a „zavarokat” képesek kiegyenlíteni. Az egyensúlyi állapotot az antropogén hatások jelentősen megbontották, elsőként a termőföld nyérés érdekében végzett erdőirtások, majd a tervszerűtlen fakitermelések jelentek meg, mely folyamatok nagyban veszélyeztették az erdőállományok fennmaradását és használatát. E felismerés vezetett, több, mint 300 éve a tartamosság fogalmának megalkotásához. Ugyanakkor a XIX. század közepe óta erdeinket olyan környezeti változások is érik,

amelyeket már helyi szinten nem lehet kezelni. Ezek közül az első nagy változás hazánkban a folyószabályozás volt, ami jelentősen átalakította – különösen az alföldi – erdeink termőhelyi viszonyait. Mivel a folyószabályozás egyik fő célja éppen a szántóföldi művelésre alkalmas termőföld nyereség volt, az akkor hegy- és dombvidéki erdőkben gazdag Magyarországon, az alföldi erdei termőhelyek visszaszorulása nem okozott gondot.

Az erdőállományok, illetve a talajok vízháztartásának megváltozása már önmagukban is jelentősen megváltoztatták az erdei ökoszisztémák anyagforgalmát, amihez csatlakozik a klímaváltozás okozta hatás. Sajnos hazai mérési eredményeink csak korlátozottan állnak a rendelkezésünkre, de nemzetközi eredmények alapján megbecsülhetjük a magyarországi erdőket érintő hatásokat. A klímaváltozás a hőmérséklet emelkedésével és a vegetációs időszak meghosszabodásával fokozhatja a fák növekedését és tápanyagfelvételét, de a gyakoribbá váló száraz időszakok pont ezzel ellentétes hatást válthatnak ki (Jolly et al. 2005, Rohner et al. 2016, Bircher et al. 2016). A hőmérséklet és a CO₂-koncentráció növekedése együtt járt a talajban felvehető nitrogén mennyiségének növekedésével (Schlepp et al. 2002). Egy összefoglaló tanulmány szerint (Borken et al. Matzner 2009) a mérsékelt égövi erdők szárazodása a talajban csekélyebb lebontást és nitrogén felszabadulást jelenthet. Ugyanakkor a légköri antropogén eredetű nitrogén depozíció hatása sokkal erősebb, mint a klímaváltozás miatt bekövetkező lebontás csökkenés eredménye (Sutton et al. 2011). Az utóbbi fél évszázadban az atmoszférából származó nitrogén ülepedés jelentősen megnőtt, ami nagyban befolyásolja az erdőállományok tápanyagellátottságát, de a talaj (és a talajvíz) nitrogénkészletét is. A nitrogénszegény talajokon álló erdőállományokban ez a többlet fokozza a fák növekedését, abban az esetben, ha elegendő víz és tápanyag áll rendelkezésre (Pretzsch et al. 2018). Ha megbomlik a fák tápelemegyensúlya, azaz a többlet nitrogén miatt Ca-, Mg-, K- vagy P-hiány lép fel a levelekben, a növények érzékenyebbek lesznek a fagyra vagy a károsítókra, illetve növekszik a nitrát kimosódás a talajból. Utóbbi együtt jár más kationok kimosódásával, így a talaj savanyodásával. Hazai erdőállományaink esetén a fák tápelemfelvételét elsősorban a rendelkezésre álló víz határozza meg, mint limitáló faktor. Ennek megfelelően ritkán kell tápelem hiánnyal számolnunk az erdőállományokban. Mivel a jövőben a vegetációs időszak – a magasabb hőmérséklet miatt – szárazabb lesz, így valószínűsíthető, hogy a jövőben is a víz lesz a meghatározó faktor a fák növekedése és tápelemfelvétele során.

A klímaváltozás hatása a fafajválasztásra

A fentiekben bemutattuk, hogy milyen hatással van a klímaváltozás a talajokra és az erdőállományok anyagforgalmára. Bár a hatások egy része hosszabb távon jelentkezik, a víz- és a szélerózió károsítása akár igen rövid idő alatt is megjelenhet. Ezek elsősorban a termőréteg csökkenése által fejtik ki kedvezőtlen hatásukat. A talajfejlődési folyamatokban bekövetkező változásoknál lényegesen gyorsabban jelenik meg az előrejelzések alapján az egyes klímatisztikus kategóriák térbeli eltolódása (Führer et al. 2017). Ez azt jelenti, hogy a jövőben olyan termőhelytípus változatok megjelenésével is kell számolnunk, amelyek eddig

hazánkban nem fordultak elő. Ezek egy része a sztyep klímához kapcsolódik (ez a klíma kategória eddig nem volt hazánkban), más része a klíma területi „eltolódásával” jár együtt, azaz olyan talajtípusok is megjelenhetnek pl. az erdősztyep klímában, amelyek kialakulásának feltételei más klímához és növényzethez kapcsolódnak. E talajtípusok a megváltozott környezeti feltételek között idővel átalakulhatnak, de ez több évtizedes, vagy akár évszázados folyamatok eredménye lehet. Ennek megfelelően az új termőhelytípus változatokkal is kell számolnunk. Szükséges, hogy az új termőhelytípus változatokra is tudjunk fajaj javaslatokat adni. Ezt nem tehetjük meg a terepi tapasztalatok alapján, hiszen olyan termőhelytípus változatokkal kell számolnunk, amelyek jelenleg még nem fordulnak elő. Ezért a jelenlegi ismereteink alapján kell megbecsülnünk, hogy mely fajajok lesznek alkalmasak az új termőhelytípus változatokra. A becslést az adott klímában előforduló talajokkal való hasonlóság, illetve az egyes fajajok termőhelyi igényének figyelembevételével lehet megtenni. Ennek megfelelően került kiegészítésre a jelenleg alkalmazott célállomány táblázat.

ÖSSZEFOGLALÓ ÉRTÉKELÉS

A klímaváltozás közvetlenül, de más termőhelyi tényezők, mint a hidrológiai- és a talajviszonyok megváltoztatásán keresztül is jelentős hatással lesz az erdőállományainkra. Mivel az egyes termőhelyi tényezők szoros kölcsönhatásban vannak és közösen határozzák meg az erdőállományok előfordulását és növekedését mindenképpen szükséges, hogy a jövőben is együttesen értékeljük ki ezeket. A talajviszonyok értékelésénél nem mindig alapozhatunk a korábbi tapasztalatainkra, mivel egyes talajképző folyamatok megerősödhetnek, mások gyengülhetnek a klímaváltozás hatására. A klímaváltozás eredményeképpen új termőhelytípus változatok jöhetnek létre, amelyekre meg kell találnunk az alkalmazható fajajokat. Egyes esetekben kiindulhatunk a jelenleg meglévő hasonló termőhelytípus változatokra ajánlott fajajokból, de sok esetben olyan termőhelyekkel (pl. klimatikus viszonyokkal) találkozhatunk, amelyek korábban hazánkban nem fordultak elő, a hazai erdőszeti kutatás és gyakorlat egyik nagy feladata, hogy fajaj javaslatukat tudjon adni ezekre a termőhelyekre is.

A klímaváltozás miatt egyes talajtulajdonságok szerepe megnövekszik. Ezek közé tartozik a talajok víztározó képessége, hiszen csak megfelelő vízellátottság mellett lesznek képesek erdeink a hosszabb szárazabb időszakot átvészelni. A talajok víztározó képességét elsősorban a talaj fizikai félesége és a termőréteg vastagsága határozza meg. Ezért is fontos, hogy az eróziós és deflációs károktól megvédjük talajainkat. Igen fontossá válik a talajok szerves szén tartalma. Egyrészt ez javítja a talaj víztároló képességét, másrészt a talaj az egyik legfontosabb széntároló. Olyan gazdálkodást kell folytatnunk, amely megőrzi, ha lehet növeli a talajok szerves szén készletét.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy bár nehéz előrebecsülni a klímaváltozás hatását talajainkra, a jövőben kiemelt feladat kell legyen a termőképesség megőrzése.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást az Agrárklíma.2 (VKSZ 12-1-2013-0034) projekt támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- AESZ (Állami Erdészeti Szolgálat) 2002: Magyarország Erdőállományai 2001. Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest.
- Babos I., Horváthné Prosz T., Járó Z., Király L., Szodfridt I. & Tóth B. 1966: Erdészeti termőhelyfeltárás és térképezés. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Bartholy J. & Pongrácz R. 2017: A közelmúlt és a jövő országos éghajlati trendjei. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai – II.) Erdészeti Lapok 152(5): 134–136.
- Bartus M., Farsang A., Szatmári J. & Barta K. 2013: Szélerózió becslése és modell alapú területhasználat optimalizáció a defláció veszélyeztetettség csökkentése érdekében, dél-alföldi mintaterületen. In: Dobos E., Bertóti R.D. & Szabóné Kele G. (eds): Talajvédelem – Talajtan a Mezőgazdaság, a Vidékfejlesztés és a Környezetgazdálkodás Szolgálatában. (Különszám: Talajtani Vándorgyűlés, Miskolc, 2012. augusztus 23-25.). Talajvédelmi Alapítvány, Magyar Talajtani Társaság és Miskolci Egyetem Földrajz Intézet, Miskolc, 57–66.
- Bidló A., Szűcs P., Horváth A., Király É., Németh E. & Somogyi Z. 2014: Telepített kocsánytalan tölgy és akác fiatalosok hatása a talaj szénkészletére néhány dunántúli erdőtelepítés példáján. Erdészettudományi Közlemények 4(2): 121–133.
- Bidló A., Novák T.J., Brúnó B. & Horváth A. 2018: Peat transformation as a response on environmental changes under swampy alder forest. Geophysical Research Abstracts 20: EGU2018-17143.
- Bircher N., Calleret M., Zingem A. & Bugmann H. 2016: **Potenziele Grundflächeveränderungen auf Bestandesebene im Klimawandel.** In: Pluess A.R., Brang P. & Augustin S. (eds): Wald im Klimawandel, Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien.
- Blum W.E.H. 2007: Bodenkunde in Stichworten, Berlin-Stuttgart.
- Borken W. & Matzner E. 2009: Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology 15(4): 808–824. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x)
- Csáki P., Szinétár M.M., Herceg A., Kalicz P. & Gribovszki Z. 2018. Climate change impacts on the water balance – case studies in Hungarian watersheds. *Időjárás* 122(1): 81–99. DOI: [10.28974/idojaras.2018.1.6](https://doi.org/10.28974/idojaras.2018.1.6)
- EU (Europäische Kommission) 2011: Boden: Der verborgene Teil des Klimazyklus – Luxemburg. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. DOI: [10.2779/30430](https://doi.org/10.2779/30430)
- Führer E., Czupy Gy., Kocsiné Antal J. & Jagodics A. 2011: Gyökérvizsgálatok bükkös, gyertyános-kocsányos tölgyes és cseres faállományban. *Agrokémia és Talajtan* 60(1): 103–118.
- Führer E., Csiha I., Szabados I., Pödör Z. & Jagodics A. 2014: Egy cseres faállomány föld feletti és föld alatti szerves-anyagának meghatározása. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2): 109–119.
- Führer E., Gálos B., Rasztovits E., Jagodics A. & Mátyás Cs. 2017: Erdészeti klímaosztályok területének várható változása. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai – III.) *Erdészeti Lapok* 152(6): 174–177.
- Jankó F. 2013: Elfeledett viták az alföldi erdősisítés és vízrendezés éghajlati hatásairól. *Földrajzi Közlemények* 137(1): 51–63.
- Jolly W.M., Dobbertin M., Zimmermann N.E. & Reichstein M. 2005: Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters* 32: L18409. DOI: [10.1029/2005GL023252](https://doi.org/10.1029/2005GL023252)
- Keresztesi B. 1971: Magyar Erdők. Akadémiai Kiadó, Budapest.

- Koch D. 2010: Langzeit-Entwicklung der Bodentemperaturen in verschiedenen Naturräumen Nodrhein-Westfalens. Diplomaarbeit, Geographisches Institut der Universität zu Köln.
- Kort J. 1988: Benefits of Windbreaks to Field and Forage Crops. Agriculture, Ecosystems and Environment, 22-23: 165–190. DOI: [10.1016/0167-8809\(88\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90017-5)
- Larcher W. (eds): *Ökophysiologie der Pflanzen*. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Lóki J., Rajkai K., Czyz E.A., Dexter A.R., Diaz-Pereira E., Dumitriu E., et al. 2005: SIDASS project: Part4. Wind erodibility of cultivated soils in north-east Hungary. Soil and Tillage Research 82(1): 39–46. DOI: [10.1016/j.still.2005.01.006](https://doi.org/10.1016/j.still.2005.01.006)
- Magyar L. 1993: A Duna-Tisza közti hátság vízgazdálkodási problémái c. konferencia előadása: Hogyan érintik a hátság erdőgazdálkodását a vízgazdálkodási problémák? Erdészeti Lapok 128(7-8): 211–213.
- Margóczy K., Rakonczai J., Barna Gy. & Majláth I. 2009: Szikes növénytakarások összetételének és talajának hosszú távú változása a Szabadkígyósi pusztán. CRISICUM: A Körös-Maros Nemzeti Park Igazgatóság időszakos kiadványa 5: 71–83.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Kemmerer J. & Uhl E. 2018: Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. Forest Ecology and Management 429: 589–616. DOI: [10.1016/j.foreco.2018.07.045](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.045)
- Rohner B., Braun S., Weber P. & Thürig E. 2016. Wachstum von Einzelbäumen: das Klima als Baustein im komplexen Wirkungsgefüge. In: Pluess A.R., Augustin S. & Brang P. (eds): Wald im Klimawandel, Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien. 137–155.
- Schachtschabel P., Blume H.P., Hartge K.H. & Schwertmann U. 1982: Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Eike Verlag, Stuttgart.
- Somogyi Z., Bidló A., Csiba I. & Illés G. 2013: Country-level carbon balance of forest soils: a country-specific model based on case studies in Hungary. European Journal of Forest Research 132(5-6): 825–840. DOI: [10.1007/s10342-013-0718-x](https://doi.org/10.1007/s10342-013-0718-x)
- Stefanovits P., Fülepy Gy. & Füleky Gy. 1999: Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., et al. 2011: The European Nitrogen Assessment Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press.
- Szodfridt I. 1993: Erdészeti termőhelyismeret-tan. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Szodfridt I. 1994. Az erdők és a talajvíz kapcsolata a Duna-Tisza közti homokhátságon. A Nagyalföld Alapítvány kötetei 3. Békéscsaba, 59–67.
- Tóth T., Kuti L., Kabos S. & Pásztor L. 2001: Az alföldi szikes talajok elterjedését meghatározó agrogeológiai tényezők térinformatikai elemzése 1:500 000 méretarányban. In: Dormány G., Kovács F., Péti M. & Rakonczai J. (eds): A földrajz eredményei az új évezred küszöbén: A Magyar Földrajzi Konferencia tudományos közleményei. Szeged, 2001.10.25-27. Szegedi Tudományegyetem TTK Természeti Földrajzi Tanszék, Szeged.
- Tóth T. & Szendrei G. 2006: A hazai szikes talajok és a szikesedés, valamint a sófelhalmozódási folyamatok rövid jellemzése. In: Szendrei G. & Tóth T. (eds): A magyarországi szikes talajok felszíni sóásványai. (Topographia Mineralogica Hungariae, IX.) Herman Ottó Múzeum, Miskolc, 7–20.
- Zentay T. (eds) 1989: A szélerózió elleni védekezés lehetőségeinek módszereinek feltárása Csongrád-megye homokterületein. Magyar Tudományos Akadémia Szegedi Akadémiai Bizottságának Kiadványai, Szeged.

Érkezett: 2018. május 7.

Közlésre elfogadva: 2018. június 1.



A származás mellett az utódok genetikai adottságai is döntő jelentőségűek

A közel 30 éves Petite Charnie-i kocsánytalan tölgy származási kísérletben (Franciaország, Normandia) a Telavi (Kaukázus, Grúzia) származás gyenge növekedése és rossz törzsalakja sok évszázados emberi beavatkozás, a negatív szelekció következményeit mutatja. A támogatott áttelepítés (migráció) során nemcsak a klimatikus alkalmazkodottság, hanem a populáció genetikai minősége is fontos kiválasztási szempont kell legyen.

Fotó és szöveg: Mátyás Csaba (SOE)

EGY THORNTHWAITE TÍPUSÚ VÍZMÉRLEG MODELL AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS HIDROLÓGIAI HATÁSAINAK ELEMZÉSÉHEZ

Herceg **András**¹, Kalicz **Péter**¹, Kisfaludi **Balázs**¹ és Gribovszki **Zoltán**¹

¹Soproni Egyetem, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet

Kivonat

A globális átlaghőmérséklet emelkedése drasztikus hatással lehet a vízkörforgalomra. Jelen tanulmány célja egy Thornthwaite típusú havi vízmérlegmodell kifejlesztése, kalibrálása távérzékelt evapotranszpirációs adatbázis felhasználásával. A kalibrált modellt 4 regionális klímamodell segítségével az aktuális párolgás és a talajnedvesség előrejelzésre is használtuk, a 2010-2040, 2040-2070, és 2070-2100-as periódusokra, feltételezve az IPCC SRES A1B kibocsátási forgatókönyvet, összevetve az 1980/2010-es referenciái-időszakkal. A modell előnye, hogy kizárólag havi hőmérséklet és csapadék idősorokat igényel bemeneti paraméterként (robosztus felépítés). A kalibrációs paraméter a talaj víztároló kapacitása (SOIL_{MAX}), amelyet az elérhető aktuális párolgás adatbázissal kalibráltunk. Ha a talajfizikai paraméterek ismertek, a maximális gyökérmélység is meghatározható. A modell vízgyűjtőszinten, vagy olyan területeken alkalmazható, ahol nincs járulékos vízutánpótlás a felszínről vagy felszín alól. A modell tesztelésére egy Mosonmagyaróvár melletti vegyes felszínborítású parcellát és egy Sopron melletti erdős kisvízgyűjtőt választottunk. Szárazságstresszre vonatkozó paramétereket is meghatároztunk a relatív hasznosítható víz (REW) és a talajvíz deficit (SWD) révén. A modellt sikeresen kalibráltuk egy vegyes felszínborítású parcellára és egy erdő borította vízgyűjtőre észak-nyugat Magyarországon.

Kulcsszavak: havi vízmérleg, klímaváltozás, evapotranszpiráció, talajnedvesség, szárazságstressz.

A THORNTHWAITE-TYPE WATER BALANCE MODEL FOR THE ANALYSIS OF THE HYDROLOGICAL IMPACT OF CLIMATE CHANGE

Abstract

The global temperature increase is expected to cause severe impacts on the water balance. The objective of this paper was to develop a new monthly step model based on a Thornthwaite-type monthly water balance estimation and calibrate the model parameters using remote sensing-based evapotranspiration dataset. The calibrated model was also used for projection based on the simulation results of 4 regional climate models applying the IPCC SRES A1B emission scenario. The 3 periods of projection were: 2010-2040, 2040-2070, and 2070-2100 compared to the reference period (1980/2010). The benefit of our method is its robust structure; therefore it can be applied if temperature and precipitation time series are accessible. The key parameter is the water storage capacity of the soil (SOIL_{MAX}), which can be calibrated using the actual available evapotranspiration data as well. **If the soil's physical properties are available, the maximal rooting depth is also projectable.** The model can be used at the catchment level or for areas without additional water amounts from below. We have determined parameters (REW; SWD) to evaluate the water stress during the 21st century. The model has been successfully calibrated for a mixed parcel and for a small forest covered catchment in Northwest Hungary.

Keywords: water balance, climate change, evapotranspiration, soil moisture, water stress.

Levelező szerző/Correspondence:

Herceg András, 9400 Sopron, Bajcsy-Zsilinszky u. 4., e-mail: herceg.andras88@gmail.com

BEVEZETÉS

A kontinensekre hulló csapadék 62%-a elpárolog (Dingman 2002), tehát a párolgás modellezésének (számszerűsítésének) fontossága globális szinten vitathatatlan. Kifejezetten igaz ez a klímaváltozással kapcsolatos előrejelzések szemszögéből hazánkban, ahol a le-hullott csapadék 90%-a elpárolog (Kovács 2011).

A párolgás tehát fontos a hozzáférhető vízkészletek szempontjából, s egyúttal szabályozza a növények elterjedését és az elsődleges termelést is (Neilson 1995, Vörösmarty és mtsai 1988). A világ élelmiszer-termelésének alapjául szolgáló földterületek java része öntözés alatt áll, tehát az elpárolgott öntözővízről szerzett tudás alapvető fontosságú (Dingman 2002). Ennek ellenére, még manapság is a vízmérleg legkevésbé ismert része a párolgás (Wilson és mtsai 1992).

Globális szinten, a 21. század végére azok a klíma-forgatókönyvek, melyek figyelmen kívül hagyják a folyamat enyhítésére szolgáló intézkedéseket, 3,7-4,8 °C-os hőmérséklet-növekedéssel számolnak az 1850-1900-as referencia időszakhoz képest (alapul az iparosodás előtti kibocsátási szinteket tekintve) (IPCC 2014).

Az Európai regionális klíma-előrejelzések tekintetében szintén általános egyetértés van, amely statisztikailag szignifikáns melegedést jelent minden évszakban (Christensen és mtsai 2007; Jacob és mtsai 2008; Linden van der és Mitchell 2009). Vautard és mtsai (2014) Európa klímájának változását kutatták a 2 °C-os globális felmelegedéshez kapcsolódóan (amely az iparosodás előtti időszakokhoz képest értelmezendő). A globális klíma szimulációk (SRES A1B forgatókönyvek alapján, 30 éves vizsgálati periódus) eredményeit skálázták le 25 kilométeres felbontásra regionális klímamodellek segítségével. A globális 2 °C-os átlaghoz képest az Európai hőmérséklet-növekedés feltételezhetően magasabb lesz (referenciaként az 1971-2000-es időszakot vették).

Magyarországon a felmelegedés az elmúlt 30 évben vált a legintenzívebbé. Legfőképpen a nyári hőmérsékletek emelkedtek, közel 2 °C-kal (Bartholy és mtsai 2011, HREX 2012). A 21. századra készített klíma előrejelzések közös álláspontot képviselnek a hazai emelkedő hőmérsékletek (minden évszakban) és a fokozódó klimatikus ariditás tekintetében (Gálos, 2015). Az előrevetített melegedés 2-5 °C között várható az alkalmazott klímamodellel és kibocsátási forgatókönyv függvényében (Nováky és Bálint 2013; Pongrácz és mtsai 2011). A legszélsőségesebb esetben a 21. század végére, a hazai éves átlaghőmérséklet megegyezhet a déli mediterrán területek jelen átlagaival (Mika 1999; URL1).

A klímaváltozás a hőmérséklet-emelkedésen túl – a változó csapadékmintázaton és párolgáson keresztül – jelentősen befolyásolhatja a vízkörforgalmat, hiszen a magasabb hőmérséklet magasabb energiapotenciált reflektál az atmoszférába, amely gyorsítja a hidrológiai ciklust (Sun és mtsai 2008; Szilágyi és Józsa 2008). Ez a gyorsulás pedig változásokat eredményez a csapadék időbeli eloszlásában, amely az egy csapadékesemény alatti mennyiség-növekedést idézi elő, miközben az éves csapadékmennyiség nem mutat jelentős változást.

Granier és mtsai (1999); Lutz és mtsai (2010); Remrová és Císleřová (2010); Keables és Mehta (2010) vízmérlegmodellek hatás elemzésével foglalkoztak.

Granier és mtsai (1999) napi léptékű vízmérlegmodellt készített erdőállományok vízmérlegének meghatározására, azzal a céllal, hogy számszerűsítse a szárazság intenzitását és időtartamát Franciaország különböző régióiban. Ez a modell szintén robosztus, mivel bemeneti paraméterként potenciális párolgást (Penman-Monteith), csapadékot, és levélfelületi indexet használ. A modellben a maximális hasznosítható vízkészlet nem kalibrációs modell paraméter, hanem az adott helyre becsült érték. A modell az állományi transzspirációt, interceptiót és talajnedvesség-tartalmat számol. Granier és mtsai (1999) a talajprofil néhány horizontális rétegre osztva vették figyelembe. Kalibrációként transzspirációs nedvaramlás-mérést végeztek. A validáció a mért, és az egyhetes frekvenciájú szimulált talajnedvesség összevetésével történt.

Remrová és Císleřová (2010) egy fűborítású kísérleti vízgyűjtő (Uhlířska, Csehország) vízmérlegét vizsgálta. Előrejelzéseket végeztek a 2071-2100-as vizsgálati periódusra, egyetlen regionális klímamodell (HIRHAM/HadCM3, SREC A2 forgatókönyv) eredményeit felhasználva. Vizsgálták a szárazságstresszt is, amely kutatásaikban a kalkulált potenciális párolgás és a szimulált párolgás különbségéből adódik.

Lutz és mtsai (2010) a Yosemite Nemzeti Park (USA) legelterjedtebb fafajainak eloszlását elemezte a vízmérleg változók (az éves vízmérleg deficit (PET-AET) és az aktuális párolgás AET) összefüggésében, a kitettséget, a lejtést és a talaj víztározó kapacitását is figyelembe véve. Egy módosított, havi időlépcsős Thornthwaite típusú vízmérlegmodellt használt, Hamon PET megközelítéssel (Dingman 2002). Klíma-előrejelzéseket alapul véve aktuális párolgást és deficitet (PET-AET) számoltak a múlt és jövő klímájára (Lutz és mtsai 2010).

Keables és Mehta (2010) a talajban rendelkezésre álló vízkészletek klimatikus függését elemezték, a jellemző talajtípusokhoz kapcsolódóan Kansas tagállam (USA) területén, egy havi időlépcsős Thornthwaite vízmérlegmodellt felhasználva. Bemeneti paraméterek a hőmérséklet és csapadék, mellyel a Hamon-féle PET került meghatározásra az 1950-2006-os időszakra. Emellett aktuális párolgást, talajvíz-felhasználást, utánpótlódást és lefolyást is meghatároztak. Előrejelzéseket azonban nem végeztek a vízmérleg paramétereire.

A bemutatott tanulmányok tekintetében elmondható, hogy kevés foglalkozik a vízmérleg tételeinek kiértékelésével, és jövőbeli alakulásával úgy, hogy kevés bemeneti paraméterigényű modellt alkalmaz, és ezáltal könnyen kiterjeszhető is. Mindazonáltal csak néhány tanulmány célozta meg a klímaváltozás vízmérlegre gyakorolt hatásainak felfedését a 21. századra, amely a Kárpát-medence speciális éghajlati sajátosságait is figyelembe veszi.

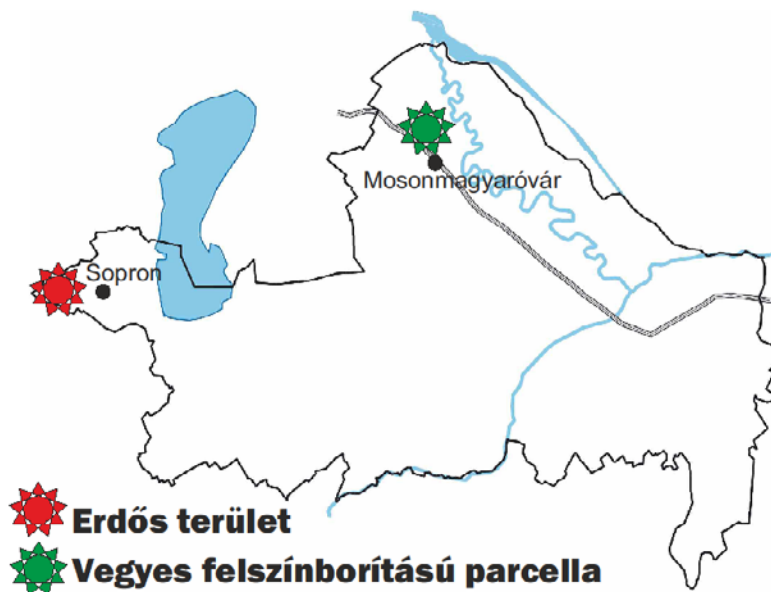
A jelen kutatás fő célja egy havi időlépcsős vízmérlegmodell kifejlesztése. A fejlesztett modell egy meglévő robosztus havi vízmérleg modell egyenleteit veszi alapul, azonban aktuális párolgást is használó kalibrációs eljárással lett továbbfejlesztetve, és regionális célokra alkalmazható. A kifejlesztett modell segítségével pedig a mezőgazdasági és az erdészeti szektorra (olyan területekre, amelyek nem rendelkeznek járulékos felszíni vagy felszín alatti vízutánpótlódással) gyakorolt éghajlat-változási hatások feltárása, számszerűsítése.

ADAT ÉS MÓDSZER

Kutatási terület

A modellünk tesztelésére két kutatási területet jelöltünk ki, amelyek Magyarországon, a Nyugat-Dunántúlon találhatóak (1. ábra).

Az erdős terület egy 6 km² összterületű kísérleti vízgyűjtő az Alpok keleti lábánál, nem messze Soprontól. A terület éghajlata szubalpin. Az átlagos évi középhőmérséklet 8,5 °C. Az éves csapadékösszeg 700-750 mm. A legszárazabb évszak az ősz, a legnedvesebb pedig a nyár és a késő tavasz (Danzky 1963, Marosi-Somogyi 1990). A vízgyűjtő geológiai alapja folyami üledék, amely a kristályos kőzeten öt rétegben rakódott le a harmadidőszakban (Miocén). A finomabb szemcséjű réteg a völgytalpban jelenik meg, amely egyúttal jó víztartó (Kisházi-Ivancsics 1985). A fizikai talajféleség agyag. Az uralkodó fafajok a vízgyűjtőn a lucfenyő (*Picea Abies*) és a bükk (*Fagus sylvatica*) az északi lejtőkön, valamint kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) és bükk a déli lejtőkön.



1. ábra: A kutatási területek. A koordinátáik a következők: 47°40'11.3"N; 16°27'31.1"E (erdős terület) és 47°54'19,20"N; 17°15'09,89"E (vegyes felszínborítású parcella).

Figure 1: The study areas. The coordinates of the them are the following: 47°40'11.3"N; 16°27'31.1"E (forested area) and 47°54'19,20"N; 17°15'09,89"E (mixed parcel).

A második kutatási terület az úgynevezett 'vegyes felszínborítású parcella', amely alapvetően egy mezőgazdasági terület, jellemzően kukoricaföld. 2003 és 2007 kivételt képez, hiszen ebben a két évben árpát, 2004-ben pedig búzát termesztettek. A parcella teljes területe 1 km², amelyen nemesnyár-fasorok (*Populus × Canadensis*) is található (arányaiban ez 10%-os jelent). A terület a Mosoni-sík kistáján található, Győr-Moson-Sopron megyében. Geológiai értelemben a Duna hordalékkúp déli felhalmozódásos lejtője, amely a süllyedő mélyedése a Kisalföldnek. A kistáj észak-nyugati részén folyami hordalék és folyami kavics borítja a felszínt a Lajta két oldalán, de a déli és délkeleti részen üledékes iszapos-löss borította felszín található. Az éghajlat kontinentális. A kistáj nyugati felén (ahol a parcella található) 9,7 °C az átlagos évi középhőmérséklet. Az éves csapadékösszeg 560 mm. Kavicsos fejlődött hidromorf talaj jellemzi a kistáját. Továbbá a nyárfa ültetvények aránya jelentős a kistáján (Dövényi 2010).

Alkalmazott adatbázisok

A modell kalibrálásához havi aktuális párolgás térképeket használtunk fel (ET_{CREMAP}).

Bouchet (1963) komplementáris elméletén alapulva Morton és mtsai (1985) megalkották WREVP modelljét regionálisan reprezentatív, aktuális evapotranszpiráció értékek számítására. Szilágyi és Józsa (2009), Szilágyi és mtsai (2011) kifejlesztettek egy metódust (CREMAP), amellyel a komplementáris elmélet alapján számított pontszerű aktuális evapotranszpiráció adatok és távérzékelt felszíni hőmérséklet térképek segítségével, a térben változó aktuális párolgás havi szinten számíthatóvá válik. A módszer alapja egy lineáris transzformáció. Ez a transzformáció 8 napos összetett MODIS nappali felszíni hőmérséklet adatokat konvertál aktuális párolgás értékekre (Szilágyi és Józsa 2009). Kovács (2011) az előbbi modellt felhasználva havi aktuális párolgás térképeket készített (ET_{CREMAP}) Magyarországra, a 2000 és 2008 közötti periódusra, március és november hónapok közötti időszakokra.

Thornthwaite típusú hidrológiai modell leírása

Az *Agrárklíma.2* projekt hőmérséklet (T_M) és csapadék (P_M) adatbázisa, valamint a távérzékelt aktuális párolgás térképek adatsora (ET_{CREMAP}) (Szilágyi és mtsai 2010, Kovács 2011) szolgálták a modell bemeneti adataiként.

Az alap vízmérleg modell C.W. Thornthwaite nevéhez fűződik (Thornthwaite 1955), amelyet továbbfejlesztve és azt a kutatás céljához hozzáigazítva hoztuk létre saját új és regionálisan alkalmazható modellünket.

A Thornthwaite típusú vízmérlegmodellt a hidrológusok szezonális szimulációkhoz, elsősorban a hó felhalmozódás, a talajnedvesség és a párolgás tanulmányozására használják.

A bemeneti adatokat a havi csapadékösszegek és átlaghőmérsékletek képezik (Dingman 2002).

Az eredeti Thornthwaite-modell módosított változatának (Dingman 2002) kalibrálása aktuális párolgás adatok felhasználásával történt (Kovács 2011).

Az aktuális párolgás a felszínről párolgó és a növények párologtatása során keletkező vízmennyiségből tevődik össze, ha a rendelkezésre álló vízkészlet korlátozott.

A saját fejlesztésű vízmérlegmodell kalibrációjának időintervalluma a párolgástérképek rendelkezésre állásának időszaka volt (2000-2008).

A modellállítás első lépése a potenciális párolgás (PET [$mm \cdot nap^{-1}$]) meghatározása.

A potenciális párolgáson azt az értéket értjük, ami egy nagy, növényzettel egyenletesen és teljesen borított területen jelenne meg, amennyiben a fejlődő növényzet korlátlan vízkészletekhez férne hozzá, advekción és a hőtárolás hatásai nélkül (Dingman, 2002).

Hamon (1963) nyomán mi egy hőmérséklet alapú, globálisan kalibrált PET modellt használtunk (PET_H).

$$e_m^* = 0,611 \cdot \exp\left(\frac{17,3 \cdot T_m}{T_m + 237,3}\right) \quad (1)$$

$$PET_H = 29,8 \cdot D \cdot \frac{e_m^*}{T_m + 273,2} \quad (2)$$

Ahol:

D : naphossz [óra]

T_a : átlagos havi hőmérséklet [$^{\circ}C$]

e_a^* : telítési párányomás [kPa].

A havi időlépcső miatt a PET_H értékét [$mm \cdot hónap^{-1}$] mértékegységre kellett átváltani.

A következő lépés egy feltétel volt.

H_a :

$$P_M \geq PET_M \quad (3)$$

Akkor:

$$ET_M = PET_M \quad (4)$$

$$SOIL_M = \min\{[(P_M - ET_M) + SOIL_{M-1}], SOIL_{MAX}\} \quad (5)$$

Ahol:

$SOIL_{MAX}$: a talaj víztároló képessége [mm]

PET_M kalibrált havi potenciális párolgás [mm].

A PET_M meghatározása a kalibráció része, ami a következő alfejezetben kerül bemutatásra.

A modellben szereplő talajnedvesség nem a talajban tárolt teljes mennyiségét jelenti, hanem a növényzet számára elérhető teljes vízmennyiséget.

A kezdő $SOIL_{M-1}$ érték $SOIL_{MAX}$ -ra lett beállítva, mivel a modellezés nyugalmi időszakban kezdődött, így feltételezhető a talaj telítettség. A $SOIL_{MAX}$ értékének meghatározása egy adott területre a következő:

$$SOIL_{MAX} = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) * Z_{rz} \quad (6)$$

Ahol:

θ_{fc} : szántóföldi vízkapacitás [dimenzió nélküli],

θ_{pwp} : hervadásponyi víztartalom [dimenzió nélküli],

Z_{rz} : gyökérszóna vertikális kiterjedése [mm].

A $SOIL_{MAX}$ értéke a kalibráció előtt 1 méteres szabványos kezdő termőréteg vastagságra lett beállítva.

Ha:

$$P_M < PET_M \quad (7)$$

Akkor:

$$ET_M = P_M + SOIL_{M-1} - SOIL_M = P_M + \Delta SOIL \quad (8)$$

Ahol:

$$\Delta SOIL = SOIL_{M-1} - SOIL_M = SOIL_{M-1} * \left(1 - \exp\left(-\frac{PET_M - P_M}{SOIL_{MAX}}\right) \right) \quad (9)$$

$\Delta SOIL$: A talajnedvesség-változás értéke [mm].

Modell kalibráció

A modell kalibrációja a modellfejlesztés részét képezi. A kalibráció alapvetően két különálló részre bontható: a potenciális párolgás (PET_H) és az aktuális párolgás (ET_M) kalibrálása az adott felszínborításra az aktuális párolgástérképek (ET_{CREMAP}) felhasználásával.

A potenciális párolgás kalibrációjához a 'segmented' nevű 'R' programcsomagot használtunk. Az 'R' egy szabad szoftver környezet, amely elsősorban statisztikai számításokhoz és grafikához használható (R Core Team 2012).

Előrevetítés

Az előrevetítés 4 regionális klímamodellel (RCM) segítségével történt, melyek fő paraméterei a 1. táblázatban találhatóak.

1. táblázat: Az alkalmazott regionális klímamodellek (Lenderink és mtsai 2003; Jacob 2001; Jacob és mtsai 2007; Christensen és van Meijgaard 1992; Jones és mtsai 2004).

Table 1: The applied regional climate models (Jacob 2001; Jacob et al., 2007; Christensen and van Meijgaard 1992; Christensen et al., 1996; Jones et al., 2004).

Modell azonosító	Kutatóintézet	Modell	Globális klímamodel (GCM)	Forgatókönyv	Felbontás
1	MP_I	REMO	ECHAM5	A1B	25*25 km
2	SMHI	RCA	ECHAM5-r3	A1B	25*25 km
3	DMI	HIR-HAM5	ECHAM5	A1B	25*25 km
4	KNMI	RACMO2	ECHAM5-r3	A1B	25*25 km

A regionális klímamodellek havi léptékű csapadék és hőmérséklet eredményeit értékeltük ki a 2010-2100-as időszakra, amelyek felhasználásával a vízmérleg elemei (párolgás, talajnedvesség) is előrejelezhetőek. A klímamodell eredményei szisztematikus hibával terhelték, viszont feltételezhetjük, hogy ez a hiba időben nem változik. Ezért a nyers, hibakorrigálatlan modelleredmények értékelésekor a múltbeli referencia időszakhoz (1980/2010) képesti változás (3. Táblázat) megfelelően alkalmazható a hatásbecsléshez.

Az előrejelzéshez a 21. századot három vizsgálati periódusra osztottuk: 2010/2040 (2010.01.01-2040.01.01); 2040/2070 (2040.01.01.-2070.01.01.); 2070/2100 (2070.01.01.-2100.01.01.). Az egyes időintervallumokra alapvető leíró statisztikai számításokat végeztünk.

Szárazságstressz

A szárazság stressz meghatározásához a relatív hasznosítható víz (REW) és a talajnedvesség deficit (SWD) meghatározása szükséges a következő (10. és 11.) egyenletek segítségével (Granier és mtsai 1999).

$$REW = \frac{SOIL_M}{SOIL_{MAX}} \quad (10)$$

Ahol:

REW relatív hasznosítható víz [dimenzió nélküli],

Ha a (R)EW értéke az $SOIL_{MAX}$ 40%-a alá esik, akkor a transzspiráció folyamatosan csökken (a sztómák bezáródása miatt), és szárazságstressz jelenik meg.

$$SWD = SOIL_{MAX} \cdot 0,4 - SOIL_M \quad (11)$$

Ha: $SOIL_M < 0,4 * SOIL_{MAX}$ és ezért az SWD értékei pozitívak, szárazságstressz feltételezhető.

Ahol:

SWD: talajnedvesség deficit [mm]

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Módszertani eredmények

A potenciális párolgás (PET_H) adott felszínborításra történő kalibrálása során a jó vízelátottságot a következőképpen határoztuk meg: a csapadékmennyiség értékei (P_M) meghaladják a potenciális párolgás értékeit (PET_H), vagy az aktuális párolgás értékei (ET_{CREMAP}) meghaladják a potenciális párolgás értékeit.

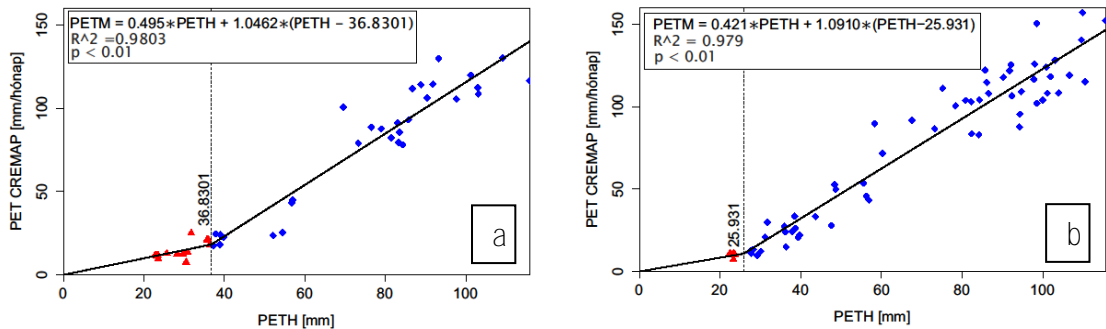
$$P_M > PET_H \text{ vagy } ET_{CREMAP} > PET_H \quad (12)$$

A kiválasztott ET_{CREMAP} és PET_H értékek között szegmentált regressziót állítottunk fel. A kiválasztott ET_{CREMAP} értékeket PET_{CREMAP} -nak fogjuk hívni.

A kiválasztott hónapokban a függő változó az adott felszínborításra vonatkozó potenciális párolgás (PET_{CREMAP}) a független pedig a Hamon-féle potenciális párolgás (PET_H) volt. A nyugalmi időszakban és a vegetációs időszakban a potenciális párolgás értékei eltérőek a vegetáció eltérő állapota miatt. Ezért a kiválasztott PET_{CREMAP} és a hozzá tartozó PET_H adatpárok között külön-külön hoztunk létre úgynevezett szegmentált regressziós kapcsolatot a vegetációs és a nyugalmi időszakra.

A szegmentált regresszió általánosan értelmezve kettő vagy több egyenes vonallal ábrázolt lineáris kapcsolatot jelent, amelyek ismeretlen értékeknél kapcsolódnak össze. Ezeket az ismeretlen értékeket nevezik töréspontoknak (Vito 2008).

A 2. ábrán az alkalmazott szegmentált regresszió, míg az 2. táblázatban annak eredményei találhatóak.



2. ábra: Regressziós kapcsolat: PET_{CREMAP} és $PETH$ között nyugalmi és vegetációs időszakban, a vegyes felszínborítású parcellára (a) és az erdős területre (b) nézve.

Figure 2: Relationship between ET_{CREMAP} and $PETH$ in growing and dormant seasons for the mixed parcel (a) and forested area (b).

2. táblázat: Szegmentált regresszió eredményei a vegyes felszínborítású parcellára és az erdős területre.
Table 2: Results of the broken line regression for the mixed parcel and the forested area.

Kutatási terület	Szegmensek	Becslés*	Standard hiba**	t érték	$Pr(> t)^{***}$
Vegyes felszínborítású parcella	1. szegmentált regressziós szakasz	0,495	0,0961	5,145	<0,01
	2. szegmentált regressziós szakasz	1,0462	0,128	8,153	NA
Erdős terület	1. szegmentált regressziós szakasz	0,421	0,284	1,477	<0,01
	2. szegmentált regressziós szakasz	1,0910	0,291	3,760	NA

Az 2. táblázatban szereplő 'NA' (nem elérhető) oka, hogy a ' $Pr(>|t|)$ ' értéke esetén a normál aszimptotikák nem alkalmazhatók.

*: A regressziós egyenesek iránytangensei.

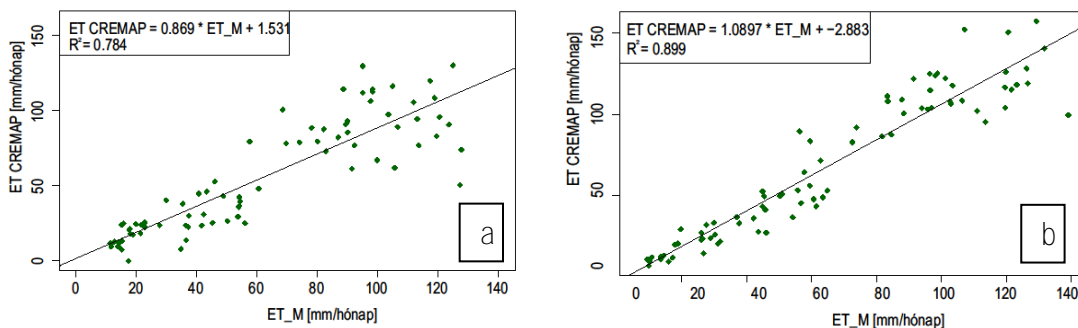
** : Az iránytangensek standard hibái (mozgó szórás).

***: $Pr(>|t|)$: A meredekség hipotézis-tesztjének p-értéke. Mindkét esetben szignifikánsan különbözik nullától. A nullhipotézis szerint a meredekség értéke 0. Mivel a p érték az esetünkben nagyon kicsi, ezért elvetjük a nullhipotézist.

Az 2. ábrán található egyenletek segítségével létre tudtuk hozni a kalibrált potenciális párolgás értékeket (PET_M [mm]).

A következő lépés az aktuális párolgás (ET_M [mm]) kalibrációja volt. A kalibrációs paraméter ebben az esetben a talaj víztároló képessége ($SOIL_{MAX}$ [mm]) (Dingman 2002).

A $SOIL_{MAX}$ értékét iteráció segítségével állítottuk be. Az iterálást a maximális korreláció eléréséig végeztük az ET_{CREMAP} és az ET_M között. Ehhez 'optim' nevű függvényt használtunk a már említett 'R' szoftver segítségével. Ez a függvény, a különbség négyzetösszeg minimumát keresi.



3. ábra: Regressziós kapcsolat: ET_M és ET_{CREMAP} között; kalibrált modell a vegyes felszínborítású parcellára (a) és az erdős területre (b) nézve.

Figure 3: Relationship between the calculated ET_M and the measured ET_{CREMAP} for the mixed parcel (a) and the forested area (b).

A kalibráció után az ET_M és az ET_{CREMAP} közötti kapcsolat a következő R^2 értékek segítségével jellemezhető: 0,748 (vegyes felszínborítású parcella) és 0,899 (erdős terület) (3. ábra). Az értékekből következik, hogy a modell kielégítő pontosságú. A kalibrációs fázisban az erdős területre jobb korrelációt kaptunk, amely feltehetően a homogénebb és a folyamatosan hasonló felszínborításból adódik (közel 100%-os erdőborítottság).

A kalibráció után, a $SOIL_{MAX}$ értékével, valamint a talajfizikai adatok segítségével, a gyökérszóna vertikális kiterjedése (és ezáltal a maximális termőréteg vastagság is) kiszámítható. A vegyes felszínborítású parcella esetén $SOIL_{MAX}$ értéke: 277 mm, míg az erdős terület esetén 503 mm. A gyökérszóna vertikális kiterjedése, az adott területen jellemző talaj fizikai félelenség figyelembevételével, 1809 mm a vegyes felszínborítású parcella és 3284 mm az erdős terület esetén.

A nyolc éves kalibrációs időszak alatt az ET_M átlagértéke 44 mm/hó volt a vegyes felszínborítású parcella, míg 51 mm/hó az erdős terület esetén. Az átlagos talajnedvesség ($SOIL_M$) értéke 197 mm a vegyes felszínborítású parcellán és 405 mm az erdős területen; míg a talajnedvesség minimumai ($SOIL_{M_MIN}$) a következők: 78 mm (vegyes felszínborítású parcella) és 232 mm (erdős terület).

Regionális klímamodellek eredményei és tendenciái

A regionális klímamodellek 30 éves hőmérsékletátlagait tekintve elmondhatjuk, hogy 2,6 °C-os növekedés tapasztalható a 21. század végére az 1980/2010-es referencia-időszakhoz képest. A növekedés üteme mérsékeltebb a század közepéig (0,9 °C (2010/2040-es periódus)), majd fokozódik a század vége felé (1,7 °C (2070/2100)) (3. Táblázat).

A csapadék százalékos változásai szignifikáns változást nem mutatnak a 21. század folyamán, mindössze 1,81%-os emelkedést jelent a 2070/2100-as időszakra.

3. táblázat: *RCM-ek hőmérséklet átlagainak abszolút és csapadék átlagainak százalékos változásai és a szórások a vizsgált periódusokra, az 1980/2010-es referencia-időszakhoz képest.*

Table 3: *The RCM's mean values and standard deviations of the temperature and precipitation between 1980 and 2100.*

Paraméter	1980/2010	2010/2040	2040/2070	2070/2100
T [°C]	10,7 (7,1)	11,6 (7,5)	12,4 (7,4)	13,3 (7,5)
P [%]	0 (39)	-1,05 (42)	+1,98 (42)	+1,81 (43)

A vízmérlegmodell paramétereinek eredményei és tendenciái a 21. században

A különböző regionális klímamodell adatokkal futtatott vízmérlegmodellek közül három ('1'; '2'; '3') emelkedő tendenciát vetít előre a 21. század végére a párolgás (ET_M) tekintetében (4. ábra). Az emelkedés mértéke: +11% mindkét kutatási terület esetén. Az ET_M értékeinek, a négy klíma modell miatti szórásstartomány a ~5%-ról, ~20%-ra emelkedik. A jelentős változást a '4' modell modellátlagtól való szignifikáns eltérése okozza a 21. század végére.

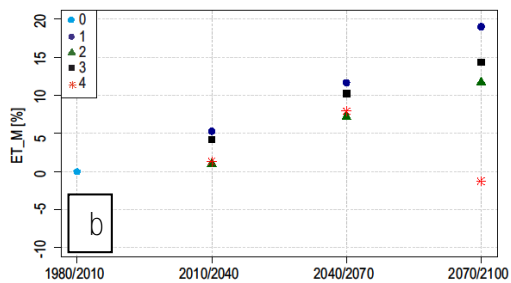
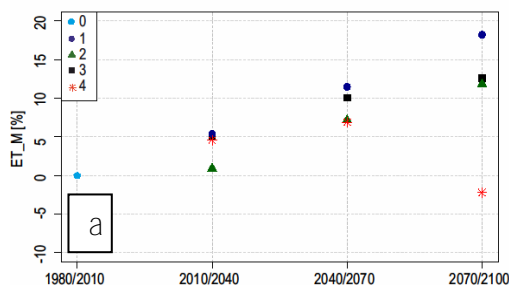
A talajnedvesség ($SOIL_M$) tekintetében csökkenő trend feltételezhető a 21. század végére, melynek értéke 12% a vegyes felszínborítású parcella, és 11% az erdős terület esetén (4. Táblázat).

Az 5. ábrán megjelenített talajnedvesség minimum értékek ($SOIL_{M_MIN}$) a növények számára elérhető minimumok, ezért a szárazságstressz szempontjából fontosak. A modellek átlaga szerint jelentős értékcsökkenés várható a 21. század végére, amelynek értéke: 48% a vegyes parcella és 32% az erdős terület esetén (4. Táblázat). A '4' modell jelzi előre a legkisebb talajnedvesség minimum értékeket, mindkét felszínborítás esetén, amely 80%-os esést jelent a vegyes felszínborítású parcellán és 60%-os esést az erdős területen a 2070/2100-as időszakra nézve, az 1980/2010-es referencia-időszakhoz képest (5. ábra). A '3' modell a század közepére (2040/2070) emelkedést jelez előre, mindkét vizsgált területen, ezért a $SOIL_{M_MIN}$ esetén a 2040/2070-es periódusban tapasztalható a legnagyobb modell-szórás (~100% (vegyes felszínborítású parcella); ~75% (erdős terület)). A minimum értékek szeptember és október hónapokban jelentkeznek.

4. táblázat: ET_M ; $SOIL_M$ és $SOIL_{M_MIN}$ várható változása a 4 modell átlagára és szórás a kutatási területeken az 1980/2010-es referencia időszakhoz képest.

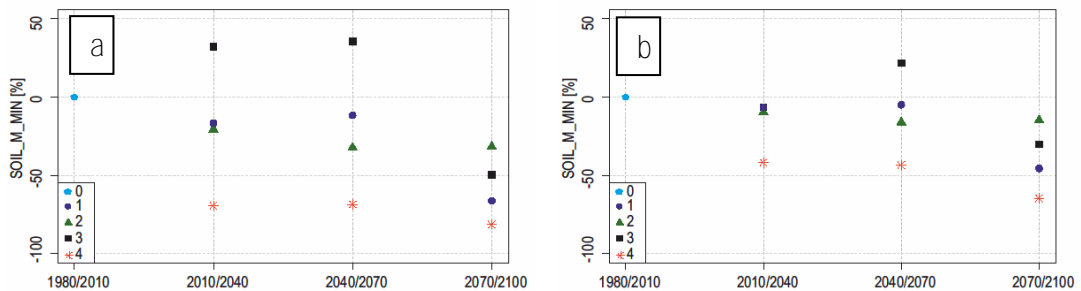
Table 4: Rates of ET_M , $SOIL_M$ and $SOIL_{M_MIN}$ with standard deviations for the study sites.

Paraméterek	2010/2040 [%]	2040/2070 [%]	2070/2100 [%]
ET_M (vegyes felszínborítású parcella)	+5 (34,53)	+10 (35,84)	+11 (35,87)
ET_M (erdős terület)	+3 (37,62)	+9 (39,21)	+11 (39,40)
$SOIL_M$ (vegyes felszínborítású parcella)	-5 (48,36)	-6 (53,35)	-12 (60,81)
$SOIL_M$ (erdős terület)	-5 (66,69)	-8 (74,30)	-11 (82,21)
$SOIL_{M_MIN}$ (vegyes felszínborítású parcella)	-16	-20	-48
$SOIL_{M_MIN}$ (erdős terület)	-11	-8	-32



4. ábra: Az előrejelített párolgás átlagértékeinek változása a vegyes felszínborítású parcellán (a) és az erdős területen (b) 1980 és 2100 között.

Figure 4: Projection of the ET_M values for mixed parcel (a) and forested area (b) between 1980 and 2100.



5. ábra: Az előrejelített talajnedvesség minimumok átlagértékeinek változása 1980 és 2100 között a vegyes felszínborítású parcellán (a) és az erdős területen (b.)

Figure 5: Projection of the $SOIL_{M_MIN}$ values for mixed parcel (a) and for forested area (b) between 1980 and 2100.

A 21. század folyamán a REW értékei körülbelül 10%-ot csökkennek mindkét kutatási terület esetén (88%-ról, 78%-ra) (10. egyenlet alapján számítva).

Az SWD esetén a képletből fakadóan (11. képlet) a 40% feletti értékek jelentik a szárazságstresszt. A szárazságstresszel érintett hónapok aránya, amelyekben tehát a 40%-ot meghaladja a talajvízdeficit, 2%-ról (7 hónap a 360 hónapból) 14%-ra (50 hónap) emelkedik az erdős terület, míg 4%-ról (14 hónap), 19%-ra (68 hónap) emelkedik a vegyes felszínborítású parcella területén. Az eredmények alapján elmondható, hogy szignifikáns szárazságstressz a 21. század végére sem várható (5. Táblázat).

5. táblázat: Szárazságstresszes hónapok aránya a talajnedvesség deficit (SWD) érték függvényében.

Table 5: Rates of the months with water stress development during the 21st century in context of the SWD values.

Kutatási terület	1980/2010 [%]	2010/2040 [%]	2040/2070 [%]	2070/2100 [%]
Erdős terület	2	9	7	14
Vegyes felszínborítású parcella	4	13	12	19

A bemeneti adatok a vízmérlegmodellhez az Agrárklíma.2 projektből származnak, amelynél pontosabb adatsor nem állt rendelkezésre.

A kalibrációra használt mért aktuális párolgás (ET_{CREMAP}) (CREMAP adatbázis) validációja eddy-kovariancia mérésekkel és 5 vízgyűjtő adatainak felhasználásával történt (Szilágyi és mtsai 2011). A mért és a számított értékek erős korrelációt mutatnak ($R^2 = 0,8-0,9$ havi szinten, $0,7-0,8$ pedig éves szinten). Kisfaludi és mtsai (2015) a CREMAP módszer 9 éves átlagos párolgás értékeit hasonlították össze a MODIS Globális Párolgás Projektjével

(MOD16). A CREMAP (az $RMSE = 17,20 \text{ mm} \cdot \text{év}^{-1}$) értékével jobb eredményt mutatott, mint a MOD16 ($RMSE = 34,12 \text{ mm} \cdot \text{év}^{-1}$). Kísfaludi és mtsai (2015) kilenc ismert vízmérleggel rendelkező vízgyűjtő párolgásértékét alkalmazták referenciaként.

A regionális klímamodellek választásából adódó szórás számszerűsítésére több modellt alkalmaztunk (az A1B üvegházgáz kibocsátási forgatókönyv alapján). Szükségességét a klíma-előrejelzés bizonytalansága indokolja, melyet az emissziók jövőbeli alakulása befolyásol (ez a globális technológiai fejlődés teljes hatásától, az energia-felhasználástól, a világ össz népességétől és számos szocio-gazdasági tényezőtől függ). Fontosak a klímamodellezés korlátai is, amelyek a mindenkori megértésünk függvényében (folyamatok és rendszerek összetettsége, véletlenszerűsége miatt) megköveteli az egyszerűsítéseket a modellezési folyamat során (IPCC 2000; URL2).

A bevezetésben ismertetett tanulmányok, melyek a vízmérlegmodellek hatásvizsgálatával foglalkoztak, alapvetően Thornthwaite típusú havi időlépcsős vízmérlegmodellt mutattak be, de alapvetően éves kiértékeléssel, szemben az általunk jelen tanulmány keretében alkalmazott havi elemzés helyett.

Granier és mtsai (1999) említenek néhány EW_M (esetünkben $SOIL_{MAX}$) értéket: 180 mm (tűlevelű állomány, mély talajjal), 72 mm (lombhullató állomány, sekély talajjal) és 185 mm (lombhullató állomány, mély talajjal). Megállapították, hogy a REW értékei a nedves években nem esnek a 0,4-es határ alá a mély talajok esetén, még az általában legnagyobb stresszel leginkább érintett hónapokban sem (Augusztus és Szeptember). Viszont a 0,4-es határ alá esnek a REW értékei a száraz években, még a mély talajok esetén is. Az általunk vizsgált területeken nagyobb volt a talaj víztároló kapacitása ($SOIL_{MAX}$), ami nagyobb gyökérmélységet is jelent egyúttal (1,8 m (vegyes felszínborítású parcella); 3,3 m (erdős terület)). Megjegyzendő, hogy Granier és mtsai (1999) kutatásával ellentétben mi egy talajréteget használtunk, de a szerzők kijelentik, hogy egy réteggént is kezelhető a talaj profil, amennyiben nem áll rendelkezésre elegendő információ. Egyezés, hogy jelen vizsgálat szerint is Augusztusban és Szeptemberben jelentkezett a szárazságstressz mindkét kutatási területen. A vizsgált felszínborítások közül kisebb szárazságstressz várható az erdős terület esetén, mind a kalibrációs mind az előrebecslő szakaszban. A kedvezőbb körülmény oka a mélyebb gyökérszóna, ami jelentősebb víztartalékot biztosít a növények számára, amely hozzávetőleg 1 hónappal hosszabb csapadékmentes időszak átvészelését teszi lehetővé, ha a téli időszakban a talaj nedvességkészletének feltöltése a szántóföldi vízkapacitásig megtörtént.

Remrová és Císleřová (2010) tanulmányában a gyökérmélység (és a talajprofil is) sekélyebb volt, mint a mi esetünkben. Habár csak a vegyes felszínborítású parcellával hasonlítható össze érdemben, hiszen az területét tekintve javarészt szántó. A mi esetünkben 1,8 m, míg az ő esetükben 0,75 m volt a gyökérmélység. Ez tehát 1,05 méteres különbséget jelent, amelynek oka a nagyobb talajvíz tárcapacitás. Remrová és Císleřová (2010) az előrejelzéseik során jelentéktelen, maximálisan 6 nap/év szárazságstresszes időszakot mutattak ki (2095 nyarán), ami a magasabb éves csapadékösszegnek (1200 mm, ellenben 560 mm jelen tanulmány esetén) és a hidegebb éves átlaghőmérsékletnek ($8,1 \text{ }^\circ\text{C}$, a mi ese-



tünkben tapasztalt 9,7 °C-hoz képest (2070/2100-as vizsgálati periódus)) köszönhető. Tanulmányuk az A2 üvegházgáz kibocsátási forgatókönyvet alkalmazták az előrejelzéseikhez, amely pesszimistább, mint az általunk használt A1B. Továbbá ők egyetlen regionális klímamodellt (HIRHAM/HADCM3) használtak, amíg mi négyet. Ez feltételezhetően hitelesebb eredményt ad figyelembe véve a klímamodell projekciók bizonytalanságait, habár a klímamodellek eredményei korrigálatlanok. Vizsgálati időszakként ők a 2071/2100-as periódust, mi a teljes 21. századot vettük figyelembe. Remrová és Čisleřová (2010) az aktuális párolgás éves változását vizsgálták és 12%-os növekedést mutattak ki, míg jelen tanulmányunkban havi átlagok változásait vizsgáltunk (szintén) 30 éves periódusokra és 11%-os aktuális párolgásemelkedést tapasztaltunk a 2070/2100-as periódusban.

Lutz és mtsai (2010) 10%-os aktuális párolgás-emelkedést mutattak ki az általuk vizsgált 2020/2049-es periódusban a teljes vizsgálati területüket tekintve az 1971/2000-es referencia időszakhoz viszonyítva. Mi az 1980/2010-es referenciaperiódushoz képest 11%-os emelkedést tapasztaltunk a 2070/2100-as időszakra. Szárazságstresszhez Lutz és mtsai (2010) a PET-AET képletét használták és 23%-os növekedést tapasztaltak a 2020/2049-es időszakban az 1971/2000 időszakhoz képest, amelynek okaként a jövőben várhatóan emelkedő hőmérsékletet és a csökkenő hóvastagságot jelölték meg. Az általunk alkalmazott REW értékei 88%-ról (1980/2010) 78%-ra (2070/2100) csökkentek mindkét kutatási terület esetén. A stresszes hónapok aránya tehát nem esik a 40%-os kritikus határ alá, hiszen ez a 30 éves perióduson belül (360 hónap) 80 stresszes hónapot jelent mindösszesen a 2070/2100-as időszakban. Az SWD esetén a hónapok aránya, amely a 40%-ot tehát meghaladja, 2%-ról (7 hónap/360 hónap) 14%-ra (50 hónap) emelkedik az erdős terület, míg 4%-ról (14 hónap), 19%-ra (68 hónap) emelkedik a vegyes felszínborítású parcella területén. Szignifikáns stressz ezért a 21. század végére sem várható.

Keables és Mehta (2010) kutatásaiban nem foglalkozik előrejelzésekkel a vízmérleg elemeinek tekintetében. A jelenre nézve megállapították, hogy Kansas állam nyugati részén a vízhiány egész évben jelentkezik, amelyet a kevés csapadék és a nyáron megemelkedett aktuális párolgás okoz. Futtatásaink referencia-időszakával összehasonlítva elmondható, hogy az 1980/2010-es periódusban mindössze 2% (erdős terület) és 4% (vegyes felszínborítású parcella) a stresszes hónapok aránya.

A bemutatott vízmérlegmodell hatás tanulmányok (Granier és mtsai 1999; Remrová és Čisleřová, 2010; Lutz és mtsai 2010; Keables és Mehta 2010) egyaránt emelkedő aktuális párolgás adatokat jeleznek előre, ugyanakkor csökkenő talajnedvesség tartalmat, melynek okaként a jövőre prognosztizált csökkenő csapadékot és a feltételezhetően emelkedő hőmérsékletet jelölik meg. Következésképpen a vízhiánnyal fokozottan számolni kell a 21. század folyamán, habár a konkrét tendenciák régióként különbözőek.

ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen cikkhez kapcsolódó kutatás keretében egy egyszerűsített Thornthwaite alapú, havi időlépcsős vízmérleg modellt fejlesztettünk ki. A modellt sikeresen kalibráltuk két különböző felszínborításra (egy vegyes felszínborítású parcellára, Mosonmagyaróvár mellett és egy erdős területre Sopron mellett). A kalibrációhoz távérzékelt aktuális párolgás-térképeket használtunk.

A modell előnye annak robusztus felépítése, mivel a kalibrált modell csak hőmérséklet és csapadék adatokat igényel a futtatáshoz. A kalibrációs paraméter felszínfüggő potenciális párolgás és a talaj víztároló kapacitása (SOIL_{MAX}).

Elsődlegesen vízgyűjtő szinten és olyan területeken használható a modell, ahol nincs pótlólagos víz utánpótlás a felszínről, vagy felszín alól.

A kalibrált modellekkel a regionális klímamodellek hőmérséklet és csapadék adatainak felhasználásával előrejelzéseket végeztünk a vízforgalomra és a vízmérleg egyes elemeire (párolgás és talajnedvesség). Mindegyik futtatás enyhén emelkedő párolgást (mindkét kutatási terület esetén +11%), de erősen csökkenő talajnedvesség minimum értékeket valószínűsít (vegyes felszínborítású parcella: -48%; erdős terület: -32%) a 21. század végére. Következésképpen a jövőben a párolgási kényszer növekedésének hatására a párolgás növekedni fog, és az elpárolgó vízmennyiség, mivel a nyári időszakban a csapadékból alig tud majd utánpótlódni, ezért drasztikusan csökkenteni majd a talajban raktározott vízkészleteket. A csökkenő talajnedvesség minimumok a szárazságstresszes időszakok egyre súlyosabb megjelenését vetítik előre, az erre érzékeny fafajok potenciális veszélyeztetésével.

Az erdős területen kisebb szárazságstressz várható mind a kalibrációs időszak, mind az előrejelzés időszakában. Habár az erdő párolgása nagyobb, de a kedvezőbb körülményeket – a mélyebb gyökérszóna révén – a jelentősebb mennyiségű (hasznosítható) hozzáférhető vízkészlet biztosítja, így hosszabb csapadékmentes időszak átvészelésére képes. Azonban, ha aszályos időszak hossza már meghaladja a 2 hónapot a vizsgált erdősült terület is szárazságstresszes állapotba kerülhet.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Agrárklíma.2 (VKSZ_12-1-2013-0034) EU-nemzeti kutatási és fejlesztési projekt támogatásával valósult meg. Kalicz Péter munkarésze a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült. Gribovszki Zoltán munkája a kutatásban az Európai Unió és Magyarország támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú „Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program” című kiemelt projekt keretei között valósult meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bartholy J., Bozó L. & Haszpra L. 2011: **Klimaváltozás – 2011, Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék.**
- Christensen J.H. & Van Meijgaard E. 1992: On the construction of a regional atmospheric climate model. Technical Reports - Royal Netherlands Meteorological Institute, (TR-147).
- Christensen J.H., Bøssing Christensen O., Lopez P., van Meijgaard E., & Botzet M. 1996: The HIRHAM4 Regional Atmospheric Climate Model. Scientific Report 96-4, Danish Meteorological Institute.
- Christensen J.H. & Christensen O.B. 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change* 81: 7–30. DOI [10.1007/s10584-006-9210-7](https://doi.org/10.1007/s10584-006-9210-7)
- Dövényi Z. 2010: **Magyarország kistájainak katasztere – második, átdolgozott és bővített kiadás.** MTA, Budapest.
- Dingman L.S. 2002: *Physical hydrology.* Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.
- Gálos B., Führer E., Czímber K., Gulyás K., Bidló A., Hänsler A., Jacob D. & Mátyás Cs. 2015: Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás* 119(4): 425–441.
- Granier A., Breda N., Biron P. & Villette S. 1999: A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116: 269–283. DOI: [10.1016/s0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(98)00205-1)
- Guitjens J.C. 1982: Models of alfalfa yield and evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 108(3): 212–222.
- Hamon W.R. 1963: Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Scientific Hydrology Publication* 63: 52–62.
- HREX jelentés. Lakatos M., Szépszó G., Bihari Z., Krüzselyi I., Szabó P., Bartholy J. et al. 2012: Éghajlati szélsőségek változásai Magyarországon: Közelmúlt és jövő – A magyarországi eredmények összefoglalása az IPCC szélsőséges éghajlati események kockázatáról és kezeléséről szóló Tematikus Jelentéshez kapcsolódóan. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.**
- IPCC 2000: Emissions scenarios. In: Nakicenovic N. & Swart R. (eds) *Contribution of Working Group III to the Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC 2014: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jacob D. 2001: A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorology and Atmospheric Physics* 77: 61–73. DOI: [10.1007/s007030170017](https://doi.org/10.1007/s007030170017)
- Jacob D., Barring L., Christensen O.B., Christensen J.H., Castro M., DeUe M., et al. 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change* 81: 31–52. DOI: [10.1007/s10584-006-9213-4](https://doi.org/10.1007/s10584-006-9213-4)
- Jacob D., Kotova L., Lorenz P., Moseley C.H. & Pfeifer S. 2008: Regional climate modeling activities in relation to the **CLAVIER project.** *Időjárás* 112: 141–153.
- Jones C.G., Ullerstig A., Willen U. & Hansson U. 2004: The Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA). Part I: model climatology and performance characteristics for present climate over Europe. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 33(4): 199–210. DOI: [10.1579/0044-7447-33.4.199](https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.4.199)
- Keables M.J. & Mehta S. 2010: A soil water climatology for Kansas. *Great Plains Research: A Journal of Natural and Social Sciences* 20: 229–248.

- Kisfaludi B., Csáki P., Primusz P., Péterfalvi J. & Gribovszki Z. 2015: Comparison of CREMAP and MODIS MOD16 evapotranspiration. International conference: Catchment processes in regional hydrology, Linking experiments and modelling in Carpathian drainage basins 2015.10.29. Vienna.
- Kisházi P. & Ivancsics J. 1985: **Sopron Környéki Üledékek Összefoglaló Földtani Értékelése. Kézirat, Sopron.**
- Kovács Á. 2011: **Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Budapest.**
- Linden van der P., Mitchell J.F.B. (eds) 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- Lutz J.A., Wagtendonik J.W. & Franklin J.F. 2010: Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park. *Journal of Biogeography* 37: 936–950. DOI: [10.1111/j.1365-2699.2009.02268.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2009.02268.x)
- Marosi S. & Somogyi S. (eds) 1990: **Magyarország Kistájainak Katasztere I. MTA Földrajztudományi Kutató Intézet, Budapest.**
- Mika J., 1999: **Klímaforgatókönyvek a nemzeti stratégia fejlesztéséhez a vízgazdálkodásban. In: Somlyódy L. (eds): Nemzeti vízgazdálkodás stratégia. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest.**
- Mingteh Cs. 2006: *Forest Hydrology: An introduction to water and forests (second edition)*. Stephen F. Austin State University, Texas, U.S.A.
- Morton F.I., Ricard F. & Fogarasi S. 1985: Operational estimates of areal evapotranspiration and lake evaporation: Program WREVP. National Hydrological Research Institute, Ottawa: Inland Waters Directorate.
- Muggeo V.M.R. 2008: Segmented: an R package to fit regression models with broken-line relationships. *R News* 8(1): 20–25.
- Neilson R. 1995: A model for projecting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications* 5(2): 362–385. DOI: [10.2307/1942028](https://doi.org/10.2307/1942028)
- Nováky B. & Bálint G. 2013: Shifts and Modification of the Hydrological Regime Under Climate Change in Hungary. In: Singh B.R. ed. *Climate Change – Realities, Impacts Over Ice Cap, Sea Level and Risks*, Chapter 6. DOI: [10.5772/54768](https://doi.org/10.5772/54768)
- Pongrácz R., Bartholy J. & Miklós E. 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research* 9(4): 387–398. DOI: [10.15666/aeer/0904_387398](https://doi.org/10.15666/aeer/0904_387398)
- Priestley C.H.B. & Taylor R.J. 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2): 81–92. DOI: [10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)
- R Core Team 2012: *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Remrová M. & Císlarová M. 2010: Analysis of climate change effects on evapotranspiration in the watershed **Uhlířská in the Jizera mountains**. *Soil and Water Research* 5(1): 28–38. DOI: [10.17221/5/2009-sw](https://doi.org/10.17221/5/2009-sw)
- Sun G.K., Alstad J., Chen S., Chen C.R., Ford G., Lin C. et al. 2011: A general projective model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. *Ecohydrology* 4(2): 245–255. DOI: [10.1002/eco.194](https://doi.org/10.1002/eco.194)
- Szilágyi J. & Józsa J. 2008: **Klímaváltozás és a víz körforgása. Magyar tudomány** 169(6): 698–703.
- Szilágyi J. & Józsa J. 2009: Estimating spatially distributed monthly evapotranspiration rates by linear transformations of MODIS daytime land surface temperature data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 13(5): 629–637. DOI: [10.5194/hessd-6-1433-2009](https://doi.org/10.5194/hessd-6-1433-2009)
- Szilágyi J. & Kovács Á. 2010: Complementary-relationship-based evapotranspiration mapping (CREMAP) technique for Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 54(2): 95–100. DOI: [10.3311/pp.ci.2010-2.04](https://doi.org/10.3311/pp.ci.2010-2.04)



- Szilágyi J. Kovacs A. & Józsa J. 2011: A calibration-free evapotranspiration mapping (CREMAP) technique. In: **Lábédzki L.** (ed) Evaporation, Chapter 11. DOI: [10.5772/14277](https://doi.org/10.5772/14277)
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R. 1955: The water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Technology, Publications in climatology. Philadelphia.
- Vörösmarty C.J., Federer C.A. & Schloss A.L.** 1998: Potential evaporation functions compared on US watersheds: Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. Journal of Hydrology 207: 147–169. DOI: [10.1016/S0022-1694\(98\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00109-7)
- Wilson B.N. & Brown J.W. 1992: Development and evaluation of a dimensionless unit hydrograph. Journal of the American Water Resources Association 28: 397–408. DOI: [10.2166/nh.1972.0007](https://doi.org/10.2166/nh.1972.0007)

On-line források

- URL1: Klímabarát Települések Szövetsége. <http://klimabarar.hu/node/96> (Letöltés dátuma: 2014.01.31.)
- URL2: Infrastructure for the European Network for Earth System Modelling / Background & topics / Climate model data / Uncertainties. <https://climate4impact.eu/impactportal/documentation/backgroundandtopics.jsp?q=Uncertainties> (Letöltés dátuma: 2017.08.10.)

*Érkezett: 2018. május 2.
Közlésre elfogadva: 2018. május 29.*

A „JÁRÓ-TÁBLA” (AVAGY AZ EGYES TERMŐHELYTÍPUSOKON ALKALMAZHATÓ CÉLÁLLOMÁNYOK ÉS AZOK NÖVEKEDÉSÉNEK) KÖZELÍTÉSE GÉPI TANULÁSI MÓDSZERREL

Czimer Kornél¹, Mátyás Csaba², Bidló András² és Gálos Borbála²

¹ Soproni Egyetem, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vizgazdálkodási Intézet

² Soproni Egyetem, Környezet és Földtudományi Intézet

Kivonat

Ebben a cikkben egy gépi tanulási eljárási kívánunk bemutatni, amely a Járó-féle egyes termőhelytípusokon alkalmazható célállományok és azok növekedésének adatait dolgozza fel. A módszer képes a meglévő adatok alapján célállomány és növekedést javasolni a klímaváltozás miatt kialakuló új termőhelytípus változatokra, és egy újonnan belépő erdészeti klímaosztályra is. Az eljárás lényege, hogy a Járó-tábla bejegyzéseit egy ötdimenziós térben helyezi el és távolság kermelek segítségével kiválogatja a közeli célállomány típusokat, valamint súlyozza azok növekedését. Ezáltal megadja egy kiválasztott termőhelytípus változatra, hogy mely célállományok valószínűsíthetők azon a területen és milyen növekedéssel jellemezhetők. Az eredmények megfelelő validálás után az Agrárklíma projekt döntéstámogató rendszerébe épülnek be.

Kulcsszavak: gépi tanulás, termőhely, célállomány, növekedés.

MACHINE LEARNING APPROXIMATION OF JÁRÓ-TABLE (TABLE OF APPLICABLE TARGETED FOREST STANDS AND THEIR GROWTH FOR EACH FOREST SITE)

Abstract

In this article, we would like to present a machine learning algorithm that processes the data of Járó's target stands and their growth for each forest site variation. The method is able to propose stand types and growths on the basis of existing data for new variations due to climate change and for a newly entering forest climate zone. The essence of this process is to place the entries of the Járó's table in a five-dimensional space, and use distance kernels to select the closest target stand types and weight their growth rate. It defines for a specific forest site, which target stands are likely to be in the area and what kind of growth can be characterized. The results will be incorporated into the decision support system of the Agrárklíma project after proper validation.

Keywords: machine learning, forest site, targeted stand, growth.

BEVEZETÉS

A klímaváltozás erdőgazdálkodást befolyásoló magyarországi hatásaival, fontossága miatt számos publikáció foglalkozott az elmúlt időszakban (Mátyás & Czímber 2000, 2004; Berki et al. 2009; Rasztovits et al. 2014; Gálos et al. 2015). A nemzetközi szakirodalom rámutat, hogy a komplex probléma feldolgozása, tekintettel a nagy mennyiségű térbeli és időbeli adatokra, csak döntéstámogató rendszerek segítségével valósítható meg hatékonyan (Ray 2001; Falcão & Borges 2005; Reynolds et al. 2008; Vacik et al. 2010).

Az Agrárklíma projekt keretében fejlesztett döntéstámogató rendszer (eDTR) egyik legfontosabb célkitűzése az integrált geoinformatikai és klímamodellek adatai alapján becslést adni több jövőbeli időszakban az alkalmazható célállományokra és azok növekedésére (Czímber & Gálos 2016). Járó Zoltán és munkatársai által kidolgozott és évtizedek óta alkalmazott, az elmúlt évtizedben továbbfejlesztett táblázat (Balogh et al. 2005), továbbiakban Járó-tábla (1. ábra), termőhelytípus-változatonként tartalmazza az alkalmazható célállományokat, a főfafajokat és azok növekedését, valamint az elegyfajokat.

Gyertyános-tölgyes klíma			
11 Sziklás-köves váztalaj SZV			
TVFLN	ISE SE	TŐ	isz
Természetes erdőtársulás-csoport:			
SZI-E			
Célállomány főfafaja és növekedése:		Elegy-fajok:	Megjegyzés:
KTT	gy	MJ	Semleges és bázikus alapközeten.
CS	gy	MSZ	Átmenet a KTT klíma felé.
MK	gy	VK	Véderdő, az őshonos fafajok vágá-sos üzemmódban nem kezelhetők.
H	gy	BE	
EF	gy		

1. ábra: Járó-tábla részlete egy termőhelytípus-változatra.

Figure 1: Járó-table for one forest site variation.

Az eDTR fejlesztésénél számos kihívásnak kellett megfelelni. A geoadatok integrációja több problémát felvetett. A jövőbeli időszak klímáját előrejelző 12 regionális klímamodell adatait a jóval finomabb felbontású múltbeli klímaadatokkal kellett összehangolni és javítani. Kísérletek folynak a klímaadatok javítására a domborzat és kitettség alapján, mivel a múltbeli modellek felbontása 10 km, a jövőbeli modelleké közelítőleg 25 km-es. A termőhelytípus-változat talaj és hidrológiai adatait is több forrásból pontosítottuk.

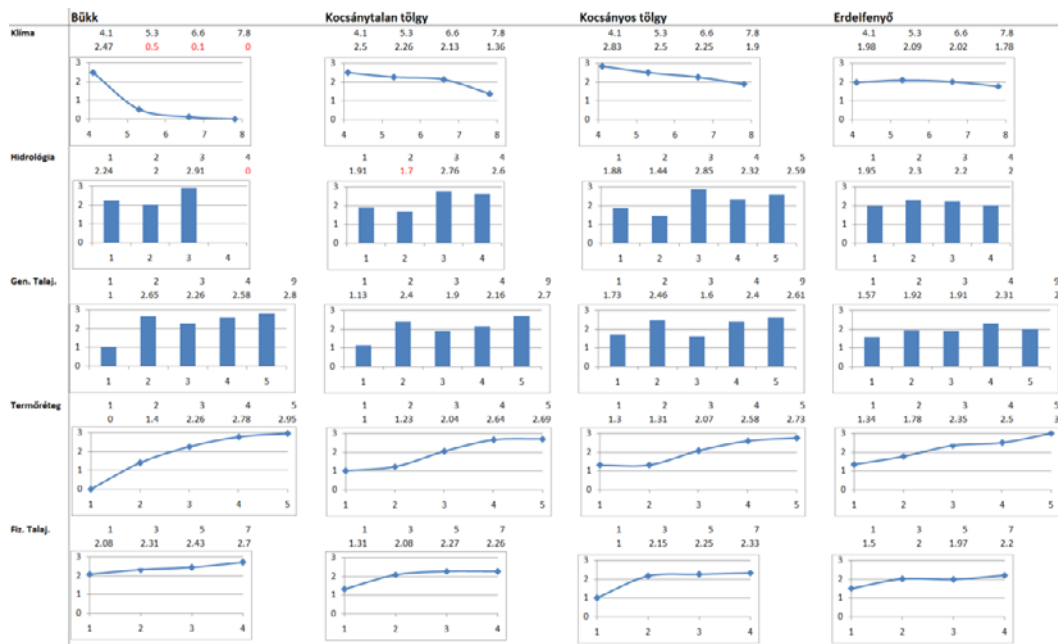
Az eDTR ezeket a geoadatokat és a Járó-tábla mintegy 5 ezer termőhelytípus-változat – fafaj – növekedés bejegyzését használja fel a jövőbeli erdőtelepítési és erdőfelújítási döntések támogatásához. Azonban a klímaváltozás, amely általában egy, ritkábban két erdészeti klímasztyá változást is jelenthet a következő évtizedekben egészen 2100-ig, számos olyan új termőhelytípus-változatot eredményez, amely az eddigi Járó-táblában nem szerepel.

A hiányok kitöltésére kidolgoztunk egy gépi tanulási módszert, amely a Járó-tábla adataiból indul ki, azok adataiból tanul, és a tanulási folyamat végén becslést ad a növekedésre.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A módszer kifejlesztéséhez a Járó tábla 2005-ös változatán kívül felhasználtuk tizenkét klímamodell adatait (Czimer & Gálos 2016), az erdőállomány adattár erdőrézlet és termőhelytípus-változat adatait. A Járó tábla jó-közepes-gyenge növekedését rendre 3, 2, 1 értékekkel helyettesítettük, tehát a magasabb érték jelenti a jobb növekedést, ezt az értékek kvantifikálása miatt vezettük be. Ahol a Járó táblában egy célállomány növekedésénél két kategória is szerepel, ott az átlagértéket használtunk (1,5 és 2,5).

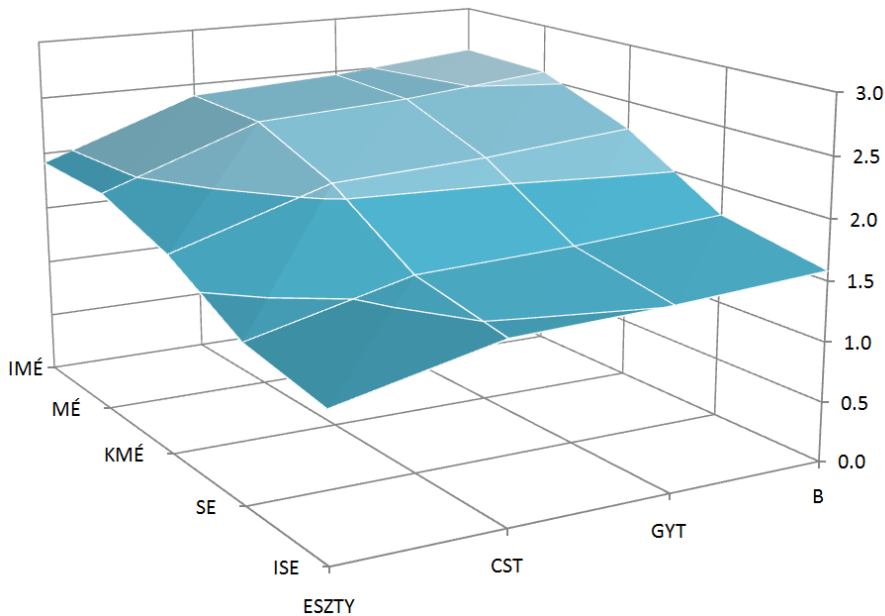
A módszer előzetes változatában külön próbáltuk modellezni az egyes termőhelyi tényezők függvényében a növekedést (2. ábra). A hidrológia és a genetikai talajtípus esetén maradtunk a kategóriáknál.



2. ábra: Négy célállomány 5 termőhelyi paraméterének növekedési görbéi.

Figure 2: Growing functions for 5 forest site parameter of 4 targeted stands.

Az egydimenziós megközelítésnél pontosabb modellezést biztosítanak a kétparaméteres (3. ábra) vagy több-, maximum ötparaméteres függvények. A végleges módszernél az utóbit választottuk.



3. ábra: KTT növekedése az erdészeti klímaosztály és a termőréteg vastagság függvényében.
Figure 3: Growth of Sessile Oak by forest climate zone and soil thickness.

A módszer fejlesztésének első lépéseként megpróbáltuk valamennyi termőhelytípus-változat tényezőt mennyiségi értékekre váltani. A klímaosztály esetében a FAI (Forest Aridity Index) (Führer 2010; Führer et al. 2011), a termőréteg vastagság esetében a konkrét mélység, a fizikai talajféleségnél a víztartó képességgel helyettesítettük a kategóriákat. A genetikai talajtípus és hidrológiai viszonyok tekintetében megtartottuk a kategóriákat, nagyobb súlyt rendelve ezekhez a tényezőkhöz, hogy az egyes kategóriák ne mosódjanak össze. Első körben csak a többletvízhatástól-független termőhelyekkel foglalkoztunk.

A gépi tanulási módszer a kvantifikált adatok alapján egy ötdimenziós termőhelytípus-változat térben keresi a legközelebbi célállományokat és kernelek segítségével súlyozza azok növekedését. Távolssággal fordítottan arányos súlyozást távolsságkernelek segítségével oldottuk meg. Minden egyes Járó tábla bejegyzéshez egy ötdimenziós kernel tartozik, amely a távolodva a bejegyzéstől a kernel értéke fokozatosan 1-ről nullára csökken. A módszer a több dimenziós adatok lokális becslésénél gyakran alkalmazott kernel sűrűség eljárás alapján (Rosenblatt 1956; Silverman 1986). Távolsságkernelnek a Gauss-kernelt választottuk.

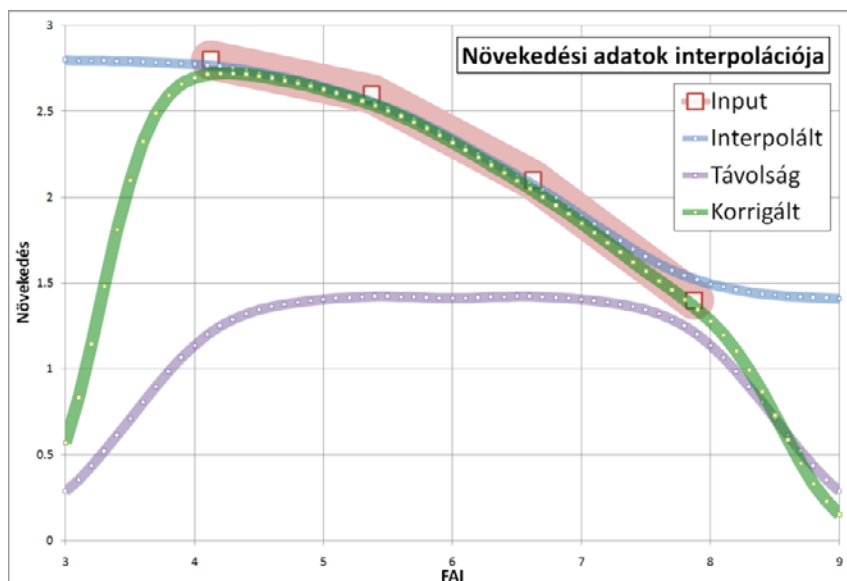
Az f növekedés becslése c célállományra, T termőhelyre a J Járótábla bejegyzési alapján, n növekedésadatokra a következő képlettel történik, ahol i valamennyi Járó tábla bejegyzés indexe, t a termőhelyi paraméter indexe, q_t konstans a távolságkernel szélességét befolyásolja termőhelyi paraméterenként, e a természetes alapú logaritmus alapszáma:

$$f_c(T) = \sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^5 n_{ci} e^{q_t(T_t - J_{cit})}$$

Az előbbi képletből az n növekedés értékek elhagyásával jutunk a távolság kernel képletéhez, a súlyozott növekedésértéket ezzel kell normalizálni:

$$w_c(T) = \sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^5 e^{q_t(T_t - J_{cit})}$$

Az előbbi két képlettel a növekedési értékek súlyozhatók tetszőleges számú paraméter felhasználásával (4. ábra, Interpolált görbe). Ez egy tényező esetén egy görbét, öt tényező esetén egy hiperfelületet eredményez, mely jól követi a kiindulási adatokat (4. ábra, Input), és extrapoláció esetén a szélső értékeket veszi fel.



4. ábra: Növekedési adatok interpolációja (kék) egy jellemző (FAI) alapján, valamint korrigált interpolációja (zöld) a távolság (lila) segítségével a KTT példáján.

Figure 4: Interpolation of Sessile Oak growth data (blue) for one parameter (FAI), corrected interpolation (green) with the usage of distance (purple).

Mivel a Járó-tábla csak ott tartalmaz bejegyzést, ahol egy fafaj erdészeti szempontból javasolt (például bükk fafaj csak bükkös klímában szerepel), ezért az interpolált 5 változós felületet a távolság függvényvel (4. ábra, Távolság görbe) korigálni kellett, hogy a hiányzó adatok esetében a felület a nulla növekedéshez közelítsen (4. ábra, Korigált görbe). A képletben az r konstans a korrekciós távolságkernel szélességét definiálja:

$$k_c(T) = \frac{f_c(T)}{w_c(T)} \left(1 - e^{rf_c(T)w_c(T)^2} \right)$$

A módszer célállományonként súlyoz, és csak a tanításra használt adatsoroktól való távolságszámítás és súlyozás után választja ki a legközelebbi öt célállományt. Ha a célállomány normalizált távolsága termőhelytípus-változat térben egy adott küszöbértéken kívül van, vagy ha a célállomány számított növekedése egy másik küszöbértéknél kisebb, akkor ez a célállomány nem fog szerepelni a kimeneti adatsorban.

EREDMÉNYEK

A módszer elsődleges kimenete egy lista minden erdészeti szempontból fontos, a jelenben és a jövőben valószínűsíthető termőhelytípus-változatra, amely tartalmazza a legközelebbi öt vagy kevesebb célállományt, azok várható növekedését számszerűsítve, valamint zárójelben egy egész számot, hogy a növekedébecslés hány közeli adatsor alapján történt (1. táblázat).

A módszert felkészítettük egy ötödikként belépő sztyep klímára történő becslésekre is. Erre a klímára a fafajok egyes klímaosztályokra adott válaszgörbéiből indultunk ki és a bevezetett korrekciós függvény segítségével extrapoláltuk a növekedés értékeket. Ha az extrapoláció eredménye egy választott küszöbérték alatti (<1), vagy a normalizált távolság túlságosan nagy, akkor azt a termőhelytípus-változatot erdősítésre alkalmatlannak tartja a módszer.

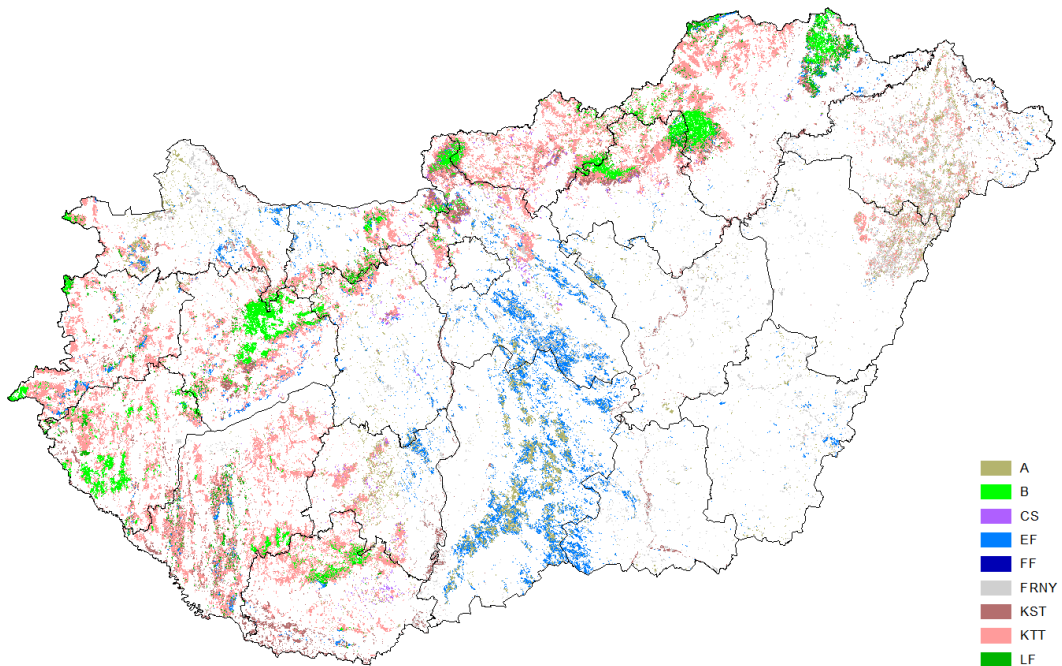
A tanulási és növekedé becslési módszer pontossági vizsgálatához az adatsort két részre osztottuk. A többletvízhatástól-független termőhelyeken a Járó-tábla bejegyzéseinek 50%-át tanításra, a másik 50%-ot pedig tesztelésre használtuk. A tesztelés során az öt paraméter alapján számított növekedési értékek és a referencia növekedések közötti átlagos eltérésre $+0,01$ érték adódott, az eltérések szórására pedig $0,35$ -öt kapunk, ami a 1; 2; 3 értékeket figyelembe véve jónak mondható.

1. táblázat: Gépi tanulási módszer kimenetének részlete.
Table 1: Part of the output of the machine learning method.

Hidroló- gia	Genetikai talaj- típus	Termő- réteg	Fizikai talaj- féleség	B	GYT	CS-KTT	ESZTY	SZTY
TVFLEN	LHE	MÉ	H	KST 2.0 (4) FRNY 1.7 (3) KTT 2.3 (4) A 2.4 (4)	KST 1.9 (9) KTT 2.4 (7) FRNY 2.2 (7) A 2.5 (9) CS 2.0 (3)	KST 1.8 (12) FRNY 2.2 (10) KTT 2.4 (8) A 2.4 (10) CS 2.0 (4)	KST 1.7 (8) FRNY 2.2 (7) A 2.3 (6) KTT 2.3 (4)	KST 1.4 (3) FRNY 1.7 (3)
TVFLEN	LHE	MÉ	V	KST 2.6 (6) FRNY 2.3 (3) KTT 2.7 (4) B 2.7 (4) MK 2.0 (3)	KST 2.4 (13) FRNY 2.7 (7) KTT 2.7 (8) A 1.5 (1) MK 2.3 (4)	KST 2.2 (15) FRNY 2.8 (10) KTT 2.7 (9) A 2.3 (1) CS 2.5 (2)	KST 2.2 (10) FRNY 2.7 (7) KTT 2.7 (4) A 1.2 (1) NNY 2.6 (3)	KST 2.1 (4) FRNY 2.3 (3) NNY 1.4 (2)

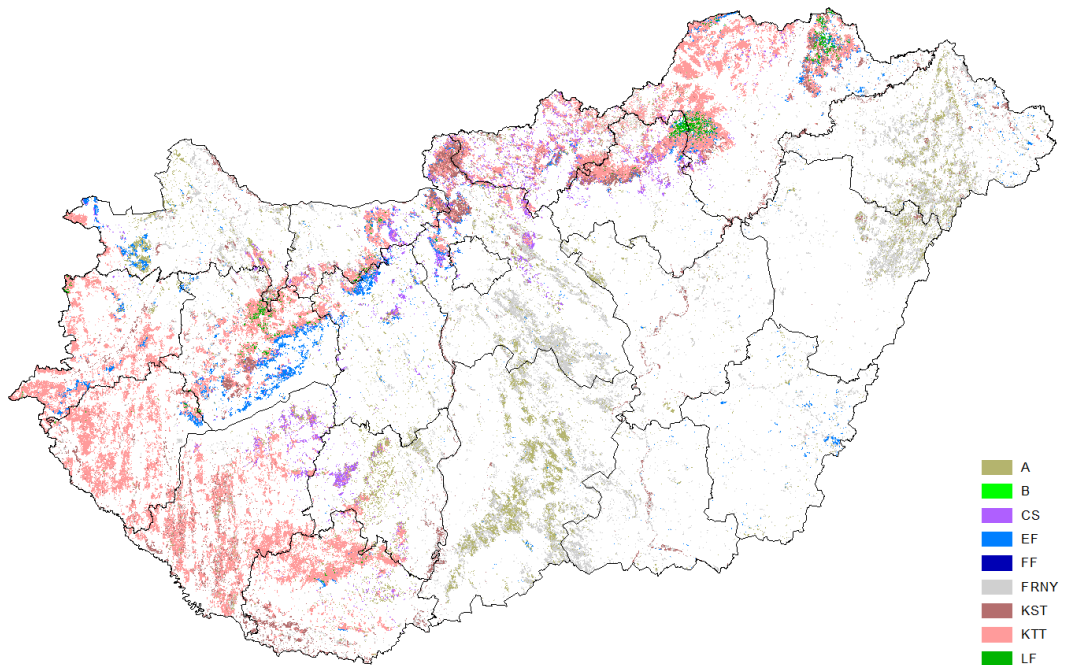
Erdőállomány adattár (2012-es állapot) erdőrészeiben az erdészeti klímaosztály lecserélhető a klímamodellekből számított értékekre. Ehhez előbb a klímamodellekből a 30 éves időszakokra le kellett válogatni a havi hőmérsékletátlagokat és havi csapadékösszegeket, amelyekből az időszak átlagos FAI értékei, majd ebből az erdészeti klímaosztály meghatározható minden erdőreszletre.

A gépi tanulási módszer valamennyi erdőreszletre tud javasolni a múlt és a jövő különböző időszakaira célállomány típust és növekedést. A növekedés értékek nem csak az 1, 2 és 3 értékeket, hanem közttes értékeket is fel tudnak venni (tizedes törtek). A módszerrel két időszakot hasonlítottunk össze térképek segítségével: 1981-2010 és 2041-2070. Az 5. és 6. ábra a két időszakra a módszer által javasolt célállománytípusok földrajzi elhelyezkedését, míg a 7. és 8. ábra a célállományok növekedésnek térképeit mutatja. A térképek jól szemléltetik a várható változásokat.



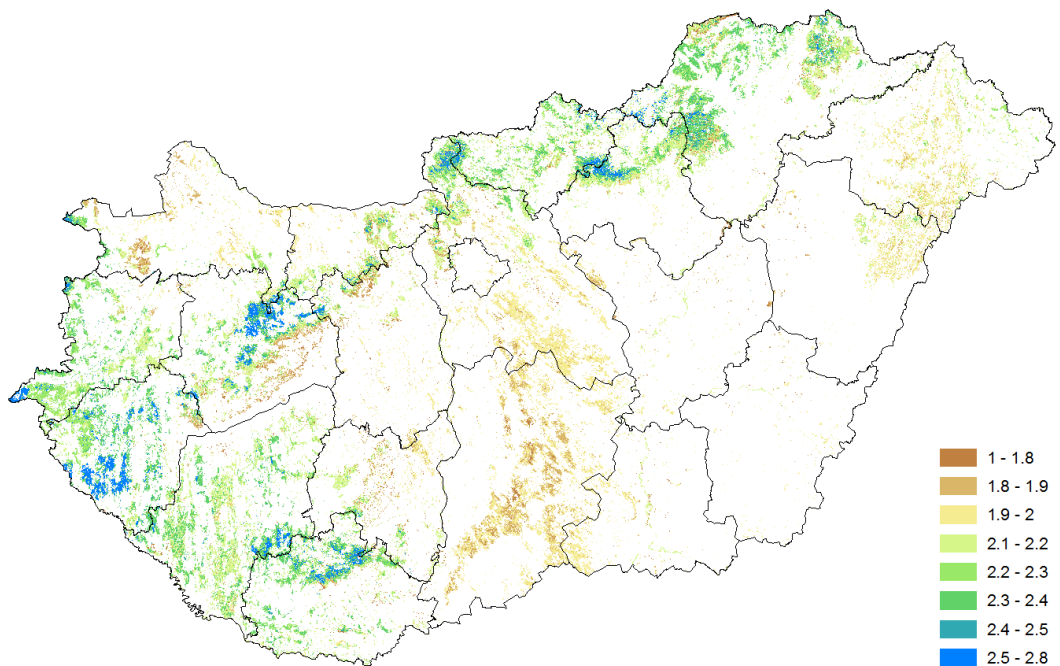
5. ábra: Módszer által javasolt célállománytípusok az 1981-2010 időszakban.

Figure 5: Targeted stands for 1981-2010 period proposed by the method.



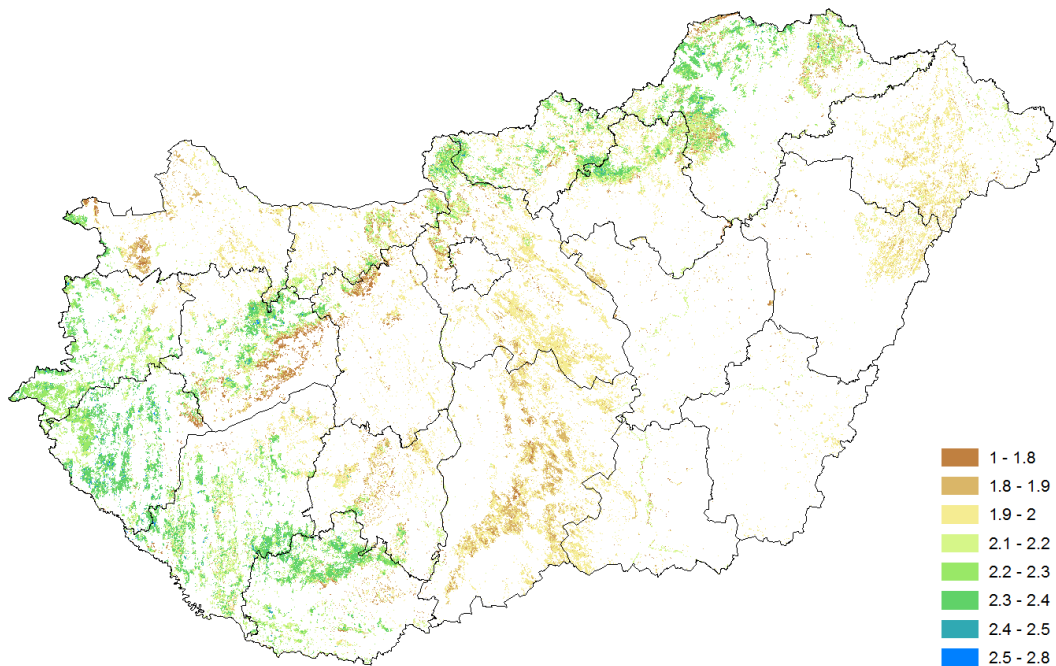
6. ábra: Módszer által javasolt célállománytípusok a 2041-2070 időszakban.

Figure 6: Targeted stands for 2041-2070 period proposed by the method.



7. ábra: Módszer által javasolt célállományok növekedése az 1981-2010 időszakban.

Figure 7: Growth rate of targeted stands for 1981-2010 period proposed by the method.



8. ábra: Módszer által javasolt célállományok növekedése a 2041-2070 időszakban.
Figure 8: Growth rate of targeted stands for 2041-2070 period proposed by the method.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eljárás fejlesztése több körben történt, az egyes kimeneti adatsorok részletes elemzése alapján. A kimeneti adatsorokat szakemberekkel vitattuk meg. Különösen a fafajonkénti küszöbértékek igényeltek alapos elemzést. A kifejlesztett és megvitatott táblázatot szakértői konszenzus után építjük be az eDTR végleges változatába.

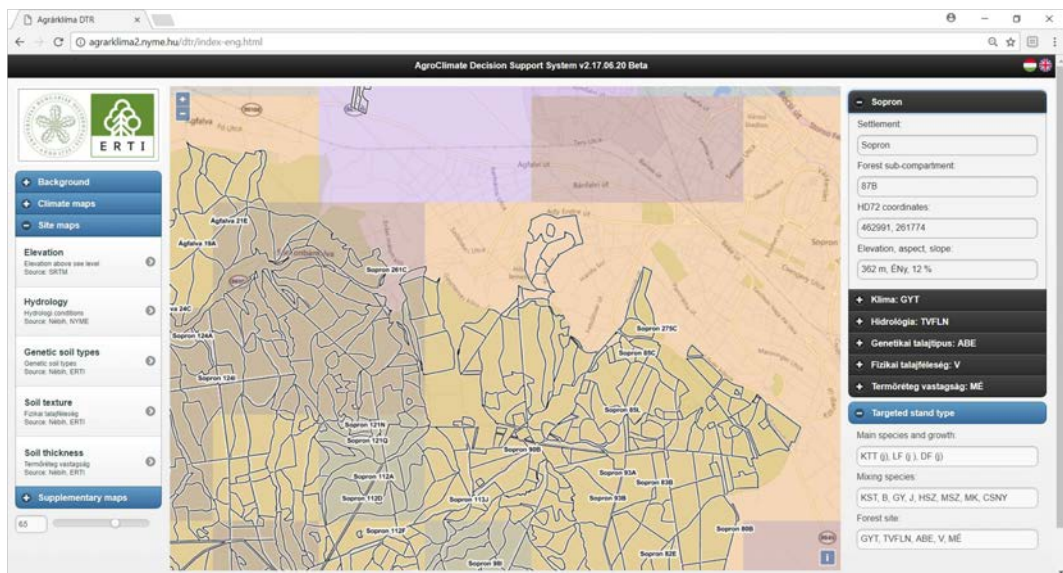
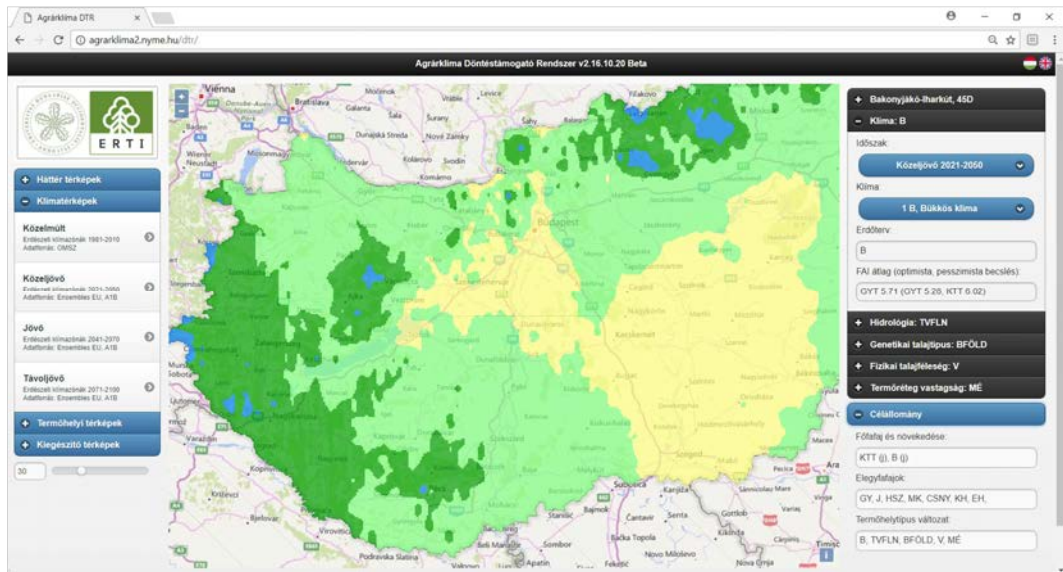
FELHASZNÁLT IRODALOM

- Balogh L., Kovács G. & Tímár G. 2005: Az egyes termőhelytípus-változatokon alkalmazható célállományok. Állami Erdészeti Szolgálat, Budapest.
- 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. DOI: [10.1556/CRC.37.2009.Suppl.4](https://doi.org/10.1556/CRC.37.2009.Suppl.4)
- Czímber 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 31: 664–673. DOI: [10.1080/02827581.2016.1212088](https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1212088)

- Falcão A. & Borges J.G. 2005: Designing decision support tools for Mediterranean forest ecosystems management: a case study in Portugal. *Annals of Forest Science* 62: 751–760. DOI: [10.1051/forest:2005061](https://doi.org/10.1051/forest:2005061)
- 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: 103–118.
- 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.
- Mátyás Cs. & Czímber K. 2000: Zonális erdőtakaró mezoklíma szintű modellezése: lehetőségek a klímaváltozás hatásainak előrejelzésére. In: Tar K. (ed): III. Erdő és Klíma Konferencia. DE-TTK, Debrecen, 83–97.
- Mátyás Cs. & Czímber K. 2004: A zonális zárt erdőtakaró alsó határának klímaérzékenysége Magyarországon. In: Mátyás Cs. & Vig P., (eds): Erdő és Klíma IV. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 35–44.
- Ray D. 2001: Ecological site classification decision support system. Version 1.7. Edinburgh: Forestry Commission.
- Reynolds K.M., Twery M., Lexer M.J., Vacik H., Ray D., Shao G., et al. 2008: Decision Support Systems in Forest Management. In: Burstein F. & Holsapple C. (eds): Handbook on Decision Support System 2. International Handbooks on Information Systems Series, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 499–534. DOI: [10.1007/978-3-540-48716-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-48716-6)
- Rosenblatt M. 1956: Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function. *The Annals of Mathematical Statistics* 27(3): 832–837. DOI: [10.1214/aoms/1177728190](https://doi.org/10.1214/aoms/1177728190)
- Silverman B.W. 1986: Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Routledge, New York.
- Vacik H., Lexer M.J., Rammer W., Seidl R., Hochbichler E., Strauss M., et al. 2010: ClimChAlp – a web based decision support system to explore adaptation options for silviculture in secondary Norway spruce forests in Austria. In: Falcao A. & Rosset C. (eds): Proceedings of the Workshop on Decision Support Systems in Sustainable Forest Management, Lisbon.

Érkezett: 2018. május 4.

Közlésre elfogadva: 2018. május 29.



Az Agrárklíma Döntéstámogató Rendszer (eDTR) munkafelülete

Fotó: Czímber Kornél (SOE)

A KLÍMAVÁLTOZÁS NYOMÁN BEKÖVETKEZŐ FATERMÉS-VÁLTOZÁS BECSLÉSE A KOCSÁNYTALAN TÖLGY PÉLDÁJÁN

Illés Gábor

NAIK Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

A faállományok növekedésének vizsgálata az erdészeti kutatás egyik központi kérdése. A klímaváltozás várható hatásainak értékelésében is fontos ez a témakör. A klímaváltozás miatt az erdők növekedési feltételei is megváltoznak Közép-Európában és ezeket a változásokat általában kedvezőtlennek tekintjük. A növekvő gyakoriságú hőhullámok és aszályok limitálják a gazdaságilag fontos fajok növekedését. Ennek a kérdésnek a vizsgálatához a kocsánytalan tölgy növekedését értékeltük statisztikai alapokon a termőhelyi (bioklimatikus és talaj) paraméterekkel összefüggésben. A tanulmányban az Országos Erdőállomány Adattár 4594 fajfajórát dolgoztuk fel az elegyetlen, mag eredetű állományokra koncentrálván. A szükséges klimatikus adatokat a Climate EU adatbázis szolgáltatta. Az 1961-1990 közötti éveket tekintettük a klimatikus bázis időszaknak. A 2041-2070 közötti éveket tekintettük a megváltozott klímájú időszaknak az RCP 4.5 kibocsátási forgatókönyven alapuló klímamodellek előrejelzéseit használva. A nem klimatikus termőhelyi és talaj adatokat a legújabb magyarországi termőhelyi adatbázisokból vettük. Az R random forest csomagjával hoztunk létre predikációs modelleket a fatermési osztály becslésére a bázisidőszakra vonatkozóan a talajtani és bioklimatikus változók felhasználásával. A modell sorozat eredményeit adattári teszt területeken és az FNM pontokon teszteltük. A becslések pontossága relatív magas 62-83%-os értéket mutatott fatermési osztályonként 77%-os átlaggal. A modelleket a jövő időszakra nézve is lefuttattuk, hogy a fatermési osztály változásokat becsülni lehessen. Az eredmények azt mutatták, hogy a jó fatermési osztályú területek kiterjedése jelentősen lecsökken és várhatóan északi és nyugati irányba tolódik el a jövőben. Az Alpokalján, a Dél-Dunántúlon és a Dunántúli-Középhegységben a jó fatermési csoportba tartozó területek nagy valószínűséggel közepes, vagy gyenge fatermésű területekké válnak. Az Északi-Középhegységben nem változik jelentősen a fatermési osztályok előfordulási valószínűsége. Összességében a kocsánytalan tölgy fatermési potenciálja inkább kedvezőtlenebb irányba változik a következő évtizedekben.

Kulcsszavak: növedék, növedékbecslés, klímaváltozás, többváltozós statisztika.

PREDICTING THE CLIMATE CHANGE INDUCED YIELD POTENTIAL CHANGES OF SESSILE OAK STANDS

Abstract

Growth of forest stands is a central question in the field of forest research. Climate change impact assessment also assigns significance to this question. The growing conditions of forests are changing in Central Europe and the impacts of changes are generally considered to be disadvantageous. Increasing frequencies and duration of heat waves and droughts constrain the growing potential of industrially important species. For this reason a statistical evaluation of growth of sessile oak (*Quercus petraea*, Liebl) was conducted using site (bioclimate and soil) describing predictor variables. The study involved 4594 geo-referenced species records from the National Forestry Database. We focused on practically monoculture stands of seed origin. Climate variables were represented by the Climate EU database. The period of 1961-1990 was considered

as climatic baseline. The future, altered climate conditions were represented by the RCP 4.5 scenario based climate models for the period of 2041-2070. Soil and non-climate site data were added from the most recent spatial soil database of Hungary. The statistical random forest package of R was used to build classifiers for yield class predictions based on soil and bioclimatic variables for the reference period. The results of the model series were tested on test sites taken from the permanent yield monitoring plots and forestry database. It was found that predictions reached a relatively high 62-83% correct classification rates by yield classes performing on 77% as an average. Models were run using future climate datasets for the period of 2041-2070 in order to assess changes in future yield classes of forests. Results showed that the extent of the area of best yield classes will decrease, and the most suitable areas show a slight shift to west and to north. In the Pre-Alps region, in the South-Transdanubian region, and in the Transdanubian Mountainous region the well growing sessile oak areas will probably turn into medium or even poorly growing ones. In the same time in the Northern Mountainous region models did not predict significant changes in yield potentials. Overall growing conditions of sessile oak seem to be slightly worsening in the next decades.

Keywords: forest growth, yield assessment, climate change, multivariate statistics.

BEVEZETÉS

Növekedés és klímaváltozás

Számos tanulmány foglalkozott már a legfontosabb fajok klímaváltozásra adott növekedési és mortalitási válaszreakciójával klímaváltozási scenárió és földrajzi fekvés vonatkozásában. Lucfenyő esetében a lengyel Tátrában, 800-1500 m-es magasságban direkt kapcsolatot mutattak ki az évenkénti növekedési dinamika és a hőmérsékletváltozás között (Savva et al. 2006) felfedve egy pozitív növekedés visszacsatolást az emelkedő kora tavaszi és nyári hőmérsékletekkel. Alacsonyabb térszinteken, ahol a fajok növekedését nem a hőmérsékleti minimumok korlátozzák, némileg más a helyzet.

A növekvő hőmérséklet és a növekvő CO₂ koncentráció okozhat magasabb növekedési potenciált, amíg elegendő víz áll rendelkezésre. Az elmúlt évtizedek erdészeti irodalmának feldolgozását közlő cikkükben (Boisvenue és Running 2006) kimutatták, hogy azoknak az ökoszisztémáknak a többségében, amelyek nem víz limitáltak, a növekedési erély emelkedő trendet mutat a klímaváltozással. Vízlimitált ökoszisztémák esetében – általában alacsonyabb térszinteken – a hőmérséklet emelkedés együtt jár a vegetációs időszaki csapadék csökkenésével, ami magasabb mortalitási rátákhoz és csökkenő növekedési trendhez vezet (McDowell és Allen 2015, Mátyás és Sun 2014). Ezért nagyon valószínű, hogy a mortalitás a fenntarthatóságot befolyásoló tényező lesz Közép- és Délkelet-Európa azon térségeiben, ahol a zárt erdők és a füves puszták határterületei találhatóak. A helyzetet potenciálisan ronthatja a sekély és igen sekély termőhelyek esete, ahol a mortalitás még változatlan csapadékviszonyok mellett is nőhet. Ezért a fajok növekedési és mortalitási válaszreakcióinak ismerete az alsó, ún.: szárazsági erdőhatáron (Mátyás et al. 2009) kulcsfontosságú erdőgazdálkodási kérdés Magyarországon, ahol az erdők zöme érintett a következményeket illetően.

Ebből a szempontból, a hazánkban is jelentős fajok közül a legtöbbet vizsgált faj a bükk volt. A legtöbb szerző egyetért abban, hogy Dél-Európában, pontosabban a bükk déli

elterjedési határán jelentős növekedés visszaesés, vagy akár kihálási jelenségek is várhatóak (Jump et al. 2006, Geßler et al. 2006). Ezzel egybevágó eredményre jutottak hazai szerzők is az aszályok mortalitásra gyakorolt hatásának vizsgálatával (Rasztovits et al. 2014). Azokban a bükk populációkban viszont, amelyek a faj elterjedési területének belsejében helyezkednek el, messzebb az elterjedési terület peremétől csak csekély mértékben lehet megfigyelni a klímaváltozásra adott válaszreakciókat (Hartl-Meier et al. 2014).

Látható talán ebből a rövidebb áttekintésből is, hogy a fafajok klímaváltozásra adott válaszreakciói fafaj és termőhely függőek és földrajzilag is eltérőek. Ezért olyan kérdésekre, hogy milyen lesz egyes fafajok válaszreakciója a klímaváltozásra nem lehet sematizált válaszokat adni.

A válaszreakciók becslésére használt módszerek között általában többváltozós statisztikai módszereket találunk, amelyeket erdőtervi, hamis idősoros, általában nagy tömegű kiindulási adatbázisra építenek. De e mellett olykor kisebb számú, de sokkal részletesebben ismert mintára (származási kísérletek) épülő elemzések is léteznek. Ausztriában 2800 erdőleltár hálózati mintaterület talaj- és fatermési adata, valamint regionális klímamodellek adatai alapján készítettek térben explicit várható hatás vizsgálatot. Az elemzés kimutatta, hogy már 1°C-os hőmérséklet emelkedés változatlan csapadékviszonyok mellett is jelentős változásokat hozhat az ausztriai erdőkben. Magasabb térszinteken a lombhullató fajok versenyképesebbé válnak a fenyőkkel szemben, míg alsóbb térszinteken a luc állományok nem lesznek fenntarthatóak gazdasági rendeltetésű állományként (Lexer et al. 2002).

Német szakemberek klímaváltozás függő, tér- és időbeli – hamis idősoros – fatermőképességi potenciál (site index) modelleket fejlesztettek (Nothdurft et al. 2012). A kapcsolatot a fatermőképesség és a klimatikus változók között krigeléssel teremtették meg. A modellt meglévő erdészeti monitoring pontokra illesztették. Az eredmények azt mutatták, hogy Baden-Württemberg hegyvidéki, középhegységi régióiban a tölgy állományoknak alacsonyabb térszinteken is növekedhet a fatermési potenciálja.

A kocsánytalan tölgy esetében, annak különböző európai származásainak túlélését és növekedését vizsgálva nem pusztán erdőtervi, hanem konkrét populációk mérési adatai alapján különböző klímascenáriók függvényében (Sáenz-Romero et al. 2017) azt találták, hogy a Közép-Európában az RCP 4.5 scenárió esetén a kocsánytalan tölgy csak kisebb mértékű növedék veszteséssel és mortalitás növekedéssel fog reagálni. Az RCP 8.5-ös scenárió esetében viszont a faj populációinak drámai hanyatlása várható.

Egy másik növekedés változással foglalkozó tanulmány szerint, mely az Alföldtől a Nyugati-Kárpátokig vizsgálta a fafajok növekedését és az erdők szénkörforgalmát a luc és a bükk a leginkább veszélyeztetett faj, míg a tölgyek növekedési erélye akár nőhet is a klímaváltozás eredményeként (Hlásny et al. 2011).

A fenti tanulmányok azt sugallják, hogy magasabb térszinteken, vagy az elterjedési terület középső részein a klímaváltozás növekedésre gyakorolt hatásai sokkal kevésbé kritikusak, mint a határhelyzetben lévő populációk esetében. Ugyanakkor, elsősorban a klímaváltozási scenáriók függvényében főként a kocsánytalan tölgy megítélése kettős: A kisebb

„amplitúdójú” (RCP 4.5) klímaváltozási scenáriókra épülő növekedés becslések hajlamosak a kedvezőbb irányú változások prognosztizálására, míg az erősebb – RCP 8.5 – alapú becslések egyértelműen negatív jövőképet festenek e fajfaj számára.

Korábbi saját vizsgálatok

Korábban már tettünk kísérletet a legfontosabb fajfajok fatermésváltozásának becslésére (Illés és Fonyó 2016). Akkor két regionális klímamodellt használtunk a projekciókhoz, az A1B kibocsátási scenárióra épülő ALADIN és a ReGCM modelleket. A fatermésváltozást erdőtervi adatokból, az 1961-1990 és az 1981-2010 jellemző fatermésértékeinek különbségként képeztük és additív módon vetítettük előre a jövő időszakokra nézve. A 2016-os vizsgálatban a klímátípust, a talajtípust, a termőréteg vastagságot és a textúra osztályt vettük figyelembe. A változásokat pedig a klímátípus váltás jelentette. Ez a meglehetősen egyszerű és nagyban sematizáló modellünk átlagosan egy-két fatermési osztálynyi romlást prognosztizált az ország nagy részén. Ezt a tér- és időbeli fatermésváltozás becslést fejlesztettük tovább a jelenlegi munkában, melyben frissítettük az alkalmazott klímamodelleket (az A1B helyett az újabb RCP scenáriókat alkalmazzuk), bővítettük a felhasznált adatok körét és felbontását (5 helyett 34 bemenő adatunk van, 10 és 1 km-es fedvények helyett, 1 km-es és 100 m-es fedvényeket használunk), fejlesztettük a módszereket (leíró statisztikák helyett többváltozós predikciós módszereket használunk).

CÉLKITŰZÉS

Ebben a tanulmányban munkahipotézisként feltételezzük, hogy statisztikailag is kimutatható, szignifikáns kapcsolat van a megfelelően megválasztott termőhelyi paraméterek és a faállományok fatermési osztálya között, amely modellezhető. Klimatikus szempontból Magyarország az egyik leginkább veszélyeztetett európai ország a jövőben várható aszály és hőhullámok miatt. Ebből következően pedig kiemelt jelentőségű, hogy az erdészeti ágazatot ellássuk térbeli és időbeli projekciókkal az összes, gazdaságilag jelentős fajfaj (pl.: a kocsánytalan tölgy) növekedésére nézve. Ezért termőhelyi alapú, középtávú, empirikus növekedési modelleket hoztunk létre a növekedésváltozás becslésére.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A tanulmányban bizonyos alább részletezett feltételeknek megfelelően választott kocsánytalan tölgy állományok fajfajsortait használva, az állományok fatermési osztályainak (Béky 1981) termőhelyfüggő statisztikai modellezését végeztük el.

Az itt bemutatott megközelítés módszertani magja a következő: Azokat a mag eredetű kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Liebl.) állományokat vonjuk be az elemzésbe, amelyek

az uralkodó koronaszintet foglalják el, kvázi elegyetlenek, ami esetünkben a választott 75%-os, vagy magasabb elegyarány elérését jelenti. Koruknál fogva a klimatikus szempontból bázis időszaknak tekintett periódusban (1961-1990), vagy azt megelőzően jöttek létre (NÉBIH EI). A bázis időszak elnevezés arra utal, hogy ezt az időszakot gyakorlatilag a klímaváltozás hatásaitól mentesnek tekintjük. A feltételeknek megfelelő összes faállományt az erdőrészek súlyponti koordinátaival térinformatikai környezetben tároltuk. A bioklimatikus (a bázis és jövő időszakra nézve külön) és termőhelyi változókat – lásd később – ugyancsak térben explicit módon raszter állományokként ugyanabban a térinformatikai rendszerben tároltuk. Ez a modell környezet, ami a minta állományok növekedésére és környezeti feltétel-rendszerére egyaránt tartalmaz adatokat. A súlypontjukkal adott faállományokhoz mintavételezéssel hozzárendeltük a prediktorként használt változókat, így konkretizálva a térbeli kapcsolatokat. Az egyesített adatbázison random forest osztályozó algoritmust (Breiman 2001) tanítottunk R-programcsomagon belül, amely nem más, mint döntési fák erdeje. Az algoritmussal 500 döntési fából álló erdőt hoztunk létre, melyek mindegyike csak az adatok véletlenszerűen kiválasztott 2/3-án tanul és 1/3-n tesztl. A folyamat közben kitűnik, melyek a leghatékonyabb prediktor változók és torzítatlan becslést kapunk a modell hibájára nézve is. A modell létrehozása előtt optimalizáltuk a döntési fák egyes elágazásainál véletlenszerűen választandó prediktor változók számát.

A kész modell révén az ország teljes területéből azokra az erdőgazdasági tájakra és termőhelytípusokra készítettük el a pixel alapú becsléseket, amelyekben a kocsánytalan tölgynek kiemelkedő jelentősége van térfoglalásából adódóan: Alpokalja, Dél-Dunántúl, Dunántúli-Középhegység, Északi-Középhegység. Az eredményül kapott modellek becsléseiből az egyes fatermési osztályok térbeli előfordulási valószínűségét is megállapítottuk. A modelleket az eredmények független mintapontokon történt tesztelése után lefuttattuk a jövőre vonatkozó (2041-2070) klimatikus paraméterekkel is és a két időszak eredményeinek összehasonlítása révén nyílt lehetőség az időbeli változások becslésére.

A folyamat során építettünk Fournier és mtsai (2000) munkájában a térbeli modellek erdészeti alkalmazása tárgyban tett ajánlásaira.

Erdőállomány adatok

A kocsánytalan tölgy állományok random forest algoritmust tanító adatai az Országos Erdőállomány Adattár 2006-os verziójából származtak.

Az akkori állapot szerint a kocsánytalan tölgy területaránya a faállománnyal borított területtől 9,8%-ot tett ki (183 000 ha). Az élőfakészlete pedig 12,6% (45 millió m³) (NÉBIH EÁA 2006).

A fentebb leírt kiválasztási szempontoknak 3093 erdőreszlet felelt meg, 15,5 ezer ha faállománnyal borított területtel.

A modellek eredményeinek tesztelésére független mintaként az 1501 fiatalabb erdőrészet (1990 után keletkezettek), illetve az 50%-ot elérő, vagy meghaladó elegyarányban kocsánytalan tölgyet tartalmazó, első generációs (1993-97) FNM pontokat – 472 db – használtuk (NÉBIH EI).

Klímaadatok

A klimatikus adatok a Climate EU adatbázisból származtak, amely klimatikus és bioklimatikus adatokat egyaránt biztosított a bázis-, és a jövő időszakokra nézve (Hamann et al. 2013). Bázis időszekeként a már korábban említett 1961-1990 közötti évek klimatikus adatait használtuk. A jövő időszakot az RCP 4.5 kibocsátási szenárión alapuló klímamodellek (IPSL-CM5A-MR) EU-ra vonatkozó becslései adták a 2041-2070 közötti évekre nézve (Wang et al. 2016). Az alábbi bioklimatikus változók statisztikai úton leskálázott 1 km x 1 km-es modelljeit használtuk:

MWMT: legmelegebb hónap átlaghőmérséklete (°C),
MCMT: leghidegebb hónap átlaghőmérséklete (°C),
MSP: átlagos vegetációs csapadékösszeg május-szeptember (mm),
SH:M: nyári hő-nedvesség index ((MWMT)/(MSP/1000)),
DD<0: foknap érték 0°C alatt, fagyos napok,
DD>5: foknap érték 5°C felett, vegetációs napok,
DD<18: foknap érték 18°C alatt, hűvös napok,
DD>18: foknap érték 18°C felett, meleg napok,
CMD: klimatikus nedvesség deficit érték, ami a párolgási kényszer és a rendelkezésre álló csapadék közti különbséget jellemzi,
FAI: erdészeti aszályosság index (Führer et al. 2011),
TD: a legmelegebb és leghidegebb hónapok átlaghőmérsékleti különbsége,
EMT: extrém minimum hőmérséklet,
Évszakos minimum, átlag és maximum hőmérsékletek,
Évszakos csapadékösszegek.

Egyéb termőhelyi adatok

Az egyéb termőhelyi adatok forrása az MTA TAKI-val közösen létrehozott, országos termőhelyi adatbázis volt, melyről korábban az Erdészettudományi Közleményekben és nemzetközi publikációban adtunk számot (Illés et al. 2016, Pásztor et al. 2018). Ezek a térképi adatok a talajtípusról, termőréteg vastagságról, a fizikai féleségről és a hidrológiai kategóriáról adnak információt. Azért ezeket a térképi fedvényeket használtuk, mert egységesen lefedik az ország teljes területét, míg az adattári termőhelyi adatok kizárólag erdőterületekre vonatkozóan érhetőek el.

A fentiek mellett a tengerszint feletti magasságot használtuk még prediktor változóként.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Az eredménytérképek alapján tudjuk megbecsülni a regionális és időszaki változásokat az egyes fatermési osztályok előfordulási valószínűségében a kocsánytalan tölgy esetében. Le kell szögezni, hogy a statisztikai megközelítés önmagában nem alkalmas minden kérdés megválaszolására. A megközelítés előnye azonban, hogy sok adatra támaszkodva robusztus eredményekre képes.

A legfontosabb hatótényezők, amik a fatermési osztály becslését meghatározták

A vizsgálatba vont prediktor változók közül a legfontosabb hat a következő volt:

- FAI,
- nyári csapadékösszeg,
- termőréteg vastagság,
- tengerszint feletti magasság,
- talajtípus,
- téli csapadékösszeg.

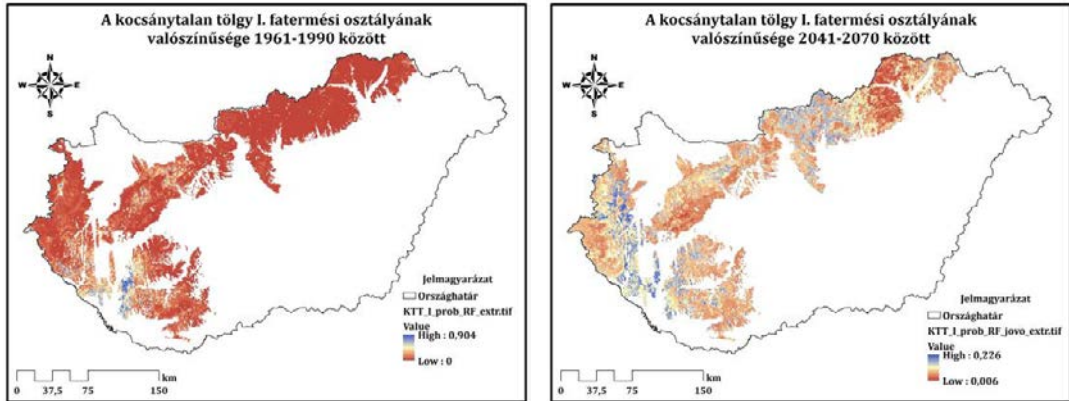
Fatermési osztályok valószínűségi térképei a múlt és a jövő időszakokra

Az 1-6. ábrák mutatják be a kocsánytalan tölgy fatermési osztályainak előfordulási valószínűség térképeit 500 döntési fából álló modell egyes fainak eredményei alapján. A térképeket fatermési osztályonként külön érdemes értelmezni. Egy adott fatermési osztályra nézve a valószínűség 0 és 1 közötti értékeket vehet fel. Az érték 1,0 abban az esetben, ha mind az 500 fa egyazon fatermési osztályt adja eredményül egy kérdéses térképi ponton. Egyhez közeli értékek ezért a döntési fák közti egyetértést tükrözik. Minél kisebb a valószínűség értéke annál kevesebb fa adja eredményül a kérdéses fatermési osztályt a modellben. Nulla esetén egyetlen fa sem adja eredményül a kérdéses osztályt. Amennyiben az egyes osztályok térképeinek maximum értéke alacsony, az azt jelenti, hogy csekély egyetértés van a döntési fák között. 0,3-as maximum érték például azt jelenti, hogy csak a fák 30%-a adja eredményül az adott osztályt. A térképpárok a bázis időszaki, 1961-1990 közötti és a jövőre vonatkozó 2041-2070 közötti időszakok valószínűség értékeit mutatják azokra az erdőgazdasági tájakra vonatkoztatva, amelyekben jelentős szerepet játszik a kocsánytalan tölgy és ezen belül is csak azokra a talajtípusokra, amelyeket a mintaterületek reprezentáltak.

A fatermési osztályok előfordulási valószínűsége alapján a legjobb növekedést nyújtó területek Nyugat- és Dél-Nyugat Magyarországon, a dombvidékek jól fejlett és mély talajain, valamint a Bakonyban találhatóak (1-2. ábra, baloldal).

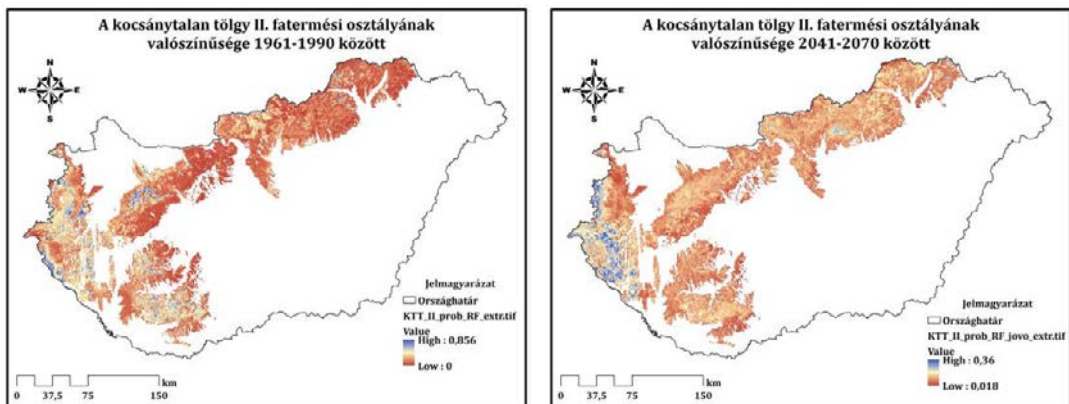
Közepes növekedésű területeket találunk zömmel az Északi-Középhegység dombvidéki területein, kisebb arányban a Dunántúli-Középhegység alacsonyabb térszintű, északias részein, valamint a Nyugat-Dunántúlon (3-4. ábra, baloldal).

Végül, a legmagasabb térszintek sekély talajain – főleg déli kitettségű oldalakon –, együtt a Közép-magyarországi dombvidéki területekkel található a leggyengébb növekedésű kocsánytalan tölgyesek (5-6. ábra, baloldal).



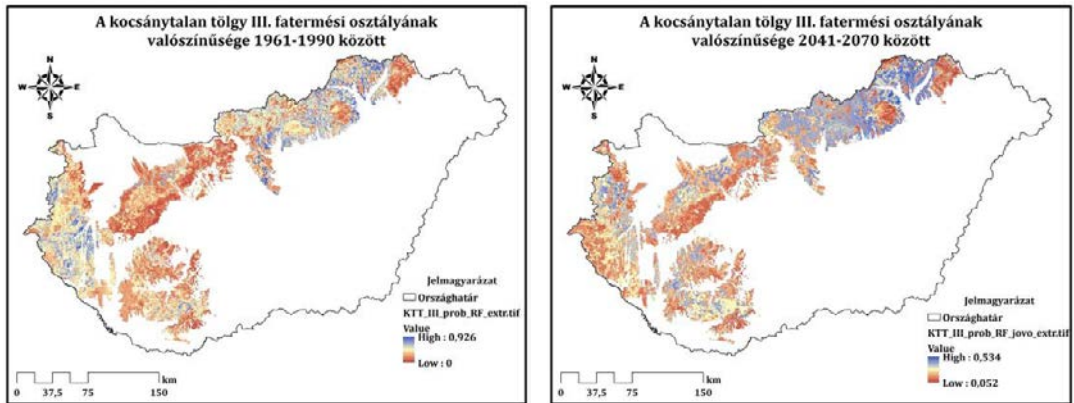
1. ábra: A kocsánytalan tölgy I. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 1: 1st yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



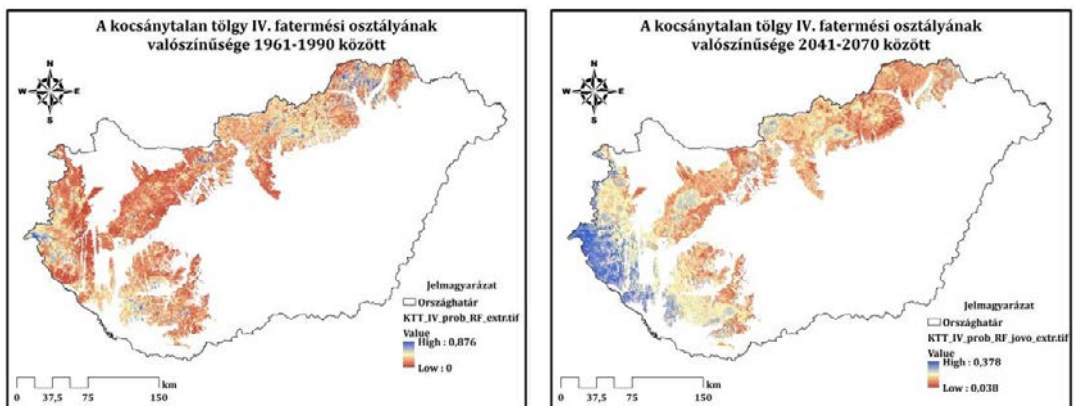
2. ábra: A kocsánytalan tölgy II. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 2: 2nd yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



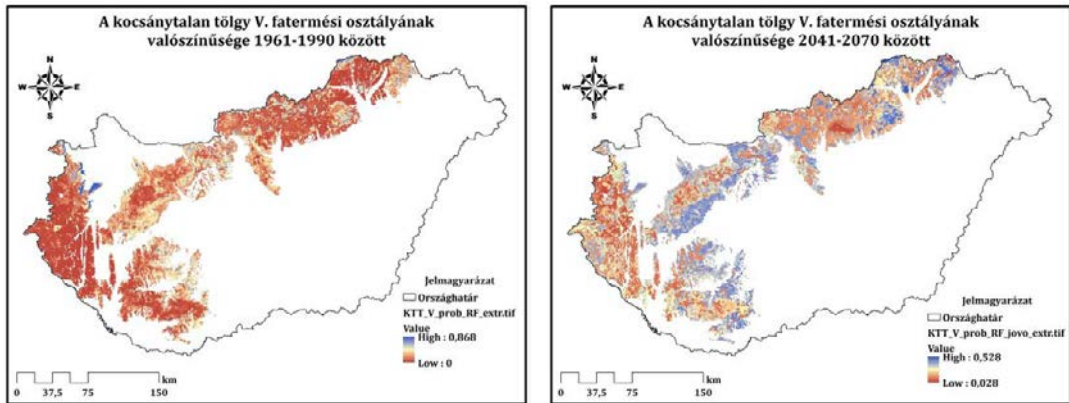
3. ábra: A kocsánytalan tölgy III. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 3: 3rd yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



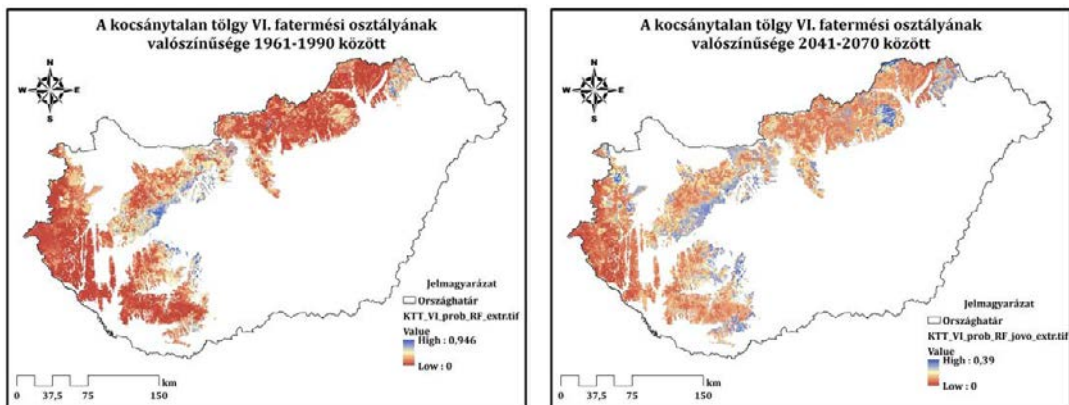
4. ábra: A kocsánytalan tölgy IV. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 4: 4th yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



5. ábra: A kocsánytalan tölgy V. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 5: 5th yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



6. ábra: A kocsánytalan tölgy VI. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 6: 6th yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).

A jövőre vonatkozó fatermési osztály valószínűségi térképek a bázis időszaktól eltérő térbeli mintázatot mutatnak.

A jövőre vonatkozó becslések esetében feltűnő, hogy a modell döntési fáinak között csökken az egyetértés, vagyis megnő a becslések bizonytalansága. Ettől függetlenül megállapítható, hogy a legjobb fatermési osztályok előfordulási valószínűségének maximális értékei egyértelmű nyugati, északi és növekvő tengerszint feletti magasság irányú eltolódást mutatnak (2-3. ábra, jobb oldal). Érdekes adalék, hogy az I. fatermési osztály előfordulási valószínűség

értékei általánosan növekedést mutatnak, de a valószínűségi értékek bőven az 50%-os érték alatt maradnak. A II. fatermési osztály esetében a magas valószínűségi értékek eltűnnek Délnyugat-Magyarországról és csak az Alpoknál valamint a Zempléni-hegységben, a Börzsönyben és a Mátrában maradnak magasabb (0,36) valószínűségi zónába eső területek. A III. fatermési osztály előfordulási valószínűsége nyugati irányban növekvő értékeket mutat, kiterjedve a Délnyugat-dunántúli régióra (4-5. ábra, jobb oldal). Ugyanakkor valószínűsége Észak-Magyarországon ugyancsak növekszik. A IV. fatermési osztály ugyancsak nyugati, délnyugati irányban mutat nagyobb valószínűségi értékeket. E két fatermési osztály esetében azonban érdemes figyelembe venni, hogy a legmagasabb valószínűségi értékek 0,4-0,5 körüliek, tehát a modellek e két osztály esetében is jobban szórtak eredményeikben. A kimondottan gyenge fatermési osztályok (V-VI) nagy valószínűségű területei növekszenek leginkább, és itt megfigyelhető egy déli, délnyugati irányú elmozdulás (5-6. ábra, jobb oldal). Az eredmények azt mutatják, hogy a kocsánytalan tölgy növekedési feltételei inkább gyengülnek a század közepére, ha az RCP 4.5 kibocsátási forgatókönyv szerinti klímamodellek válnak valóra.

Erdőgazdasági táj szinten a klímaváltozás kedvezőtlen hatásai súlyosan érinthetik majd a Dél-Dunántúlt (Somogy, Tolna és Baranya megyét), ahol a legjobb növekedésű területek közepes, vagy éppen gyenge kategóriába kerülhetnek át.

A becslések pontosságáról

A modellek becsléseinek pontossági tesztelése megerősítette azt az előzetes feltevést, hogy az esetek többségében a módszer robosztus és kiegyensúlyozott eredményt szolgáltat. Az 1. táblázat foglalja össze a helyesen osztályozott esetek részarányát.

1. táblázat: A helyesen osztályozott FNM és adattári teszterületek százalékos aránya.

Table 1: Proportion of correctly classified FNM test sites.

Fafaj	Adattári teszt*	FNM pontok*
Kocsánytalan tölgy	71,6%	68,7%

* A becsléseket akkor fogadtuk el, ha a becsült fatermési osztály értéke max. +/- 1 fatermési osztállyal tért el a valós értéktől.

A modellek egyes fatermési osztályokra vonatkozó legjobb találati eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze. Az eredmények harmonizálnak a bevezetésben bemutatott azon korábbi munkák eredményeivel, melyek a kocsánytalan tölgy Közép-európai növekedésbeli válaszreakcióját helyezték fókuszba és a növekedési erély csökkenését prognosztizálták. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a jövőre vonatkozó becslések nagymértékű szóródása még mindig elég magas ahhoz, hogy véglegesnek tekintsük ezeket az eredményeket. Ennek megfelelően a kocsánytalan tölgy állományok várhatóan fenntartják eddigi fatermési potenciáljukat az Alpoknál és az Északi-középhegység legészakibb és legmagasabb tájain. El-

lenben visszaesés várható a növekedésben elsősorban a Dél-dunántúli tájakon és a Dunántúli-Középhegységben. Mindez természetesen a feltételezett, RCP 4.5 szcenárió szerinti modellek megvalósulása esetén várható (Sáenz-Romero et al. 2017).

2. táblázat: A modellek *fatermési osztályonként elért legjobb eredményei az FNM pontokon.*
 Table 2: *Best classification results of the 20 models by yield classes on FNM test sites.*

Fatermési osztály	Találati % érték
I.	62,4%
II.	61,9%
III.	73,5%
IV.	80,5%
V.	82,5%
VI.	81,6%

KONKLÚZIÓK

Az eredmények alátámasztják, hogy a fejlett statisztikai módszerek alkalmasak nagy elemszámú termőhelyi adatbázisok és erdészeti adatok felhasználásával a faállományok növekedés potenciáljának modellezésére. Kihhasználva a számítástechnikai kapacitásokat, több egyenlő valószínűségű mintával végzett modellezéssel, mint a sztochasztikus szimuláció esetében, a termőhely függő fatermési mintázat felderíthető és valószínűségi változóként értelmezhető. Ezek a modell sorok alkalmasak lehetnek a növekedési jellegzetességek tér- és időbeli vizsgálatára, ezért a modellépítést kiterjesztettük a többi gazdaságilag fontos fajra is. Az további vita tárgya lehet, hogy mennyire használhatók az efféle sztochasztikus modellek a jövőre vonatkozó becslések elkészítésében. Véleményünk szerint rövidtávú (10-20 év) és középtávú (30-50 év) előrementszések megtehetőek, amennyiben a prediktor változók értékészlete a modell alapját képező időszakban és a célidőszakban kellő mértékű átfedést mutat. Az, hogy ez esetben mi a kellő mérték, még további diszkussziót igényel. Egy megoldást jelenthet, ha a mozgó átlagok elven alapulva, aktuális tény adatokkal mindig újrakalibráljuk a modelleket, így mindig csak az aktuális, például 30 éves időszakokat kell előre metszeni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munkát az Agrárklíma 2 projekt finanszírozta (VKSZ_2012-1-2013-0034).

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Béky A. 1981: Mag eredetű kocsánytalanölgyesek fatermése. *Erdészeti Kutatások* 74: 309-320.
- Boisvenue C. & Running S.W. 2006: Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12: 862–882. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x)
- Breiman L. 2001: Random forests. *Machine Learning* 45: 5–32. DOI: [10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)
- Fournier R.A., Guindon L., Bernier P.Y., Ung C.H. & Raulier F. 2000: Spatial implementation of models in forestry. *The Forestry Chronicle* 76: 929–940. DOI: [10.5558/ffc76929-6](https://doi.org/10.5558/ffc76929-6)
- 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.
- Geßler A., Keitel C., Kreuzwieser J., Matyssek R., Seiler W. & Rennenberg H. 2006: Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1–11. DOI: [10.1007/s00468-006-0107-x](https://doi.org/10.1007/s00468-006-0107-x)
- Hamann A., Wang T., Spittlehouse D.L. & Murock T.Q. 2013: A comprehensive, high-resolution database of historical and projected climate surfaces for western North America. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94: 1307–1309. DOI: [10.1175/BAMS-D-12-00145.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00145.1)
- Hartl-Meier C., Dittmar C., Zang C. & Rothe A. 2014: Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees* 28: 819–829. DOI: [10.1007/s00468-014-0994-1](https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1)
- Hlasny T., Barcza Z., Fabrika M., Balázs B., Churkina G., Pajtík J. et al. 2011: Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research* 47: 219–236. DOI: [10.3354/cr01024](https://doi.org/10.3354/cr01024)
- 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)
- Illés G., Fonyó T., Pásztor L., Bakacsi Zs., Laborczí A., Szatmári G. et al. 2016: Az Agrárklíma 2 projekt eredményei: Magyarország digitális talajtípus térképének előállítás. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 17–24. DOI: [10.17164/EK.2016.002](https://doi.org/10.17164/EK.2016.002)
- Jump A.S., Hunt J.M. & Peñuelas J. 2006: Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12(11): 2163–2174. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x)
- Lexer M.J., Hönniger K., Scheifinger H., Matulla Ch., Groll N., Kromp-Kolb H. et al. 2002: The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management* 162: 53–72. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00050-6)
- Mátyás Cs. & Sun G. 2014: Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters* 9: 085001. DOI: [10.1088/1748-9326/9/8/085001](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/085001)
- Mátyás Cs., Vendramin G.G. & Fady B. 2009: Forests at the limit: evolutionary — genetic consequences of environmental changes at the receding (xeric) edge of distribution. Report from a research workshop. *Annals of Forest Science* 66: 800. DOI: [10.1051/forest/2009081](https://doi.org/10.1051/forest/2009081)
- McDowell N.G. & Allen C.D. 2015: Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change* 5: 669–672. DOI: [10.1038/nclimate2641](https://doi.org/10.1038/nclimate2641)
- Nothdurft A., Wolf T., Ringeler A., Böhner J., Saborowski J. 2012: Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest Ecology and Management* 279: 97–111. DOI: [10.1016/j.foreco.2012.05.018](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.018)
- Pásztor L., Laborczí A., Bakacsi Zs., Szabó J., Illés G. 2018: Compilation of a national soil-type map for Hungary by sequential classification methods. *Geoderma* 311: 93–108. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.04.018](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.018)
- Rasztovits E., Berki I., Mátyás Cs., Czímber K., Pötzelberger E., Móríc 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)



- Sáenz-Romero C., Lamy J-B., Ducousso A., Musch B., Ehrenmann F., Delzon S. et al. 2017: Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Global Change Biology* 23(7): 2831–2847. DOI: [10.1111/gcb.13576](https://doi.org/10.1111/gcb.13576)
- Savva Y., Oleksyn J., Reich P.B., Tjoelker M.G., Vaganov E.A., Modrzynski J. 2006: Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees* 20: 735–746. DOI: [10.1007/s00468-006-0088-9](https://doi.org/10.1007/s00468-006-0088-9)
- Wang T., Hamann A., Spittlehouse D. & Carroll C. 2016: Locally Downscaled and Spatially Customizable Climate Data for Historical and Future Periods for North America. *PLoS One* 11: e0156720. DOI: [10.1371/journal.pone.0156720](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156720)

Érkezett: 2018. május 6.
Közlésre elfogadva: 2018. május 29.

FAPUSZTULÁS ÉS GYORSULÓ NÖVEKEDÉS KOCSÁNYTALAN TÖLGYESEINKBEN

Berki Imre¹, **Móricz Norbert**², Rasztovits Ervin², **Gulyás Krisztina**³, Garamszegi Balázs²,
Horváth Adrienn¹, **Balázs Pál**¹ és Lakatos Bence¹

¹Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar

²NAIK Erdészeti Tudományos Intézet

³Észak-magyarországi Vízügyi Igazgatóság

Kivonat

Hazánkban a klímaváltozással együtt járó aszályok évtizedek óta fapusztulásokat okoznak kocsánytalan tölgyesekben is. Másfelől több hazai publikáció született e faj faj növekedésének gyorsulásáról, de lassulásáról is. Vizsgáltuk, hogy van-e növekedésgyorsulás a száraz klímájú kocsánytalan tölgyes termőhelyeken, ahol évtizedek óta számottevő a kigyérülés a középkorú és az idősebb állományokban. Eredményeink szerint száraz tájainkon is egyértelműen gyorsult a fiatal kocsánytalan tölgyesek magassági növekedése. Az évtizedek óta időszakonként fellépő fapusztulás, valamint ezzel szemben a magassági-növekedés gyorsulása mégsem ellentmondásos. A fentiekből nem következik, hogy a többlet növekedés a jövőben is jellemző lesz, mert a klíma előrejelző modellek szerint az aszálygyakorosság növekvő tendenciát fog mutatni.

Kulcsszavak: klímaváltozás, aszály, kocsánytalan tölgy, fapusztulás, növekedésgyorsulás.

MORTALITY AND ACCELERATING GROWTH IN SESSILE OAK SITES

Abstract

The drought-induced vitality loss of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) has been continuously observed in Hungary for more than three decades. On the other hand there are some publications about the accelerated and decelerating growth of this tree species in Hungary. The changing height growth was studied on dry sessile oak sites to decide the presence or absence of the accelerated growth of young stands neighbouring older one with mass mortality in the last decades. Results showed a significant accelerated height growth of young stands in dry landscapes. The mass mortality and the accelerated growth of sessile oak stands in the dry landscapes are not contradictory.

Keywords: climate change, dry extremes, sessile oak, tree decay, accelerating growth.

BEVEZETÉS

Nyugat-Európában és Észak-Amerikában az „új típusú” erdőpusztulások az 1970-es években kezdődtek és okaival számos kutató foglalkozott (pl. Ulrich 1989, Manion 1992). Megállapították, hogy a pusztulások egyik fő oka a lokális, vagy regionális, túlnyomóan kén-dioxidos légszennyezés, amely a talaj savanyításán keresztül is elősegíti a pusztulást. Az iparvidékektől távoli pusztulásokban viszont már akkor is a száraz időszakok jelentették a döntő okot (Rehfuess 1986).

Az 1980-as (és 90-es) években a kén-dioxid emisszió drasztikus csökkentésével szinte teljességgel megszűntek a légszennyezés eredetű fapusztulások, és egyre több publikáció jelent meg az erdei fafajok gyorsuló növekedéséről, amelynek okáull elsősorban a globális melegedést jelölték meg (pl. Becker 1991, Spiecker et al. 1996).

Megjegyezzük, hogy a kontinens nyugati felén a klímaváltozás nem járt együtt olyan mértékű – fapusztulást és a növekedés lassulását okozó – szárazodással, mint Közép-Európa délkeleti felén és Dél-Európában. Bertini et al. (2010) ki is mutatta, hogy Olaszországban a klímaváltozás hatására csökkent a kocsánytalan tölgy növekedése.

Később a Nyugat-Európában tapasztalt növedékgyorsulás inspiráló hatására hazai mérések és elemzések is indultak, amelynek eredményei szerint bizonyos mértékű gyorsuló növekedés a hazai erdőkben is tapasztalható (Somogyi 2007, Somogyi 2008, Szabados 2007).

CÉLKITŰZÉS

Hazánk szárazságra hajló tájainak kocsánytalan tölgyeseiben az elmúlt évtizedek egyre gyakoribb száraz időszakainak hatására számottevő fapusztulás zajlott. Ugyanakkor az ország még viszonylag jobb nedvességellátottságú tájain mérsékelt növekedésgyorsulás is kimutatható volt. Jelen kutatás célja annak vizsgálata, hogy:

- Milyen szoros az összefüggés tájaink nedvességellátottsága és a kocsánytalan tölgy pusztulásának mértéke között.
- Van-e növekedésgyorsulás az olyan mezofil és száraz kocsánytalan tölgy termőhelyeken is, ahol évtizedek óta jelentős a fapusztulás.

A VIZSGÁLT ÁLLOMÁNYOK ÉS AZ ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Kocsánytalan tölgyesek fapusztulás okozta törzshiányának megállapítása országos klímagradiens mentén

A kocsánytalan tölgy a leghumidabb tájaktól a száraz tájakig állományalkotó, és az elmúlt évtizedekben a szárazodás hatására elterjedésének szárazabb tájain számottevő pusztulást

mutatott. E két jellegzetessége miatt alkalmas a klímfüggő pusztulás, illetve a növekedés-gyorsulás klimatikus okainak vizsgálatára. Már négy évvel ezelőtt is beszámoltunk a kocsánytalan tölgy egészségi állapotáról (Berki et al. 2014). Vizsgált helyszíneink az országon átnyúló klímatranszekt mentén, 3-4 évtizede nem gyérített (legfeljebb száradékolt), zonális termőhelyű, középkorú és idős állományok voltak. Jelenlegi kutatásunkban a fapusztulások okozta törzshiány megállapításához bővítettük a vizsgált állományok számát.

Erdőállományok vizsgálata klímatranszekt mentén általánosan ismert módszer (pl. Pretzsch & Schütze 2012). A száraz időszakok miatti fapusztulások következtében lecsökken a relatív állománysűrűséget, és az így kialakult törzshiányt úgy határoztuk meg, hogy a vizsgált állományok hektáronkénti törzsszámát Béky (1981) mageredetű kocsánytalan tölgy fatermési tábla (100%-os záródású állományokra vonatkoztatott) törzsszámaihoz viszonyítottuk. E módszer részleteit e folyóiratban megjelent korábbi közleményünk (Berki et al. 2014) tartalmazza.

Az egyes tájak klímajellemzésére választott Ellenberg-index a legmelegebb hónap középhőmérsékletének és a csapadék éves mennyiségének aránya ($T_{\text{július C}} / P_{\text{éves mm}} \times 1000$), és alkalmas a nyári szárazság mértékének kifejezésére.

A vizsgált kocsánytalan tölgy állományok felső magasságának mérése és a relatív felső magasság

Egy erdei termőhely termőképességét a rajta növekvő faállomány (dendrometriai paraméterei közül) a magassági növekedés jelzi a legvalóságosabban. A felső magasság függ legkevésbé az állomány sűrűségétől (gyérülésétől) ezért a felső magasság és az állomány fatérfogata a termőhely produktivitásának indikátora. Számos publikáció azt is megerősíti, hogy a magassági növekedés változása jelzi legpontosabban a klímaváltozás faállományokra gyakorolt hatását (pl. Libište-Zalite & Jansons 2012).

Az általunk vizsgált kocsánytalan tölgy állományokban egy hektár területet bejárva a vizuálisan legmagasabbnak ítélt 20-25 faegyed magasságát mértük. E megmért fák közül a legmagasabb 7-8 fa (a mért faegyedek egyharmada) átlagmagasságát tekintettük az állomány felső magasságának. Jólehet e módszer nem megszokott módja az állományi felső magasság meghatározásának, de viszonylag gyors és pusztán a vizsgált állományoknak a relatív felső magasság alapján, egymással történő összehasonlítására messzemenően alkalmas.

A fák magassági növekedése szoros összefüggésben van a klímával, és ezen belül a nedvességellátottsággal, éppen ezért az állományok felső magasságát is a nedves – száraz klímatranszekt mentén mértük.

Egy faállomány magassága a terepen (általában tized méter pontossággal) megmért abszolút érték. A relatív magasság pedig azt fejezi ki, hogy az adott életkorig ez a magasság gyenge, vagy jó magassági növekedésre utal. A faállományokat magassági növekedési teljesítményük alapján a fatermési tábla hatféle fatermési osztályba sorolja be.



Vizsgálatunkban az idősebb kocsánytalan tölgy állományok eddigi magassági növekedési teljesítményéhez (relatív magasságához) viszonyítjuk a fiatal állomány eddigi növekedését (relatív magasságát). Ezt kétféle módon is megtehetjük. Az egyik módszer, hogy a Béky-féle mageredetű kocsánytalan tölgyek fatermési tábláiban (Béky 1981) az idősebb állomány fatermési osztályát tekintjük alapnak, és ennek korfüggő értékeihez viszonyítjuk az idősebb és a fiatal állomány magassági értékét, majd összevetjük egymással az idősebb és a fiatal állomány ezen értéktől való eltéréseit. A másik módszer szerint minden vizsgált helyszín idősebb és fiatal állományainak magasságát egységesen a közepes (III.) fatermési osztály (korfüggő) értékeihez viszonyítunk, és százalékban fejezzük ki. Az összehasonlításainkat minkét módszer szerint elvégeztük és a kapott eredmények szinte teljességgel egyeztek. Utóbbi módszer eredményei szemléletesebben ábrázolhatók, így jelen publikációban ezeket mutatjuk be.

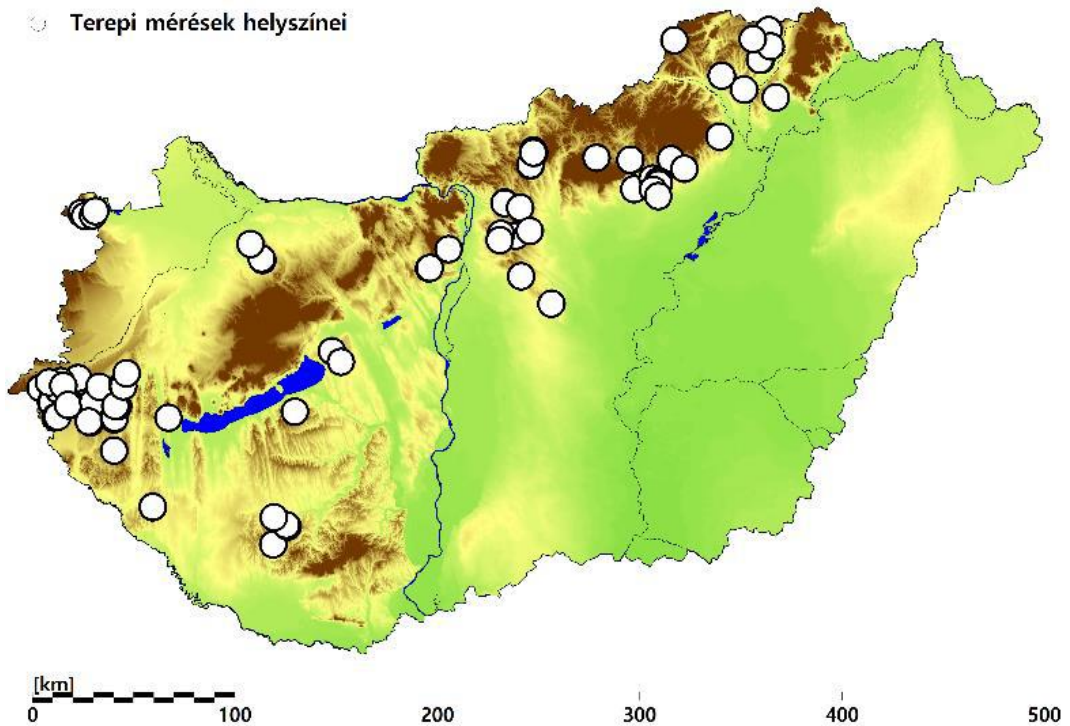
A kocsánytalan tölgy magassági növekedés változásának vizsgálata szomszédos fiatal és idősebb állományok relatív felsőmagasságának összevetésével

Hazánkban a klíma melegedése az 1980-as évektől lett fokozott mértékű, és szintén ettől váltak gyakoribbá a több évre kiterjedő aszályos időszakok. Tehát a klímaváltozás a faállomány növekedésére gyakorolt hatását az 1980-as években felújított, így jelenleg 30-35 éves állományok magassági növekedésén lehet lemérni.

E fiatal állományok növekedését nem tudjuk megfelelő standardhoz viszonyítani, hiszen a klímaváltozás minden táj, minden fajának, minden korosztályára hat. Viszonyíthatjuk ugyanakkor a megváltozott körülmények között nőtt fiatal állományok növekedési teljesítményét a fiatal állományok szomszédságában álló, számottevően idősebb állomány növekedési teljesítményéhez. Ebben az esetben ugyanis az egyes helyszíneken a fiatal és a szomszédos idősebb állomány termőhelye hasonló, de **míg a fiatal állomány eddigi teljes életidejét már a melegebb és szárazabb klímában töltötte, addig a szomszédos idősebb állomány eddigi életidejének csak egy részét – ráadásul idősebb, már lassuló növekedésmentű – életszakaszát élte a megváltozott környezetben.** Ha a fiatal állományok felső magassága nagyobb, mint az idősebbeké, akkor a növekedést gyorsító hatások erősebbek, mint a gyakori száraz időszakok növekedést fékező hatása.

Az állománysűrűségi és törzshiány vizsgálatok 32 db állománya közül csak 12 szomszédságában volt 25-35 év közötti korú fiatal állomány is, így további 16 db olyan idősebb (80-120 éves) állományokat jelöltünk ki, amelyeknek voltak fiatal szomszédjai. Így összesen 28 helyszínen hasonlítottuk össze a két korosztály relatív felső magasságát.

○ Terepi mérések helyszínei



1. ábra: A kocsánytalan tölgy állományok relatív sűrűségének és felső magasságának mérési helyszínei az országot átszelő dombosági magasságú helyszínek alkotta klímátranszekt mentén.

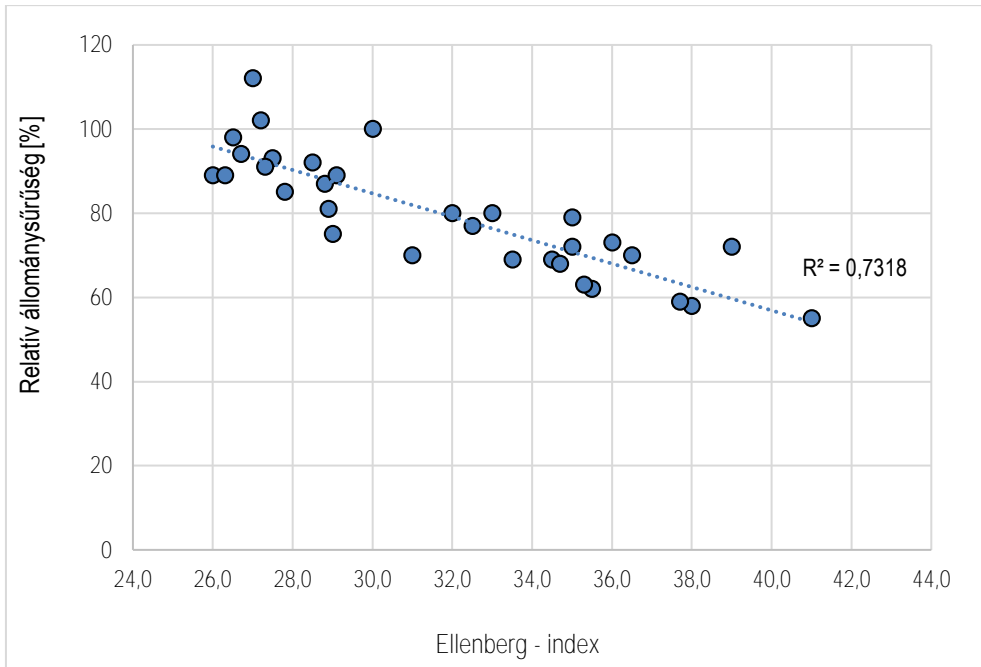
Figure 1: Selected sessile oak stands for density and growth investigations in zonal hilly sites along a climatic gradient through Hungary.

EREDMÉNYEK

A szárazság okozta fapusztulás miatti állománysűrűség csökkenés (gyérülés, törzshiány)

A nedves-száraz klímátranszekt mentén vizsgált állományokban 112% -ról 57% -ig csökken a relatív állománysűrűség (1. ábra), főleg a száraz alföldperemi, dombosági tájakon volt olyan jelentős fapusztulás a gyakoribbá és hosszabbá vált aszályok hatására, hogy drasztikusan csökkent az állományok relatív sűrűsége, és alakult ki jelentős élőkészlet hiány.

A 2. ábrán látható klímászárazodás-mortalitás függvény segítségével becsülhető, hogy adott Ellenberg-index értékkel jellemzett klíma mellett milyen mértékű kocsánytalan tölgyfapusztulás várható. A különböző klímáscenáriók szerint a jövőben tovább szárazodik a Kárpát-medence klímája (Gálos et.al. 2015)

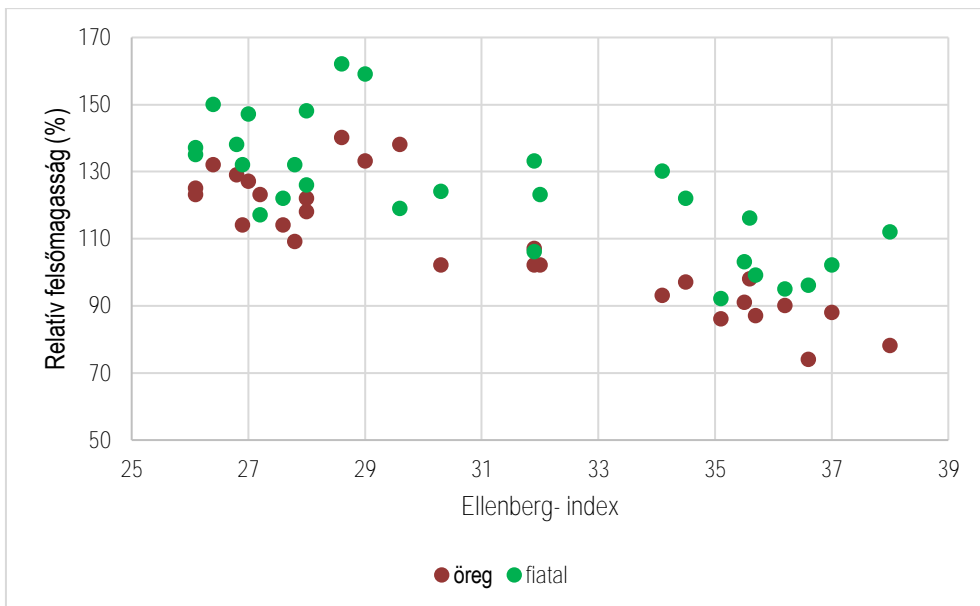


2. ábra: Kocsánytalan tölgy állományok Ellenberg-indexel kifejezett klímája (1961-2010) és relatív sűrűségük közötti összefüggés.

Figure 2: Relationship between the climate (1961-2010) and the relative density of the sessile oak stands along a climatic gradient through Hungary.

Szomszédos idős és fiatal kocsánytalan tölgy állományok relatív felsőmagassága

A 3. ábra a vizsgált kocsánytalan tölgyes helyszíneken, az azonos Ellenberg-index értékű fiatal és idős állományok relatív magasságát mutatja (zöld és barna pontok). Látható, hogy az idős és a fiatal állományok legintenzívebb magassági növekedése nem a leghumidabb (őrségi) klímában van, hanem a 28-29-es Ellenberg-indexű (göcseji) állományokban, az őrségénél kedvezőbb talaj adottságok miatt. Ezután a mezofil-száraz irányban (nagyobb index értékek felé) haladva a felső magasság csökkenése jól követi a növekvő vízhiányt.



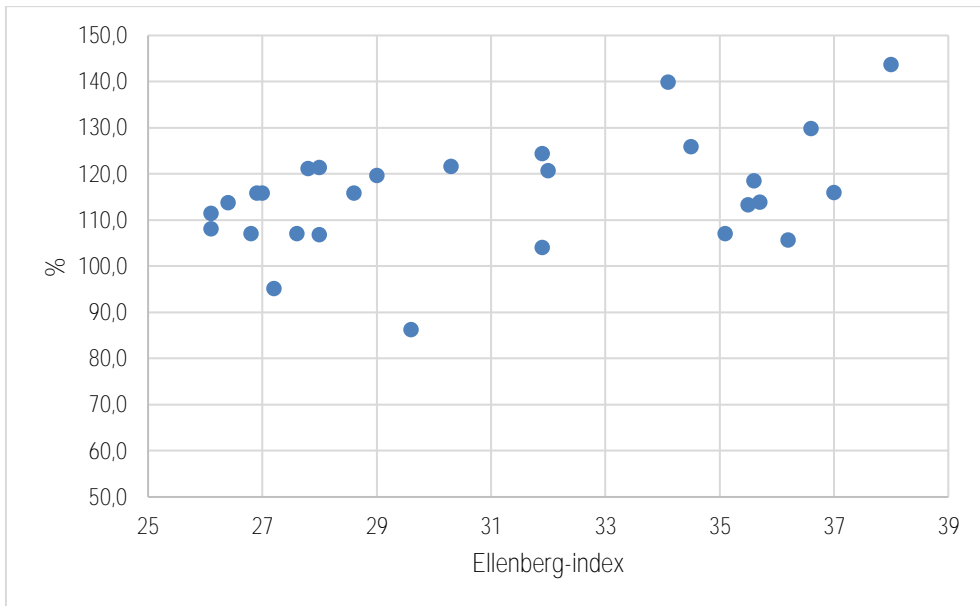
3. ábra: A vizsgált idős-fiatal KTT állománypárok relatív felső magassága. Adott helyszín idősebb és fiatalabb állománya ugyanazon Ellenberg-index értéknél van.

Figure 3: Relative top height of young and older sessile oak stands. Green point = young stand, brown point = older stand.

A 3. ábra fontos mondanivalója az, hogy az egyes helyszíneken a fiatalabb állományok relatív felső magassága rendre nagyobb, mint az idősebbeké, tehát gyorsabban növekednek, mint az idősebb állományok fiatalabb korukban. A meglepő az, hogy a klímatranszekt száraz részén is gyorsult a magassági növekedés az utóbbi évtizedekben, miközben ott számottevő fapusztulás is zajlott.

A fiatalabb/idősebb állomány relatív magasságának aránya

A könnyebb áttekinthetőség kedvéért az egyes helyszíneken levő fiatal és idősebb állomány relatív felső magasságának viszonyát oly módon is bemutatjuk, hogy adott helyszín fiatal állományának relatív felső magasságát osztottuk a szomszédos idősebbével. A kapott értéket százalékos formában ábrázoltuk a 4. ábrán, amelyen látható, hogy a 28 idős-fiatal állománypár közül 26 helyszínen van 100% fölötti érték, 115-120% közötti átlagértékekkel. Megállapíthatjuk tehát, hogy átlagosan 15-20%-kal nagyobb a fiatal állományok relatív felső magassága a fatermési táblához képest, mint az idősebbeké.



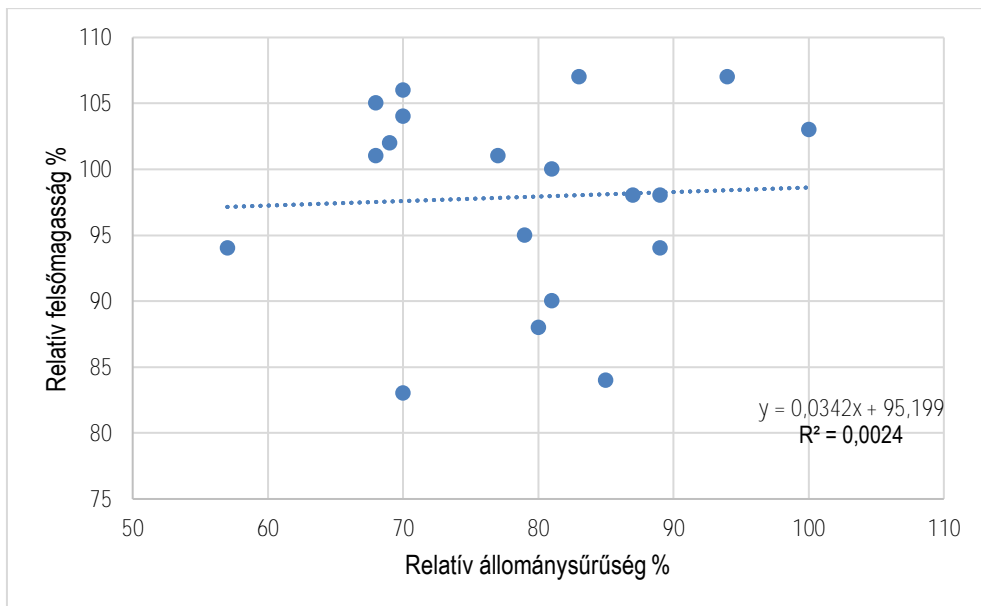
4. ábra: A szomszédos fiatal / idős állománypárok relatív felsőmagasság arányának százalékban kifejezett hányadosa.

Figure 4: The rate of relative top height of young / neighbouring older stand (in %).

Függ-e a kocsánytalan tölgy magassági növekedése az állomány relatív sűrűségétől?

A fiatal állományok relatív felső magasságát tehát a szomszédos idősebb állomány relatív felső magasságához viszonyítottuk, ezért fontos tudni, hogy az idősebb állomány felső magasságát nem csökkenti-e a fapusztulások miatt lecsökkent állománysűrűség.

Elemeznünk tehát, hogy a vizsgált idősebb állományokban milyen mértékben függ a felső magasság az állomány relatív sűrűségétől. Mivel a zonális termőhelyű állományok magassági növekedése döntően a klímától függ, ezért, ha a magassági növekedés állománysűrűségtől való esetleges függését akarjuk megtudni, akkor a hasonló klímájú, de eltérő sűrűségű állományok relatív felső magasságát kell összehasonlítani. Az 5. ábrán 19 db cseres-tölgyes klímájú, középkorú és idősebb kocsánytalan tölgy állomány relatív felső magasságát ábrázoltuk relatív állománysűrűségük függvényében.



5. ábra: Hasonlóan cseres-tölgyes klímájú, de különböző relatív állománysűrűségű (%), középkorú és idősebb kocsánytalan tölgy állományok relatív felső magassága (%).

Figure 5: Relationship between relative stand density and relative top height of older sessile oak stands with similar (Turkey-sessile oak) climate (in %).

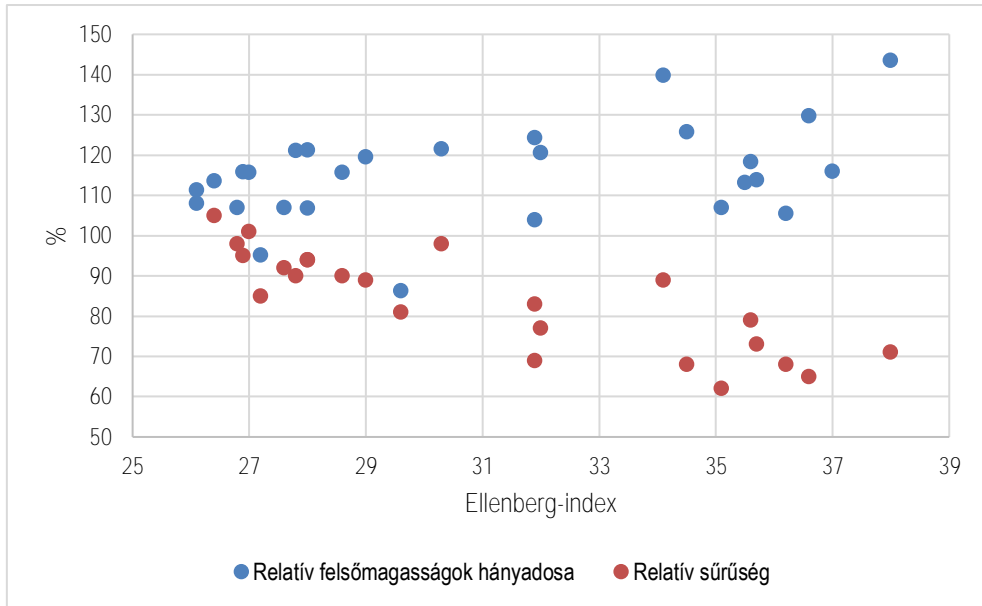
Ezen állományok klímája eléggé hasonló, Ellenberg-indexük 33,0-36,2 értékek közé esik. Az állományok relatív sűrűsége viszont széles spektrumú, mert 57%-tól 100% közötti. Eltérő relatív felső magasságukat nem az eltérő állománysűrűség okozza, mert az összefüggés nem szignifikáns.

Az idősebb állományok fapusztulásának mértéke és a szomszéd fiatal állományok növekedésmentének változása az idősebbekhez képest

Az eredmények bemutatásának elején a 2. ábrán láthattuk, hogy a klímatranszekt mentén vizsgált 32 db középkorú és idős állományokat a száraz tájak felé haladva egyre nagyobb mértékű fapusztulás jellemezte az elmúlt évtizedekben. A 4. ábrán pedig azt láttuk, hogy az idősebb állományok relatív magasságát 100%-nak véve a fiatal fiatalok relatív magassága rendre 100% fölötti, tehát gyorsabban nőttek, mint az idősebbek fiatalabb korukban. A szemléletesség kedvéért e két jelenséget egy ábrán is bemutatjuk (6. ábra).

Az idősebb állományok relatív sűrűségéhez (kigyérüléséhez) két okból sem a saját, hanem a szomszédos fiatal állományok növekedésgyorsulását hasonlítottuk Egyrészt azért, mert a saját növekedésgyorsulásuk nem ismert, másrészt azért, mert – ahogy a módszertani

részben kifejtették – nem az idősebb, hanem a fiatalabb állományok élték eddigi teljes életszakaszukat abban a megváltozott klímában, amelynek száraz időszakai fapusztulást, tehát állománygyérülést okoztak a középkorú és idősebb állományokban.



6. ábra: A fiatal állományok relatív felsőmagassága (%) (kék pontok), és a szomszédos idősebb állományok relatív állománysűrűsége (barna pontok) összehasonlítása, a klíma függvényében.

Figure 6: The rate of relative top height of young / neighbouring older stand (in %, blue point), and the relative stand density of older stands (in %, brown point).

A 6. ábrán látható, hogy a humid tájaktól a szárazak felé haladva az idősebb állományokban a száraz időszakok hatására bekövetkezett fapusztulás miatt fokozatosan csökken az állománysűrűség, és kb. a 32-es Ellenberg-index értéknél szárazabb helyszíneken számottevő törzshiány alakult ki. Meglepő, hogy e száraz tájakon is gyorsuló növekedésűek a fiatal állományok.

KONKLÚZIÓ

Vizsgálataink legfontosabb megállapítása tehát az, hogy az eddigi életszakaszukat a megváltozott atmoszférikus környezetben töltő fiatal állományok a teljes klímatranszekt mentén gyorsabban nőttek, mint ahogy az idősebb állományok nőttek fiatalabb korukban. Meglepő, hogy a szárazságokkal erősebben sújtott tájakon is gyorsult a fiatal állományok magassági növekedése, pedig a szomszédos idősebb állományokban az utóbbi 3 évtized-

ben a száraz időjárási extrémek miatt számottevő fapusztulás volt. A vizsgálatunkban viszonyítási alpnak tekintett idősebb állományok növekedése is valamennyivel feltételezhetően gyorsuló lett, így a fiatal állományok 15-20%-os növekedésgyorsulása alábecsült érték.

Feltehető, hogy az idősebb állományokban történt fapusztulások miatti állománygyérülés (törzshiány) következtében hektáronkénti fatérfogatuk kisebb, mint amekkorát korukból és magasságából adódóan a fatermési tábla mutat.

Az évtizedek óta időszakonként fellépő fapusztulás, valamint ezzel szemben a magasági növekedés gyorsulása mégsem ellentmondásos folyamatok. A klímaváltozással együtt járó száraz extrémek jóllehet időszakonként fapusztulásokat okoztak, de egyenlőre csak feltételezzük, hogy az elmúlt évtizedekben többségben lehettek az olyan az évek, amelyekben volt legalább annyi csapadék, hogy a fák nedvességellátottsága elegendő volt a melegebb és hosszabb vegetációs időszak növekedésfokozó érvényesüléséhez. Kutatásunk következő feladata, hogy évgűrű analízissel számszerűsítsük az elmúlt 3-4 évtized növekedést fékező, illetve gyorsít hatású éveinek számát.

Az elmúlt évtizedekben tehát az országon átívelő klímagradiens túlnyomó részén a fapusztulások ellenére növedégyorsulás volt, de ebből nem következik, hogy a többletnövekedés a jövőben is jellemző lesz, mert a klíma előrejelző modellek szerint az aszály gyakoriság növekvő tendenciát fog mutatni (Gálos et al. 2015).

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást az Agrárklíma.2 (VKSZ 12-1-2013-0034) projekt támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Becker M. 1991: Impact of climate, soil and silviculture on forest growth and health. In: Landmann (ed): French research into forest decline. DEFORPA Programme (Forest decline and air pollution), 2nd report, Nancy, 23–38.
- Béky A. 1981: Mag eredetű kocsánytalan tölgyesek fatermése. Erdészeti kutatások 74: 309–320.
- Berki I., Rasztovits E. & Móricz N. 2014: Erdőállományok egészségi állapotának értékelése – egy új megközelítés. Erdészettudományi közlemények 4(2): 149–155.
- Bertini G., Amoriello T., Fabbio G. & Piovosi M. 2010: Forest growth and climate change: evidences from the ICP-Forests intensive monitoring in Italy. iForest 4: 262–267. DOI: [10.3832/ifor0596-004](https://doi.org/10.3832/ifor0596-004)
- 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.
- Libiete-Zalite Z. & Jansons A. 2012: Climate impacts on lodgepole pine (*Pinus contorta* var. latifolia) height growth in Latvia. Joint International Conference „Biological Reactions of Forests to Climate Change and Air Pollution” Kaunas, Lithuania.
- Manion P.D. 1992: Forest Decline Concepts (first edition). American Phytopathological Society, St Paul, Minnesota, USA.
- Pretzsch H. 2009: Forest dynamics, growth and yield – From measurement to model. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-540-88307-4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4)



- Pretzsch H., Schütze G. & Uhl E. 2012: Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* 15(3): 483–495. DOI: [10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x](https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x)
- Rehfuess K.E. & Bosch C. 1986: Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) auf saueren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 105(1): 201–206. DOI: [10.1007/bf02741714](https://doi.org/10.1007/bf02741714)
- Somogyi Z. 2007: A klíma, a klímaváltozás és a fanövedék néhány összefüggéséről. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): *Erdő és klíma V.*, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 281–294.
- Somogyi Z. 2008: Recent trend of tree growth in relation to climate change in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 4: 17–27.
- Spiecker H., Mielikeinen K., Köhl M. & Skovsgaard J.P. (eds) 1996: *Growth trends of European forests*. European Forest Institute, Research report 5, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Szabados I. 2007: Időjárás fluktuáció hatása a produkcióra dendrokronológiai kutatások alapján. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): *Erdő és klíma V.*, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 295–306.
- Ulrich B. 1989: Effect of acidic Precipitation on Forest Ecosystem in Europe. In: Adriano D.C. & Johnson A. H. (eds): *Acidic Precipitation Vol. 2.*, Springer-Verlag New York, 189–272.

*Érkezett: 2018. május 2.
Közlésre elfogadva: 2018. május 30.*

KOCSÁNYTALAN TÖLGYPOPULÁCIÓK FIATALKORI MAGASSÁGI NÖVEKEDÉSE SZIMULÁLT KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁRA, EGY SZÁRMAZÁSI KÍSÉRLETSOROZATBAN

Mátyás Csaba¹, Kóczán-Horváth Anikó¹, Antoine Kremer²,
és Cuauhtémoc Saenz-Romero³

¹Soproni Egyetem, Környezet- és Földtudományi Intézet

²Unité Mixte de Recherche Biodiversité Gènes & Communautés (UMR 1202 BIOGECO), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) – Université de Bordeaux, 69 route d'Arcachon, F-33610 Cestas, France

³Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Morelia, México

Kivonat

A tanulmány kiválasztott kocsánytalan tölgy populációk szimulált klímaváltozásra adott fenotípusos válaszreakcióját (reakciónormáját) mutatja be egy, a francia INRA által kezdeményezett nemzetközi származási kísérlet 10 éves magassági adatai alapján. A reakciónormákat a klímaterancia becslésére alkalmaztuk, az eredeti termőhelynél melegebb és szárazabb helyszíneken. Az egy irányban változó klímaviszonyokra adott válasz-regressziókat lineárisnak találtuk. A maximális növekedési potenciált a populációk alkalmazkodott termőhelyüknél kedvezőbb feltételek mellett mutatták. A különböző klímákhoz adaptált populációk fenotípusos plaszticitása, vagyis klíma-érzékenysége szignifikánsan eltérő mértékűnek bizonyult. A Kárpát-medencei származások a többi európai populációhoz képest átlagos teljesítményt mutattak. A szárazsági határhoz közelebbi populációk jobb klíma-toleranciája a szaporítóanyag felhasználás szempontjából a kísérlet legfontosabb eredménye. Az eredmények a „támogatott áttelepítés/vándorlás” koncepcióját a kocsánytalan tölgy esetében megerősítik, és az alkalmazkodó erdőművelés országos stratégiája fejlesztéséhez felhasználhatók.

Kulcsszavak: alkalmazkodóképesség, kocsánytalan tölgy, klímaterancia, származási kísérlet, reakciónorma.

JUVENILE HEIGHT GROWTH RESPONSE OF SESSILE OAK POPULATIONS TO SIMULATED CLIMATIC CHANGE BASED ON PROVENANCE TEST DATA

Abstract

The report presents the analysis of phenotypic response (reaction norm) of selected sessile oak populations to simulated climate change, based on 10-year height data from an international provenance experiment network initiated by INRA (France). Reaction norms were calculated for assessing tolerance of populations to (simulated) warmer and drier conditions than at origin. The unilateral responses to warming and drying climatic conditions have been linear. The maximum growth potential of populations was shifted toward more favorable conditions than the original ones. Phenotypic plasticity of populations of various provenance, interpreted as an indicator of climate sensitivity, was found significantly different. The provenances from the Carpathian Basin have shown average performance compared to other European populations. The better phenotypic plasticity of populations originating closer to the xeric (trailing, lower) limit is the most important result of the analysis, in terms of reproductive material use. The results corroborate the concept of "assisted migration" for sessile oak and may support the development of a strategy for adaptive forest management.

Keywords: adaptability, phenotypic plasticity, climate tolerance, provenance test, assisted migration.

BEVEZETÉS

A fajok alkalmazkodó képességének határa a melegedő és szárazodó nyári klímához (Gálos et al. 2009) nem ismert, jövőbeni vitalitásukat és termelésüket bizonytalanság övezi. Számos kutatásban előrejelítették már a vitalitás csökkenését, az elterjedési terület eltolódását, a különböző kártevők elszaporodását. Ezek a jelenségek különösen a fajok alsó, szárazsági határán („xeric limit”) válnak komoly kihívássá az erdőgazdálkodás számára (Mátyás et al. 2010, Hlásny et al. 2014, Mátyás & Sun 2014). Különösen fontos lenne a domináns, klímazonális, erdőtürelmüket meghatározó fő fajok várható viselkedésének megbízható, kvantitatív előrebecslése, mint amilyen a kocsánytalan tölgy is. Széles termőhelytűrése (Sáenz-Romero et al. 2018) a klímaváltozásra felkészülés egyik fontos fájává emeli (Czúcz et al. 2011, Borovics & Mátyás 2013, Cseke et al. 2014).

Az erdészeti fajokkal létesített származási kísérletek feltárták a genetikai változatosság jelentős mértéke mellett azt is, hogy az adataik a klímaváltozás által kiváltott válaszreakciók előrejelítésére is felhasználhatók. A megváltozott klímát eltérő klimatikus környezetbe telepítéssel szimulálhatjuk a származási kísérletekben (Mátyás & Yeatman 1987, Mátyás 1994). A módszert azóta széles körben alkalmazzák, és tovább fejlesztették (Leites et al. 2012, Sáenz-Romero et al. 2016a, Rehfeldt et al. 2017), elsősorban az északi félgömb fenyő fajaira. Kísérleteink során erdeifenyő (Mátyás et al. 2007), lucfenyő (Ujvári-Jármay et al. 2016) és bükk (Horváth & Mátyás 2016) fajokra bemutattuk az előrebecslés lehetőségeit, kocsánytalan tölgyből azonban nem rendelkezünk megfelelő hazai kísérlettel. Egy EU-s projekt (FORGER) keretében lehetőség nyílt a francia INRA (A. Kremer) által kezdeményezett nemzetközi kocsánytalan tölgy származási kísérlet adatai elemzésére, amely azonban, elsősorban az adaptált módszer miatt nem szolgáltatott egyértelmű eredményt (Sáenz-Romero et al. 2016a), emiatt indokoltnak ítéltük a kísérleti adatok újraértékelését.

A tanulmányban bemutatjuk az új koncepció alapján végzett elemzést, amelynek célja *adatgyűjtés a kocsánytalan tölgy klímaváltozás során várható viselkedéséről*. Ennek keretében vizsgáljuk a nyári szárazsághoz való alkalmazkodást, és a stresszválaszt jellemezzük a származási és kísérleti helyszínek nyári aszályvalószínűsége alapján. Az eredmények hozzájárulhatnak a klímaváltozásra felkészülés során a szaporítóanyag gazdálkodás stratégiájának továbbfejlesztéséhez (Mátyás 2016, Mátyás & Kramer 2016, Sáenz-Romero et al. 2016b).

ANYAG ÉS MÓDSZER

A kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) 116 európai ill. kisázsiai, őshonos állományából gyűjtött szaporítóanyaggal a francia INRA intézet, A. Kremer koordinálása mellett, nemzetközi együttműködésben, négy év leforgása alatt (1990-1993, 1996) 23 helyszínen létesített származási kísérletet. A magassági felvételezések a különböző helyszíneken nem azonos időpontokban történtek, így a 2, 5, 7, 8, 11, 15 és 20 éves adatokból az adatsorokból származó növekedésmenet alapján, a 10 éves korra standardizált magasságot határozták meg.

A kísérlet problémája, a származások kiegyenlített képviselő mellett, az a körülmény, hogy érthető okokból a mintavételezett állományok, és a létrehozott kísérletek döntő része a fajok atlanti, északnyugati előfordulási területére koncentrálódik.

Mindamellet a kísérleti hálózat a faj legnagyobb reprezentatív keresztmetszetét képviseli, és nem valószínű, hogy a közeljövőben hasonló kezdeményezésre sor kerülhet. A kocsánytalan tölgy jelenlegi és a változó klímában betöltendő szerepe miatt az adatok kiértékeléséhez komoly érdek fűződik, különösen Magyarország részéről, amely a kísérlethez anyagot szolgáltatott, de a létesítésben nem vett részt.

Az összegyűjtött adatbázis anyagából eddig az u.n. „Madsen¹ gyűjtés” 14 populációját felhasználva, készült egy átfogó elemzés, ugyanis csak ezek a populációk szerepelnek megfelelő számú helyszínen (Sáenz-Romero et al. 2016a). Tanulmányunkban ugyanezen 14 db európai-kisázsiai származás, valamint a Kárpát-medencét képviselő populációk (1. táblázat) fiatalkori (10 éves) adatait az előbbi elemzéstől eltérő statisztikai módszerekkel értékeltük. Az elemzés során a szimulált klímaváltozásra adott fenotípusos válaszreakciókat (reakciónormákat) hasonlítottuk össze.

A szárazsági határ mentén a klímaérzékenység megállapítása elsődlegesen fontos kérdés Magyarországon. Ebben a tekintetben előnyösnek bizonyult, hogy a kísérleti hálózatban nagyobb számban vannak jelen populációk és kísérleti helyszínek a faj areájának északnyugati részéről, ami lehetővé tette az áttelepítés hatásának elemzését, elsődlegesen, sőt majdnem kizárólagosan, a melegebb és szárazabb termőhelyi feltételek irányában. A magassági adatok kiértékeléséhez a kelet-középeurópai, kontinentális klímát aszályveszély szempontjából jellemző, ökofiziológiai alapon meghatározott indexet vettünk figyelembe (FAI, Führer et al. 2011, Führer 2017).

A teszthelyszínekre és a származásokra vonatkozó klímaadatok a ClimateEU (<http://tinyurl.com/ClimateEU>) adatbázisból származnak. Az ökológiai zóna besorolás az European Environmental Stratification térképe alapján történt (2. táblázat, Metzger et al. 2005). A reakciónormák értékeléséhez, az ökocsoportok helyett, a jobban jellemző FAI alapú csoportosítást alkalmaztuk (1. később, 3. táblázat).

A magassággal és a megmaradással legszorosabb összefüggést mutató klímaparamétereket Sáenz-Romero és munkatársai (2016a) a teljes kísérletre vonatkozóan meghatározták, ezek az éves és a vegetációs időre vonatkozó aszályindexek voltak (ADI és GSDI). Saját elemzésünkben változóként – fentebb említett okok miatt – a hazai környezetben bevezetett FAI indexet alkalmaztuk (Führer et al. 2011). Hasonlóan más indexekhez, a FAI más klimatikus feltételek mellett, pl. Északkelet-Európában, a klíma jellemzésére kevésbé alkalmas. Alkalmazásának indoka a nagyon eltérő származások esetében is az, hogy a tanulmányban a nyári szárazságra adott stresszválaszt jellemezzük a származási és kísérleti helyszínek nyári klímája alapján, a FAI ugyanis ennek érzékelésére alkalmas.

A kísérleti helyszínenként meghatározott ökológiai (klimatikus) távolságot (Mátyás & Yeatman 1987, 1992) használtuk fel a populációk reakciónormái független változójaként. Az

¹ Dán kutató, a kísérletsorozat kezdeményezője

ökológiai távolság a kiválasztott klímparaméterre vonatkozó különbség, amelyet a kísérleti helyszín és az eredeti származási helyszín adatából képezünk. Pozitív értéke a (szimulált) melegedést-szárazodást, a negatív a lehűlést és csapadéknövekedést indikálja.

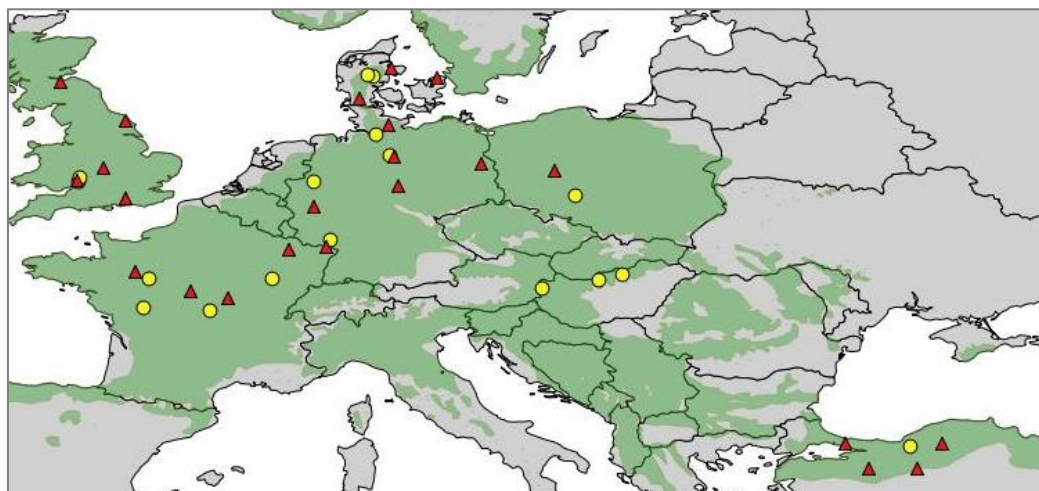
1. táblázat: A kiválasztott 14 európai kocsánytalan tölgy populáció és a három „pannon” származás alapadatai.

Table 1: Data of 14 selected European and 3 "Pannonian" sessile oak populations.

Származási hely	Ország	Földrajzi szélesség	Földrajzi hosszúság	Tszfm. (m)	Éves közép-hőmérséklet (°C)	Éves csapadék (mm)	FAI
Syców	POL	51,18	17,93	210	8,0	577	4,7
Bercé	FRA	47,81	0,39	157	10,5	712	6,8
Vouillé	FRA	46,60	0,18	130	11,2	745	7,0
Luss	DEU	52,83	10,32	110	8,2	692	4,8
Dreuilles	FRA	46,46	2,89	270	10,5	778	5,2
Bolu	TUR	40,92	31,67	1200	8,6	721	7,5
Dymock	GBR	51,95	-2,45	70	9,6	717	5,7
Rantzau	DEU	53,71	9,76	10	8,3	767	4,5
Londal	DNK	56,07	9,6	25	7,5	736	5,0
Elmstein	DEU	49,36	7,87	470	7,7	755	4,4
Recklinghausen	DEU	51,77	7,17	75	9,4	818	4,4
Blakeney	GBR	51,79	-2,49	91	9,5	804	5,3
Bussièrès	FRA	47,76	5,49	330	9,6	890	5,1
Hald Ege	DNK	56,13	9,40	250	6,2	770	4,3
Pilis	HUN	47,72	18,87	500	8,6	665	5,1
Nagybátony	HUN	47,94	19,85	400	8,7	605	5,2
Klostermarienberg	AUT	47,41	16,55	310	8,8	669	4,6

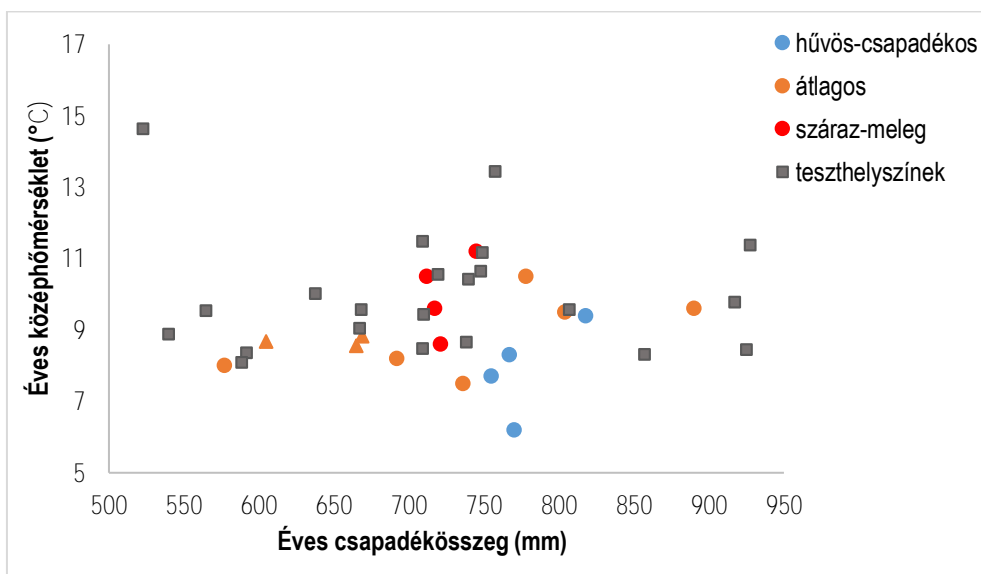
Bár a kísérletsorozat indításakor nem volt lehetőség hazai kísérlettel csatlakoznunk, Kárpát-medencei (pannon) származások is kerültek az európai hálózat egyes helyszíneire. Ebből kettő a vezető szerző közreműködésével került be, a magyarországi Nagybátony és Pilis, egy pedig az országhatár közeléből, a burgenlandi Borsmonostorból származik (Klostermarienberg). Mivel azonban ezek a populációk csak kevés kísérletben szerepelnek (Pilis 2, Nagybátony 3 helyen), ezért „pannon csoportként” összevonva, a két magyar származást és - azonos ökológiai besorolása alapján - az ausztriai-burgenlandi származást, Borsmonostort együtt értékeltük (utóbbi 8 helyen van képviselve). Ezen populációk szerepeltetését az indokolja, hogy a szárazsági határ közelében várható növekedési és esetleges mortalitási

reakciók ökológiai és gazdasági jelentősége különösen nagy, de pontosan ezek a helyszínek vannak hiányosan képviselve a kísérletben (1. ábra).



1. ábra: A kiválasztott kocsánytalan tölgy populációk (●) és teszthelyszínek (▲) földrajzi elhelyezkedése a faj elterjedési területére vetítve (térkép: EUFORGEN).

Figure 1: Geographic location of the selected sessile oak populations (●) and test sites (▲) projected on the distribution map of the species (source: EUFORGEN).



2. ábra: Az elemzésben szereplő származások és teszthelyszínek elhelyezkedése a klímaterben. Az ábrán külön jelöltük a három FAI-csoportot ill. a „pannon” származásokat (▲).

Figure 2: Location of populations and test sites in the climatic niche of annual precipitation (x axis) and mean annual temperature (y axis) divided into three climate groups classified by the FAI index. Pannonian populations are marked by triangles.



A 23 kísérleti helyszín többsége, a német, dán és angol kísérletek az 50. szélességtől északabbra, atlanti klímában helyezkedik el. A kontinentális klímát egyedül a lengyel Kórnik képviseli. A legnagyobb és legjobban kezelt négy francia kísérlet a mérsékelt atlanti és nyugat-mediterrán, a török kísérletek pedig a kelet-mediterrán klímában helyezkednek el (2. ábra). A kísérleti helyszínek részletesebb adatai Sáenz-Romero et al. (2018) cikke mellékletében található.

EREDMÉNYEK, MEGVITATÁS

Klíma-stressz és a származások reakciónormája

A reakciónorma alatt az ökológia egy adott faj, populáció vagy egyed (klón), változó környezeti feltételek mellett mért fenotípusos válaszát érti. Pontosabban, a reakciónorma a változó környezet és a genetikai adottság kölcsönhatását fejezi ki a fenotípusos tulajdonságban (pl. magasság, vagy fenológia), ezzel az alkalmazkodóképesség fontos jellemzője. A reakciónorma elméleti koncepciója és gyakorlati megjelenése között jelentős eltérés áll fenn. Általánosságban az eredeti (származási) termőhelyen intuitíve maximális reakciót várunk, és a reakciónorma függvény lefutását elméletileg a maximumtól mindkét irányban szimmetrikusan csökkenő, harang alakúnak tételezik fel (Rehfeldt et al. 2017). A gyakorlatban a függvény, az eddig vizsgált fajok esetében, erősen asszimmetrikusnak mutatkozik, a szárazodás-melegedés irányában exponenciálisan csökkenő, a hűvösebb-csapadékosabb irányban lassulva, de tovább javuló, majd hirtelen lecsökkenő trendet tételezhetünk fel (Czimer 2017).

A reakciónormák az eddigiekben elsősorban a nemesítésben kerültek alkalmazásra, pl. a szelektált klónok termőhelyállóságának, termőhelyi igényeinek megállapításához (Bach 1998). A klímaváltozással az eddig változatlanak vélt legfontosabb termőhelyi tényező, az éghajlat *indult változásnak*: ezzel a reakciónorma egyfajta elméleti jellemzőből hirtelen mindennapi gyakorlati tényezővé lépett elő, mert választ adhat arra a kérdésre, hogyan változik a faállomány vitalitása (növekedése, egészségi állapota, esetleg mortalitása) a termőhelyi feltételek változásával.

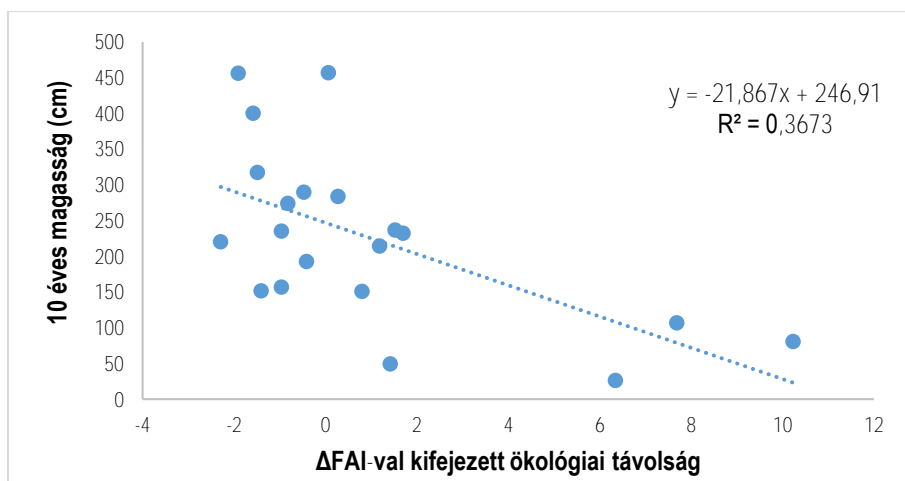
A reakciónorma egyenletek vizsgálata

A származások egyes kísérleti helyszíneken mért, 10 éves kori átlagos magassági adataival egyenként regressziót számoltunk, ahol a független változó a mindenkori helyszínrre számított, FAI-val kifejezett, ökológiai távolság (ΔFAI érték) volt, vagyis a populáció eredeti klimatikus feltételeitől való eltérés. A regresszió az ökológiai távolsággal, azaz a klíma-stressz növekedésével fellépő válaszreakciót a magassági növekedés (a függő változó) változásában adja meg. Az esetek döntő többségében az áttelepítéssel előidézett (szimulált) klímaváltozás iránya a szárazodás/melegedés felé mutat, vagyis a kapott ökológiai távolsá-

gok nagyrészt pozitívak. Elméletileg, egyirányú klimatikus változás mellett is a reakciónormát másodfokú egyenlet kellene hogy leírja (Mátyás et al. 2010), ehhez azonban, elsősorban a szárazsági határ közelében, nincs elegendő kísérleti helyszín és adat, ezért minden esetben lineáris egyenletet alkalmaztunk.

A populációk átlagadatai erősen szórnak, a kísérletek nagyon eltérő termőhelyi potenciálja (azaz termőhelyi/fatermesi osztálya) miatt (3. ábra). Ennek csak egyik oka az eltérő klíma: a talaj- és hidrológiai viszonyok adatai – mint általában nemzetközi kísérletek esetében – itt is hiányoznak. Feltehetően hozzájárult a szóráshoz a magasság egységes 10 éves korra való vetítése is.

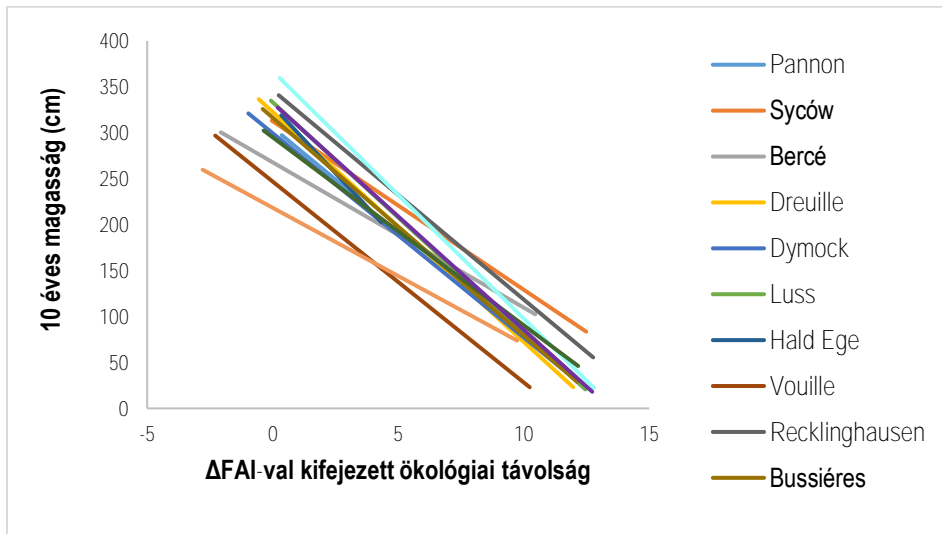
A regressziók a magassági variancia 10-40%-át határozták meg (2. táblázat). Mivel a származások klímaérzékenységét a *regresszió meredeksége* jellemzi (4. ábra), valószínű ez a legérdekesebb jellemzője az egyenleteknek. A meredekség-elemzéshez a származásokat három csoportba soroltuk a *FAI* értékek alapján: hűvös-csapadékos ($FAI < 4,5$), átlagos ($FAI 4,5-5,5$) és száraz-meleg ($FAI > 5,5$) termőhelyi csoportokba. (Az ökológiai besorolás kevésbé veszi figyelembe a klíma szárazodását, ezért a *FAI* értékek nem hozhatók fedésbe az ökológiai csoportokkal; így pl. a közép-atlanti (atc) zónába eső pontok eltérő *FAI* csoportokba kerültek (2. táblázat).



3. ábra: Egy atlanti-mediterrán (lusitán) származás (Vouillé, Franciaország; $FAI: 6,98^2$) 20 teszt helyszínén mért átlagmagassága az áttelepítés ökológiai távolsága függvényében. Ez a származás az eredetnél hűvösebb/csapadékosabb helyszínekre is került (negatív ΔFAI értékek). Adatai az átlagosnál gyengébb szórást mutatnak, a regresszió a variancia 37%-át magyarázza. A függvény meredeksége erős, vagyis a származás klímaérzékenysége magas (l. 3. táblázatot).

Figure 3: Mean height of an Atlantic-Mediterranean population (Vouillé, France; $FAI: 6.98$), in function of the ecological distance of transfer, expressed with the *FAI* index (ΔFAI), measured at 20 test sites. Colder and more humid test sites than the original site have negative ΔFAI values. The regression explains 37% of the variation. The steep slope of the function indicates the high climate sensitivity of this provenance (see Table 3).

² ez a *FAI* érték Führer E. besorolása szerint tulajdonképpen már az erdőssztyep alsó peremére esik; a sztyep határ 7,25-nél van!



4. ábra: A vizsgált európai származások 10 éves kori magassága regressziója az áttelepítés ökológiai távolságával (Δ FAI).

Figure 4: Regression of 10-year height on ecodistance of transfer, expressed in Forestry Aridity Index change (Δ FAI).

A meredekség és a FAI összefüggését ábrázolva, a brit Blakeney adatai, ismeretlen okból, kiugró szélső értékűnek bizonyultak. A származás kizárásával, a három FAI csoport között számított egyirányú varianciaanalízis az alacsony és magas FAI csoport között szignifikáns eltérést mutat (3. táblázat). Vagyis, a hűvösebb-nedvesebb helyszínek származásai (4,5 FAI alatt) nagyobb meredekséget mutatnak, a változásokra erősebben reagálnak, következésképp *klímaérzékenyebbek*. A szárazabb-melegebb termőhelyek populációi (5,5 FAI felett) plasztikusabbak, meredekségük szignifikánsan kisebb. A különbség a szárazsági határhoz közelebbi populációk jobb toleranciájára utal – ez a szaporítóanyag felhasználás szempontjából fontos jellemző (3. táblázat).

2. táblázat: A vizsgált származások ökológiai jellemzői, magassága és reakciónorma paraméterei a származási hely klimatikus státusa szerint (a kísérletekben mért Δ FAI értékek és magasságok lineáris regressziójából számítva).

Table 2: Ecological characterisation and parameters of reaction norms of absolute and relative height vs ecological distance (expressed in Δ FAI values), listed according to the aridity index (FAI) at provenance.

származás	ökológiai csoport	FAI	FAI csop. besorolás	magasság ^a (cm)	meredekség	R ² szignif.	relatív magasság (%)	meredekség	R ² szignif.
Hald Ege	atn	4,347	hűvös	329,0	-29,17	0,105	101,7	-3,66	0,130
Elmstein	atc	4,412	hűvös	367,1	-26,94	0,417**	120,5	-3,47	0,308*
Recklinghausen	atc	4,449	hűvös	346,4	-22,78	0,367**	107,7	-0,79	0,026
Rantzau	atn	4,485	hűvös	332,5	-24,70	0,393**	109,7	-4,06	0,333*
Syców	con	4,727	átlagos	312,6	-18,34	0,255*	102,8	0,19	0,003
Luss	atn	4,759	átlagos	333,3	-25,10	0,348**	107,3	-3,48	0,424**
Pannon csop. ^b	pan	4,979	átlagos	305,6	-22,56	0,091	98,8	-2,06	0,039
Londal	atn	5,048	átlagos	295,1	-20,46	0,290*	95,1	-0,93	0,064
Bussiéres	atc	5,085	átlagos	316,5	-23,71	0,428**	110,9	-4,19	0,458**
Dreuille	atc	5,244	átlagos	322,7	-25,03	0,417**	107,8	-2,64	0,276*
Blakeney	atc	5,318	átlagos	375,3	-37,98	0,179	119,4	-5,38	0,216
Dymock	atc	5,658	száraz	300,0	-22,24	0,324**	108,1	-2,71	0,364**
Bercé	atc	6,754	száraz	267,9	-15,82	0,190	103,2	-2,49	0,181
Vouille	lus	6,978	száraz	246,9	-21,87	0,367**	92,9	-3,79	0,534**
Bolu	mdm	7,478	száraz	218,4	-14,85	0,222	84,6	0,08	0,000

^a a tengelymetszet értéke (intercept)

^b három származásból átlagolt értékek

* $p < 0,05$

** $p < 0,01$

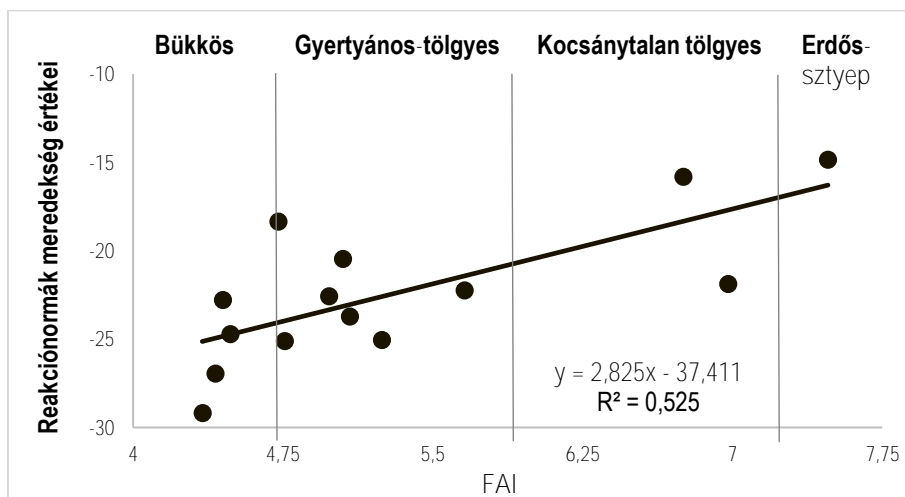
3. táblázat: A származás szerinti FAI-csoportok meredeksége és tengelymetszete közötti különbségek szignifikancia-mátrixa (P értékek). A szignifikáns különbségeket vastagított számokkal jeleztük.

Table 3: Significance (P) matrix of slope and intercept parameters of the different FAI groups. Bold numbers indicate significant differences between groups of provenance.

csoport	FAI	átlagos meredekség	1	2	3
1	>5,5	-18,69		0,240	0,021
2	4,5 – 5,5	-22,53			0,358
3	<4,5	-25,90			

csoport	FAI	tengelymetszet	1	2	3
1	>5,5	258,3		0,007	0,000
2	4,5 – 5,5	323,0			0,187
3	<4,5	343,7			

A 14 populáció származási helyszínére megállapított FAI érték is jól korrelál a meredekséggel (5. ábra). A hűvös-üde termőhelyű csoportba sorolt négy populáció meredeksége -24,70 és -29,17 közé esik, míg a legmagasabb FAI értékkel rendelkező Bolu (TR) meredeksége mindössze -14,85 (2. táblázat – nem minden regresszió bizonyult szignifikánsnak). Tehát a nagyon széles klimatikus amplitúdójú kísérleti helyszínek adatai alapján számított regressziók eltérései megerősítik a FAI csoportok között talált szignifikáns különbségeket (3. táblázat).



5. ábra: A származások reakciónormái meredekségének regressziója a származások eredeti FAI értékével, Blakeney származás nélkül. Feltüntettük a klímaosztályok FAI határait a klimatikus skála mentén.

Figure 5: Regression of slope values of reaction norms of populations (y axis) vs FAI values of original provenance (without Blakeney). The climatic scale is divided into forest climate classes of Hungary.

A populációk fenotípusos plaszticitása mellett nem közömbös a tulajdonság kapcsolata a (juvenilis) növekedéssel. Ehhez a 10 éves magassági növekedést a származások klimatikusan meghatározott, „eredeti” klímájára standardizáltuk. Mivel a populációk eredeti származási helyén nem történhetett mérés, a regressziós egyenletek tengelymetszetét használtuk fel a „virtuális eredeti magasság” jellemzésére. Az egyenletek tengelymetszete (intercept) ugyanis a származási klímával azonos értékre, vagyis 0 ΔFAI értékre megadja a származás virtuális „eredeti” magasságát, amelyet a származási helyével azonos klímában érne el, a teszhelyszínek termőhelyi potenciálja figyelembevételével. Feltűnő, hogy a száraz-meleghelyszínek populációi „eredeti” magassága rendre jelentősen elmarad a hűvös-csapadékos termőhelyekről származóktól (6. ábra).

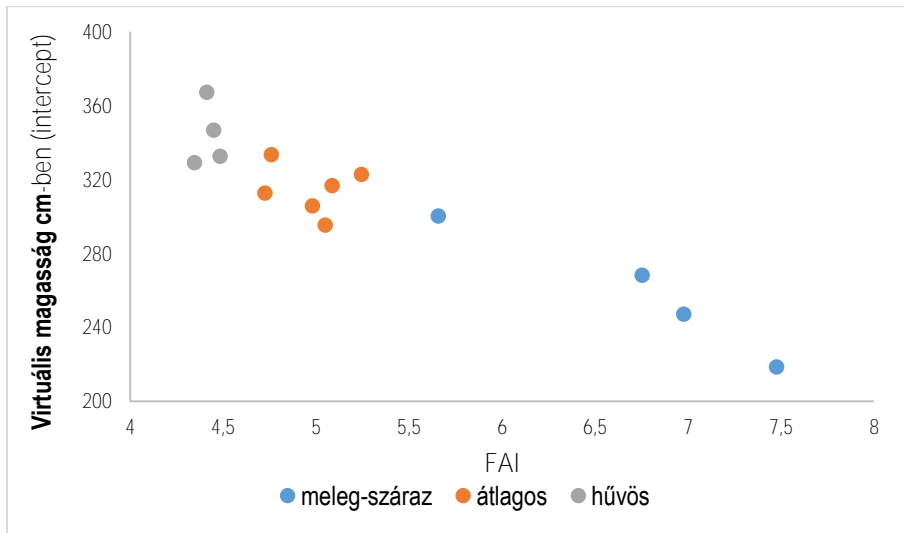
A FAI-csoportokkal végzett egyirányú varianciaanalízis szerint (3. táblázat), a szárazabb-melegebb származások tengelymetszet alapján becsült magassága szignifikánsan elmarad az átlagos és hűvösebb-csapadékosabb termőhelyet jelző, alacsonyabb FAI értékű származások becsült magasságától. Az átlagos FAI értékű populációk viszont nem térnek el szignifikánsan a hűvösebb-csapadékosabb csoporttól. A szárazabb-melegebb helyről származó populációk növekedési potenciálja viszont rendre elmarad a kedvezőbb klímáról érkező származásokétól.

A populációk eredeti klímájával (FAI) számolva, az 6. ábrán instruktív módon látható, hogy a tengelymetszettel jellemzett virtuális magasság a hűvösebb-csapadékosabb klímájú csoportban éri el legmagasabb értékeit, ugyanakkor a török Bolu a leggyengébb növekedést produkálja. Figyelembe kell természetesen venni, hogy a különbségek nem azonos termőhelyre vonatkoznak, de a kirajzolódó trend a származási csoportok jellemző klímájával összefügg. Mindenesetre a „virtuális magasság” egyúttal a származási helyszín spontán adaptáció ill. klímaszелеkció révén előállt genetikai potenciálját képviseli.

A magyar olvasó számára kiemelten fontos lenne a pannon csoport fenotípusos plaszticitásának meghatározása. Sajnálatos módon, a kevés teszhelyszín miatt a számított regresszió eredmények nem megbízhatók. Annyi mindenesetre megállapítható, hogy a három populáció átlagos teljesítményt nyújt, mind virtuális magassága, mind a reakciónorma melegeksége szerint.

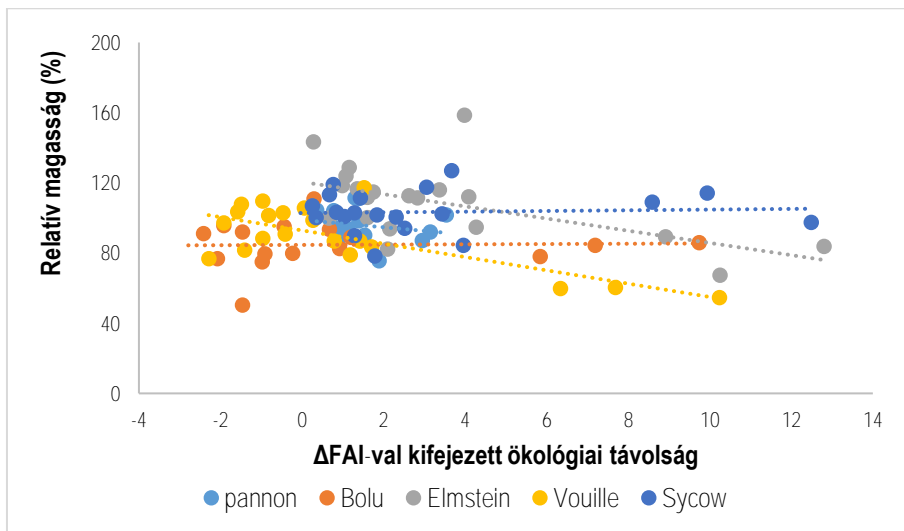
Reakciónormák számítása relatív magassággal

Relatív magasság alatt egy adott kísérletben mért teljesítménynek a kísérlet átlaga százalékában kifejezett értékét értjük. Előnye, hogy ezzel a lépéssel a helyszínek termőhelyi potenciál különbségéből adódó szórását kiküszöböljük. A relatív magasság szemléletesen mutatja a termőhelyi-klimatikus spektrum mentén a plaszticitás különbségeit a származások között. A normalizálás annyiból nem pontos, hogy a származások összetétele nem minden kísérletben azonos, ennek ellenére tájékoztatást nyújt a populáció viselkedésére, változó klimatikus feltételek között.



6. ábra: A vizsgált származások eredeti termőhelyére becsült, „virtuális magasságának” összefüggése a származási hely FAI értékével. A FAI csoportokat eltérő színek jelzik.

Figure 6: Estimated “virtual original height” (regression intercept, y axis) of populations vs FAI values of provenance. FAI groups are shown by colors.



7. ábra: Néhány kiválasztott származás relatív magasságának regressziója az áttelepítés ökológiai távolságával (Δ FAI).

Figure 7: Regression of relative height vs ecodistance of transfer (Δ FAI) of selected provenances.

A 7. ábrán néhány, jellegzetes klímából származó tölgy populáció relatív magassága regresszióját mutatjuk be, ezek különbségei nem túl meggyőzőek, értelmezésük csak korlátokkal fogadható el. A kontinentális Syców (PL) mutat kiegyenlítettebb, stabil teljesítményt.

A hozzá hasonlóan stabil Bolu (TR) ugyanezt gyengébb növekedés mellett produkálja. A klimatikus feltételek változására érzékenyen reagáló atlanti Elmstein (DE) és az atlanti-mediterrán Vouillé (FR) is erőteljesebb növekedés-visszaesést mutat a szárazabb termőhelyeken a kísérleti helyszíneken képviselt többi származáshoz képest.

Az eredmények jelentősége az alkalmazkodó erdőművelés stratégiája szempontjából

Annak ellenére, hogy az európai (INRA) kocsánytalan tölgy származási kísérlet több mint húsz éves múltra tekinthet vissza, eddig csak egyetlen nemzetközi publikáció ismertette az eddig elért eredményeket (Sáenz Romero et al. 2016a), gyakorlati alkalmazási lehetőségek részletezése nélkül. Az értékelések elmaradásának számos oka van, az egyik az ilyen típusú kísérletek nemzetközi karakteréből adódó koordinációs nehézség: az adatgyűjtés összehangolása meghaladta a lehetőségeket. A könnyebben végrehajtható, és gyorsabban eredményeket produkáló fenyő kísérlethálózatokhoz képest a lombos fafajok több nehézséget támasztanak, ami feltehetőleg gyengítette az együttműködésben való részvételt. A terepi adatfelvételekre támaszkodó kísérletezésnek nem tett jót az utóbbi évtizedek kutatási hangsúly eltolódása az intenzív, labor eredményekre építő, rövid lejáratú projektekből finanszírozott munkák irányába. Egy, lombos és fenyő tesztfajokkal végzett elemzésünk (Sáenz-Romero et al. 2018) egyértelműen igazolta, hogy a bükk és a kocsánytalan tölgy is szélesebb plaszticitással rendelkezik, mint a számos kísérletben elemzett luc- és erdeifenyő, ezért juvenilis eredményeik kevésbé látványosak. Viszont éppen a szélesebb fenotípusos plaszticitás miatt a kocsánytalan tölgy fontossága a klímaváltozásra készülés szempontjából kiemelkedő.

Az eddig csak genetikai oldalról elemzett közös tenyészkertek egyidejűleg egyfajta „fatermési kísérleti sornak” is felfoghatók, ahol genetikailag azonos összetételű és azonos korú faállományok növekedése és fatermése eltérő klimatikus/termőhelyi feltételek mellett vizsgálható. Több jel utal arra, hogy a származási kísérletek új értelmezése feltehetően felülírhatja a faj faj földrajzi elterjedése és termőhelyi-fatermési értékelése alapján feltételezett klímatoleranciáját (Czúcz et al. 2011, Berki et al. 2018, Illés 2018, Mátyás et al. 2018). E tekintetben a fentiekben számított reakciónormák a genetikai különbségek kimutatása mellett a termőhelyállóságra (reszilienciára), klímatoleranciára vonatkozó információkat is szolgáltatnak. Ez különösen fontos adat a jelentős többletköltséget és termesztési kockázatot jelentő „támogatott áttelepítés ill. vándorlás” megvalósíthatósága szempontjából. A szerzett tapasztalatok az alkalmazkodó erdőművelés országos stratégiája kialakítására, illetve a klímaváltozás döntéstámogató rendszere fejlesztésére használhatók fel (Bidló et al. 2014, Mátyás 2015, 2017, Mátyás & Kramer 2016). Az alábbiakban összefoglalt eredmények alátámasztják a támogatott áttelepítés ill. vándorlás (assisted migration) koncepciójának indokoltságát.

ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgált származási kísérlet hálózat eredményei nem véglegesek, de a 10 éves kori adatok már alkalmasak óvatos előrebecslésre (Lambeth 1980). A kísérleti hálózat adataiból elsősorban a faj általános toleranciájára, plaszticitására következtethetünk. Az egyes származások (populációk) magassági adataiból reakciónormákat számítottunk, ahol a független változó a FAI különbséggel kifejezett ökológiai távolság (ΔFAI) volt. Az áttelepítéssel szimulált klímaváltozás hatása – populációktól függően – a teljes magassági variancia 10-40%-át határozta meg.

A számított válaszregressziókból levonható általános, evolúciós-ökológiai következtetések

A kapott regressziós egyenletek lineárisak, a fenotípusos válasz feltételezett exponenciális alakja nem volt kimutatható. Bár ezt az adatok jelentős szórása is előidézte, általánosságban bizonyosra vehető, hogy a változó klíma-tényezőre adott fenotípusos válasz nem szimmetrikus, jelentős szakasza lineáris, ezt a célállomány-tábla adatainak modellezése is megerősíti (Czímber 2017). A növekedés (produkció) optimuma nem az eredeti termőhelynek megfelelő klíma mellett, hanem annál üdőbb, hűvösebb feltételek között várható, ezt fenyőkre vonatkozó, korábbi megfigyelések már jelezték (Namkoong 1969, Mátyás 1990).

A melegedés-szárazodás klimatikus transzekt mentén a növekedési ráta folyamatos, erőteljes csökkenése észlelhető. A növekedési ráta csökkenése a feltételezett optimumtól az üdőbb-hűvösebb irányba feltételezhetően csak nagyobb ökológiai távolság esetén lép fel, ez a jelenleg elemzett adatbázis alapján nem ellenőrizhető. A válaszregressziók egyértelműen bizonyítják, hogy a különböző származású (adaptáltságú) populációk fenotípusos plaszticitása a klimatikus-termőhelyi transzekt mentén eltérő mértékű. A klímaérzékenység mértékét, a más kísérletekben vizsgált luc- és erdeifenyőhöz képest, a kocsánytalan tölgy esetében kisebbnek találtuk, ezt más módszerrel kapott eredmények is megerősítik (Saenz-Romero et al. (2018).

Gyakorlati következtetések

A vizsgálat legfontosabb eredménye, hogy a hűvösebb-nedvesebb helyszínek származásai nagyobb meredekségű reakciónormát mutattak, azaz a változásokra erősebben reagálnak, következésképpen klímaérzékenyebbek. A szárazsági határhoz közelebbi populációk kisebb érzékenysége, vagyis jobb klíma-toleranciája a szaporítóanyag felhasználás szempontjából fontos információ. Ez a tény megerősíti, hogy a szárazsági határhoz közelebb eső, de nem szélsőségesen degradálódott populációk áttelepítése a klímaturést (reszilienciát)

javíthatja, feltehetőleg a fenotípusos plaszticitást meghatározó géneváltak (allélek) nagyobb gyakorisága miatt. Ennek valószínűségét korábbi vizsgálataink már felvetették (Borovics & Mátyás 2013, Cseke et al. 2014).

A reakciónorma egyenlet az eredeti termőhelyi potenciálhoz alkalmazkodott növekedési ráták standardizált összehasonlítására is lehetőséget ad. A tengelymetszet 0 Δ FAI értékre megadja a származás virtuális, „eredeti” magasságát, az összes vizsgált termőhelyen mért teljesítmény figyelembevételével standardizálva, de természetesen a mindenkori származási hely klímájának megfelelően. Ez a virtuális magasság az egyes származási helyszínek spontán adaptáció, ill. klímaszelekció révén megvalósult potenciálját képviseli. A támogatott áttelepítés során előnyben részesített szárazabb-melegebb termőhelyek populációinak jövőbeli becsült (virtuális) magassági növekedése természetesen el fog maradni a hűvösebb-csapadékosabb termőhelyen tenyésző, alacsonyabb FAI értékű termőhelyek származásai jelenlegi magasságától.

Mivel a Kárpát-medencei populációk telepítési helyszínei aránylag szűk termőhelyi spektrumot fognak át, értékelésük csak a nemzetközi mezőnybe illesztve végezhető. A „pannon csoport” fenotípusos plaszticitását tekintve, az európai populációkhoz képest átlagos teljesítményt nyújt, mind virtuális magassága, mind a reakciónorma meredeksége szerint.

A válaszregressziós egyenletekből levezethető a ökológiában már elfogadott egyensúlytalanság; esetünkben ez azt jelenti, hogy a maximális növekedési potenciált az alkalmazkodott populáció termőhelyénél kedvezőbb feltételek mellett produkálja; azaz a „helyi nem biztos, hogy a legjobb”. Ez természetesen csak a mesterséges felújítással létrehozott állományok esetében igazolható.

Az elemzés általános hiányossága a szárazsági határon fellépő mortalitás előrevetítésének hiánya. Erre vonatkozó, megbízható adat nem áll rendelkezésre. A megmaradás fiatalkori értékei a helyi kezelés, technológiai eltérések és hibák által a legerősebben befolyásolt jellemző és alig hagy lehetőséget a helyi klimatikus hatások elemzésére.

Az analízis hiányosságaival és megbízhatóságával kapcsolatosan még számos további felvetés tehető, pl. a vizsgálati módszerek alkalmassága, a kísérletbe vont populációk és helyszínek összetétele stb. Nem szabad azonban megfeledkezni arról, hogy a vizsgált adatbázis egy olyan kísérlethálózat eredménye, amely, minden korlátja mellett, a fajaj genetikai alkalmazkodóképességének eddig legalaposabb elemzését teszi lehetővé, amelyhez hasonlóan a jövőben a kutatás előrelátható finanszírozási körülményei aligha fognak lehetővé tenni. Ezért tettünk kísérletet az értékelés más szempontú megismétlésére, vállalva a fiatalkori adatok kétségtelenül nagy bizonytalanságát is. Bár a kísérleti anyag a hazai populációk tekintetében kevés közvetlen információt szolgáltat, meggyőződésünk, hogy a levont következtetések a hazai populációkra is érvényesek, és olyan tapasztalatokat kínál a feltételezett klímaváltozással kapcsolatban, amelyet semmilyen más módszerrel nem lehet helyettesíteni. Erdeink jövőjéről sajnos semmi biztosat sem tudhatunk. A klímaváltozásra adott válaszsal kapcsolatos bármilyen, akár nagy bizonytalansággal terhelt adat is több a pusztá vélelmezésnél.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás megvalósítását segítette C. Sáenz-Romero részére az INRA-Bordeaux-i tartozkodást finanszírozó Mexikói Tudomány és Technológiai Tanács (CONACyT, 232838-as projekt) és a Michoacán-i Egyetem támogatása, továbbá a soproni tanulmányúthoz segítséget nyújtó EU-s FORGER projekt. Mátyás Csaba és Kóczán-Horváth Anikó kutatómunkáját a "VKSZ_12-1-2013-0034- Agrárklíma.2" projekt támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bach I. 1998: Tájékoztató eredmények a fajta (genotípus) x termőhely kölcsönhatás vizsgálatáról. in: Tóth B. (ed): A Nemzetközi Nyárfa Bizottság (International Poplar Commission) 20. ülése és tanulmányútja Magyarországon. Az Erdészeti Tudományos Intézet Kiadványai. 9: 112–114.
- Berki I., Mórincz N., Rasztoivits E., Gulyás K., Garamszegi B., Horváth A. et al. 2018: Fapusztulással párhuzamosan tapasztalt gyorsuló növekedés kocsánytalan tölgyeseinkben. Erdészettudományi Közlemények 8(1): 119–130. DOI: [10.17164/EK.2018.008](https://doi.org/10.17164/EK.2018.008)
- Bidló A., Király A. & Mátyás Cs. (eds) 2014: Agrárklíma: Az előrejelített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetőségei. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron.
- Borovics A. & Mátyás Cs. 2013: Decline of genetic diversity of sessile oak at the retracting (xeric) limits. Annals of Forest Science 70(8): 835–844. DOI: [10.1007/s13595-013-0324-6](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0324-6)
- Cseke K., Jobb Sz., Koltay A. & Borovics A. 2014: Tölgypusztulás genetikai szerkezetre gyakorolt hatása. Erdészettudományi Közlemények 4(2): 135–148.
- Czímber K. 2017: Fafaj és fatermőképesség előrebecslése gépi tanulással, a célállománytáblák felhasználásával. Erdészeti Lapok 152(11): 348–349.
- Czúcz B., Gálhidy L. & Mátyás Cs. 2011: Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. Annals of Forest Science 68(1): 99–108. DOI: [10.1007/s13595-011-0011-4](https://doi.org/10.1007/s13595-011-0011-4)
- Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A. & Szabados I. 2011: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. Időjárás 115(3): 205–216.
- Führer E. 2017: Az erdészeti klímaosztályok új lehatárolása öko-fiziológiai alapon. (A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai III.) Erdészeti Lapok 152(6): 173–175.
- Gálos B., Lorenz Ph. & Jacob D. (2009): Klímaváltozás – Szélsőségesebbé válnak-e száraz nyaraink a 21. században? Klíma-21 füzetek 57: 56–63.
- Hlásny T., Mátyás Cs., Seidl R., Kulla L., Merganicová K., Trombik J. et al. 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: what are the options for adaptation? Lesnický Casopis – Forestry Journal 60: 5–18. DOI: [10.2478/forj-2014-0001](https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001)
- Horváth A. & Mátyás Cs. 2016: The decline of vitality caused by increasing drought in a beech provenance trial predicted by juvenile growth. South-east European Forestry 7(1). 21–28. DOI: [10.15177/seefer.16-06](https://doi.org/10.15177/seefer.16-06)
- Illés G. 2018. A klímaváltozás nyomán bekövetkező fatermésváltozás becslése a kocsánytalan tölgy példáján. Erdészettudományi Közlemények 8(1): 105–118. DOI: [10.17164/EK.2018.007](https://doi.org/10.17164/EK.2018.007)

- Lambeth C. 1980: Juvenile-mature correlation in Pinaceae and implications for early selection. *Forest Science* 26(4): 571–580. DOI: [10.1093/forestscience/26.4.571](https://doi.org/10.1093/forestscience/26.4.571)
- Leites L.P., Rehfeldt G.E., Robinson A.P., Crookston N.L. & Jaquish B.C. 2012: Possibilities and limitations of using historic provenance tests to infer forest species growth responses to climate change. *Natural Resources Modeling* 25: 409–433. DOI: [10.1111/j.1939-7445.2012.00129.x](https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2012.00129.x)
- Mátyás Cs. 1990: Adaptation lag: a general feature of natural populations. Invited lecture. Proc., WFGA IUFRO Symp. Olympia, Wash. Paper no. 2.226, 10 p.
- Mátyás Cs. 1994: Modelling climate change effects with provenance test data. *Tree Physiology* 14: 797–804. DOI: [10.1093/treephys/14.7-8-9.797](https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.797)
- Mátyás Cs. 2015: Az alkalmazkodó erdőművelés támogatása. Az Agrárklíma projekt döntéstámogató rendszere. *Erdészeti Lapok* 150(4): 102–104.
- Mátyás Cs. 2016: Guidelines for the choice of forest reproductive material in the face of climate change. FORGER Guidelines, Bioversity International, Rome, 2016. DOI: [10.13140/RG.2.1.1329.3207](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1329.3207)
- Mátyás Cs. (eds) 2017: A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás kihívásai. (Cikksorozat az Erdészeti Lapokban) — I. rész 152(4): 102–106; II. rész 152(5): 134–136; III. rész 152(6): 173–177; IV. rész 152(9): 270–272; V. rész 152(10): 306–310.
- Mátyás Cs. & Yeatman C.W. 1987: A magassági növekedés adaptív változatosságának vizsgálata *P. banksiana* populációkban: Investigation of adaptive height growth variation of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) populations. *Erdészeti és Faipari Egyetem Tudományos Közleményei* 1987(1): 191–197.
- Mátyás Cs. & Yeatman C.W. 1992: Effect of geographical transfer on growth and survival of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) populations. *Silvae Genetica* 41(6): 370–376.
- Mátyás Cs., Nagy L. & Újváriné Jármay É. 2007: Klimatikus stressz és a fafajok genetikai válaszreakciója az elterjedés szárazsági határán: elemzés és előrejelzés. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): *Erdő és klíma V. Nyugat-magyarországi Egyetem*, Sopron, 241–256.
- Mátyás Cs., Nagy L. & Újvári-Jármay É. 2010: Genetically set response of trees to climatic change, with special regard to the xeric (retreating) limits. *Forstarchiv* 81: 130–141.
- Mátyás Cs. & Sun G. 2014: Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters* 9: 085001. DOI: [10.1088/1748-9326/9/8/085001](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/085001)
- Mátyás Cs. & Kramer K. 2016: Az erdei génkészletek szerepe a klímaváltozáshoz alkalmazkodó gazdálkodásban. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 7–16. DOI: [10.17164/EK.2016.001](https://doi.org/10.17164/EK.2016.001)
- Mátyás Cs., Berki I., Bidló A., Csóka Gy., Czimmer K., Führer E. et al. 2018: Sustainability of forest cover under climate change on the temperate-continental xeric limits. *Forests* 9(8): 489. DOI: [10.3390/f9080489](https://doi.org/10.3390/f9080489)
- Metzger M.J., Bunce R.G.H., Jongman R.H.G., Múcher C.A. & Watkins J.W. 2005: A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography* 14: 549–563. DOI: [10.1111/j.1466-822x.2005.00190.x](https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00190.x)
- Namkoong G. 1969: Nonoptimality of local races. *Tree Improvement and Genetics – Southern Forest Tree Improvement Conference*, Houston, 149–153.
- Rehfeldt G.E., Leites L.P., Joyce D.G. & Weiskittel A.R. 2017: Role of population genetics in guiding ecological responses to climate. *Global Change Biology* 24(2): 858–868. DOI: [10.1111/gcb.13883](https://doi.org/10.1111/gcb.13883)
- Sáenz-Romero C., Lamy J.B., Ducouso A., Musch B., Ehrenmann F., Delzon S. et al. 2016a: Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Global Change Biology* 23(7): 2831–2847. DOI: [10.1111/gcb.13576](https://doi.org/10.1111/gcb.13576)
- Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R.A., Joyce D.G., Beaulieu J., St. Clair J.B. & Jaquish B.C. 2016b: Migración asistida de las poblaciones forestales para la adaptación de árboles ante el cambio climático (Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 23(3): 303–323. DOI: [10.5154/r.rchscfa.2014.10.052](https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052)



Sáenz-Romero C., Kóczán-Horváth A., Nagy L., Ujvári-Jármay É., Ducouso A., Kremer A. et al. (): Common garden comparisons confirm inherited sensitivity differences between conifer and broadleaved forest tree species to changing climate. Peer Journal (**benyújtva, lektorálás alatt**).

Ujvári-Jármay É., Nagy L. & Mátyás Cs. 2016: The IUFRO 1964/68 Inventory Provenance Trial of Norway Spruce in Nyírjes, Hungary – results and conclusions of five decades. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica 12(special issue): 178. DOI: [10.1515/aslh-2016-0001](https://doi.org/10.1515/aslh-2016-0001)

*Érkezett: 2018. május 1.
Közlésre elfogadva: 2018. május 30.*

ERDEI ROVAROK REAKCIÓI A KLÍMAVÁLTOZÁSRA (ESETTANULMÁNYOK)

Csóka György¹, Hirka Anikó¹, Csepelényi Mariann², Szócs Levente¹, Molnár Miklós³,
Tuba Katalin³, Hillebrand Rudolf³ és Lakatos Ferenc³

¹NAIK Erdészeti Tudományos Intézet, Erdővédelmi Osztály

²Szent István Egyetem, MKK Növényvédelmi Intézet

³Soproni Egyetem, Erdőművelési és Erdővédelmi Intézet

Kivonat

A rovarok és környezetük kapcsolata rendkívül szoros, ezért ha abban – például a klímaváltozás miatt – a legkisebb változás is bekövetkezik, arra érzékenyen reagálnak. Ez a reakció igen változatos lehet. Megváltozhat elterjedési területük, megváltozhat fejlődési idejük és ezen keresztül a generációs viszonyaik, illetve a populáció nagyságát befolyásoló tényezők (természetes ellenségek, mortalitás) hatása is eltérhet. Külön ki kell emelni a növényevő rovarok és gazdanövényeik közötti érzékeny kölcsönhatást, ahol a gazdanövényben bekövetkezett változásra (pl. szárazság, vagy hőség által kiváltott stressz) rendkívül gyorsan képesek a rovarok reagálni. Végeredményképpen új fajok jelenhetnek meg, korábban ritka fajok tömegszaporodása következhet be, illetve növekedhet kártételi területük. Az elmúlt évtizedekben bekövetkezett változásokat hat mintapéldán keresztül mutatjuk be: tölgy csipkésposloska (*Corythucha arcuata*), májusi cserebogár (*Melolontha melolontha*), tölgy búcsújáró lepke (*Thaumetopoea processionea*), gyapottok bagolylepke (*Helicoverpa armigera*), gyapjaslepke (*Lymantria dispar*), illetve a lucfenyvesekben bekövetkezett szúkártétel.

Kulcsszavak: tölgy csipkésposloska, májusi cserebogár, tölgy búcsújáró lepke, gyapottok bagolylepke, gyapjaslepke, szúkártétel, klímaváltozás.

RESPONSE OF FOREST INSECTS TO THE CLIMATE CHANGE (CASE STUDIES)

Abstract

There is a very tight relationship between insects and their environment, therefore if there is even the slightest change – due to climate change for instance, they react sensitively. This reaction can be very diverse. Their area can expand, their development time can change and consequently their number of generations can alter as well. Effect of factors influencing the size of the populations (natural enemies, mortality) can differ too. It should also be mentioned the sensitive interaction between herbivore insects and host plants in particular, where the insects can react very fast to the changes in the host plant (e.g. drought, stress caused by heat). Ultimately new species can appear, previously rare species can have mass outbreaks or their damage area can expand. We are demonstrating the changes of the last decades in six sample examples: oak lace bug (*Corythucha arcuata*), cockchafer (*Melolontha melolontha*), oak processionary moth (*Thaumetopoea processionea*), cotton bollworm (*Helicoverpa armigera*), gypsy moth (*Lymantria dispar*), in addition to the bark beetle damage in spruce stands.

Keywords: oak lace bug, cockchafer, oak processionary moth, cotton bollworm, gypsy moth, bark beetle damage, climate change.

BEVEZETÉS

A rovarok fokozottan ki vannak téve a környezeti tényezőknek, illetve azok változásainak, így a klíma is számos direkt és indirekt módon befolyásolja őket (Csóka 1996, 1997, Lakatos & Molnár 2009, Molnár et al. 2010, Robinet & Roques 2010, Pureswaran et al. 2018, Csóka et al. 2018). A klímában bekövetkező változások hatással vannak például egyes rovarfajok elterjedési területének alakulására (Vanhanen et al. 2007, Battisti 2008, Jepsen et al. 2008, Battisti & Larsson 2015, Battisti et al. 2017). A változó klíma növelheti, esetleg csökkentheti egyes többnemzedékes rovarfajok éven belüli generációinak számát (Ayres & Lombardero 2000, Jönsson et al. 2009). A téli időjárási viszonyok az elszenvedett telelési mortalitás okán meghatározóak lehetnek egy faj megtelepedésében és népességének alakulásában (Csepelényi et al. 2017a). A klíma hatással van a rovarok és tápnövényük (Pelini et al. 2009, Robinet & Roques 2010), illetve a rovarok és természetes ellenségeik interakcióira (Jefferies & Lewis 2013, Kalinkat & Rall 2015). Ezen különböző jellegű hatások eredője sok esetben tömegszaporodásokat, ezen keresztül pedig jelentős gazdasági károkat, illetve ökológiai hatásokat is okozhatnak. Ezt meglehetősen sok tanulmány taglalja is (Mattson & Haack 1987, Leskó et al. 1995, 1998, Csóka 1997, Rouault et al. 2006, Dobbertin et al. 2007, Jactel et al. 2012, Klapwijk et al. 2013, Hlásny et al. 2015, Pureswaran et al. 2018).

Az utóbbi három évtized során lucosaink területe drámai mértékben csökkent. Bár a tömeges magyarországi lucpusztulás közvetlen okozói jellemzően a szűbogarak (főként a betűzősű – *Ips typographus*), az időjárás elsődleges hatása itt is megkerülhetetlenül felmerül. A gyakoribb vihar- és hókárok tömeges költőhelyet biztosítanak a szűknek, az enyhe telek, aszályos tavaszi, nyári időszakok pedig gyorsabb fejlődést (esetenként több nemzedéket) és kisebb mortalitást eredményeznek. Számos további rovarkár vonatkozásában is nyilvánvaló összefüggés mutatható ki az időjárási viszonyokkal (Csóka 1996, 1997, Csóka et al. 2018). Két-három aszályos évet követően növekszik az erdei rovarkárok területe. Az évezred első néhány évének súlyos aszályai egyértelműen segítették a gyapjaslepke eddig regisztrált legnagyobb tömegszaporodásának, illetve kárterületének kialakulását. Ez a tömegszaporodás nemcsak, hogy a korábban tapasztaltaknál jóval nagyobb területű volt, de vertikálisan is kiterjedt, azaz nemcsak a megszokott sík- és alacsony dombvidéki lombos állományokban, hanem hegyvidéki bükkösökben is jelentkezett (Csóka & Hirka 2009). A lombvesztést szenvedett bükkök regenerációja jóval lassabb és kevésbé teljes körű, mint pl. a csereké. A lombvesztés a bükkök esetében hosszabb távon is egészségi állapot romlást eredményezhet (Csóka et al. 2015).

A korábbról jól ismert erdei rovarfajok növekvő kártrendjein (Hirka et al. 2011; Klapwijk et al. 2013;) túl egyre több olyan kárformával kell szembesülnünk, amikkel korábban nem, vagy csak igen ritkán találkozhattunk (Lakatos & Molnár 2009, Molnár et al. 2010, Hirka & Csóka 2010, Csóka 2016).

Az európai, így a magyar erdőkben is gyorsuló ütemben jelennek meg idegenhonos rovarfajok (Turcani et al. 2001, Csóka 2001, Csóka et al. 2012, Szeőke & Csóka 2012, Tuba

et al. 2012). Az utóbbi 2 évtizedben több új fajt regisztráltak, mint az azt megelőző 110 évben. Habár ezért a trendért nem elsősorban a klímaváltozás okolható, a jelenség klimatikus vonatkozásai számos esetben nyilvánvalóak. Természetesen nem minden jövevény faj válik invázióssá, de közülük több, jelentős kárpotenciállal bír.

A klímaváltozás rovarokra gyakorolt hatásainak alaposabb megismerése tudományos érdekeségén túl számottevő gyakorlati jelentőséggel is bír. Megbízható, hosszú távú előrejelzéseket ugyanis csak érdemi kutatási eredményekre alapozva lehet tenni. A jövőbeni kockázatokat csökkentő döntéseket, beavatkozásokat pedig érdemi előrejelzések híján nehéz elképzelni.

Jelen tanulmányban néhány, főként hazai kutatási eredményekre alapozott esettanulmányt ismertetünk, arra vonatkozóan, hogy a klímaváltozás miként befolyásolhatja egyes rovarfajok elterjedését, népségük alakulását, ezen keresztül pedig erdészeti jelentőségét.

Tölgy búcsújáró lepke [*Thaumetopoea processionea* (Linnaeus, 1758)]

A búcsújáró lepkék (Lepidoptera: Notodontidae), különösen a fenyő búcsújáró lepke (*Thaumetopoea pityocampa* (Denis & Schiffermüller, 1775)) az utóbbi időben jelentős figyelmet vívtak ki a klímaváltozással magyarázható area expanziójuknak köszönhetően (Pimentel et al. 2006, 2011, Hoch et al. 2009, Straw & Williams 2013, Roques et al. 2015, Mirchev et al. 2016). A genusz másik, jelentős terjeszkedést mutató faja a nálunk is honos tölgy búcsújáró lepke. A faj Délkelet-Európában a tölgyek időnként és helyenként tömegesen fellépő, jól ismert lombfogyasztója. Csalánzó hernyószőrei miatt jelentős humán-egészségügyi jelentőséggel is bír. Az utóbbi néhány évtizedben figyelemre méltó nyugati, északnyugati irányú terjeszkedést mutatott (Groenen 2010, Groenen & Meurisse 2012). 65 év „szünet” után, 1970-ben újra előkerült Belgiumból (Groenen 2010), 100 év kihagyás után pedig Hollandiából (Stigter & Romeijn 1992). Szintén 100 év elteltével észlelték újra Északnyugat-Lengyelországban (Blaik et al. 2011). Ezeket a folyamatokat ugyan inkább rekolonizációnak, mintsem tényleges area expanzióknak tartják (Groenen & Meurisse 2012), ugyanakkor a faj hím egyedeit fogták már Dániában (Skule & Vilhelmsem 1997) és Svédországban is (Lövgren & Dalsved 2005), ahol korábban még soha nem jegyezték fel őket. Megjegyzendő, hogy a nemzetközi kereskedelem szintén közrejátszhat a terjeszkedésben. Ennek köszönhető pl. a faj megjelenése az Egyesült Királyságban is (Baker et al. 2009, Mindlin et al. 2012).

A faj egynemzedékes, pete alakban telet, fő tápnövénye a cser, de más tölgyeken is megél. Hernyói május-júniusban rágnak, a lepkék júliustól szeptemberig repülnek, de akár még decemberben is lehet élő lepkéket találni. Éves átlagos kárterülete Magyarországon (1961-2012) 808 ha, de az utóbbi két évtized egyes éveiben ennél jóval nagyobb kárterületeken lépett fel, 2004-ben országosan 4270 ha-ról jelentették kártételét, ami a kárjelentések bő fél évszázadának legnagyobb kárterülete volt (Csóka et al. 2018).

Egy közelmúltban megjelent tanulmány (Csóka et al. 2018) három nyugat-magyarországi fénycsapda éves fogásainak alakulását elemzi az időjárási viszonyokkal való összefüggésben. Fő megállapítása, hogy a lárvastádium időjárási viszonyai meghatározóan befolyásolják a faj népességét. A májustól júliusig terjedő időszak átlagos hőmérséklete pozitívan, ugyanezen időszak csapadékösszege pedig negatívan befolyásolja az adott évi fogási számokat. Ez egyben azt is jelenti, hogy a faj népességének és kárterületének növekedésére kell számítanunk, amennyiben a jelzett időszakok egyre melegebbek és csapadékszegényebbek lesznek. A tavaszi időjárás népességre gyakorolt hatásáról (adatokra alapozott elemzések nélkül) egyébként már többen is említést tesznek (Klapwijk et al. 2013, Wagenhoff & Veit 2011, Wagenhoff et al. 2013, 2014).

Gyapottok bagolylepke [*Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808)]

Habár a jövevény fajok egyre gyakoribb megjelenésének főként a rohamosan növekvő volumenű világkereskedelem a fő mozgató rugója (Vanhanen et al. 2008, Tuba et al. 2012, Csóka et al. 2012), sok esetben a klímaváltozás hatásai is tetten érhetőek. Látványos példát szolgáltat erre vonatkozóan a gyapottok bagolylepke. Melegigényes, trópusi/mediterrán, vándorlepke faj (Tuba et al. 2012), 1986 előtt Magyarországon kifejezetten ritkának számított. Az Erdészeti Fénycsapda Hálózat csapdái működésük első negyed századában mindösszesen hat példányát fogták. Ezt követően azonban egyre gyakrabban került a fénycsapdádba, az utóbbi három évtizedben a csapdák növekvő számban fogják, néhány csapda egyes években több ezres egyedszámban. A vándor lepkefajok, így a gyapottok bagolylepke is, egyre gyakrabban jelennek meg nagyobb tömegben, és honosodnak meg az északi táplálkozási területeiken (Sparks et al. 2005). Az egyre gyakrabban jelentkező aszályok általában segítik tömegszaporodásait (Szabóky & Szentkirályi 1995). A gyapottok bagolylepkének több, egymást jelentősen átfedő nemzedéke lehet. Rendkívül polifág. Az utóbbi két évtizedben jelentős mezőgazdasági (kukorica, napraforgó, paradicsom, alma, stb.) kártevővé vált, de akác, nemes nyár és tölgy fiatalosokban is észlelték már kártételét (Leskó & Szabóky 2003, Keszthelyi et al. 2013). Megjegyzendő, hogy világszerte jelentős kártevőként tartják nyilván. A népességnövekedés mellett figyelemre méltóak a rajzásfenológiában bekövetkező változások is. Az első példányokat egyre korábban fogják az Erdészeti Fénycsapda Hálózat csapdái, így a fogási súlynap szintén egyre korábbra tevődik (Szócs et al. kézirat). Ez a meghosszabbodott tenyészedőszak magában hordozza több nemzedék kifejlődésének lehetőségét, ezáltal pedig a kárpotenciál növekedését is.

Tölgy-csipkéspoloska [*Corythucha arcuata* (Say, 1832)]

Az észak-amerikai származású inváziós tölgy-csipkéspoloska (*Corythucha arcuata* Say, 1832) első európai észlelése Észak-Olaszországból származik (Bernardinelli & Zandigiacomo 2000). 2002-ben Törökországban (Mutun 2003), 2005-ben Svájcban (Forster et al. 2005) is előkerült. 2013-ban, közel egy időben megtalálták Bulgáriában (Dobrev et al. 2013), Horvátországban (Hrašovec et al. 2013) és Magyarországon (Szarvas) is (Csóka et al. 2013). Később több más európai országban is megjelent. Magyarországi, robbanásszerű terjeszkedését Csepelényi et al. (2017b) foglalták össze.

A faj kifejlett stádiumban, kéreg alatt, kéregrepedésekben, ágvillákban telet. Valószínűsítettük, hogy a váratlan tömegszaporodás egyik előmozdítója a megelőző három, rendkívül enyhe tél, illetve az ezeknek köszönhető alacsony telelési mortalitás volt. Ugyanakkor az is feltételezhető volt, hogy a 2016/2017-es, a korábbi háromnál jóval keményebb tél, jelentős veszteségeket okozhatott a telelő populációkban. Ez utóbbi feltételezésünk tisztázása érdekében öt helyszínen (Békéscsaba, Gyula és Szarvas, Tiszakürt, Tőserdő) célirányos telelési mortalitási vizsgálatokat végeztünk (Csepelényi et al. 2017a). A március végén begyűjtött 4770 telelő egyed 63,5%-a sikeresen átvészelte a telet. Azaz várakozásunkkal ellentétben a viszonylag kemény tél sem okozott számottevő telelési mortalitást. Ezt erősíti az a tény is, hogy a faj 2017-ben Magyarországon, de a környező országok némelyikében is jelentős expanziót és tömegszaporodásokat mutatott. Mivel az Európában honos tölgyfajok túlnyomó részben megfelelő tápnövényt jelentenek a csipkéspoloskának, további terjeszkedése várható.

A tölgy csipkéspoloskával kapcsolatban egyelőre nyilvánvalóan több a megválaszolatlan kérdés, mint a tudományos megalapozottságú, megbízható ismeret. A teljesség igénye nélkül néhány fajsúlyos kérdés: A hosszabb időszakon át ismétlődő tömeges fellépései hogyan fognak hatni a fák növekedésére és egészségi állapotára? Befolyásolja-e a tömeges jelenlét a tölgyek makktermését, ezáltal a természetes felújítások, illetve a szaporítóanyag termelés lehetőségeit? A tömegessé váló inváziós faj miként fog hatni a tölgyeken élő fajgazdag specialista rovar együttesekre (köztük számos védett fajra)? Van-e (lesz-e) olyan természetes ellensége, illetve kórokozója, ami a populációit szabályozni képes? A kérdések megválaszolására csak érdemi, célirányos kutatásokat követően van esély.

Májusi cserebogár [*Melolontha melolontha* (Linnaeus, 1758)]

A Melolonthidae család a Kárpát-medencében 81 fajjal képviselteti magát (Endrődi 1956), melyből 11 rendelkezik erdőgazdasági jelentőséggel. Közöttük a májusi cserebogár (*M. melolontha*) kártétele kiemelkedő (Janik et al. 2008). Észak- és Közép-Európában a mérsékelt klímájú területeken mindenhol előfordul, de megtalálható Ázsiában és Kis-Ázsiában is. Magyarországon általánosan elterjedt. Leginkább a jól felmelegedő, középkötött barna erdőtalajokon fordul elő, de a homokos talajokon is tömegessé válhat, különösen a

melegebb éghajlatú vidékeken. Az idők során a Kárpát-medencében a fajnak 7 törzse alakult ki. A hűvösebb, hegyvidéki területeken (Kárpátok) a négyéves fejlődésű, míg a melegebb sík és dombvidéki területeken a hároméves fejlődésű törzsek találhatók meg.

Az elterjedést, a rajzást és a pajorok túlélését alapvetően befolyásolják a klímatis fel-tételek. Az imágó április végén, május elején bújik elő. A rajzás kezdete a kritikus időjárási paraméterek folyamatos mérésével előrejelezhető, melyre több módszer is ismert (Tóth 1976, Nowinszky & Nagy 1977, Bognár & Huzián 1979, Hirka 2012). A hőmérséklet és csapadékviszonyok a rajzó nemzők mozgását, a peterakások számát, de a petézőhely kiválasztását is befolyásolják (Homonnay 1977, Bognár & Huzián 1979). A peteállapot a talaj hőmérsékletétől és nedvességtartamától függően 32-50 napig tart. A peték, és később a fiatal lárvák egyaránt érzékenyek a talaj kiszáradására és a túl magas nedvességtartalmára, ezért a rajzás utáni június-július hónapok időjárása nagy jelentőséggel bír a populáció alakulásában. Az idősebb pajorok már szívósabbak, a szélsőségekre függőleges irányú mozgással reagálnak (Bognár & Huzián 1979, Györfi 1954). A klímatis tényezők függvényében időről-időre változhat az egyes törzsek elterjedési és kártételi területe.

Az Erdészeti Tudományos Intézet Erdővédelmi Osztálya 1962 óta ad ki erdővédelmi prognózist. Az előrejelzés alapja már kezdetektől az erdővédelmi figyelő- és jelzőszolgálati rendszer, melynek keretein belül az erdőgazdálkodók közvetlenül a saját kezelésükben lévő erdőállományokban tapasztalt káreseményeket jelentik a központi nyilvántartás részére. Az Agrárklíma 2. projekt keretében feldolgoztuk az 1983-1997 időszakban a májusi cserebogár rajzásáról térképeken is közreadott gazdálkodói jelentéseket. A térképeket térinformatikai eszközökkel összehasonlítottuk a szakirodalomban még napjainkban is széles körben hivatkozott, 1973-ban publikált adatokkal (Homonnay 1973). A gazdálkodói jelentéseket összehasonlítottuk a korábban már feldolgozott Erdészeti Fénycsapdahálózat 2006-2016 közötti fogási adataival, melyek alapján a törzsek területének változásáról szereztünk információkat. Az V. törzs elterjedési területe az erdőgazdálkodók kárjelentései és a fénycsapda fogási adatok alapján kiterjedtebb, a szakirodalomban fellelhető elterjedési területnél. A VI. törzs elterjedési területe a vizsgált időszakban némileg csökkent. A VII. törzs előfordulása továbbra is szigetszerű, azonban egyre több új helyen figyelik meg a rajzását, illetve kártételét.

Gyapjaslepke [*Lymantria dispar* (Linnaeus, 1758)]

A gyapjaslepke (*Lymantria dispar* L. 1758) a mérsékelt övi lombos erdők egyik legfontosabb és legveszélyesebb erdőszeti károsítója. A kárterülete tömegszaporodása esetén igen jelentős lehet. Legutóbbi magyarországi gradációja során (2003-2006) a szaporodás csúcspontjában (2005) a károsított terület meghaladta a 200000 ha-t (Csóka & Hirka 2009). Tömegszaporodását az időjárási körülmények, illetve a változó klíma hatásai is jelentősen befolyásolják. A kedvezőtlen környezeti tényezők ezekkel a hatásokkal, mint a száraz évek sorozata, a kiegyenlítetlen, kedvezőtlen eloszlású csapadék, összeadódva kedvező alapot biztosítanak a gyapjaslepke zavartalan és tömeges fejlődésének (Csóka 1996).

A klímaváltozással kapcsolatban, de attól függetlenül is a hőmérséklet emelkedésének a gyapjaslepke fejlődésére gyakorolt hatásaival már több kutatás is foglalkozott. A hőmérséklet hatását a gyapjaslepke tojásokra többen is vizsgálták, míg az eredményeket végül egy szimulációs modellben próbálták egyesíteni (Sawyer et al. 1993, Gray et al. 1995). Mint jelentős környezeti hatással bíró, inváziós fajnak Észak-Amerikában, összefüggésben a klímaváltozással, modellezték lehetséges elterjedési határait. Az alkalmazott szimulációs modell segítségével, a hőmérséklet lehetséges emelkedéséhez kapcsolódó elterjedési terület változást is becsülték (Allen et al. 1993, Gray 2004). Laboratóriumi kísérletek során azt tapasztalták, hogy viszonylag magas hőmérsékleten (27°C) nevelt gyapjaslepke hernyók, még a rövid ideig tartó napi hőmérsékleti stressz (1 óra, 47°C) hatásra is színbeli elváltozással, méghozzá sötéttedéssel, reagáltak. Ugyanez a hőstressz a lárvák fejlődési idejét lerövidítette, míg súlygyarapodását megnövelte. Azonban a hőstresszek napi ismétlődése a súlygyarapodás tekintetében rövidesen visszaesést eredményezett (Ponomarev et al. 2014). A vizsgálatok többsége azt is igazolta, hogy a magasabb hőmérsékleti értékek a lárvakori fejlődést felgyorsítják (Gray 2004). Ugyanakkor a prediapauza, diapauza és posztdiapauza arányát is megváltoztatják (Gray et al. 2001).

A VKSZ Agrárklíma projekt keretében meghatároztuk a gyapjaslepke esetleges gazdanövény váltásának hatásait a faj egyedfejlődésére. Ennek során csertölgyön (*Quercus ceris*), gyertyánon (*Carpinus betulus*), pannon nyáron (*Populus x euramericana* Pannonia) és mesterséges tápanyagon (AD) neveltünk gyapjaslepke hernyókat a tojásból való kikeléstől a lepke kifejlődéséig (30-30 egyed, 16:8 nappal:éjszaka, illetve 20°C hőmérséklet mellett). Két esetben a nevelés során tápnövényt is váltottunk (cserről gyertyánra).

A hernyók mortalitásának mértéke a mesterséges tápanyagon volt a legalacsonyabb (0%), illetve a váltott tápnövényen (cserről gyertyán) a legmagasabb (30%). A bábok esetében hasonló volt a kép, bár a legmagasabb mortalitást a tisztán gyertyánon nevelt egyedek esetében tapasztaltuk. A fejlődési idő hossza is jelentős mértékben függött az ezalatt kapott táplálék minőségétől. A gyapjaslepke hernyók fejlődési paraméterei azonban nem csupán a mortalitási rátában, illetve a fejlődési időben különböztek, attól függően, hogy milyen táplálékkal etettük őket, hanem a tömeggyarapodás mértékében is. A már korábban is ismert tényen túl – azaz a nőstény hernyók tömeggyarapodása többszöröse (2-4-szerese) a hím hernyók tömeggyarapodásának – egyértelmű különbséget mutattak a különböző gazdanövényen nevelt hernyók. Különösen igaz ez a nőstény egyedek esetén, ahol a peteprodukciónagy mértékben függ a hernyó állapotban felvett táplálék mennyiségétől.

A kapott adatok jól mutatják egy erősen polifág lombfogyasztó rovar, a gyapjaslepke plaszticitását. A változó környezet miatti esetleges gazdanövény váltás hatásai nem írhatók le egyetlen jellemzővel. A végső hatást a különböző tulajdonságok (mortalitás, fejlődési sebesség, tömeggyarapodás, stb.) változásának összessége adja meg.

Szűkártétel a hazai lucosokban

Nagyságrendjét és jelentőségét tekintve a lucosokban bekövetkezett szűkártétel az elmúlt időszak legjelentősebb, klímaváltozással összefüggésbe hozható erdővédelmi problémája volt mind Európában (Hlasny & Turcani 2008, Netherer et al. 2014, Marini et al. 2017, Pureswaran et al. 2018) mind hazánkban (Győrfi 1950, Jurásek & Román 1997, Lakatos 1997, Roth 2003, Szép 2005, 2008).

A szűbogarak Magyarországon már a II. világháború után (1946-48) is okoztak jelentékeny károkat. Ekkor például a soproni lucosok 1/6-át, mintegy 70 000 m³ faanyagot termelték ki (Győrfi 1963). Az itteni tapasztalatok alapján vezettek be olyan intézkedéseket, mint a tisztítási faanyag megsemmisítésének finanszírozása, akkor még az erdőfenntartási alapból. Az évek során azonban a károsítás tapasztalatai feledésbe merültek, sőt még az intézkedéseket is eltörölték. A 80-as évek elejétől kezdve újból jelentkezett szűkártétel a hazai lucfenyvesekben, de ezek elszórtan fordultak elő, és mennyisége ritkán haladta meg a néhány 100 m³-t. Jelentősebb károsítás 1991-től jelentkezett ismét, először a Soproni-hegyvidéken, majd a Kőszegi-hegységben, illetve az Őrség és Zala lucfenyveseiben. A kártétel hullámokban jelent meg, és többnyire összefüggésbe volt hozható a száraz meleg nyári időjárással. A szűkártétel és a klímatis tényezők közötti összefüggések pontos, statisztikai elemzését megnehezítette a kártételről rendelkezésre álló adatok pontatlansága. Mind a kitermelt faanyag mennyiségét, mind az érintett terület nagyságát tekintve változó pontosságú adatok álltak rendelkezésre. A végrehajtott fahasználatok több esetben nem egészségi termelés címszó alatt, hanem más használati kategóriába sorolva történtek (pl. véghasználat).

A szűkáróítás ilyen jelentős mértéke több okra is visszavezethető, melyek együttes fellépése tovább súlyosbította a helyzetet:

1. *Klímaigény:* A lucfenyő hegyvidéki fajaj, 1000 m tengerszint feletti magasságban összefüggő állományokat alkot. Bár a Soproni- és Kőszegi-hegységben őshonos előfordulása vitatott, Magyarországon klímaigényének megfelelő terület nem, vagy csak nagyon korlátozottan található. Ennek ellenére igen kedvelt fajaj volt, hiszen növekedése gyors, a vadkevésbé szereti, és még extrém termőhelyeken is jó növekedést mutat. Gazdaságossági szempontok is csak alátámasztották telepítését.

2. *Tűltartottság:* Alacsonyabb hegy- és dombvidéki régiókban csak alacsonyabb vágásérettségi kora lehet a lucfenyveseket fenntartani. Különösen veszélyes az eredetileg tervezett vágáskor kitolása valamilyen ürüggyel (pl. természetvédelem).

3. *Gyors reakálás hiánya:* Fenyvesekben mindig kiemelt figyelemmel kell kísérni a szűbogarak jelenlétét és megjelenését. Elegendő egy két-három fából álló „szűfolt” figyelmen kívül hagyása, és a tenyészidőszak végére már akár hektáros nagyságrendet is elérhet a pusztulás.

4. *Klímaváltozás – gyakoribb abiotikus káresemények, száraz, meleg periódusok:* Már az előzőekben felsorolt pontok is elegendő feltételt biztosítottak volna a szűkáróítás növekedéséhez, de az utóbbi évtizedekben bekövetkezett, klímaváltozásra visszavezethető ese-

mények is jelentősen felerősítették a negatív trendeket. Az egyre gyakoribb és nagyobb területet érintő abiotikus kalamitások (viharkárok, hótörés, stb.) és súlyos aszályok egyaránt elősegítették a szűk tömeges fellépését, ezzel pedig a lucosok általános egészségi állapotának jelentős romlását. Saját, publikálatlan elemzéseink szerint az aszályosság jelentős, statisztikailag is szignifikáns hatással van a bejelentett szűkárók területére.

A lucfenyvesekben bekövetkezett pusztulás során a legfontosabb károsító a betűzészű (*Ips typographus*) volt, de a kéreg alatt megtalálhatók voltak a rézmetszőszű (*Pityogenes chalcographus*) és a firkáló fenyőszű (*Polygraphus poligraphus*) menetei is.

Jól mutatja a klímaváltozás hazai lucosokra gyakorolt hatását, hogy a Soproni-hegyvidék lucfenyveseinek területe az 1990-es évek elején még 1000 ha volt, ami a töredékére (250 ha) csökkent. Jelentősen átalakult a faállomány szerkezet (a lombos fajok javára) és ezzel együtt a gazdálkodás is. A bekövetkezett változások egy klímaváltozás hatására induló, és különböző károsítók (főként szűbogarak) által befejezett pusztulási folyamat tipikus példája. A teljesség kedvéért megemlítendő azonban, hogy a luc magyarországi területfoglalásának csökkenése részben természetvédelmi korlátozásokra is visszavezethető. Védett területeken ugyanis a luc „nemkívánatossá” vált, így a letermelt lucosok helyén jellemzően más fajokkal történik meg az újraerdősítés.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen tanulmány elkészítését a VKSZ_12-1-2013-0034-Agrárklíma.2 projekt támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Allen J.C., Foltz J.L., Dixon W.N., Liebhold A.M., Colbert J.J., Regmere J., et al. 1993: Will the gypsy moth become a pest in Florida? *The Florida Entomologist* 76(1): 102–113. DOI: [10.2307/3496018](https://doi.org/10.2307/3496018)
- Ayres M.P. & Lombardero M.J. 2000: Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of the Total Environment* 262(3): 263–286. DOI: [10.1016/S0048-9697\(00\)00528-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00528-3)
- Baker R., Caffier D., Choiseul J.W., Clercq P.De., Gerowitt B., Karadjova O.E., et al. 2009: Evaluation of a pest risk analysis on *Thaumetopoea processionea* L., the oak processionary moth, prepared by the UK and extension of its scope to the EU territory. *The EFSA Journal* 1195: 1–64. DOI: [10.2903/j.efsa.2009.1195](https://doi.org/10.2903/j.efsa.2009.1195)
- Battisti A. & Larsson S. 2015: Climate change and insect pest distribution range. In: Björkman C. & Niemelä P. (eds): *Climate change and insect pests*. Wallingford: CABI, 1–15. DOI: [10.1079/9781780643786.0001](https://doi.org/10.1079/9781780643786.0001)
- Battisti A. 2008: Forests and climate change – lessons from insects. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 1(1): 1–5. DOI: [10.3832/ifor0210-0010001](https://doi.org/10.3832/ifor0210-0010001)
- Battisti A., Larsson S. & Roques A. 2017: Processionary moths and associated urtication risk: global change-driven effects. *Annual Review of Entomology* 62: 323–342. DOI: [10.1146/annurev-ento-031616-034918](https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031616-034918)
- Bernardinelli I. & Zandigiaco P. 2000: Prima segnalazione di *Corythucha arcuata* (Say) (Heteroptera, Tingidae) in Europa. *Informatore Fitopatologico* 50(12): 47–49.



- Blaik T., Malkiewicz A. & Wasala R. 2011: Rediscovery and remarks on occurrence of *Thaumetopoea processionea* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Notodontidae: Thaumetopoeinae) in Poland. *Wiadomości Entomologiczne* 30(4): 246–256.
- Bognár S. & Huzián L. 1979: Növényvédelmi állattan. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 170–182.
- Csepelényi M., Hirka A., Mikó Á., Szalai Á. & Csóka Gy. 2017a: A tölgy-csipkésposzka (*Corythucha arcuata*) 2016/2017-es áttelelése Délkelet-Magyarországon. *Növényvédelem* 53(7): 285–288.
- Csepelényi M., Hirka A., Szénási Á., Mikó Á., Szócs L. & Csóka Gy. 2017b: Az inváziós tölgycsipkésposzka [*Corythucha arcuata* (Say, 1832)] gyors terjeszkedése és tömeges fellépése Magyarországon. *Erdészettudományi Közlemények* 7(2): 127–134. DOI: [10.17164/ek.2017.009](https://doi.org/10.17164/ek.2017.009)
- Csóka Gy., Hirka A., Szócs L., Móricz N., Rasztovits E. & Pödör Z. 2018: Weather-dependent fluctuations of Oak Processionary Moth (*Thaumetopoea processionea* L.) populations. *European Journal of Entomology* 115: 249–255. DOI: [10.14411/eje.2018.024](https://doi.org/10.14411/eje.2018.024)
- Csóka Gy. 1996: Aszályos évek – fokozódó rovarkárok erdeinkben. *Növényvédelem* 32: 545–551.
- Csóka Gy. 2001: Recent invasions of five species of leafmining lepidoptera in Hungary. *Proceedings „Integrated Management of Forest Defoliating Insects”*. USDA General Technical Reports NE-277, 31–36.
- Csóka Gy. 2016: A gyapottok bagolylepke (*Helicoverpa armigera*) terjedése Magyarországon. In: Riesz L. (ed): *Magyarország környezeti állapota 2015*. HOI, 62–64.
- Csóka Gy. & Hirka A. 2009: A gyapjaslepke (*Lymantria dispar* L.) legutóbbi tömegszaporodása Magyarországon. *Növényvédelem* 45(4): 196–201.
- Csóka Gy., Hirka A. & Somlyai M. 2013: A tölgycsipkésposzka (*Corythucha arcuata* Say, 1832 – Hemiptera, Tingidae) első észlelése Magyarországon. *Növényvédelem* 49(7): 293–296.
- Csóka Gy., Hirka A. & Szócs L. 2012: Rovarglobalizáció a magyar erdőkben. *Erdészettudományi Közlemények* 2: 187–198.
- Csóka Gy. 1997: Increased insect damage in Hungarian forests under drought impact. *Biologia* 52(2): 159–162.
- Csóka Gy., Pödör Z., Nagy Gy. & Hirka A. 2015: Canopy recovery of pedunculate oak, Turkey oak and beech trees after severe defoliation by gypsy moth (*Lymantria dispar*): Case study from Western Hungary. *Forestry Journal* 61: 143–148. DOI: [10.1515/forj-2015-0022](https://doi.org/10.1515/forj-2015-0022)
- Dobbertin M., Wermelinger B., Bigler C., Bürgi M., Carron M., Forster B., et al. 2007: Linking increasing drought stress to scots pine mortality and bark beetle infestations. *The Scientific World Journal* 7(1): 231–239. DOI: [10.1100/tsw.2007.58](https://doi.org/10.1100/tsw.2007.58)
- Dobrev M., Simov N., Georgiev G., Mirchev P. & Georgieva M. 2013: First record of *Corythucha arcuata* (Say) (Heteroptera: Tingidae) on the Balkan Peninsula. *Acta Zoologica Bulgaria* 65(3): 409–412.
- Endrődi S. 1956: Lemezescsapú bogarak *Lamellicornia*. In: Szélessy V. et al. (eds): *Magyarország Állatvilága Fauna Hungariae IX. kötet, Coleoptera IV. 4. füzet*, 106–188.
- Forster B., Giacalone I., Moretti M., Dioli P. & Wermelinger B. 2005: Die amerikanische Eichennetzwanze *Corythucha arcuata* (Say) (Heteroptera, Tingidae) hat die Südschweiz erreicht. *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft* 78(3-4): 317–323.
- Gray D.R., Ravlin W.F., Régnière J. & Logan J.A. 1995: Further Advances Toward a Model of Gypsy Moth (*Lymantria dispar* (L.)) Egg Phenology: Respiration Rates and Thermal Responsiveness During Diapause, and Age-dependent Developmental Rates in Postdiapause. *Journal of Insect Physiology* 41: 247–256. DOI: [10.1016/0022-1910\(94\)00102-m](https://doi.org/10.1016/0022-1910(94)00102-m)
- Gray D.R., Ravlin F.W. & Braine J.A. 2001: Diapause in the gypsy moth: a model of inhibition and development. *Journal of Insect Physiology* 47: 173–184. DOI: [10.1016/s0022-1910\(00\)00103-7](https://doi.org/10.1016/s0022-1910(00)00103-7)

- Gray D.R. 2004: The gypsy moth life stage model: landscape-wide estimates of gypsy moth establishment using a multi-generational phenology model. *Ecological Modelling* 176: 155–171. DOI: [10.1016/j.ecolmodel.2003.11.010](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.11.010)
- Groenen F. & Meurisse N. 2012: Historical distribution of the oak processionary moth *Thaumetopoea processionea* in Europe suggests recolonization instead of expansion. *Agricultural and Forest Entomology* 14(2): 147–155. DOI: [10.1111/j.1461-9563.2011.00552.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2011.00552.x)
- Groenen F. 2010: Variation of *Thaumetopoea processionea* (Notodontidae: Thaumetopoeinae) in Europe and the Middle East. *Entomologische Berichten* 70(3): 77–82.
- Győrfi J. 1950: Szúkárosítások a hazai Lucfevesekben. *Agrártudományi Egyetem Erdőmérnöki Karának Évkönyve*, 383–394.
- Győrfi J. 1954: A cserebogár-kérdés jelenlegi helyzete. *Az Erdő* 3(1-2): 24–33.
- Győrfi J. 1963: Erdővédelem. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Hirka A. & Csóka Gy. 2010: Kevésbé ismert lombfogyasztó rovarok tömeges megjelenése hazai nemesnyár-ültetvényeken. *Növényvédelem* 46(11): 529–531.
- Hirka A. (ed) 2012: A 2011. évi biotikus és abiotikus erdőgazdasági károk, valamint a 2012-ben várható károsítások. Erdészeti Tudományos Intézet Erdővédelmi Osztály, Mátrafüred.
- Hirka A., Csóka Gy. & Szócs L. 2011: Long term population trends of some forest pests in Hungary. In: Delb H. & Pontuali S. (eds): *Biotic Risks and Climate Change in Forests, Proceedings of the 10th IUFRO Workshop of WP 7.03.10 „Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe”, September 20–23, 2010, Freiburg, Germany*, 163–165.
- Hlásny T. & Turčáni M. 2008: Insect pests as climate change driven disturbances in forest ecosystems. In: Štřelcová K. et al. (eds) *Bioclimatology and Natural Hazards*. Springer, Dordrecht, 165–177. DOI: [10.1007/978-1-4020-8876-6_15](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8876-6_15)
- Hlásny T., Trombik J., Holuša J., Lukášová K., Grendár M., Turčáni M., et al. 2015: Multi-decade patterns of gypsy moth fluctuations in the Carpathian Mountains and options for outbreak forecasting. *Journal of Pest Science* 89(2): 413–425. DOI: [10.1007/s10340-015-0694-7](https://doi.org/10.1007/s10340-015-0694-7)
- Hoch G., Toffolo E.P., Netherer S., Battisti A. & Schopf A. 2009: Survival at low temperature of larvae of the pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* from an area of range expansion. *Agricultural and Forest Entomology* 11(3): 313–320. DOI: [10.1111/j.1461-9563.2009.00431.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2009.00431.x)
- Homonnay F. 1973: A májusi cserebogár (*Melolontha melolontha* L.) törzsek hazai elhelyezkedése, térhódítása és keveredése. *A növényvédelem korszerűsítése* 7: 31–41.
- Homonnay F. 1977: A fénycsapdák alkalmazásának jelentősége a *Melolontha* fajok rajzásának, ivararányának és tömegszaporodásának kutatásában. *Növényvédelem* 13(4): 152–159.
- Hrašovec B., Posarić D., Lukić I. & Pernek M. 2013: Prvi nalaz hrastove mrežaste stjenice (*Corythucha arcuata*) u Hrvatskoj. *Šumarski list* 137(9-10): 499–503.
- Jactel H., Petit J., Desprez-Loustau M.L., Delzon S., Piou D., Battisti A., et al. 2012: Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology* 18(1): 267–276. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02512.x)
- Janik G., Tóth J., Csóka Gy., Szabóky Cs., Hirka A. & Koltay A. 2008: Az erdészeti jelentőségű cserebogarak életmódja. *Az Erdészeti kutatások digitális, ünnepi különszáma az OEE 139. Vándorgyűlésének tiszteletére. Cikkgyűjtemény: 350–380.*
- Jeffs C.T. & Lewis O.T. 2013: Effects of climate warming on host-parasitoid interactions. *Ecological Entomology* 38(3): 209–218. DOI: [10.1111/een.12026](https://doi.org/10.1111/een.12026)
- Jepsen J.U., Hagen S.B., Ims R.A. & Yoccoz N.G. 2008: Climate change and outbreaks of the geometrids *Operophtera brumata* and *Epirrita autumnata* in subarctic birch forest: evidence of a recent outbreak range expansion. *Journal of Animal Ecology* 77(2): 257–264. DOI: [10.1111/j.1365-2656.2007.01339.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2007.01339.x)



- Jönsson A.M., Appelberg G., Harding S. & Barring L. 2009: Spatio-temporal impact of climate change on the activity and voltinism of the spruce bark beetle, *Ips typographus*. *Global Change Biology* 15(2): 486–499. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01742.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01742.x)
- Jurásek F. & Román J. 1997: A „Soproni fenyveserdő” végnapjai ...? *Erdészeti Lapok* 132(10): 313–315.
- Kalinkat G. & Rall B.C. 2015: Effects of climate change on the interactions between insect pests and their natural enemies. In: Björkman C. & Niemala P. (eds): *Climate change and insect pests*. Wallingford: CABI, 74–91. DOI: [10.1079/9781780643786.0074](https://doi.org/10.1079/9781780643786.0074)
- Keszthelyi S., Nowinszky L., & Puskás J. 2013: The growing abundance of *Helicoverpa armigera* in Hungary and its areal shift estimation. *Open Life Sciences* 8(8): 756–764. DOI: [10.2478/s11535-013-0195-0](https://doi.org/10.2478/s11535-013-0195-0)
- Klapwijk M.J., Csóka Gy., Hirka A. & Björkman C. 2013: Forest insects and climate change: long-term trends in herbivore damage. *Ecology and Evolution* 3(12): 4183–4196. DOI: [10.1002/ece3.717](https://doi.org/10.1002/ece3.717)
- Lakatos F. 1997: Szúkárosítások alakulása a Soproni-hegyvidéken. *Erdészeti Lapok* 132(10): 325–326.
- Lakatos F. & Molnár M. 2009: Mass mortality of beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-West Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 5: 75–82.
- Leskó K. & Szabó Cs. 2003: Új károsító az akácra a gyapottok bagolylepke (*Helicoverpa armigera* Hübner, 1808). *Erdészeti Lapok* 138(3): 96–97.
- Leskó K., Szentkirályi F. & Kádár F. 1995: Long term fluctuation pattern of the brown-tail moth (*Euproctis chryorrhoea* L.) Hungarian population. *Erdészeti Kutatások* 85: 169–185.
- Leskó K., Szentkirályi F. & Kádár F. 1998: An analysis of fluctuation pattern of geometrid moths based on long term (1961-1997) light trap and damage data time series in Hungary. *Erdészeti Kutatások* 88: 319–333.
- Lövgren R. & Dalsved B. 2005: *Thaumetopoea processionea* L. (Lepidoptera: Thaumetopoeidae) found in Sweden. *Entomologisk Tidskrift* 126(1-2): 93–94.
- Marini L., Økland B., Jönsson A.M., Bentz B., Carroll A., Forster B., et al. 2017: Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography* 40: 1426–1435. DOI: [10.1111/ecog.02769](https://doi.org/10.1111/ecog.02769)
- Mattson W.J. & Haack R.A. 1987: Role of Drought in Outbreaks of Plant-Eating Insects The role of drought in outbreaks of plant-eating insects drought's physiological effects on plants can predict its influence on insect populations. *Bioscience* 37(2): 110–118. DOI: [10.2307/1310365](https://doi.org/10.2307/1310365)
- Mindlin M.J., Polain O., Waroux D., Case S. & Walsh B. 2012: The arrival of oak processionary moth, a novel cause of itchy dermatitis, in the UK: Experience, lessons and recommendations. *Public Health* 126(9): 778–781. DOI: [10.1016/j.puhe.2012.06.007](https://doi.org/10.1016/j.puhe.2012.06.007)
- Mirchev P., Georgiev G., Georgieva M. & Bocheva L. 2016: Impact of low temperatures on pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) larval survival in Bulgaria. *Silva Balcanica* 17(1): 51–58.
- 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.
- Mutun S. 2003: First report of the oak lace bug, *Corythucha arcuata* (Say, 1832) (Heteroptera: Tingidae) from Bolu, Turkey. *Israel Journal of Zoology* 49: 323–324.
- Netherer S., Matthews B., Katzensteiner K., Blackwell E., Henschke P., Hietz P., et al. 2015: Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *The New Phytologist* 205(3): 1128–1141. DOI: [10.1111/nph.13166](https://doi.org/10.1111/nph.13166)
- Nowinszky L. & Nagy L. 1977: Új matematikai módszer a májusi cserebogár (*Melolontha melolontha* L.) rajzáskezdetének kiszámítására. *Növényvédelem* 13(8): 337–340.
- Pelini S.L., Prior K.M., Parker D.J., Dzirisin J.D.K., Lindroth R.L. & Hellmann J.J. 2009: Climate Change and Temporal and Spatial Mismatches in Insect Communities. In: Letcher T.M. (ed): *Climate Change* (1st ed.). Elsevier, Amsterdam, 215–231. DOI: [10.1016/B978-0-444-53301-2.00011-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53301-2.00011-7)

- Pimentel C., Calvão T. & Ayres M.P. 2011: Impact of climatic variation on populations of pine processionary moth *Thaumetopoea pityocampa* in a core area of its distribution. *Agricultural and Forest Entomology* 13(3): 273–281. DOI: [10.1111/j.1461-9563.2011.00520.x](https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2011.00520.x)
- Pimentel C., Calvão T., Santos M., Ferreira C., Neves M. & Nilsson J.Å. 2006: Establishment and expansion of a *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep. Notodontidae) population with a shifted life cycle in a production pine forest, Central-Coastal Portugal. *Forest Ecology and Management* 233(1): 108–115. DOI: [10.1016/j.foreco.2006.06.005](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.06.005)
- Ponomarev V.I., Benkovskaya G.V. & Klobukov G.I. 2014: Effect of Heat Stress on Morphophysiological Characteristics and Biochemical Parameters of Stress Response in Gypsy Moth (*Lymantria dispar* L.) Larvae. *Russian Journal of Ecology* 45(4): 275–281. DOI: [10.1134/s1067413614040080](https://doi.org/10.1134/s1067413614040080)
- Pureswaran D.S., Roques A. & Battisti A. 2018: Forest Insects and Climate Change. *Current Forestry Reports* 4(2): 35–50. DOI: [10.1007/s40725-018-0075-6](https://doi.org/10.1007/s40725-018-0075-6)
- Robinet C. & Roques A. 2010: Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology* 5(2): 132–142. DOI: [10.1111/j.1749-4877.2010.00196.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2010.00196.x)
- Roth M. 2003: Szűgradáció kialakulásának feltételei és lefolyása a Soproni-hegységben 1987-2001. *Erdészeti Lapok* 138(12): 356–358.
- Roques A., Rousset J., Avci M., Avtzis D.N., Basso A., Battisti A., et al. 2015: Climate warming and past and present distribution of the processionary moths (*Thaumetopoea* spp.) in Europe, Asia Minor and North Africa. In: Roques A. (ed): *Processionary moths and climate change: an update*. Springer Netherlands, Dordrecht, 22: 81–161. DOI: [10.1007/978-94-017-9340-7_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7_3)
- Rouault G., Candau J-N., Lieutier F., Nageleisen L-M., Martin J-C. & Warzée N. 2006: Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science* 63(6): 613–624. DOI: [10.1051/forest:2006044](https://doi.org/10.1051/forest:2006044)
- Sawyer A.J., Tauber M.J., Tauber C.A. & Ruberson J.R. 1993: Gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) egg development: a simulation analysis of laboratory and field data. *Ecological Modelling* 66: 121–155. DOI: [10.1016/0304-3800\(93\)90043-r](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)90043-r)
- Sparks T.H., Roy D.B. & Dennis R.L.H. 2005: The influence of temperature on migration of Lepidoptera into Britain. *Global Change Biology* 11(3): 507–514. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2005.00910.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00910.x)
- Stigter H. & Romeijn G. 1992: *Thaumetopoea processionea* na ruim een eeuw weer plaatselijk massaal in Nederland (Lepidoptera: Thaumetopoeidae). *Entomologische berichten* 55: 66–69.
- Straw N.A. & Williams D.T. 2013: Impact of the leaf miner *Cameraria ohridella* (Lepidoptera: Gracillariidae) and bleeding canker disease on horse-chestnut: Direct effects and interaction. *Agricultural and Forest Entomology* 15: 321–333. DOI: [10.1111/afe.12020](https://doi.org/10.1111/afe.12020)
- Szabóky Cs., & Szentkirályi F. 1995: A gyapottok-bagolylepke (*Helicoverpa armigera* Hübner, 1808) szezonálisitása az erdészeti fénycsapdák gyűjtései alapján. *Növényvédelem* 31(6): 267–274.
- Szeőke K. & Csóka Gy. 2012: Jövevény kártevő izeltlábúak Magyarországon – Lepkék (Lepidoptera). *Növényvédelem* 48(3): 105–115.
- Szép T. 2005: Szűkáróság a Szombathelyi Erdészeti Rt. területén. *Erdészeti Lapok* 140(12): 351–353.
- Szép T. 2008: Vas megye lucfenyő nélkül? *Erdészeti Lapok* 143(4): 120–121.
- Szőcs L., Gimesi L., Hírka A., & Csóka Gy. 2018: Trendek a gyapottok bagolylepke (*Helicoverpa armigera*) magyarországi populációs fluktuációiban és rajzásfenológiájában. Kézirat.
- Tóth L. 1976: A májusi cserebogár (*Melolontha melolontha* L.) rajzáskezdés-előrejelzési lehetőségeinek vizsgálata. *Növényvédelem* 12(5): 221–222.
- Tuba K., Horváth B. & Lakatos F. 2012: Inváziós rovarok fás növényeken. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron.



- Turcani M., Csóka Gy., Grodzki W. & Zahradnik P. 2001: Recent invasions of forest insect pests in Central Europe. Protection of World Forests from Insect Pests: Advances in Research. Papers presented at the XXI IUFRO World Congress 7-12 August 2000, Kuala Lumpur, Malaysia. IUFRO World Series Vol. 11. 99-104.
- Vanhanen H., Veteli T.O., Paivinen S., Kellomaki S. & Niemela P. 2007: Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth – a model study. *Silva Fennica* 41(4): 621–638. DOI: [10.14214/sf.469](https://doi.org/10.14214/sf.469)
- Wagenhoff E. & Veit H. 2011: Five years of continuous *Thaumetopoea processionea* monitoring: tracing population dynamics in an arable landscape of South-Western Germany. *Gesunde Pflanzen* 63(2): 51–61. DOI: [10.1007/s10343-011-0244-z](https://doi.org/10.1007/s10343-011-0244-z)
- Wagenhoff E., Blum R., Engel K., Veit H. & Delb H. 2013: Temporal synchrony of *Thaumetopoea processionea* egg hatch and *Quercus robur* budburst. *Journal of Pest Science* 86(2): 193–202. DOI: [10.1007/s10340-012-0457-7](https://doi.org/10.1007/s10340-012-0457-7)
- Wagenhoff E., Wagenhoff A., Blum R., Veit H., Zapf D. & Delb H. 2014: Does the prediction of the time of egg hatch of *Thaumetopoea processionea* (Lepidoptera: Notodontidae) using a frost day/temperature sum model provide evidence of an increasing temporal mismatch between the time of egg hatch and that of budburst of *Quercus*. *European Journal of Entomology* 111(2): 207–215. DOI: [10.14411/eje.2014.030](https://doi.org/10.14411/eje.2014.030)

On-line irodalom

- Skule B. & Vilhelmsen F. 1997: *Thaumetopoea processionea* L. found in Denmark. Available from <http://www.lepidoptera.dk/process.htm> Letöltve: 2017.05.30.

Érkezett: 2018. május 1.
Közlésre elfogadva: 2018. május 30.

ERDŐTÁRSULÁSOK ÉS FAFAJAIK ÁTRENDEZŐDÉSI LEHETŐSÉGEI A VÁLTOZÓ KLÍMÁBAN

Bartha Dénes¹, Berki Imre², Lengyel Attila^{3,4}, Rasztovits Ervin⁵,
Tiborcz Viktor¹ és Zagyvai Gergely¹

¹ Soproni Egyetem, Növényteni és Természetvédelmi Intézet

² Soproni Egyetem, Környezet- és Földtudományi Intézet

³ MTA Ökológiai Kutatóközpont, Ökológiai és Botanikai Intézet

⁴ Wrocławi Egyetem, Vegetációökológiai Tanszék (Lengyelország)

⁵ NAIK, Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

Kutatásunk sokrétű megközelítést tükröz. Honos fafajaink becsült reakciói alapján elemeztük őshonos fafajú erdőtársulásaink várható átrendeződését. Az elméleti becsüléseket összedolgoztuk az újulatra és mortalitásra vonatkozó terepi vizsgálatok eredményeivel. Potenciális, invázióbiológiai szempontból alacsony kockázatú cserefafajokat kerestünk a várhatóan visszaszoruló fafajaink esetleges helyettesítésére. A honos és inváziós fafajok esetében országos adatokon nyugvó, cserefafajok esetében európai léptékű modellezéssel is becsültük a fajok potenciális és prognosztikus elterjedését. Potenciális természetes erdőtársulás (PTE) adatbázist építettünk fel az ország erdőterületeire az Országos Erdőállomány Adattár alapján, a jelenre és jövőre vonatkozóan egyaránt. Eredményeink alapján az erdő- és erdősztyep-társulások esetében egyaránt a magas összetételi (elegyesség) és szerkezeti diverzitás (gyepekkel, cserjésekkel mozaikoló állományok) jelenthet nagyobb alkalmazkodóképességet. A kiválasztott tájidegen fafajok alkalmazására csak az új körülmények között is vitális, őshonos taxonok és az általuk alkotott (akár újszerű) társulások által nyújtott lehetőségek kimerülését követően kerülhet sor.

Kulcsszavak: klímaváltozás, fafajösszetétel, potenciális elterjedés, cserefafajok, potenciális természetes erdőtársulás.

ESTIMATED SHIFTS OF FOREST COMMUNITIES AND TREE SPECIES DURING CHANGING CLIMATE

Abstract

Our study reflects a multiple approach. On the basis of native tree species estimated response we analyzed the probable rearrangement of our native forest communities. Theoretical estimations were synthesized with result of field work tree mortality and regrowth examination. From the point of view of potential invasion biology, low risk tree species were chosen for possible substitution of our native species. In case of native and invasive species country scale databases, in case of substitute tree species European scale were used for predict future potential distribution. On the basis of National Forestry Database potential natural forest community database of forests were created for the present and future prediction also. According to our results, case of forest and forest steppe habitats high species and structural diversity (fragmented forest stands with grasslands and shrubs) can report higher adaptation. Usage of non native tree species only be possible if new circumstances are not suitable in any case for native habitats and taxa.

Keywords: climate change, tree species composition, potential range, assisted migration, potential natural forest community.

BEVEZETÉS

A globális klímaváltozás jelenleg is érzékelhető erdőkre gyakorolt hatásai a jövőben várhatóan fokozódnak a Kárpát-medencében (Mátyás 2009, Barcza et al. 2011, Bartholy et al. 2011). A termőhelyek átalakulása a melegedés, szárazabbá válás és a tápelemellátottság növekedésének irányába (többlet szén-dioxid és nitrogén) mutat. A prognosztizált folyamatok nyilvánvalóan hatnak a fafajok elterjedésére, ökológiai viselkedésére, a növénytársulások faji, szerkezeti és működési jellemzőire. A témával kapcsolatos magyarországi kutatások elsősorban az utóbbi évtizedek erdészetileg fontos, állományalkotó fafajokat érintő erdőpusztulásaira (lucfenyő, bükk, kocsányos tölgy, kocsánytalan tölgy) koncentráltak (Berki 2007, Kotroczó et al. 2007, Molnár & Lakatos 2007, Somogyi 2007, Mátyás et al. 2010). A várható változások becslése során nem szabad elfeledkezni azonban a többi honos állományalkotó vagy elegy fafajról sem, melyek az erdőtársulásokban ökológiai szempontból fontos szerepet töltenek be és alkalmazkodási lehetőséget kínálhatnak az erdészet és a természetvédelem számára egyaránt.

A bizonyosan bekövetkező, de pontosan nehezen jósolható átrendeződési folyamatok becsléséhez fajokra és társulásokra fókuszáló módszereket egyaránt alkalmaztunk. A módszerek változatosságát a várható folyamatok komplexitása, valamint a becslési bizonytalanságok csökkentésének igénye indokolta.

Növényi tulajdonságokon alapuló értékelési módszer segítségével becsültük a Magyarországon őshonos fafajok érzékenységet és ezek értékeinek különbségeiből a tipizált összetételű erdőtársulás-csoportok várható átrendeződését.

A honos és inváziós fafajok Magyarországra vonatkozó potenciális és prognosztikus elterjedési mintázatát térinformatikai módszerekkel modelleztük kiválasztott példafajok segítségével (virágos kőris, csertölgy, nyugati osterfa), alapozva a Magyarországi Flóratérképezési Program (Király 2003) eredményeként megjelent Magyarország edényes növényfajainak elterjedési atlaszára (Bartha et al. 2015).

Az elméleti jellegű értékeléseket nagyszámú terepi felvétel tapasztalataival egészítettük ki az egyes fafajok érzékenységének pontosabb becslése érdekében. Természetes erdőkben egy fafaj jövőbeli jelenléte vagy hiánya alapvetően azon múlik, hogy fel tud-e újulni. Másfelől főleg az erdőgazdálkodás szempontjából lényeges, hogy Európa jelentős részén a klímaváltozással együtt járó, és várhatóan egyre gyakoribbá váló szélsőségesen száraz nyarak hatására mekkora az adott állomány mortalitása, azaz a törzsszám hány százaléka éri meg a vágásérettségi kort.

Elemzéseink kitértek arra is, hogy lehetséges-e a várhatóan visszaszoruló fafajok cseréje olyan nem őshonos fafajokra, melyek inváziós veszélyt nem jelentenek. Ezek a csereléhetségek, az emberi segítséggel történő „fajvándorlás” (assisted migration, assisted colonisation) lehetőséget jelenthet a probléma megoldásában (Mclachlan et al. 2007, Hoegh-Guldberg et al. 2008, Richardson et al. 2009, Schwartz et al. 2012).

A társulás alapú megközelítés esetében a jelen és a jövő összehasonlítását a potenciális természetes erdőtársulás (PTE) koncepcióra támaszkodva végeztük (Bartha 2005, Bartha

et al. 2014). Hasonló hazai kutatást jelent a MÉTA terepi felmérései alapján felépített, a potenciális természetközeli vegetációra vonatkozó térképes becslés, amely a szerzők tervei szerint a jövőben szintén összeköthetővé válik prognosztikus klímaadatokkal (Molnár et al. 2008, Somodi et al. 2017).

A jövőben várhatóan olyan termőhelytípus változatok alakulhatnak ki, melyekhez nem illeszkednek a jelenleg használatos erdőtársulás-csoportok rendszerébe tartozó kategóriák. A társulások fafajainak eltérő érzékenységből adódó dinamika szintén olyan közösségeket tehet potenciálissá, melyekre jelenleg nincsenek definíciók. A jövőre vonatkozó térinformatikai adatbázis kategóriarendszere esetében azért választottuk mégis alapnak a jelenleg használt erdőtársulás csoportokat, mert a PTE előfordulási mintázat átrendeződésének célja nem a potenciális fajösszetétel változásának nagyon pontos modellezése (ez sok esetben az aktuális állapotokra vonatkozóan is rendkívül nehéz feladat), hanem olyan országos kép felvázolása, mely alapján a szakmai közönség – a jelenlegi erdőtársulások rendszerének ismeretében – a termőhelyek változásának irányáról és mértékéről reális értékelést kap.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Erdőtársulások átrendeződési lehetőségei a fajok eltérő érzékenysége alapján

Elemzésünk során a Magyarországon bizonyítottan őshonos fajok mellett fajlistánkra kerültek olyan fajok is, melyek őshonossága nem tisztázott (pl. szelídgesztenye) vagy korábbi tudományos munkákban komolyabban felvetődött (pl. közönséges jegenyefenyő).

Összegyűjtöttük azokat a növényi tulajdonságokat, melyek összefüggésbe hozhatók a fajok klímaváltozással kapcsolatos válaszreakcióival. Az értékelésbe bevont attribútumok négy csoportba sorolhatók: társuláspreferencia, horizontális és vertikális elterjedés, ökológiai igények, alkalmazkodóképesség. A társuláspreferencia során a fajokhoz tipikus erdőtársulásokat rendeltünk. A horizontális és vertikális elterjedés komponensei: areatípus, areaperemi helyzet, areadiszjunkttság, magassági elterjedés. Vizsgált ökológiai igények: kontinentalitás, hőigény, vízigény. Az alkalmazkodóképesség értékelése az életmenet stratégia, a szukcessziós jelleg, a szociális magatartás típus, a degradációtűrés, a vegetatív megmaradóképesség és a vegetatív terjedőképesség alapján történt.

Az értékelés során az egyes jellemzők kategóriái negatív és pozitív értékeket kaptak a várható klimatikus változásokkal kapcsolatos érzékenység szerint, melyeket súlyoztunk és összegeztünk a korábban említett négy értékelési szempontnak megfelelően. Attól függően, hogy a négy fő attribútum csoportból hány esetében kapott kiugró értékeket az adott faj, a következő kategóriákba soroltuk őket: „erősen érzékeny”, „mérsékelten érzékeny”, „mérsékelten pozitív” és „erősen pozitív reakció” a klímaváltozás hatásaira.

A fajokhoz rendelt érzékenységi kategóriák önállóan csak általánosságban tekinthetők érvényesnek. A kapott adatbázis praktikus módon akkor válik alkalmazhatóvá, ha azt ösz-



szedolgozzuk a Magyarországon jellemző erdőtársulások fajaj összetételét tartalmazó adatbázissal, melyet Bartha (2012) munkája alapján állítottunk össze. Ebben az esetben természetesen egy termőhelyen zajló előrevetített vegetációdinamikai folyamatokra tudunk következtetni az adatokból. A fafajok értékei, érzékenységi kategóriái közötti kontrasztból becsülhetővé válnak az elegyarány változások, dominancia viszonyok átalakulásai. A társulások változásainak becsléséhez az érzékenységi kategóriákon kívül figyelembe kell venni a társulásra jellemző termőhelyi adottságokat (klímarégió, vízháztartás, kitettség, egyéb edafikus tényezők), az egyes fajok életmenet tulajdonságait, szukcessziós jellegét, ökológiai tűrőképességét, élőhely spektrumát, a társulások hazai előfordulásainak érzékenységét, becsült regenerációs képességét, valamint az aktuálisan tapasztalható átalakulási folyamatokat.

Erdőtársulások átrendeződési folyamatai terepi vizsgálatok alapján

Faállomány egészségügyi- mortalitási, cönológiai, valamint a természetes felújulást megfigyelő vizsgálatokat végeztünk az elmúlt években az ország különböző klímájú tájain. Az eddig felmért 500 erdőrészlet közül 180-200 száraz erdő volt, amelyekben nemcsak a szárazságra érzékeny fafajok vizsgálatára koncentráltunk, hanem figyelemmel voltunk a szárazságtoleráns fafajok vitalitására, felújulására, a lombkorona szintbe növekedésükre is.

A kutatás részeként 50-60 évvel ezelőtti cönológiai felvételek megismétlését végeztük el. Az újulat létének, vagy hiányának több évtizedes időtávú összevetése tekintetében lényeges, hogy az adott erdőrészleten belül ugyanolyan termőhelyi (domborzati) – tehát mikroklímatis – adottságok között történt a megismételt felvételezés, mint 50-60 évvel ezelőtt. A kocsánytalan tölgy felújulása tekintetében lényeges volt annak figyelembe vétele, hogy az elődök felvételében volt-e fiatal kocsánytalan tölgy a felső cserjeszintben (B1) vagy az alsó lombkoronaszintben (A2), illetve volt-e kocsánytalan tölgy a felső lombkoronaszintben (A1). Olyan helyszínek is voltak, hogy az elődöknél a 20 x 20 méteres kvadrátban volt kocsánytalan tölgy újulat, de az A1-szintben nem volt. A mi felvételeinken, ahol nem volt kocsánytalan tölgy az A1-ben, ott sehol sem volt újulata. Rögzítettük azt is, hogy volt, vagy van-e tölgy- (vagy más fafaj) pusztulás az egyes helyszíneken. Ha volt pusztulás, akkor jegyzőkönyveztük, hogy milyen fafajok újulnak fel a kialakult kisebb-nagyobb lékekben.

Természetes újulatnak tekintettük a B1-, illetve az A2-szintbe felnőtt egyedeket. Az aljnövényszerű (C) szintben levő magoncokat azért nem tekintettük (kutatásunk szempontjából) újulatnak, mert jóllehet számos állományban tapasztaltunk pl. viszonylag bőséges kocsánytalan tölgy magonc borítást, de a B1-, é A2- szintben nem, vagy elvétve láttunk néhány egyed.

A cönológiai vizsgálatok mellett felújulási és mortalitási vizsgálatokat is végeztünk a dendometriai és állományegészségügyi vizsgálatokra kiválasztott kocsánytalan tölgyesben az országot átívelő klímagradiens mentén.

Minden alkalmazott módszer esetében, a vizsgált területeken különös figyelemmel voltunk a lécek, erdőszélek és vadkizárt állományrészek felújulásának vizsgálatára. Egy természetes szerkezetű erdő (őserdő) sosem zárt lombkoronájú, mivel az idős és/vagy széldöntött fák helyén a lécek keletkeznek, amelyekben van annyi fény, hogy a fényigényesebb fajok is fel tudnak újulni. Az egykorú gazdasági erdők lombkoronája – ezzel szemben – viszonylag zárt, és a fényigényes tölgyfajok még jó magtermő évek után is csak az öregerdő levágása utáni fénygazdag környezetben tudnak valamelyest felújulni. A természetes felújulás vizsgálatát a tölgyek esetében ezért a nagyobb lécekre, erdőszegélyekre koncentráltuk.

Tekintettel az évtizedek alatt többszörösére növekedett vadlétszámra, különösen a vad-disznóállományra, kerítéssel elzárt tölgyesek felújulását is vizsgáltuk, ráadásul fénygazdag lécekben létesített vadkizárt területeken is.

Potenciális cserefajok értékelése

A potenciális cserefajok leválogatása során értékeltük az összes olyan európai fajtát, mely Magyarországon nem tekinthető őshonosnak (Bartha 1999). A cserefaj és faj szétválasztást szintén az idézett irodalom alapján tettük meg. A tanulmány korábbi fejezetében értékelt őshonos fajok listája kissé átfed a potenciális cserefajok listájával, részben az őshonosság szempontjából kétséges fajok, részben az előzőekben ismertetett Magyarországon őshonos, de egyes tájainkon tájidegen cserefajok alkalmazhatóságának vizsgálata miatt (pl. ezüst hárs, szelídgesztenye, keleti gyertyán). Az utóbbi kiegészítéshez olyan fajokat soroltunk, melyek areája a Kárpát-medencében éri el északi határát. Felvettünk a listára olyan taxonokat is, melyek Magyarországon őshonos fajok balkáni elterjedésű alfajai.

A kialakított európai taxon lista elemzése az őshonos fajok korábbi fejezetben ismertetett módszeréhez hasonlóan történt. A taxonok korábban tárgyalt jellemzőit kiegészítettük olyan attribútumokkal, melyek inváziós kockázatuk minél pontosabb becslését célozzák. A kategorizálásnál alkalmazott skálák egyes jellemzők esetében részben vagy teljesen megegyeznek az őshonos fajok elemzése esetében használtakkal, bizonyos esetekben új kategória rendszer alkalmazására került sor.

A potenciális cserefajok értékelt jellemzőik és csoportjaik a következők:

Alkalmazhatóság: Társuláspreferencia („Társuláspreferencia” érték), Ökológiai igények („Vízigény” érték + „Hőigény” érték + „Kontinentalitás” érték), Vertikális és horizontális elterjedés („Areatípus” érték + „Magassági elterjedés” érték), Ökomorfológiai tulajdonságok („Ökomorfológiai” érték).

Kockázatbecslés: Kockázati érték („Életmenet stratégia, szukcessziós jelleg” érték × 2 + „Degradációtűrés” érték + „Vegetatív terjedőképesség” érték × 2 + „Vegetatív megmaradóképesség” érték + „Magterjesztési mód” érték + „Magbank típus” érték)



A taxonlista szűrését az alkalmazhatóságot, valamint a kockázati veszélyt jellemző számértékek alapján végeztük, így elkülöníthetővé váltak az alkalmas, illetve nem alkalmas, és a kockázatos, illetve kevésbé kockázatos fajok.

A kapott fajlistát szükséges a fagyűrésre vonatkozó adatok segítségével leszűrní, mivel a szubmediterrán elterjedésű fajok esetében a fagy az egyik legjelentősebb limitáló tényező. A fagyűrési értékeket szakirodalmi adatok (Roloff & Bärtels 2006) segítségével, illetve az elterjedési területeket a fagyűrési térképekkel összehasonlítva határoztuk meg.

Kiválasztott fajok esetében (keleti gyertyán, komlógyertyán, magyar tölgy, magyaltölgy) európai areájuk jelenlegi klimatikus adatai alapján térinformatikai módszerekkel modelleztük aktuális és jövőbeli potenciális elterjedésüket. Az elemzés jelenlegi klímája az 1960-90-es időszak átlagértékeiből származtatott adatokon nyugszik (URL1, Hamann 2013). A jövőbeni klíma az RCP 4.5, 2041-2070-re vonatkozó modelladataiból származik, amit a német Max Planck Institute készített (AOGCM name: MPI-ESM-LR). Mivel a fajok az országhatáron túliak, így szükséges volt egy európai léptékű konzisztens klímaadatbázisra. A fajok elterjedési adatainak forrása Mauri (2017) adatbázisa, amely 21 európai ország közel 600.000 validált elterjedési adatát tartalmazza összesen 200 fajra vonatkozóan. A modellezés „R” környezetben történt a maximum entrópia módszer felhasználásával.

Fajok potenciális elterjedési mintázatainak modellezése

A magyarországi flóratérképezés alapegysége a közép-európai flóratérképezés (Niklfeld 1971) által használt hálórendszer, mely a földrajzi fókuszra támaszkodik. A felmérési egység az alapmezők negyedelésével jött létre, az alapmezőnegyedek (kvadrátok) mérete így 6,25 km × 5,55 km (Király & Horváth 2000). Ezek a kvadrátok képezték a felmérés alapegységét, ezért a többi vizsgálandó háttértényezőt ezekre az alapmező negyedekre kellett vonatkoztatnunk. A domborzat, talaj, klíma paraméterek és az aktuális elterjedés között kerestünk összefüggéseket. A domborzat esetében a kvadrátokhoz rendeltük a magasságkülönbségeket, és a magassági adatok középértékét. A talajtani tényezők hozzárendelése a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete által összeállított AGROTOPO adatbázis alapján történt. A talajtani tényezők közül a talaj kémhatása és mésztartalma befolyásoló tényező az egyes növényfajok elterjedésében, ezért kvadrát szinten határoztuk meg a különböző kémhatású és mésztartalmú talajok (erősen savanyú, gyengén savanyú, felszíntől karbonátos, szikes talajok) területarányát. A limitáló környezeti tényezők megállapításához további klímaadatokat vontunk be az elemzésbe: erdészeti aszályosság index (FAI) (Führer 2010), éves csapadékösszegek átlaga ($P_{\text{éves}}$), nyári hónapok csapadékösszegének átlaga ($P_{\text{nyári}}$), éves hőmérsékletek átlaga ($T_{\text{éves}}$), nyári hónapok hőmérsékletének átlaga ($T_{\text{nyári}}$).

Az abiotikus tényezőkön túl az elemzés során figyelembe vettük a biotikus tényezőket is. Az általunk kiválasztott legalkalmasabb módszernek az R statisztikai programcsomagban található beals smoothing elemzés (De Cáceres & Legendre 2008) bizonyult. Kiválasztottuk

a flóratérképezési adatbázisban szereplő 32 leggyakoribb taxont, majd leválasztottuk azon kvadrátokat, melyekben a leggyakoribb taxonok 90%-a előfordul, ezen módszer segítségével szűrtük le a kontroll kvadrátokat. A leggyakoribb fajokat a felmérők ismerik, így a heterogén fajtudás ezzel a módszerrel többé-kevésbé kizárható. A leggyakoribb fajok potenciálisan a kvadrátokban nagy valószínűséggel fordulnak elő, tehát feltételezhetjük, hogy bizonyos mértékben függetlenek a környezeti háttérváltozóktól. Az elemzés a taxonok asszociáltságán alapul, tehát a kontroll kvadrátokban kiszámoltuk, hogy az egyes taxonok milyen valószínűséggel fordulnak elő egymáshoz viszonyítva. Ezekből a valószínűségekből lehetett vonatkoztatni a jósolt fajkészletre, illetve a taxonok jósolt előfordulására. Az elemzésnél azon kvadrátokban fogadtuk el a jósolt előfordulást, ahol legalább 90%-os valószínűséggel fordulhat elő az adott taxon. Eredményként minden egyes taxonra kaptunk egy jósolt előfordulást, a kvadrátokra egy jósolt teljes fajkészletet.

A kiválasztott fás szárú taxonokra ökológiai limitáló faktorokat állapítottunk meg, melyek meghatározó szerepet játszhatnak az elterjedésben. Egy döntési fa segítségével a limitáló tényezők között prioritási sorrendet állítottunk fel, majd így szűrtük le azon kvadrátokat, melyek potenciálisan alkalmasak lehetnek az adott faj megjelenésére.

Potenciális természetes erdőtársulások változásának becslése

A potenciális természetes erdőtársulások aktuális elterjedési mintázatát tükröző térinformatikai adatbázist, mely a kiinduló állapotokat jellemzi és a viszonyítási alapot jelenti, Bartha et al. (2014) munkájára alapozva építettük fel. Az adatbázist az idézett tanulmányban leírt állapotához képest továbbfejlesztettük, erdészeti tájanként javítottuk a helyi sajátosságoknak megfelelően, valamint korrigáltuk azokat a hibákat (pl. nem létező termőhelytípus változatok), melyek a kiinduló üzemptervi adatokból származnak.

A klimatikus változások mértékének becsléséhez minden erdőrészelethez hozzárendeltük az 1981-2010 és a 2041-2070 közötti erdészeti aszályossági index (FAI) értékét, majd kiszámítottuk különbségüket.

Erdőtársulás-csoportokból álló változási sorokat állítottunk fel, a kiinduló PTE adatbázis rendszerét felhasználva, bizonyos társulások esetében azokat módosítva, átmeneti kategóriákkal kibővítve. Az erdőrészeletek PTE kategóriáinak jövőre vonatkozó módosítása a FAI értékek különbségén (Δ FAI) alapszik:

- Bükkösök $\rightarrow \Delta$ FAI= 0,625 \rightarrow Bükkösök x Gyertyános-kocsánytalan tölgyesek $\rightarrow \Delta$ FAI= 0,625 \rightarrow Gyertyános-kocsánytalan tölgyesek $\rightarrow \Delta$ FAI= 0,625 \rightarrow Gyertyános-kocsánytalan tölgyesek x Cseres-kocsánytalan tölgyesek $\rightarrow \Delta$ FAI= 0,625 \rightarrow Cseres-kocsánytalan tölgyesek $\rightarrow \Delta$ FAI=0,3125 \rightarrow Cseres-kocsánytalan tölgyesek x Mész- és melegkedvelő tölgyesek $\rightarrow \Delta$ FAI=0,3125 \rightarrow Mész- és melegkedvelő tölgyesek $\rightarrow \Delta$ FAI=0,3125 \rightarrow Mész- és melegkedvelő tölgyesek x Bokorerdő $\rightarrow \Delta$ FAI=0,3125 \rightarrow Bokorerdő $\rightarrow \Delta$ FAI=1,25 \rightarrow nem erdő termőhely.



- Mészkerülő bükkösök $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 0,625 \rightarrow$ Mészkerülő bükkösök x Mészkerülő gyertyános-tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 0,625 \rightarrow$ Mészkerülő gyertyános-tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 0,625 \rightarrow$ Mészkerülő gyertyános-tölgyesek x Mészkerülő tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 0,625 \rightarrow$ Zárt mészkerülő tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ Nyílt mészkerülő tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Zárt lösztölgyesek ($\text{FAI}_{1981-2010} \leq 7.25$) $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ Nyílt lösztölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Nyílt lösztölgyesek ($\text{FAI}_{1981-2010} > 7.25$) $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Zárt homoki tölgyesek ($\text{FAI}_{1981-2010} \leq 7.25$) $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ Nyílt homoki tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Nyílt homoki tölgyesek ($\text{FAI}_{1981-2010} \rightarrow 7.25$) $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Borókás-nyárasok $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Sziki tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ nem erdő termőhely.
- Gyertyános-kocsányos tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ Zárt kocsányos tölgyesek.
- Cseres-kocsányos tölgyesek $\rightarrow \Delta\text{FAI} = 1,25 \rightarrow$ Nyílt cseres-kocsányos tölgyesek.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Erdőtársulások átrendeződési lehetőségei a fafajok eltérő érzékenysége alapján

A várhatóan visszaszoruló vagy előnyhöz jutó fafajok értékelése erdőtársulás csoportonként lehetséges, olyan módon, hogy vagy az értékelési szempontok alapján kapott pontokat vetjük össze vagy a 4 szempontot együttesen jellemző kategóriák kontrasztját elemezzük (1. táblázat).

A várható átrendeződési folyamatok két módon értelmezhetők. Az egyik lehetőség az erdőtársulások tipikus komponens fafajaiból kiindulni és azok egymáshoz viszonyított érzékenységét mérlegelni. Másik alkalmazkodási út lehet, olyan fajok előretörése vagy előnyben részesítése, melyek aktuálisan nem illeszkednek az őshonos fafajú társulásokba, de környezetükben elérhető távolságban vannak olyan erdőtársulások, melyek fafajai alkalmasabbnak értékelhetők a változó klímában. Az első lehetőség enyhébb, a második drasztikusabb éghajlati változások esetén kaphat nagyobb hangsúlyt.

Az átrendeződési lehetőségeket a legfontosabb többletvízhatáshoz nem kötődő erdőtársulás-csoportokat áttekintve, néhány jellemző példa segítségével szemléltetjük. A becslést változások jövőbeli megvalósulásának minden esetben feltétele az erdőállományok természeteshez közelítő elegyessége. Országos és regionális kutatások, valamint az Országos Erdőállomány Adattár adatai szerint, az őshonos fafajú erdőállományaink elegyességi mutatói jelentősen elmaradnak ettől, az alkalmazkodást lehetővé tevő szinttől (Bartha et al. 2003, Standovár et al. 2017).



	Dombvidéki és középhegységi bükkös	Dombvidéki és középhegységi GY-KTT tölgyes	Dombvidéki és középhegységi CS-KTT tölgyes	Mész- és melegkedvelő tölgyes	Bokorerdők	Mészkerülő bükkös	Mészkerülő GY-KTT tölgyes	Mészkerülő tölgyes	Sziklaerdők	Szurdokerdők	Törmeléklejtő-erdők	Mészkerülő fenyvesek	Mészkedvelő fenyves	Homoki erdőfenyves	Fenyőelegyes-tölgyes	Lösztölgyesek	Sziki tölgyesek	Homoki tölgyesek	Borókás-nyárasok	Sík- és dombvidéki GY-KST tölgyes	Sík- és dombvidéki CS-KST tölgyes	
<i>Castanea sativa</i>		R				R	R	RSZ														
<i>Cerasus avium</i>	SZ	E								E	E										E	
<i>Cerasus mahaleb</i>					E																	
<i>Fagus sylvatica</i>	D	E				D	SZ	SZ	E,D	SZ	SZ				D							
<i>Fraxinus angustifolia</i> <i>ssp. danubialis</i>																	E				R	
<i>Fraxinus excelsior</i>	E	E			Ö				E	E	E											
<i>Fraxinus ornus</i>			SZ	R	D				E	R, Ö	R			E								
<i>Malus sylvestris</i>																SZ					E	
<i>Pinus sylvestris</i>						R	RSZ	R	D			D	D	D	D							SZ
<i>Populus alba</i>																			E	D		
<i>Populus tremula</i>	SZ					E	E	SZ				E			E					SZ		
<i>Pyrus pyraeaster</i>			E	E												E	E	E	SZ			E
<i>Quercus cerris</i>		E	D	R-D	E			SZ						E		E						D
<i>Quercus petraea</i>	SZ	D	D	D	SZ	E	D	D	E						D	E					SZ	SZ

	Dombvidéki és középhegységi bükkös	Dombvidéki és középhegységi GY-KTT tölgyes	Dombvidéki és középhegységi CS-KTT tölgyes	Mész- és melegkedvelő tölgyes	Bokorerdők	Mészkerülő bükkös	Mészkerülő GY-KTT tölgyes	Mészkerülő tölgyes	Sziklaerdők	Szurdokerdők	Törmelékjítő-erdők	Mészkerülő fenyvesek	Mészkedvelő fenyves	Homoki erdefenyves	Fenyőelegyes-tölgyes	Lószőtölgyesek	Sziki tölgyesek	Homoki tölgyesek	Borókás-nyárasok	Sík- és dombvidéki GY-KST tölgyes	Sík- és dombvidéki CS-KST tölgyes	
<i>Quercus pubescens</i>			SZ	D	D				SZ													SZ
<i>Quercus robur</i>														E	D	D	D	D	SZ	D	D	
<i>Quercus virgiliana</i>			SZ	D												SZ		SZ				
<i>Salix caprea</i>	SZ																					
<i>Sorbus aria</i>									E		E		SZ									
<i>Sorbus aucuparia</i>						E	E	SZ	E			E										
<i>Sorbus domestica</i>			E	E	E																	
<i>Sorbus torminalis</i>			E	E	E				E													
<i>Tilia cordata</i>	SZ	E	SZ				E		E	E	E										E	
<i>Tilia plathyphyllos</i>	E	SZ							E	E	E											
<i>Tilia tomentosa</i>	R	R	R	R						R, Ö	R										R	
<i>Ulmus glabra</i>	E								SZ	E												
<i>Ulmus minor</i>			E	E	SZ										E	E	E			E	E	

Az elemzés alapján a klímaregionális üde erdőtársulás-csoportok (bükkösök, gyertyános-kocsánytalan tölgyesek) esetében potenciálisan előnyhöz jutó fafajok közé tartozik a korai juhar (*Acer platanoides*), a madárcseresznye (*Cerasus avium*) és a kontinentalitást jobban elviselő kislevelű hárs (*Tilia cordata*). A regionális jelentőségű, balkáni areával rendelkező ezüst hárs (*Tilia tomentosa*) tág élőhelypreferenciája szintén jó alkalmazkodási képességre utal. A közönséges bükk (*Fagus sylvatica*) várható visszaszorulásával, bükkösökben a nagylevelű hárs (*Tilia platyphyllos*) és a hegyi juhar (*Acer pseudoplatanus*) is előtérbe kerülhet.

A cseres-kocsánytalan tölgyesek, valamint a mész- és melegkedvelő tölgyesek esetében a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*), mint fontos komponens fafaj visszaszorulása prognosztizálható. A jellemző elegyfajok közül pozitív reakció várható a tatár juhar (*Acer tataricum*), virágos kőris (*Fraxinus ornus*), vadvirág (*Pyrus pyraeaster*), molyhos tölgy (*Quercus pubescens*), házi berkenye (*Sorbus domestica*) és barkócaberkenye (*Sorbus torminalis*) esetében. A mész- és melegkedvelő tölgyesek nagyobb fajdiverzitása, valamint az érzékeny kocsánytalan tölgy alacsonyabb elegyaránya nagyobb lehetőséget enged a meglévő fajkészleten alapuló spontán vagy támogatott kompozicionális átrendeződésre.

Az erdők számára határtermőhelyen fekvő, természetes módon felnyíló bokorerdők és erdőssztyep erdők (lösztölgyesek, sziki tölgyesek, homoki tölgyesek, borókás-nyárasok) esetében különösen fontos a honos fafajokra támaszkodó alkalmazkodás, hiszen ennek alternatívája csak gyepek arányának növekedése lehet. Természetvédelmi szempontból nem feltétlen előnytelen forgatókönyv a nagyobb vertikális szerkezeti elemek arányainak eltolódása az erdő-gyep élőhelykomplexen belül, de előnyös, ha a fafajok egyedei, csoportjai meghatározó elemei maradnak a vegetációnak, alkalmazkodva a termőhely mozaikok szerkezetéhez. A növényi fajdiverzitás szempontjából az erdőfoltok, facsoportok és a gyepek között kialakuló szegélytársulások kiemelkedő jelentőségűek.

A szikladomborzatú erdők változatos fajkészlete általánosságban jó esélyt ad a spontán alkalmazkodásra. Ennek gyakorlati megvalósulását akadályozhatja, hogy ezek az élőhelyfoltok sokszor kis kiterjedésűek és a tipizált fajkészlet csak egy kisebb része van jelen az állományokban. Különösen a sziklaerdőkre és a törmeléklejtő-erdőkre érvényes, hogy a változatos kitétség változatos fajösszetételt is jelenthet, ami a klíma átalakulása esetén fokozottabb sérülékenységgel jár. A szurdokerdők létrejöttét lehetővé tevő, a mikroklimát jelentősen befolyásoló edafikus tényezők a jövőben is érvényesülni fognak, de a módosuló makro- és mezoklimához képest viszonyítva. A szikladomborzatú erdők példája jól mutatja, hogy az erdőtársulások természetes alkalmazkodási képességének becsléséhez az állományok tényleges összetételét és a tájökológiai szempontokat egyaránt figyelembe kell venni.

Az előbbieken tárgyalt összes erdőtársulás-csoport esetében kiemelendő a mezei juhar (*Acer campestre*), mely elegyfajként a gyertyános-tölgyesektől a bokorerdőkig és erdőssztyep erdőkig megtalálható. A széles élőhelyspektrum és a magas alkalmazkodóképesség arra utal, hogy változatos termőhelyi feltételek között juthat nagyobb szerephez a klímaváltozás következtében.

A fajszegény mészkerülő erdők erdőtársulás-csoporton belüli rugalmassága mérsékelt, kevésbé érzékeny elegyfajainak egy része pionír karakterű (közönséges nyír, rezgő nyár). Számottevő elegyarány eltolódás esetén már mészkerülő bükkös helyett mészkerülő gyertyános-kocsánytalan tölgyesként vagy mészkerülő tölgyesként határozhatjuk meg az erdőállományt. A mészkerülő erdők állományainak jelentős részének esetében azzal is számolni kell, hogy a klíma változásával párhuzamosan, tájtörténeti okokból folytatódik a mészkerülő jelleg csökkenésének folyamata. Ennek következménye, hogy a klímaregionális erdőtársulások gazdagabb fajkészletének egyes fajtái már alkalmazhatóak lennének a termőhelyen, de nem biztos, hogy elérhető távolságban vannak a gyors, spontán betelepüléshez.

Erdőtársulások átrendeződési folyamatai terepi vizsgálatok alapján

Humid klímán az erdő „belső szukcessziójának” eredményeképpen még a bükk fel tud nőni a lombkoronaszintbe. A szárazabb tájak felé haladva a gyertyán egészen a 32-33-as Ellenberg indexű termőhelyekig jelen van, viszont e mezofil klímakategóriában jellemző rá a csúcscsúszáradás.

A madárcseresznye viszont jó egészségügyi állapotban megtalálható még a 35-ös Ellenberg-index értékig, igaz tömegessége messze elmarad a gyertyán mögött. Az akác csak a mezofil erdőkben, és csak kevés egyeddel jelenik meg a lombkorona szintben. A kocsánytalan tölgy felújulása még saját – viszonylag humid – állományaiban sem történik meg, leginkább a fényhiány miatt ugyanakkor néhány fényben gazdagabb és savanyú talajú, szárazságra hajló termőhelyen kinő a cserjeszintből. Továbbá a kocsánytalan tölgy felújulásának megítélése nem nélkülözheti a kerített vadkizárásos területek fás szukcessziójának figyelembe vételét. A kislevelű hárs virulensen nő föl a felső lombkoronaszintbe (A2) számos mezofil termőhelyen. A legszárazabb erdőkben kis elegyaránnyal jelenik meg a mezei szil, és meglepő, hogy néhány helyen a korai juhar is. A mezofil és a száraz erdők többségében a mezei juhar törekszik fává nőni a kisebb-nagyobb lékekben, a legszárazabb termőhelyeken pedig társul hozzá a virágos kőris és a sekély talajú erdőkben a mezei juharnál is nagyobb elegyaránnyal nő fává a kiszáradó tölgy egyedek helyén.

Adataink előzetes kiértékelése alapján is egyértelműen látszik, hogy a jelenlegi még viszonylag humid és mezofil tölgyesekben és erdei fenyvesekben a gyertyán felújulása jelentős. A száraz tölgyesek, fekete fenyvesek termőhelyein a mezei juhar és a virágos kőris képes spontán állományokat alkotni.

A humid tájakon egy-két „főfafaj” is elegyfajaként is feltűnik, így pl. kocsánytalan tölgyesben a gyertyánon kívül a bükk, erdei fenyvesben pedig a kocsánytalan tölgy és a bükk is jól tolerálja a klímaváltozást, így e fajok a lombkorona szintbe nőttek.

Potenciális cserefajok értékelése

Fafajok értékelése növényi tulajdonságok adatbázisai alapján

Az előzőekben ismertetett módszerünkkel a következő fafajokat határoltuk le:

- Görög jegenyefenyő (*Abies cephalonica*)
- Szelídgesztenye (*Castanea sativa*)
- Török mogyoró (*Corylus colurna*)
- Balkáni kőris (*Fraxinus pallisiae*)
- Magas kőris alfaj (*Fraxinus excelsior* subsp. *coriarifolia*)
- Alacsony vadalma (*Malus dasyphylla*)
- Keleti platán (*Platanus orientalis*)
- Vastaggallyú körte (*Pyrus nivalis*)
- Magyar tölgy (*Quercus frainetto*)
- Hartwiss-tölgy (*Quercus hartwissiana*)
- Kocsányos tölgy alfaj (*Quercus robur* subsp. *broteroana*)
- Dárdáskaréjú kocsánytalan tölgy (*Quercus dalechampii*)
- Szürke (hamvas) tölgy (*Quercus pedunculiflora*)
- Erdélyi kocsánytalan tölgy (*Quercus polycarpa*)
- Szicíliai tölgy (*Quercus sicula*)
- Déli berkenye (*Sorbus graeca*)
- Begónialevelű hárs (*Tilia dasystyla*)
- Nagylevelű hárs alfaj (*Tilia platyphyllos* subsp. *pseudorubra*)
- Krími szil (*Ulmus elliptica*)

Az alábbi fajok nem feleltek meg a leválogatási kritériumoknak, áttekintésük és alapsabb vizsgálatuk mégis indokolt. Azonos nemzetségbe tartoznak vagy közeli rokonságban állnak olyan fontos magyarországi fafajokkal, melyek visszaszorulása, társulásaik átrendeződése a jövőben valószínűsíthető.

- Komlógyertyán (*Ostrya carpinifolia*)
- Keleti gyertyán (*Carpinus orientalis*)
- Balkáni bükk (*Fagus moesiaca*)
- Keleti bükk (*Fagus orientalis*)
- Tompakaréjú juhar (*Acer obtusatum*)
- Keskenylevelű kőris alfaj (*Fraxinus angustifolia* subsp. *angustifolia*)
- Keskenylevelű kőris alfaj (*Fraxinus angustifolia* subsp. *oxycarpa*)
- Francia juhar (*Acer monspessulanum*)
- Illír juhar (*Acer hyrcanum*)
- Hegyi juhar alfaj (*Acer pseudoplatanus* subsp. *subobtusatum*)

A két fajlistában felsorolt fajok tovább szűrhetők és potenciális hasznosíthatóság szerint csoportosíthatók.

A közönséges jegenyefenyő (*Abies alba*) hazánkban számottevő gazdasági jelentőséggel nem rendelkezik, ezért a fajt potenciálisan helyettesítő görög jegenyefenyő (*Abies cephalonica*) tényleges alkalmazása indokolatlan.

Bár leválogatási szempontjainknak megfelelt a Hartwiss-tölgy (*Quercus hartwissiana*) és a szicíliai tölgy (*Quercus sicula*), erős mediterrán karakterük és növényföldrajzi helyzetük okán legfeljebb csak hosszú távon jöhetnek szóba cserefajként.

Bizonyos fajok Magyarországon kis populációkkal aktuálisan is előfordulnak vagy természetvédelmi, kultúrtörténeti szempontból fontosak. E fajok elegyként történő ültetése a fajok védelme szempontjából kívánatos, de erdészeti szempontból kisebb jelentőséggel rendelkeznek. Ebbe a csoportba sorolható a szelidgesztenye (*Castanea sativa*), az alacsony vadalma (*Malus dasycphylla*), a vastaggallyú körte (*Pyrus nivalis*) és a déli berkenye (*Sorbus graeca*).

Az *Acer*, *Fraxinus* és *Ulmus* nemzetség nem őshonos fajokhoz sorolható taxonjainak (*Acer obtusatum*, *Acer monspessulanum*, *Acer hyrcanum*, *Fraxinus pallisiae*, *Ulmus elliptica*) mesterséges migrációval történő terjesztése, hatékony anemochor magterjesztésük és nemzetségük más, idegenhonos fajai esetében tapasztalható magas inváziós képessége miatt fokozott óvatosságot és további vizsgálatokat igényel.

A komlógyertyán (*Ostrya carpinifolia*), a keleti gyertyán (*Carpinus orientalis*) és az előző csoportban is említett francia juhar (*Acer monspessulanum*) mesterséges migrációba való részvételét faanyaguk alacsony hasznosíthatóságán kívül az is akadályozza, hogy a helyettesítendő fajok (pl. közönséges gyertyán) jellemző élőhelyei a potenciális cserefajokétól nagyban eltérő összetételűek. Ezek az élőhelyek legtöbbször több klímarégióval eltolva vagy jóval üdőbb körülmények között helyezkednek el, így az eredetihez hasonló erdőtársulások stabilizálása ezekkel a fajokkal nem lehetséges.

Feltételelesen, további vizsgálatokat követően javasolható taxonok a török mogyoró (*Corylus colurna*), keleti platán (*Platanus orientalis*), begónialevelű hárs (*Tilia dasystyla*). A török mogyoró inváziós potenciálja a tölgyekétől magasabb, de még mindig viszonylag alacsonynak mondható. Óvatosságra ad okot, hogy megfigyelések szerint egyes gyűjteményes kertekben erőteljesen, már szinte gyomosító jelleggel újul, így ennek a kérdéskörnek a megnyugtató tisztázása még további vizsgálatokat igényel. A közönséges mogyoróval (*Corylus avellana*) hibridizálódik, így genetikai állományára veszélyt jelenthet.

A legnagyobb biztonsággal javasolható taxonokat két csoportra oszthatjuk. Egyik csoportba azok az alfaj szintű, dél-európai elterjedésű taxonok tartoznak, melyek rendszertanilag közel állnak a helyettesítendő hazai alfajokhoz, inváziós kockázatuk mérsékelt, felhasználási lehetőségeik a hazai taxonokhoz hasonlóak. A hazai alfajktól való genetikai különbözőségük elsősorban rövidtávon (erdészeti léptékban) jelenthet alkalmazkodási lehetőséget az erdőgazdálkodás számára. A csoportba a következő taxonok tartoznak: *Fraxinus ex-*

celsior subsp. *coriaria* folia, *Quercus robur* subsp. *broteroana*, *Tilia platyphyllos* subsp. *pseudorubra*, *Fraxinus angustifolia* subsp. *angustifolia*, *Fraxinus angustifolia* subsp. *oxycarpa*, *Acer pseudoplatanus* subsp. *subobtusatum*.

A mesterséges migráció keretében eltérő fajokkal történő fafajcsere az alábbi fajok esetében javasolható: magyar tölgy (*Quercus frainetto*), erdélyi kocsánytalan tölgy (*Quercus polycarpa*), szürke (hamvas) tölgy (*Quercus pedunculiflora*), keleti bükk (*Fagus orientalis*), balkáni bükk (*Fagus moesiaca*). Életmenet stratégiájukból, szukcessziós jellegükből (K-stratégista) adódóan és a tölgyekre, bükkökre jellemző terjedési módszerük miatt számottevő inváziós potenciállal nem rendelkeznek.

A szürke tölgy alkalmas lehet a kocsányos tölgy (*Quercus robur*) pótlására azokon az alföldi termőhelyeken, melyeken a klimatikus változások és / vagy a talajvíz szintjének drasztikus süllyedése nem teszi lehetővé az erdők őshonos tölgyfajokkal történő felújítását.

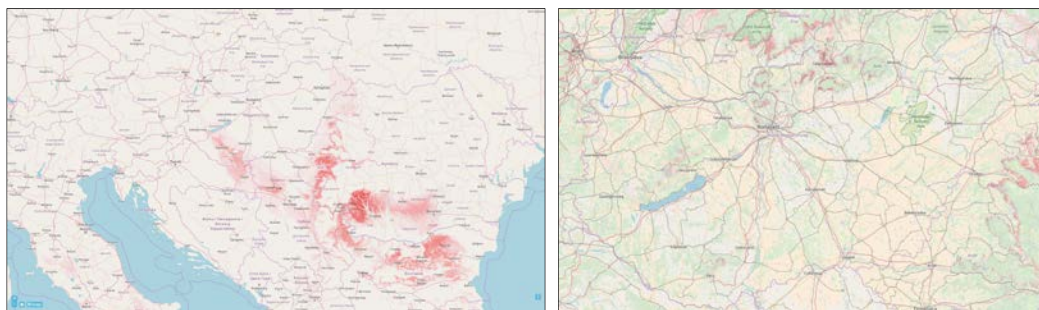
A magyar tölgy, az erdélyi és a dárdáskaréjú kocsánytalan tölgy taxonok a közönséges kocsánytalan tölgy helyettesítésére alkalmasak, elsősorban cseres-kocsánytalan tölgyesekben, valamint mész- és melegkedvelő tölgyesekben. A szekcióba tartozó fajok változatos módon hibridizálódnak, ami lehetőséget ad az optimális populációk kiválasztására ebből a tág genetikai spektrumból.

A közönséges bükk (*Fagus sylvatica*) és keleti bükk (*Fagus orientalis*) közötti széles átmenet a tőlük nehezen elhatárolható balkáni bükkön (*Fagus moesiaca*) keresztül szintén adott.

Fafajok értékelése európai léptékű térinformatikai modellezés alapján

Kapcsolódva az előző értékelési módszeréhez, megvizsgáltuk 4 fafaj potenciális és prognosztikus elterjedését a jelenlegi area klimatikus tulajdonságai alapján. Csak olyan fafajok bizonyultak vizsgálhatónak, melyekről megbízható elterjedési adatokkal rendelkezünk és elterjedési területük nem túlságosan szűk. A magyar tölgyet a számszerűsíthető adatokon nyugvó leválogatás során kaptuk eredményül. A keleti gyertyán és a komlógyertyán részletesebb vizsgálatát más honos fafajainkkal való közeli rokonságuk indokolja. A magyaltölgy (*Quercus ilex*) nem ment át a növényi tulajdonságokon alapuló szűrőinken, a fafaj bevonása kontroll jelleggel, az előző módszer ellenőrzésének céljából történt.

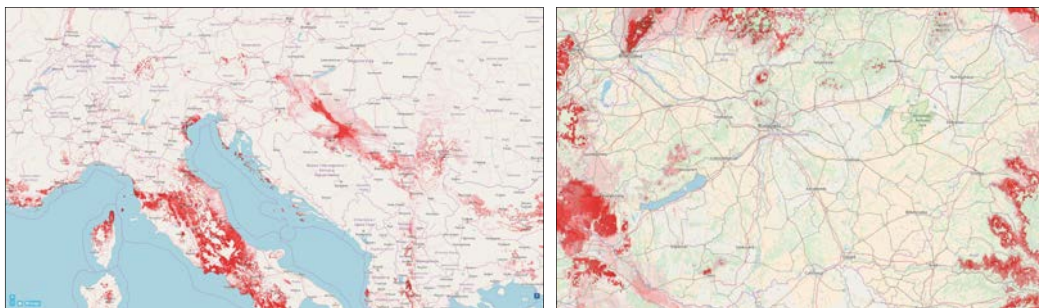
Az alkalmazott modell eredményei szerint, a jelenlegi klimatikus körülményeket figyelembe véve, a magyar tölgy potenciális areája magában foglalja Dunántúl déli és középső részét. A klíma változásával a 2041-2070-es időszakra a fafaj számára alkalmas területek elsősorban a középhegységek (pl. Mátra, Bükk) keskeny hegylábi sávjaira és egyes dombvidékeinkre (pl. Kelet-Cserhát, Heves-Borsodi-dombság) tolódnak (1. ábra).



1. ábra: A magyar tölgy (*Quercus frainetto*) potenciális (bal) és prognosztikus (2041-2070) (jobb) elterjedése (0 – 0% valószínűség, 1 – 100% valószínűség) a „Maximum Entropy” módszer szerint végzett modellezés és RCP 4,5 forgatókönyv alapján.

Figure 1: Potential area of *Quercus frainetto* for present (left) and future (2041-2070) (right) (0 – 0% feasibility, 1 – 100% feasibility) using „Maximum Entropy” method and RCP 4,5 scenario.

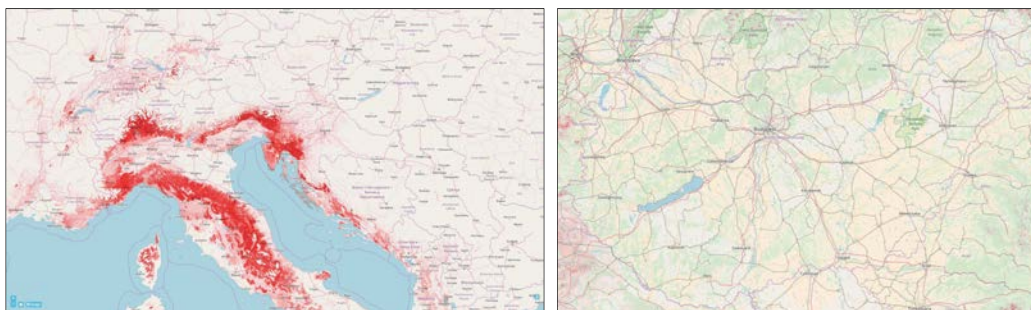
A keleti gyertyán klíma alapján becsült potenciális areája kiterjed a Dunántúl déli és délnyugati részére. A 2050-re vonatkozó térkép szerint a faj prognosztikus elterjedésének magyarországi súlypontja a Dunántúl nyugati részére helyeződik, valamint szigetszerűen a középhegységek magasabb régióiban is alkalmas lesz a klíma számára. Figyelembe véve a Nyugat-magyarországi peremvidék klímán kívüli termőhelyi tényezőit, a faj potenciális előfordulása a területen kétséges (2. ábra).



2. ábra: A keleti gyertyán (*Carpinus orientalis*) potenciális (bal) és prognosztikus (2041-2070) (jobb) elterjedése (0 – 0% valószínűség, 1 – 100% valószínűség) a „Maximum Entropy” módszer szerint végzett modellezés és RCP 4,5 forgatókönyv alapján.

Figure 2: Potential area of *Carpinus orientalis* for present (left) and future (2041-2070) (right) (0 – 0% feasibility, 1 – 100% feasibility) using „Maximum Entropy” method and RCP 4,5 scenario.

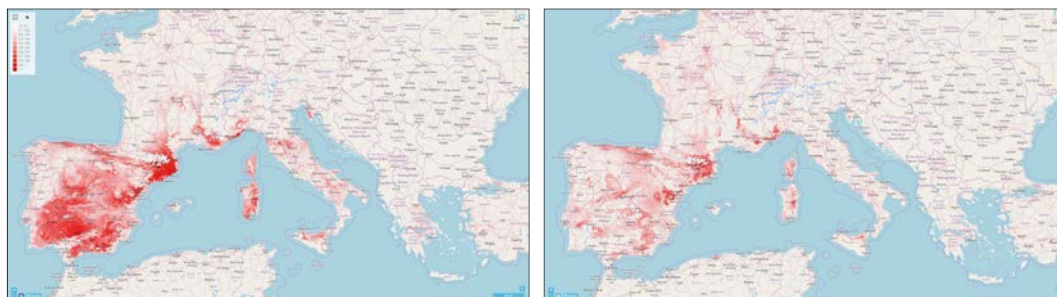
A komlógyertyán számára az aktuális klíma nem megfelelő az ország területén. A jövőben csupán a Vendvidék lehet alkalmas a fajtának, a modell itt is csak alacsony valószínűséget jelez (3. ábra).



3. ábra: A komlógyertyán (*Ostrya carpinifolia*) potenciális (bal) és prognosztikus (2041-2070) (jobb) elterjedése (0 – 0% valószínűség, 1 – 100% valószínűség) a „Maximum Entropy” módszer szerint végzett modellezés és RCP 4,5 forgatókönyv alapján.

Figure 3: Potential area of *Ostrya carpinifolia* for present (left) and future (2041-2070) (right) (0 – 0% feasibility, 1 – 100% feasibility) using „Maximum Entropy” method and RCP 4,5 scenario.

Az előző fajknál távolabbi természetes elterjedési területtel rendelkező magyaltölgy potenciális elterjedését is vizsgáltuk. Az eredmények visszaigazolták a növényi tulajdonságok komplex értékelése során alkalmazott szűrési módszert. A fafaj egyik eljárás szerint sem bizonyult javasolhatónak hazánkban (4. ábra).



4. ábra: A magyaltölgy (*Quercus ilex*) potenciális (bal) és prognosztikus (2041-2070) (jobb) elterjedése (0 – 0% valószínűség, 1 – 100% valószínűség) a „Maximum Entropy” módszer szerint végzett modellezés és RCP 4,5 forgatókönyv alapján.

Figure 4: Potential area of *Quercus ilex* for present (left) and future (2041-2070) (right) (0 – 0% feasibility, 1 – 100% feasibility) using „Maximum Entropy” method and RCP 4,5 scenario.

Fafajok potenciális elterjedési mintázatainak modellezése

Virágos kőris (*Fraxinus ornus*)

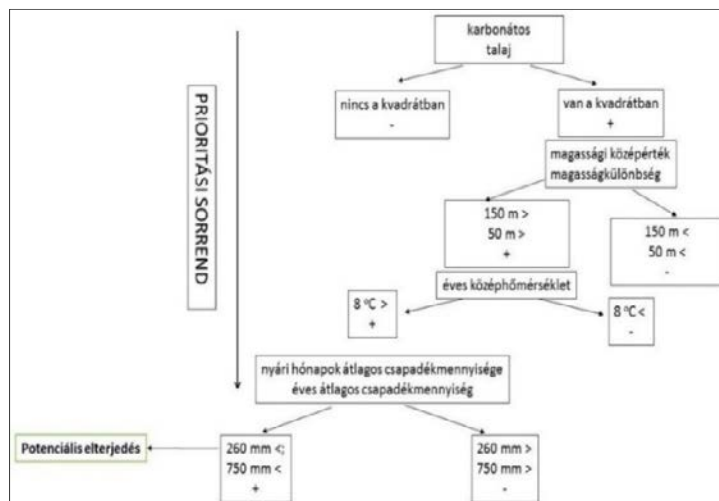
A virágos kőris európai elterjedési területe Délkelet-Franciaországtól, Olaszországon át egészen a Balkán-félszigeten keresztül nyugat Törökországig terjed. Szubmediterrán elter-

jedesű fajról révén szó a relatív hőigénye a szubmediterrán siblijak és sztyepp övének megfelelő 8-as értéket kapta a Borhidi-féle ökológiai indikátor értékek szerint. A relatív talajvíz és talajnedvesség indikátor számai szerint a szárazságtűrő, alkalmilag üde termőhelyen is előforduló növényfajok csoportjába tartozik. A talajreakció relatív értékszámai alapján a mészkedvelő fajok közé sorolható. A relatív fényigény alapján a félmáryéknövényekhez tartozik a Borhidi-féle ökológiai indikátor értékek alapján (Borhidi 1993).

A faj őshonos elterjedési területe Magyarországon a hegy- és dombvidéki területeket foglalja magába. Az előfordulási kvadrátok több mint 95%-a 150 m-nél nagyobb magassági középértéknél fordul elő, ezért alsó határnak ezt az értéket vettük. A délies kitettségű lejtőket preferálja, ami a kvadrátok magasságkülönbségek szerinti eloszlásánál is megfigyelhető. A kvadrátok 98%-a 50 m-nél nagyobb magasságkülönbségnél fordul elő, így alsó határnak 50 m-es magasságkülönbséget vettünk, míg felső határ megállapítását nem tartottuk indokolt-nak a faj esetében.

Az ökológiai indikátor értékek alapján, ahogy már fent említettük, a virágos kőris a mészkedvelő fajok közé tartozik. A talaj kémhatása és mésztartalma szerint az előfordulási kvadrátok 83%-ban karbonátos talajon fordul elő. Összesen 52 olyan előfordulási kvadrát van, ahol a karbonátos talajok aránya 0%, itt nagyobb területarányban a gyengén savanyú talajok jelennek meg.

Az éves csapadékmennyiséget elemezve az előfordulási kvadrátok több mint 95%-a 750 mm alatti éves csapadékmennyiségnél fordul elő. A fajnál a nyári hónapok átlagos csapadékmennyiségét is elemeztük, mint elterjedést korlátozó klimatikus paramétert, a nyári hónapok szárazabb körülményeit tolerálja, a kvadrátok 260 mm-es csapadékmennyiség alatt fordulnak elő, ezért ezt az értéket vettük felső határnak.



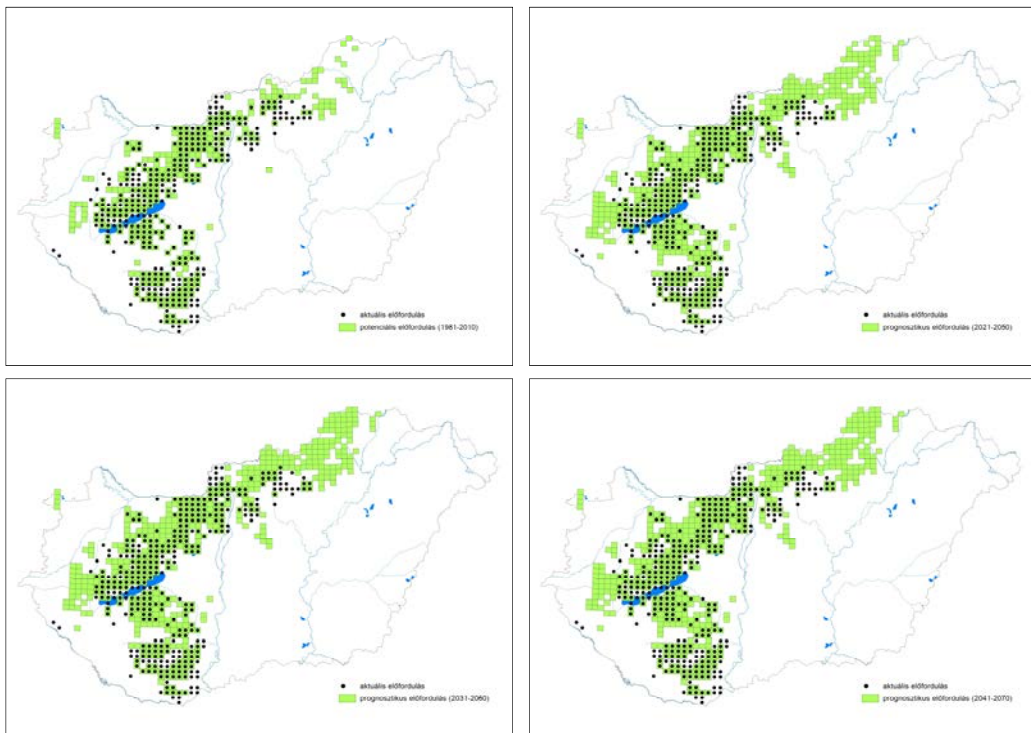
5. ábra: A virágos kőris (*Fraxinus ornus*) limitáló paramétereit és döntési fája.

Figure 5: Limit factors and decision tree of *Fraxinus ornus*.

Az éves átlagos középhőmérsékletek alapján a kvadrátok 98%-a 8 °C-nál magasabb értéknél fordul elő. Szubmediterrán elterjedéséből adódóan alapvetően melegigényes faj, ezért feltételezhetően a magasabb éves átlagos középhőmérsékletet kedvező lesz a faj számára. Európai őshonos elterjedési területén 17-18 °C-os értékeknél is megtalálható a faj (Caudullo & De Rigo 2016). A téli hónapok átlagos hőmérséklet értékei a faj előfordulási kvadrátjaiban -2 °C felett voltak, ezért alsó határként ezt az értéket vettük.

A nyári hónapok átlagos havi hőmérsékleti értékei szerint az előfordulási kvadrátok 98%-a 17 °C feletti értékeknél jelenik meg (5. ábra).

A virágos kőris potenciális elterjedési térképe és az aktuális elterjedése között látható eltérés. Több kvadrát alkalmasnak mutatkozik számára az abiotikus háttértényezők és a beals smoothing módszer szerint, így a Sopron környéki Fertőmelléki-dombsor, az Északi-középhegységben az Aggteleki-karszt északkeleti pereme, a Heves-Borsodi-dombság, a Bükk-hegység és a Gödöllői-dombság. A faj jóvolt előfordulását vizsgálva gyenge terjedés figyelhető meg, a szárazabb, melegebb klíma feltételezhetően kedvező hatással lesz a faj számára, így a hegy- és dombvidéki területeken a modell szerint megjelenhet (6. ábra).



6. ábra: A virágos kőris (*Fraxinus ornus*) potenciális (●) és prognosztikus (■) előfordulása a klíma paraméterek és a „beals smoothing” elemzés alapján.

Figure 6: Potential (●) and prognostic (■) range of *Fraxinus ornus* according to climatic parameters and „beals smoothing” method.

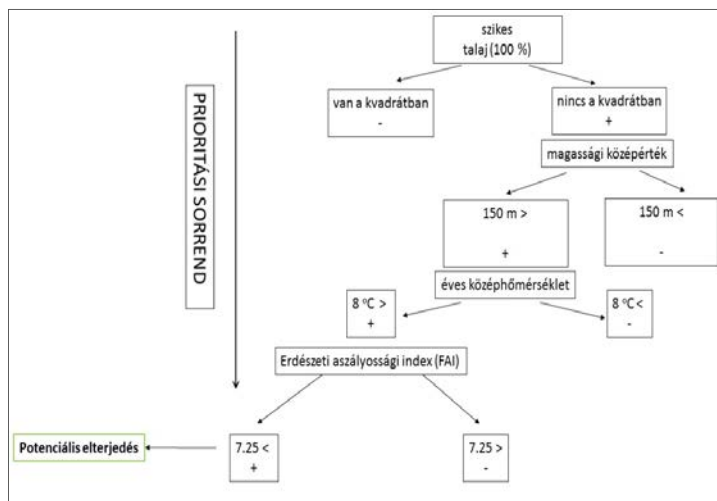
Csertölgy (*Quercus cerris*)

A csertölgy a keleti-szubmediterrán flóraelem kategóriába tartozik, az őshonos elterjedési területe Európa déli; délkeleti részére koncentrálódik. A Borhidi-féle relatív indikátor értékek alapján melegkedvelő (TB=8), félüde termőhelyek (WB=5) növényei közé sorolható. A relatív talajreakció alapján indifferens, széles tűrésű (RB=6), a relatív fényigény szerint félárnyék, félnapfény (LB=6) növények közé tartozik (Borhidi 1993).

Az elemzés során a faj őshonos előfordulási kvadrátjait vettük figyelembe, az erdészeti ültetések kiszűrésre kerültek. A faj elterjedését és a magassági értékeit vizsgálva az előfordulási kvadrátok több mint 80%-a 150 m feletti magassági középértéknél fordul elő, ez az érték vehető alsó határnak. A magasságkülönbség értékei széles skálán oszlanak el, ezért erre a paraméterre nem állapítottunk meg limitáló értékeket.

A talaj mésztartalma és kémhatása szerint a faj előfordulási kvadrátjaiban erősen savanyú, karbonátos és gyengén savanyú talajok is jelen vannak. Mindösszesen öt előfordulási kvadrátban volt jelen szikes talaj, ezért azon kvadrátokból, melyekben a szikes talajok aránya 100%, a faj potenciális előfordulása kizárható, a csertölgy azonban megjelenhet erősen savanyú, gyengén savanyú és karbonátos talajon is.

A csertölgy aktuális elterjedési kvadrátjai szerint a faj több mint 90%-a 8 °C feletti éves átlaghőmérsékleti értéknél fordul elő. A faj elterjedésénél figyelembe vettük a nyári és a téli hónapok átlaghőmérsékletét. A csertölgy melegigényes faj, így az elterjedését leginkább a téli hőmérsékletek befolyásolhatják, hazánkban az előfordulási kvadrátok 97%-a -1 °C-nál magasabb téli átlagos hőmérsékleti értéknél fordul elő. A nyári átlagos hőmérsékleti értékek alapján 18 °C felett fordul elő a faj.



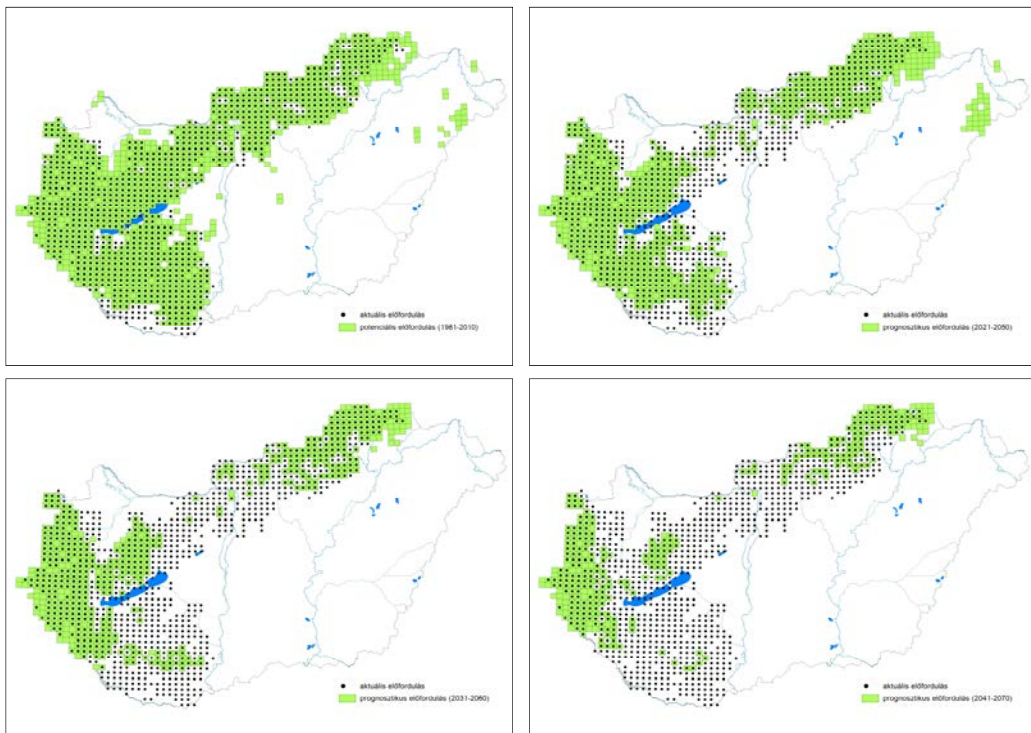
7. ábra: A csertölgy (*Quercus cerris*) limitáló paramétereit és döntési fája.

Figure 7: Limiting factors and decision tree of *Quercus cerris*.

A csertölgy előfordulása és a nyári csapadékmennyiség között éles limitáló értéket nem állapítottunk meg, ugyanis feltételezhetően a hazánkban előforduló magasabb és alacsonyabb csapadékmennyiséget is képes tolerálni a faj.

Az erdészeti aszályossági index alapján a cseres-kocsánytalan tölgyes klíma 6.00-7.25 közötti értékeknél jelenik meg. A csertölgy azonban a gyertyános-tölgyes és bükkös klímában is jelen van, ami az előfordulási kvadrátok eloszlásában is megmutatkozik. Az erdészeti aszályossági index és az aktuális elterjedés kvadrátjainak eloszlása alapján 7.25-nél nagyobb értéknél az előfordulási kvadrátok száma csökken, ami a diagrammban is látható, ezért ezt állapítottuk meg felső limitáló értéknek (7. ábra).

A limitáló tényezők alapján megrajzoltuk a csertölgy potenciális elterjedési mintázatát és a jövőbeli prognosztikus elterjedést. A potenciális elterjedési nagyobb területet fed le a jelenlegi aktuális elterjedésnél, a Nyírségben és a Szigetköz északi részén mutatkozott eltérés. A klíma scenáriók alapján a jövőben a csertölgy folyamatos visszaszorulása figyelhető meg, a Nyugat-Dunántúlon és az Északi-középhegységben lesznek jelen alkalmas klimatikus feltételek a faj számára (8. ábra).



8. ábra: A csertölgy (*Quercus cerris*) potenciális (●) és prognosztikus (■) előfordulása a klíma paraméterek és a „beals smoothing” elemzés alapján.

Figure 8: Potential (●) and prognostic (■) range of *Quercus cerris* according to climatic parameters and „beals smoothing” method.

Nyugati osterfa (*Celtis occidentalis*)

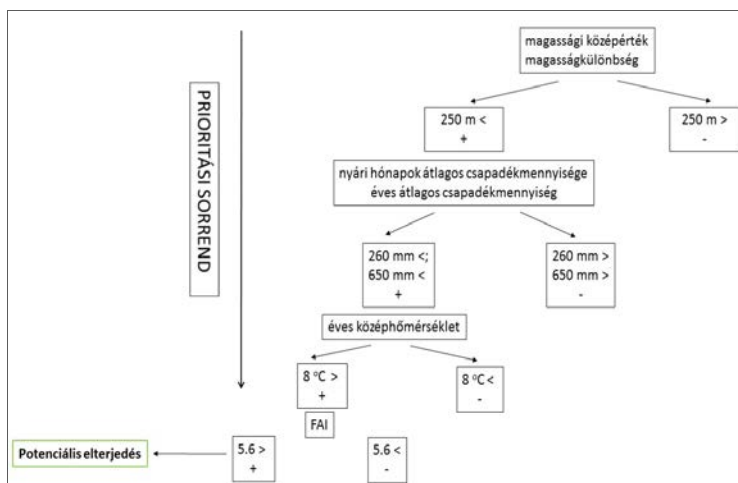
A nyugati osterfa Észak-Amerika keleti részében őshonos, leginkább síkvidékek fája (Bartha & Csiszár 2012). Magyarországon terjedőben lévő inváziós fajként tartjuk számon, mely leginkább a homokterületeken és ártereken jelenik meg. A faj tág tűrőképességgel rendelkezik, ami szintén elősegíti a térhódítását.

A talaj kémhatása és mésztartalma szempontjából minden típusban előfordul, ebből ki folyólag ez a környezeti tényező nem befolyásolja az elterjedését.

A faj síkvidéki jellegét a magyarországi elterjedése is jól tükrözi, az előfordulási kvadrátok mintegy 98%-a 250 m alatti magassági középértékeknél jelenik meg. A faj elterjedésében a magasság limitáló faktorként van jelen, felső határként a 250 m-t állapítottuk meg.

A klíma paraméterek közül vizsgáltuk a nyári hónapok átlagos és az éves átlagos csapadékmennyiséget, melyből kiderült, hogy a faj jól elviseli a nyári szárazságot is, így itt egy felső határt húztunk meg. A nyugati osterfa elterjedési kvadrátjainak jelentős többsége 650 mm éves és 260 mm nyári átlagos csapadékmennyiség alatt fordul elő.

A hőmérséklet szempontjából a faj kiegyenlített hőigényű, az elterjedési kvadrátjai 8 °C felett fordulnak elő hazánkban. Figyelembe vettük a klíma adatokból származtatott erdészeti aszályossági index értékeit is, melynél az alsó limitáló értéket 5.6-nál állapítottuk meg (9. ábra).

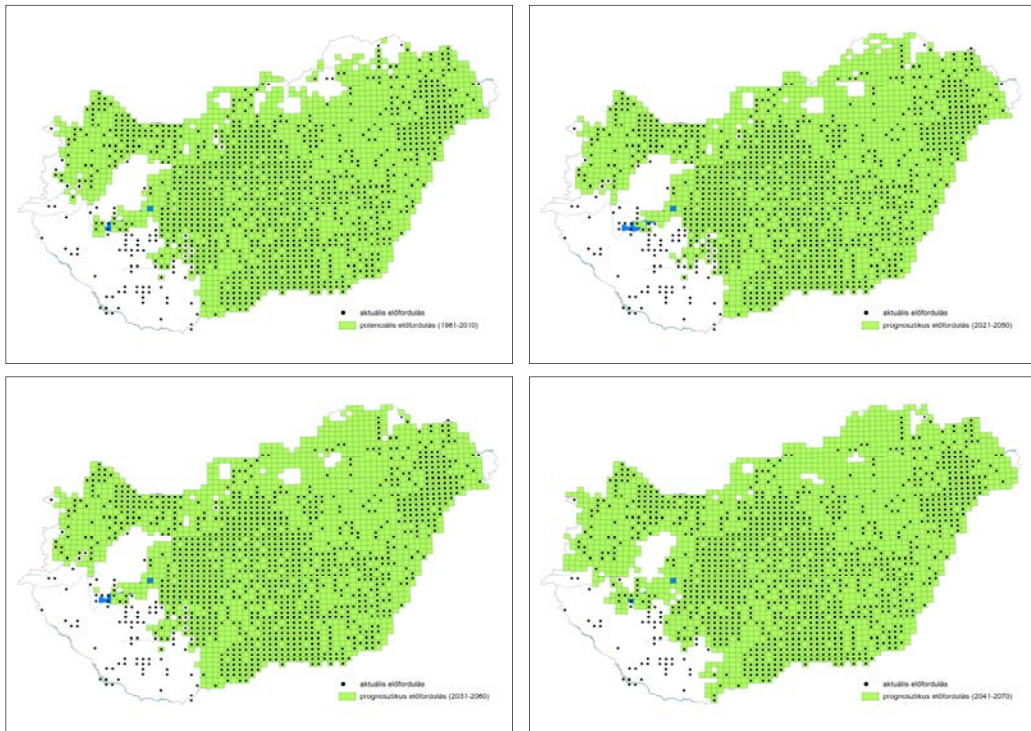


9. ábra: A nyugati osterfa (*Celtis occidentalis*) limitáló paramétereit és döntési fája.
Figure 9: Limit factors and decision tree of *Celtis occidentalis*.

Előzetesen a nyugati osterfa további terjedése jósolható hazánkban, melyet a klíma szcenáriók által számolt jövőbeli klíma paraméterek is alátámasztanak.

A faj potenciális elterjedési térképe alapján a nagyalföldi területek alkalmasak a klíma szempontjából a faj megjelenésére, így itt potenciálisan további terjedése várható. A jövőbeli

prognosztikus elterjedés alapján megállapítható, hogy a hegylábi részeken és nyugati irányban várható a faj areájának növekedése. A jelenlegi előfordulási területnél nagyobb mértékben fog előfordulni a faj, a klímaváltozás feltételezhetően kedvező lesz a faj számára (10. ábra).



10. ábra: A nyugati ostorfa (*Celtis occidentalis*) potenciális (●) és prognosztikus (■) előfordulása a klíma paraméterek és a „beals smoothing” elemzés alapján.

Figure 10: Potential (●) and prognostic (■) range of *Celtis occidentalis* according to climatic parameters and „beals smoothing” method.

Potenciális természetes erdőtársulások változásának becslése

Jelentős átrendeződések várhatók a 2041-2070-es klímaperiódusig azoknál a potenciális erdőtársulás-csoportoknál, melyek a hegy- és dombvidéki klímaregionális társulások átalakulási sorához kapcsolódnak. Csak a potenciális bükkösök tizedrésze (9,6%) esetében van reális esély arra, hogy a bükkös jelleg a gyertyános-kocsánytalan tölgyesekkel keveredve megmaradjon az Északi-középhegységben és a Nyugat-magyarországi peremvidéken. A potenciális bükkösök többségének (77,7%) helyén várhatóan potenciális gyertyános-kocsánytalan tölgyeseknek megfelelő termőhelyi feltételek várhatók. A társuláscsoport termőhelyeinek 12,7%-a esetében, a Dunántúli-középhegység és Dunántúli-dombság keleti részén, valamint a Mecsekben az előző eseteket is meghaladó átalakulás várható, mely az

alkalmazott kategóriarendszerben a gyertyános-kocsánytalan tölgyes és a cseres-kocsánytalan tölgyes közé helyezhető.

A potenciális gyertyános-kocsánytalan tölgyesek átalakulásának spektruma viszonylag széles; a cseres-kocsánytalan tölgyesekkel alkotott átmeneti kategóriától (3,2%) a mész- és melegkedvelő tölgyes – bokorerdő átmenetig (3,2%) terjed. A társuláscsoport potenciális termőhelyei közel hasonló arányban alakulnak potenciális cseres-kocsánytalan tölgyes (28,8%), mész- és melegkedvelő tölgyes (28,9%), valamint az előző két kategória hibridjének megfelelő (35,9%) termőhelyekké. A gyertyános-kocsánytalan tölgyesek eltérő átalakulási típusai földrajzilag a bükkösökhöz hasonló módon oszlanak el, kirajzolva az erdészeti aszályossági index (FAI) növekedésének mintázatát.

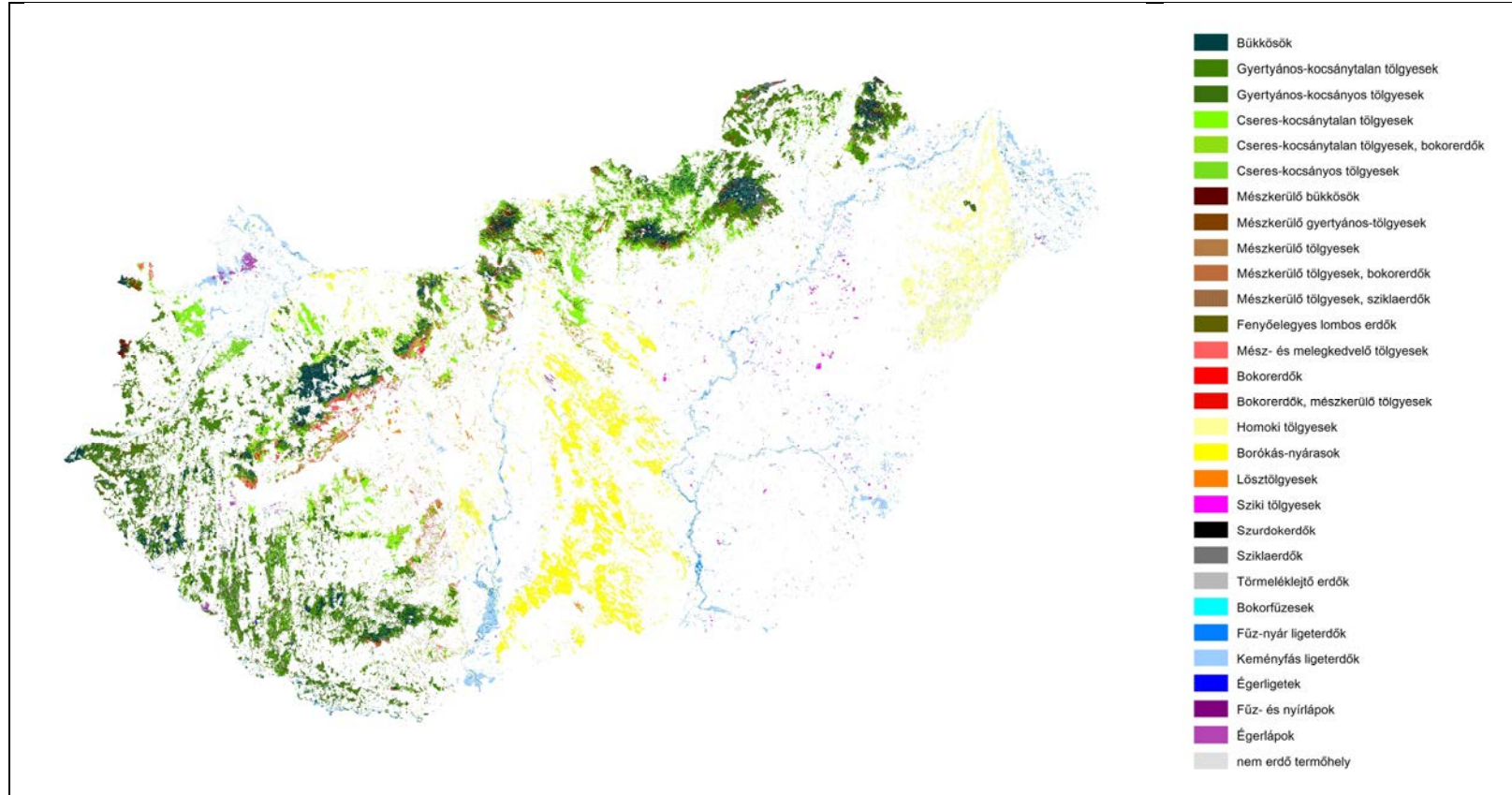
A jelenlegi potenciális cseres-kocsánytalan tölgyesek csaknem teljes területe várhatóan bokorerdőhöz hasonló potenciális vegetációval jellemezhető a 2041-2070 közötti időszakban. Erdőgazdálkodási szempontból pozitívnak tekinthető, hogy eredményeink szerint ezeken a termőhelyeken várhatóan biztosítható az erdőborítás fenntartása, alkalmazkodva a bokorerdőkre jellemző nyíltabb erdőszerkezethez.

A mész- és melegkedvelő tölgyeseknek megfelelő termőhelyek kevesebb, mint felén (46,9%) prognosztizálható potenciális bokorerdő, többségük alkalmatlan lesz az erdők számára (53,1%), hasonlóan, mint a jelenleg potenciális bokorerdők csaknem teljes területe (2. táblázat 11-12. ábra).

2. táblázat: A hegy- és dombvidéki klímaregionális (és hozzájuk kapcsolódó) potenciális természetes erdő-társulás-csoportok becsült átalakulásának területarányai (%) 1981-2010 és 2041-2070 között.

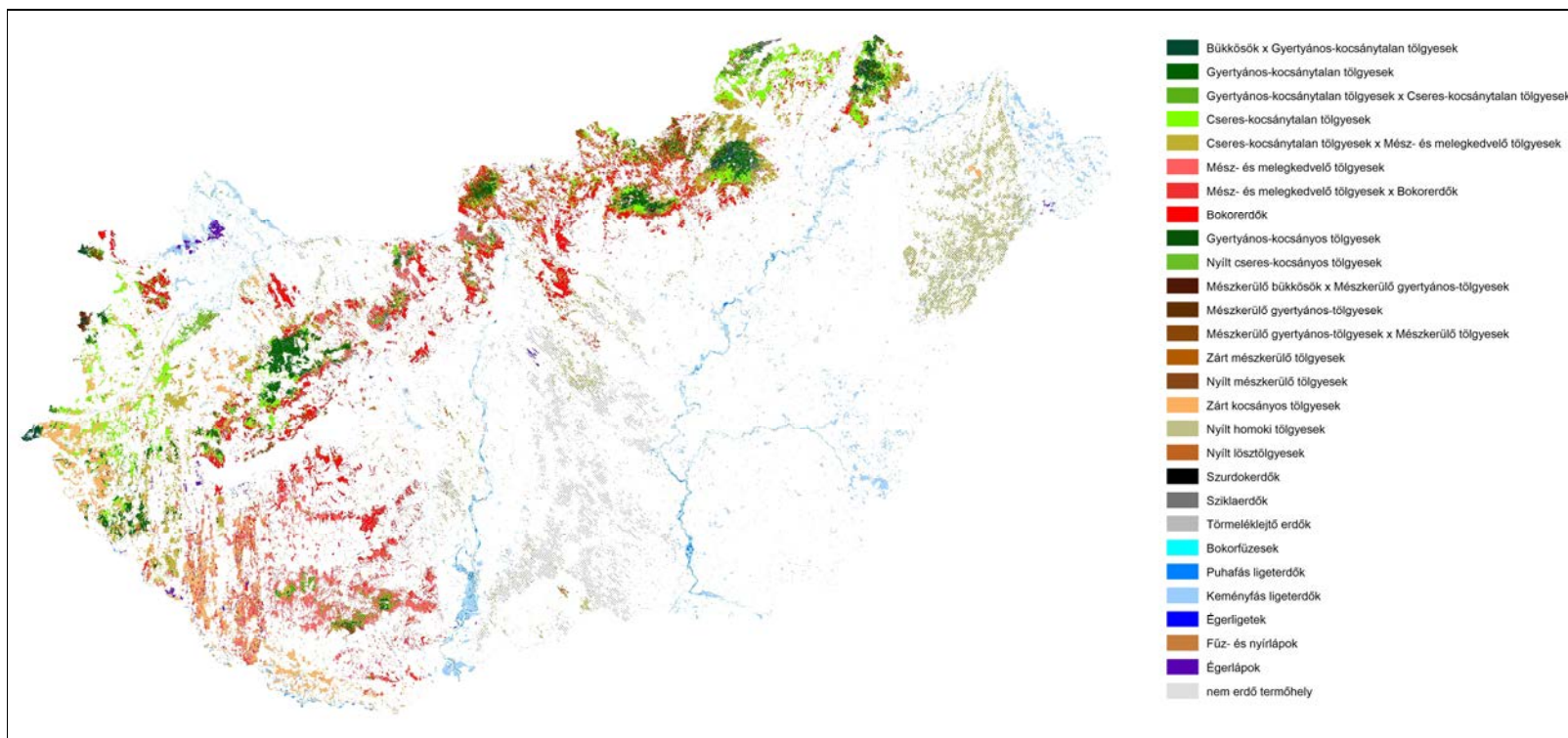
Table 2: Estimated conversion ratio (%) of climate determined (and related) potential natural forest communities (colline and montane regions).

Aktuális potenciális természetes erdő-társulás (PTE)		Jövőbeli (2041-2070) potenciális természetes erdő-társulás (PTE)								
		HDB x GY-KTT	GY-KTT	GY-KTT x CS-KTT	CS-KTT	CS-KTT x BAZ-T	BAZ-T	BAZ-T x KBE	KBE	nem erdő termőhely
PTE kategóriák területaránya (%)		0,721	5,857	1,772	7,605	9,085	7,317	0,859	14,959	16,424
Bükkösök (HDB)	7,516	9,6	77,7	12,7	0	0	0	0	0	0
Gyertyános-kocsánytalan tölgyesek (GY-KTT)	25,339	0	0	3,2	28,8	35,9	28,9	3,2	0	0
Cseres-kocsánytalan tölgyesek (CS-KTT)	12,992	0	0	0	0	0	0	0,3	99,7	0
Mész- és melegkedvelő tölgyesek (BAZ-T)	3,178	0	0	0	0	0	0	0	46,9	53,1
Bokorerdők (KBE)	0,528	0	0	0	0	0	0	0	5,0	95,0



11. ábra: A potenciális természetes erdőársulások (PTE) elterjedése Magyarországon.

Figure 11: Distribution of potential natural forest communities in Hungary.



12. ábra: A potenciális természetes erdőközösségek (PTE) becsült elterjedése Magyarországon a klímamutatók előrejelzett (2041-2070) változása alapján.

Figure 12: Estimated distribution of potential natural forest communities according to climate change projections (2041-2070).

A potenciális mészkerülő erdők becsült átalakulását összehasonlítva a párhuzamos klímaregionális erdők becsült átalakulásával látható, hogy mérsékeltebb a változás mértéke. A különbség oka, hogy a mészkerülő erdők olyan tájakra jellemzőek, ahol a kialakulásukat is befolyásoló csapadékmennyiség magasabb és a klímaváltozás hatásai is mérsékeltebben érvényesülnek. Bár a potenciális mészkerülő bükkösök többsége (69,2%) átalakul mészkerülő gyertyános-tölgyessé, valamint a jelenlegi potenciális mészkerülő gyertyános-tölgyesek nagy része zárt mészkerülő tölgyessé válik, mindkét esetben több mint 20% azoknak a területeknek az aránya, melyek még az átalakulási sorban megelőző hibrid kategóriába sorolhatók a jövőben. A potenciális mészkerülő tölgyesek esetében várhatóan elsősorban szerkezeti változásokra kell számítani, a szárazodó termőhelyeknek nyílt mészkerülő tölgyesek feleltethetők meg. A mészkerülő tölgyesek kompozicionális rugalmasságát a társulás viszonylagos fajszegénysége jelentősen hátráltatja (3. táblázat).

A mészkerülő erdők dinamikáját a mindenkori tájhasználati folyamatok jelentősen befolyásolják. Az állományok jelentős részénél az aktuális tendencia a mészkerülő jelleg csökkenését és a klímaregionális jelleg erősödését jelenti. A mészkerülő erdők esetében a jövőbeli tájhasználat ismeretének hiányában ezzel a tényezővel az átalakulási folyamatok becsülésénél nem számoltunk. A fenyőelegyes lombos erdők esetében figyelembe vettük az erdeifenyő visszaszorulásának folyamatát, így a kategória a jövőre vonatkozó PTE térképen már nem jelenik meg.

3. táblázat: A potenciális mészkerülő erdőtársulás-csoportok becsült átalakulásának területarányai (%) 1981-2010 és 2041-2070 között.

Table 3: Estimated conversion ratio (%) of potential acidofrequent natural forest communities between 1981-2010 and 2041-2070.

Aktuális potenciális természetes erdőtársulás (PTE)		Jövőbeli (2041-2070) potenciális természetes erdőtársulás (PTE)				
		AC-B x AC-GY-T	AC-GY-T	AC-GY-T x AC-KTT	zárt AC-KTT	nyílt AC-KTT
PTE kategóriák területaránya (%)		0,141	0,365	0,286	0,944	0,652
Mészkerülő bükkösök (AC-B)	0,528	26,8	69,2	4,0	0	0
Mészkerülő gyertyános-kocsánytalan tölgyesek (AC-GY-T)	1,185	0	0	22,3	77,7	0,0
Mészkerülő tölgyesek (AC-KTT)	0,383	0	0	0	3,4	96,6

Az erdőssztyep erdők közül a potenciális sziki tölgyesek várhatóan átadják helyüket a potenciális fátlan vegetációnak, szikes gyepeknek. Hasonló teljes átrendeződés jósolható a borókás-nyárasok viszonylatában. A lösztölgyesek és homoki tölgyesek területeinek nagy része felnyíló szerkezettel potenciális erdő-gyep vegetációkomplexet alkot a jövőben, kisebb hányaduk „nem erdő termőhelyé” válik majd (4. táblázat).

4. táblázat: A potenciális erdőssztyep erdő-társulás-csoportok becsült átalakulásának területarányai (%) 1981-2010 és 2041-2070 között.

Table 4: Estimated conversion ratio (%) of potential forest-steppe communities between 1981-2010 and 2041-2070.

Aktuális potenciális természetes erdő-társulás (PTE)		Jövőbeli (2041-2070) potenciális természetes erdő-társulás (PTE)		
		nyílt LÖ-KST	nyílt HO-KST	nem erdő termőhely
PTE kategóriák területaránya (%)		0,642	9,568	16,345
Lösztölgyesek (LÖ-KST)	0,868	73,9	0	26,1
Sziki tölgyesek (HO-KST)	0,493	0	0	100,0
Homoki tölgyesek (HO-KST)	11,071	0	86,4	13,6
Borókás-nyárasok (BO-NY)	11,265	0	0	100,0

A potenciális gyertyános-kocsányos tölgyesek és a cseres-kocsányos tölgyesek jövőjére vonatkozóan az előző becsült átalakulási folyamatoknál is több bizonytalansággal kell számolnunk. A gyertyános-kocsányos tölgyes termőhelyek túlnyomó többsége (98,3%) várhatóan „lép” egy klímaosztályt és a táji adottságoktól függően valamilyen potenciálisan zárt kocsányos tölgyes állomány képzelhető el rajta. Nagy valószínűséggel számos termőhelyen a jelenlegi kategóriarendszerbe nem illeszkedő, analógia nélküli erdőtípussal kell számolnunk. Cseres-kocsányos tölgyes termőhelyek esetében a jelenlegi potenciálisan zárt erdő-vegetáció felnyílása prognosztizálható.

Az alkalmazott potenciális természetes erdő-társulás (PTE) kategóriák egy részénél nem változtattunk a jelenlegi besoroláson a jövőre vonatkozóan sem. A ligeterdők és láperdők esetében a többletvízhatás változásának nehéz modellezhetősége nem tesz lehetővé megalapozott becslést. Ott, ahol megmarad a többletvíz, a potenciális vegetáció akár változatlan is maradhat, ha eltűnik, akkor drasztikus változás várható. A sziklaerdők, szurdokerdők, tör-

meléklejtő-erdők esetében a domborzatból adódó edafikus tényező a jövőben is meghatározó lesz, így a PTE kategória a jövőben is helytálló, valamilyen mértékben átalakuló fajkészlettel (5. táblázat).

5. táblázat: A modellezés során állandónak tekintett edafikus potenciális természetes erdőtársulások területe (ha, %).

Table 5: Area (ha, %) of "constant" defined potential natural forest community categories.

Potenciális természetes erdőtársulás	Terület	
	ha	%
Sziklaerdők	2453	0,130
Szurdokerdők	502	0,027
Törmeléklejtő erdők	2603	0,138
Égerligetek	5564	0,294
Keményfás ligeterdők	186099	9,838
Puhafás ligeterdők	21208	1,121
Bokorfüzesek	581	0,031
Égerlápok	18960	1,002
Fűz- és nyírlápok	92	0,005

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Kutatásunk során a klímaváltozás erdőtársulásokra gyakorolt hatásainak becsléséhez sokrétű megközelítést, különböző módszereket alkalmaztunk. Honos fafajaink várható reakcióit adatbázisokból származó növényi tulajdonságok alapján számítottuk, erdőtársulás-csoportonként értékelve a jövőben visszaszoruló vagy előnyhöz jutó fafajokat. A társulásokat alkotó (elegy)fafajok eltérő ökológiai spektruma, tűrőképessége, kompetíciós képessége, ideális esetben, csaknem minden erdőtársulás-csoport esetében lehetőséget nyújthat a társuláscsoporton belüli alkalmazkodásra vagy szárazabb klímaregiónak fajkészlete felé történő rugalmas átmenet kialakulására/kialakítására. A főként száraz, határtermőhelyekre koncentrált terepi vizsgálatok újulat és mortalitás adatai jórészt megerősítették az elméleti alapokon nyugvó becsléseinket, és az elegyfafajok kiemelt szerepét a gyakorlatban is igazolták.

Az erdészszakma felől érkező, valós igény olyan idegenhonos, potenciális cserefafajok keresése, melyek a változó klímában segítséget jelenthetnek. Erre az igényre reagálva, de a jövőbeli invázió megelőzésének elvét hangsúlyosan figyelembe véve értékeltük az európai fafajokat. Kiválasztott fafajok esetében aktuális európai klímaadatokon alapuló modellezést is végeztünk, melynek során meghatároztuk a fajok potenciális és prognosztikus elterjedését. A kiválasztott tájidegen fafajok alkalmazására, csak az új körülmények között is vitális,

őshonos taxonok és az általuk alkotott (akár újszerű) társulások által nyújtott lehetőségek kimerülését követően kerülhet sor.

Kiválasztott honos és inváziós fafajok esetében az országos flóratérképezési adatbázis és az előrevetített klímaadatok alapján becsültük fajok potenciális és prognosztikus elterjedését. A térképek erdőtársulásoktól függetlenül mutattak rá azokra a tájakra, melyekben az adott honos fafaj alkalmazása kétséges vagy lehetségessé válhat, illetve ahol nő az inváziós veszélyeztetettség.

Potenciális természetes erdőtársulás (PTE) adatbázist építettünk fel az ország erdőterületeire a jelenre és jövőre vonatkozóan egyaránt, az Országos Erdőállomány Adattár adatai és az erdészeti aszályossági index (FAI) erdőrészekhez rendelt értékeinek különbségei alapján. A jelenlegi potenciális bükkös termőhelyek erősen veszélyeztetettek. A száraz tölgyesek alkalmazkodóképességét növelheti potenciális elegyfa fajaik magas száma, melyek jelentős része (pl. mezei juhar) tág tűrőképességű. A mész- és melegkedvelő tölgyesek, bokorerdők és az erdőssztyep tölgyesek átalakult formában való megmaradásához az állományok felnyílása (vagy mozaikos állományok létrehozása) nyújthat megoldást.

Összefoglalásként megállapítható, hogy a klimatikus változások erdeinkre gyakorolt erőteljes hatásai elkerülhetetlenek, de az erdők összetételi (elegység) és szerkezeti diverzitásának (pl. gyepekkel, cserjésekkel mozaikoló állományok) növelése, kiegészülve a természetes dinamika „használatával” (és az invázió megakadályozásával) számos kihasználattal, az erdőgazdálkodás és a természetvédelem számára is előnyös alkalmazkodási lehetőséget rejt.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutató munka a VKSZ_12-1-2013-0034 „Agrárklíma 2” projekt és a „Soproni Egyetem Struktúraváltási Terve” - 32388-2/2017 INTFIN sz. projekt keretében az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatásával valósult meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Mauri A., Strona G. & San-Miguel-Ayanz J. 2017: EU-Forest, a high-resolution tree occurrence dataset for Europe. Scientific Data 4: 160123. DOI: [10.1038/sdata.2016.123](https://doi.org/10.1038/sdata.2016.123)
- Barcza Z., Bartholy J., Mészáros R., Pongrácz R. & Radics K. 2011: Globális és európai tendenciák. In: Bartholy J., Bozó L. & Haszpra J. (eds): KLÍMAVÁLTOZÁS – 2011 Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest, 99–144.
- Bartha D. 1999: Bewertung der Dendroflora Europas auf Grund der Lebensformen. Tilia 7(Suppl.): 3–30.
- Bartha D., Bölöni J., Ódor P., Standovár T., Szmorad F. & Tímár G. 2003: A magyarországi erdők természetességének vizsgálata. Erdészeti Lapok 138(3): 73–75.
- Bartha D. 2005: Tájállapotok és vegetációállapotok, mint az erdőtermészetességi vizsgálatok viszonyítási alapjai. Tájökológiai Lapok 3(2): 253–274.

- Bartha D. 2012: Növényföldrajz és társulástan. Egyetemi jegyzet. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron.
- Bartha D. & Csiszár Á. 2012: Nyugati ostorfa (*Celtis occidentalis* L.). In: Csiszár Á. (ed): Inváziós növényfajok Magyarországon. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, 109–113.
- Bartha D., Korda M., Kovács G. & Tímár G. 2014: A potenciális természetes erdőtürsulások és az aktuális faállománytípusok összevetése országos szinten. Erdészettudományi Közlemények 4(1): 7–21.
- Bartha D., Király G., Schmidt D., Tiborcz V., Barina Z., Csiky J., et al. (eds) 2015: Magyarország edényes növényfajainak elterjedési atlasza. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron.
- Bartholy J., Bihari Z., Horányi A., Krüzselyi I., Lakatos M., Pieczka I., et al. 2011: Hazai éghajlati tendenciák. In: Bartholy J., Bozó L. & Haszpra J. (eds). KLÍMAVÁLTOZÁS – 2011 Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tan-széke, Budapest, 145–234.
- Berki I., Móricz N., Rasztoivits E. & Vig P. 2007: A bükk szárazság tolerancia határának meghatározása. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): Erdő és klíma V. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 213–228.
- Borhidi A. 1993: A Magyar Flóra szociális magatartás típusai, természetességi és relatív ökológiai értékszámai. Janus Pannonius Tudományegyetem, Pécs.
- Caudullo G. & de Rigo D. 2016: *Fraxinus ornus* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J., de Rigo D., Caudullo G., Houston Durrán T. & Mauri A. (eds): European Atlas of Forest Tree Species. The Publications Office of the European Union, Luxembourg, 100–101.
- De Cáceres M. & Legendre P. 2008: Beals smoothing revisited. *Oecologia* 156(3): 657–669. DOI: [10.1007/s00442-008-1017-y](https://doi.org/10.1007/s00442-008-1017-y)
- Führer E. 2010: A fák növekedése és a klíma. *Klíma-21 Füzetek* 61: 98–107.
- Hamann A., Wang T., Spittlehouse D.L. & Murock T.Q. 2013: A comprehensive, high-resolution database of historical and projected climate surfaces for western North America. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94: 1307–1309. DOI: [10.1175/bams-d-12-00145.1](https://doi.org/10.1175/bams-d-12-00145.1)
- Hoegh-Guldberg O., Hughes L., McIntyre S., Lindenmayer D.B., Parmesan C., Possingham H.P., et al. 2008: Assisted colonization and rapid climate change. *Science* 321(5887): 345–346. DOI: [10.1126/science.1157897](https://doi.org/10.1126/science.1157897)
- Somodí I., Molnár Zs., Czúcz B., Bede-Fazekas Á., Böloni J., Pásztor L., et al. 2017: Implementation and application of Multiple Potential Natural Vegetation models – a case study of Hungary. *Journal of Vegetation Science* 28(6): 1260–1269. DOI: [10.1111/jvs.12564](https://doi.org/10.1111/jvs.12564)
- Király G. & Horváth F. 2000: Magyarország flórájának térképezése: lehetőségek a térképezés hálórendszerének megválasztására. *Kitaibelia* 5(2): 357–368.
- Király G. 2003: A magyarországi flóratérképezés módszertani alapjai. *Flora Pannonica* 1(1): 3–20.
- Kotroczy Zs., Krakomperger Zs., Papp M., Bowden R.D. & Tóth J.A. 2007: A Síkfőkúti cseres-kocsánytalan tölgyes szerkezetének és fajösszetételének hosszútávú változása. *Természetvédelmi Közlemények* 13: 93–100.
- McLachlan J.S., Hellmann J.J. & Schwartz M.W. 2007: A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conservation Biology* 21: 297–302. DOI: [10.1111/j.1523-1739.2007.00676.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2007.00676.x)
- Mátyás Cs. 2009: Ecological challenges of climate change in Europe's continental, drought- threatened South-east. In: Groisman P.Y., Ivanov S.V. (eds): Regional Aspects of Climate-Terrestrial-Hydrologic Interactions in Non-boreal Eastern Europe. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, 35–46. DOI: [10.1007/978-90-481-2283-7_5](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2283-7_5)
- 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 Cs., Molnár Zs., Barina Z., Bauer N., Bíró M., Bodoncz L., et al. 2008: Vegetation-based landscape-regions of Hungary. *Acta Botanica Hungarica* 50(Suppl.): 47–58.
- Molnár M. & Lakatos F. 2007: A bükkpusztulás Zala-megyében – klímaváltozás? In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): Erdő és klíma V. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 257–267.

- Nikfeld H. 1971: Bericht über die Kartierung der Flora Mitteleuropas. *Taxon* 20: 545–571. DOI: [10.2307/1218258](https://doi.org/10.2307/1218258)
- Richardson D.M., Hellmann J.J., McLachlan J.S., Sax D.F., Schwartz M.W., Gonzalez P., et al. 2009: Multidimensional evaluation of managed relocation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 9721–9724. DOI: [10.1073/pnas.0902327106](https://doi.org/10.1073/pnas.0902327106)
- Roloff A. & Bärtels A. 2006: *Flora der Gehölze*. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Schwartz M.W. 2012: Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biological Conservation* 155:149–156. DOI: [10.1016/j.biocon.2012.06.011](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.06.011)
- Somogyi Z. 2007: A klíma, a klímaváltozás és a fanövedék néhány összefüggéséről. In: Mátyás Cs. & Vig P. (eds): *Erdő és klíma V. Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron*, 295–306.
- Standovár T., Bán M. & Kézdy P. (eds) 2017: *Erdőállapot-értékelés középhegységi erdeinkben. (Forest state assessment in submontane woodlands.)* Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság, Budapest.

On-line irodalom

URL1: Andreas Hamann's personal website / ClimateEU: historical and projected climate data for Europe. <https://sites.ualberta.ca/~ahamann/data/climateeu.html> (letöltve: 2018. 08. 01)

*Érkezett: 2018. május 4.
Közlésre elfogadva: 2018. május 31.*



Idős korosztályok győznek meg a tartamos gazdálkodásról

A normandiai kocsánytalan tölgy gazdálkodás több évszázados múltra tekinthet vissza. A Spessarttal vetekedő Bercé állományainak szépsége (felső kép) felelteti, hogy teljes egészében mesterséges beavatkozás eredménye, erdészkezek „műalkotása”. Az állományok utódai, a Mátyás Cs. és m.társai tanulmányában tárgyalt kísérletben, genetikailag is kiválónak bizonyultak. Nem meglepő, hogy idős állományokat természetvédelem alá vontak, és turisták búcsújáró helyeivé váltak. A felújult tölgyesek végvágás utáni állapota (alsó kép) viszont a laikusban kételyeket ébreszt a tartamos gazdálkodással szemben.

Fotó és szöveg: Mátyás Csaba (SOE)

LÉKEK NÖVÉNYZETÉT MEGHATÁROZÓ TÉNYEZŐK VIZSGÁLATA KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A MIKROKLÍMÁRA

Zagyvai Gergely¹, Eredics Attila², **Csiszár Ágnes¹**, **Korda Márton¹**, Lengyel Attila^{3,4},
Tiborcz Viktor¹ és Bartha Dénes¹

¹Soproni Egyetem, Növénytani és Természetvédelmi Intézet

²Soproni Egyetem, Környezet- és Földtudományi Intézet

³MTA Ökológiai Kutatóközpont, Ökológiai és Botanikai Intézet

⁴Wroclawi Egyetem, Vegetációökológiai Tanszék (Lengyelország)

Kivonat

Különböző magyarországi erdőállomány-típusokban kialakított, 12 lék mikroklíma mérőhálózatának adatelemzése alapján lineáris összefüggést találtunk a lékméret és egyes napi meteorológiai paraméterek között. Az állományban és a lékekben mért adatok összevetése az Országos Meteorológiai Szolgálat legközelebbi meteorológiai állomásának adataival szintén szabályos eltéréseket mutat. Az eredmények lehetőséget kínálnak egyes klímparaméterek, pl. napi maximum és minimum becslésére különböző méretű lékekben és a környező állományokban, a szabványos meteorológiai megfigyelések alapján. 109 lék esetében vizsgáltuk, hogy a lékek jellemzői hogyan állnak összefüggésben a fajdiverzitással. Arra is választ kerestünk, mennyire érzékenyek az újulat fajai a léteken belüli mikroklíma grádiensekre. A lékek korának és méretének hatása az egyes szociális magatartás típusok szerint eltérő, a lékek formája az újulat fajgazdagságára hat. A FAI (Forest Aridity Index) és a diverzitást jellemző változók között pozitív összefüggés mutatható ki. Az újulat léken belüli pozícióját vizsgálva megállapítható, hogy az összesített fajszám, egyedszám és effektív fajszám a lékek közepén a legmagasabb. A lékek üdőbb részeit jellegzetes mezofil fafajok újulatának megjelenése indikálja.

Kulcsszavak: mesterséges lék, mikroklíma, ökológiai gradiens, újulat, növényi diverzitás

STUDIES ON FACTORS INFLUENCING FOREST GAP VEGETATION WITH SPECIAL ATTENTION TO THE MICROCLIMATE

Abstract

Based on data from 12 microclimate measurement networks placed in different gaps of various forest stands in Hungary, linear correlation was found between the gap size and certain daily meteorological parameters. The comparison of the forest and gap data to the nearest state meteorological observatory also revealed systematic differences. These provide opportunity to estimate certain climatic parameters, e.g. daily maxima or minima in various sized gaps and the surrounding forest stand, based on standard meteorological observations. Relationship between attributes of 109 gaps and species diversity were analysed as well as indication of microclimatic gradient by regrowth species. Effect of gap age and size are different by social behaviour type. The shape of gaps affects the species richness of regrowth. Positive correlation was detected between Forest Aridity Index and diversity variables. The total number of species, individuals and effective numbers of regrowth species are highest in the centre of the gaps. Shady, moist areas of gaps are indicated by regrowth of typical mesophilous tree species.

Keywords: artificial gap, microclimate, ecological gradient, regrowth, plant diversity.

BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben hazánkban is egyre kifejezettebbé vált az igény a társadalom részéről a folyamatos erdőborítás fenntartása mellett megvalósuló erdőgazdálkodás iránt. A gyakorlati megvalósítást támogatva az elmúlt időszakban megélénkült a témával kapcsolatos kutatói aktivitás (Török 2000, Tobisch & Standovár 2005, Standovár 2006, Csépanyi 2008, Gálhidy 2008, Kenderes et al. 2007, 2008, Bartha & Puskás 2013, Csiszár et al. 2014). A korábban vágásos üzemmódban kezelt, homogén, egykorú állományok heterogenitásának fokozása vagy örökderőkké alakítása lécek nyitásával lehetséges. A Magyarországon üzemszerű léptékben bevezetett átalakító üzemmód lehetőséget adott a korábban részletesen tanulmányozott bükkösöktől eltérő erdőtársulás-csoportba tartozó állományok lékjeinek növényzeti és ökológiai vizsgálatára is.

A felújulás sikerét nagyban meghatározzák a lécek mikroklíma viszonyai, melyek elsősorban a lécek geometriai paramétereitől, a környező állomány jellemzőitől és a domborzattól függenek. A korábbi kutatások a besugárzás és felmelegedés szempontjából a lékméret (Minckler & Woerheide, 1965, Collins & Pickett, 1987) jelentőségét emelik ki, valamint eredményeket kínálnak a mikroklíma paraméterek lécen belüli mintázatára vonatkozóan is (Collins et al., 1985, Eredics 2014).

Céljaink, melyek a felújulási viszonyokra, a növényzet összetételi és szerkezeti jellemzőire, valamint az ezeket meghatározó ökológiai tényezőkre (kiemelten a mikroklímára) koncentráltak a következő pontokban foglalhatók össze.

- Az eltérő méretű lécek mikroklíma adatai mennyiben különböznek az erdei és nyílt területeken létesített referenciapontok, valamint az országos mérőhálózat adataitól.
- Hogyan befolyásolja a lécek területe, formája, a lécek nyitása óta eltelt idő és a klíma a lécek és szegélyük fajgazdagságát leíró változókat?
- A lécek fajszáma és fajsűrűsége mennyire függ a táji adottságoktól, az eltérő klímától?
- A különböző szociális magatartástípusba tartozó fajok jelenlétükkel és tömegességükkel mennyire reagálnak a vizsgált magyarázó változókra?
- Az újulat fontosabb fafajai hogyan oszlanak el a jellemző mikroklíma grádiensek mentén?

ANYAG ÉS MÓDSZER

Vizsgálatainkat a terepi felvételezések idején átalakító és szálaló üzemmódban kezelt erdőrészek területén kialakított mesterséges lécekben végeztük. A vizsgált lécek kora és mérete tág spektrumon változott. A gazdálkodással összefüggő előzményekből adódóan, szűkebb táji környezetben mindkét változó egységesebb eloszlást mutatott. A mikroklíma mérések (12 lék) lékjeinek többsége átfed és növénytani vizsgálatok (109 lék) lékjeivel. A

lékek növényzeti (újulat, cserje- és gyepszint) vizsgálatának eredményeit a mikroklíma mérésekkel összefüggésben értékeltük, annak érdekében, hogy az erdőgazdálkodási gyakorlatban is használható, természetvédelmi vonatkozásokkal is bíró eredményekkel járuljunk hozzá a folyamatos erdőborítás sikeres megvalósításához

Mikroklíma

A mikroklímára vonatkozóan három helyszínen került sor részletes mérésorozatra. A lékek mikroklímájának vizsgálatát mindig lombos állapotban, összesen 12 különböző méretű lékben végeztük el a léghőmérséklet (T) és relatív páratartalom (Rh) több ponton történő egyidejű mérésével (1. táblázat).

A lékekben egy É–D-i és egy K–Ny-i transzekt mentén 5 méterenként, a legnagyobb lékekben 10 méterenként mikroklíma mérő állomásokat helyeztünk el 1 m magasságban, melyek a T és Rh értékeket 5 percenként rögzítették. A soproni mérőhálózat a két lékben párhuzamosan üzemelt (17, ill. 20 mérési ponttal), a másik két helyszínen a 15 mérési pontból álló hálózatot 2–4 hét mérés után mindig újabb lékbe telepítettük. Mindhárom kísérleti terület közelében (max. távolság 500 m) kijelöltünk egy *nyílt területi referencia* pontot, és a zárt állomány alatt egy *erdei referencia* pontot is, melyek végig egy helyben maradtak. A *nyílt területi referencia* pont Sopronban a Harkai legelőn, Csörötneken egy felújítás alatt álló vágásterület szélén, Zánkán pedig egy szántóföldek közötti árokparton volt.

A lékek méretét legegyszerűbben az átlagos lékátmérő és a famagasság hányadosával ($D_{\text{át}}/H$) lehet jellemezni, de az átlagos lékméret megállapítása szabálytalan alakú lékeknél, illetve olyan esetekben, amikor a léken belül egy vagy több hagyásfa is található, meglehetősen bizonytalan. Ezért a lékméret számszerűsítésére az ekvivalens átmérő és a famagasság hányadosát (D_{ekv}/H) alkalmaztuk. Az ekvivalens átmérő egy akkora szabályos kör átmérője, melynek területe megegyezik a szabálytalan alakú lék szabad (tehát hagyásfával sem borított) területével. Az elemzések során a D_{ekv}/H mutató szorosabb korrelációt mutatott a meteorológiai paraméterek eloszlásával, mint a hagyományos $D_{\text{át}}/H$ mutató, ezért az összefüggéseket a D_{ekv}/H mutató függvényében számszerűsítettük (1. táblázat).

A mérésekhez alkalmazott szenzorokat minden évben a mérések előtt és után is kalibráltuk, így az egyes érzékelők közötti maradék bizonytalanság $\pm 0,2$ °C, ill. $\pm 3\%$ mértékűre csökkent. Az 5 perces időközű mérési adatsorokat hibaszűrés és kalibrációs korrekció után 15 perces mozgóátlaggal simítottuk, majd minden mérési pontra napi statisztikákat (átlag, minimum, maximum, napi ingás) számítottunk.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) mérőhálózatának óránkénti adatai a NOAA online adatbázisából származnak (NOAA NCEI 2017), melyekből szintén napi statisztikákat számítottunk. A *OMSZ referencia* állomások lékekhez viszonyított adatait a 2. táblázat foglalja össze.



1. táblázat: A mikroklíma-mérésekkel érintett lékek és főbb jellemzőik.
Table 1: Main parameters of gaps related to the microclimate measures.

	átmérő É-D (m)	átmérő K-Ny (m)	Átlagos át- mérő / Famagasság $D_{\text{át}}/H$	Ekvivalens át- mérő / Famagasság D_{ekv}/H	Mérések éve	Erdőrészlet	Állománytípus	Főfafajok	Átlagos magasság (m)
1.	20	20	1,00	1,09	2015	Sopron 80/C	gyertyános- kocsánytalan tölgyes	kocsánytalan tölgy	20
2.	30	30	1,50	1,58					
3.	20	20	0,80	0,75					
4.	20	40	1,20	1,07	2016	Csőrötnek 43/D	fenyőelegyes tölgyes	kocsánytalan tölgy, kocsányos tölgy, erdeifenyő, bükk	25
5.	10	20	0,60	0,48					
6.	9	8	0,34	0,32					
7.	25	50	1,50	1,35					
8.	20	15	0,88	0,69	2017	Zánka 1/B	cseres-kocsánytalan tölgyes	kocsánytalan tölgy, csertölgy	20
9.	20	15	0,97	0,94		Zánka 15/A	cseres	csertölgy, mezei juhar	18
10.	25	15	1,11	0,89					
11.	27	15	1,17	1,05					
12.	14	8	0,61	0,50					

2. táblázat: A referenciaként használt OMSZ meteorológiai állomások lékekhez viszonyított helyzetének adatai.

Table 2: Position data of the nearest state meteorological observatory (OMSZ) compared to the studied gaps.

Lékek helye	OMSZ állomás		
	Helye	Távolsága (km)	T.sz.f. magasság különbség (m)
Sopron 80/C	Sopron, Kurucdomb	3,4	-50
Csörötnek 43/D	Szentgotthárd-Farkasfa	3,5	3
Zánka 1/B, 15/A	Veszprém-Szentkirályszabadja	33,5	90

Az egyes lékekben a mérések 11–80 napon keresztül zajlottak, de a hosszabb adatso-rokból csak azokat a napokat használtuk fel a lékek jellemzésére, melyek időjárása az OMSZ referencia állomás adatai alapján hasonló tartományban mozgott, vagyis: a mérési periódus legalacsonyabb napi minimum hőmérséklete 8-13 °C, a legmagasabb napi maxi-mum hőmérséklete 28-33 °C, a teljes periódus átlaghőmérséklete pedig a 17-24 °C tartomá-nyon belül változott.

Az értékelés során nem közvetlenül a mért meteorológiai paramétereket (T , Rh) elemez-tük, hanem azok eltérését (különbségét) az *erdei referencia* ponttól (ΔT , ΔRh), vagyis azt vizsgáltuk, hogy a lékek pontjai, valamint a *nyílt területi referencia* és az OMSZ referencia pontok mennyivel melegebbek/hidegebbek, ill. szárazabbak/párásabbak az *erdei referenci-ánál* (zárt erdőnél). Az összehasonlításoknál a lék pontjaiba beleszámítottuk a lék peremén elhelyezkedő pontokat és a lékben lévő nagyásfák alatti pontokat is.

Az adott meteorológiai paraméter (P) eltéréseinek nagyságát (ΔP) a lékméret függvényé-ben egyszerű lineáris regresszióval közelítettük, ami a vizsgált lékméret tartományban ($0,3 \leq D_{ekv}/H \leq 1,7$) jó közelítésnek bizonyult:

$$\Delta P = a \frac{D_{ekv}}{H} + b \quad (1)$$

ahol ΔP a meteorológiai tényező (T vagy Rh) eltérése az *erdei referencia* ponttól, a és b pedig lineáris regressziós paraméterek.

Az adatfeldolgozást és értékelést Scilab 5.4.1 (Scilab Enterprises 2012) környezetben írt, saját fejlesztésű algoritmusokkal és programokkal végeztük.

Lékek növényzete

109 db lék növényzetét vizsgáltuk, melyek Bejcggyertyános, Budapest (II. kerület), Csö-rötnek, Fenyőfő, Pécsely, Sopron, Vállus, Vép, Zánka községhatároiban helyezkedtek el. A lékeket 2-13 évvel a felvételezésüket megelőzően alakították ki. Erdőtársulás-csoport szerint

cseres-kocsánytalan tölgyesben, gyertyános-kocsánytalan tölgyesben, fenyőlegyes tölgyesben, méz- és melegkedvelő tölgyesben és sziklaerdőben dolgoztunk. Az egyes lékek felvételezését 2013 nyarán egy alkalommal, két térbeli léptékben végeztük: először rögzítettük a lék paramétereit és az egyes növényfajok borítását a lék egészére vonatkozóan, majd a lék átlóira fektetett mintakörökből álló transzektek segítségével részletes cönológiai felvételeket készítettünk. Az adatrögzítés során a cserje-, gye- és újulati szinteket külön-külön vizsgáltuk. A lékeken belüli mintakörökben az újulat fajonkénti egyedszámát és magasságát szintén rögzítettük. Az adatok kiértékelése során minden mintaléket tartalmazó erdőrészletre lekérdeztük a terület klimatikus adottságait jellemző erdészeti aszályossági index (FAI) értékét (Führer et al. 2011).

A lékek összehasonlító vizsgálata során Spearman-féle rangkorrelációs tesztekkel megvizsgáltuk, hogy a lékek kora, területe, az erdőrészlet FAI indexe és a lék alakját jellemző lékindex hogyan áll összefüggésben a cserje- és gyepszint teljes fajszámával, fajsűrűségével (mintakörönkénti átlagos fajszámával), egyenletességével, az újulat egyed- és fajsűrűségével, valamint az újulat magasságával. Az utóbb felsorolt függő változókat a lék tényleges területére és a lék szegélyére vonatkozóan is vizsgáltuk. A lék és a szegély fajsűrűsége korrelálhat egymással, hiszen (legalább részben) azonos regionális fajkészletből „táplálkoznak”: fajgazdag tájban a lékek és a szegélyek is gazdagabbak, míg fajszegény tájban mindkettő szegényebbek lehetnek (Pärtel et al. 1996). Fontos többletinformációt rejthet azonban a lék fajsűrűségének a regionális fajkészlettel független komponense, vagyis a táji léptékű fajgazdagság alapján várt fajsűrűségtől való eltérés mértéke. Mivel a regionális fajkészlet méretére vonatkozóan nem végeztünk felmérést, helyette a szegély fajsűrűségét használjuk közelítő értéként. A keresett eltérést leíró változó pedig nem más, mint annak az általános lineáris modellnek a reziduálisa, amelyben a függő változó a lék fajsűrűsége, a magyarázó változó pedig a szegély fajsűrűsége. Az összefüggések szignifikanciáját permutációs tesztekkel állapítottuk meg. A tesztek elvégeztük a teljes fajkészletre és külön-külön szociális magartatás típusokra bontva is (Borhidi 1993).

A lékeken belüli előfordulási mintázatok kiértékelése során a léken belüli mintakörök sorszámait 0 és 1 közé standardizáltuk úgy, hogy a transzekt északi és keleti végén lévő mintakörök értéke 0 lett, a déli és nyugati végén lévőké 1, a középen lévőé 0,5. Ezzel a lékméret hatásától függetlenítettük az elemzést. A keleti és a nyugati oldalt elvileg azonos ideig süti a nap (amennyiben a kitétségnek nincs jelentős módosító hatása), viszont a nyugati oldalt érő délelőtti napsütés hatása gyengébb, mivel az éjszakai harmat még üdebb mikroklimát biztosít a növényeknek. A korábbi vizsgálatok szerint a léken belüli szárazság-grádiens az ÉK–DNY irány mentén változik a legerősebben. A maximális hőmérsékletek és minimális páratartalmak a lék középpontjához képest É–ÉK-i irányban eltolódva jelentkeznek (pl. Collins et al., 1985, Eredics 2014). A standardizált pozíció függvényében kvantilis regresszió (Cade & Noon 2003) segítségével modelleztük egyedi fajok, areatípusok, valamint a teljes fajszám, a teljes egyedszám és az effektív fajszám (a Shannon-féle entrópia exponense; Hill 1973) változását.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Mikroklíma

A napi átlaghőmérsékletek átlagának vizsgálatakor a különböző lékméretetek hatása alig kimutatható, csak gyenge pozitív korreláció fedezhető fel az adatokban. A zárt állományhoz képest a lécek pontjainak átlaghőmérséklete a soproni és csörotneki lécek esetében alig 0,0-0,2 °C-kal magasabb, de a zánkai száraz tölgyesekben is csak 0,3-0,8 °C-kal magasabb. A *nyílt területi referencia* pont napi átlaghőmérséklete 0,5-0,8 °C-kal, az *OMSZ referencia* pont napi átlaghőmérséklete pedig 0,1-0,2 °C-kal volt magasabb a zárt állománynál. Ez utóbbi eredményt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy a zárt erdőállományok napi átlaghőmérséklete átlagosan 0,2 °C-kal alacsonyabb a legközelebbi OMSZ mérőállomás napi átlaghőmérsékleténél.

Eredményeink szerint a lécek legmelegebb pontjainak napi maximumhőmérséklete ($T_{napi\ max}$) esetében a lékmérettől való függés jól kimutatható, ami szinkronban van az előzetes várakozásokkal, melyek szerint a besugárzás mértéke és az ebből adódó felmelegedés is arányos a lék méretével (Minckler & Woerheide, 1965, Collins & Pickett, 1987). A különböző állományok között felfedezhető némi szisztematikus eltérés, de az összes léket tekintve is magas határozottsági fokú összefüggést kapunk, az (1) egyenlet alapján konkrét értékekkel:

$$\left(\Delta(T_{napi\ max})\right)_{\max} = 6,13 \frac{D_{ekv}}{H} - 1,43 \quad R^2=0,78 \quad (2)$$

ahol $(\Delta(T_{napi\ max}))_{\max}$ a lécek legmelegebb pontján a mérési időszakban mért legmagasabb napi maximumhőmérséklet eltérés a zárt állománytól. A (2) egyenlet tehát azt adja meg, hogy a lécek legmelegebb pontja maximálisan hány fokkal lehet melegebb a zárt erdőnél.

A nyílt területek legnagyobb napi maximumhőmérséklete 6-8 °C-kal, az OMSZ állomásoké pedig 3-4 °C-kal magasabb a zárt állományoknál. Ebből az is látszik, hogy a nagyobb lécekben még a nyílt területnél is magasabb hőmérsékletek alakulhatnak ki, ami a szél korlátozott keverő hatásával magyarázható: a lécekben könnyebben megül a forró levegő (hőkatlan), míg a nyílt területen már egy kisebb szellő is hatékonyabban hűti a felszínt.

Az előző összefüggések a lécek és a zárt állomány között a mérési időszakban valaha is észlelt legnagyobb hőmérsékleti különbséget írták le, de ilyen viszonylag ritkán fordul elő. Ha a napi maximum hőmérsékletek eltérésének nem az abszolút maximumát tekintjük, mint az előbb, hanem az átlagát, akkor arról kapunk képet, hogy átlagosan mennyivel melegebb a lécek legmelegebb pontja. A (3) egyenlet tehát a rendszeresen ismétlődő „hőterhelés” nagyságát jellemzi a lécekben:

$$\left(\Delta(T_{napi\ max})\right)_{\text{átlag}} = 3,35 \frac{D_{ekv}}{H} - 0,5 \quad R^2=0,61 \quad (3)$$

ahol $(\Delta(T_{\text{napi max}}))_{\text{átlag}}$ a lécek legmelegebb pontján a mérési időszakban mért napi maximumhőmérsékletek átlagának eltérése a zárt állomány napi maximumhőmérsékleteinek átlagától. A (3) egyenlet tehát azt adja meg, hogy a lécek legmelegebb pontja átlagosan hány fokkal melegebb a zárt erdőnél.

A nyílt területek átlagos napi maximumhőmérséklete 5-6 °C-kal, az OMSZ állomásoké pedig 2-3 °C-kal magasabb a zárt állományoknál. Ezek alapján megállapítható, hogy a napi maximumhőmérsékletek átlagos eltérése a zárt erdőtől a nyílt területen a legnagyobb, és nem a lécekben.

A relatív páratartalom értékeiről megállapítható, hogy a várakozásoknak megfelelően a hőmérséklettel fordítottan arányosan változnak, vagyis a magasabb hőmérsékletekhez alacsonyabb relatív páratartalmak tartoznak. Az adatok elemzésével kapott összefüggéseket a 3. táblázat foglalja össze. Azokban az esetekben, ahol a lécek pontjaira a lékméret függvényében nem lehetett magas határozottsági fokú összefüggést felírni, illetve az adott változó értéke nem függ a lék méretétől, ott a különbséget egy átlagos konstanssal és a 90%-os konfidencia intervallum feltüntetésével jellemeztük.

3. táblázat. A különböző meteorológiai változók átlagos és maximális eltérése az erdei referencia ponttól: az (1) egyenlet szerinti lineáris regresszió a és b paramétere, ill. R^2 határozottsági foka, vagy átlagos eltérés konstansként $\pm 90\%$ -os konfidencia intervallum. Az eredmények $0,3 \leq D_{\text{ekv}}/H \leq 1,7$ méretű lécekben, tipikus nyári napok esetén igazak: $8^\circ\text{C} \leq T_{\text{min}} \leq 13^\circ\text{C}$, $17^\circ\text{C} \leq T_{\text{átl}} \leq 24^\circ\text{C}$, $28^\circ\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 33^\circ\text{C}$.

(OMSZ referencia napi hőmérséklet)

Table 3: Average and maximum differences of the meteorological variables compared to the forest stand reference point: a and b parameters and R^2 of linear regression according to equation (1), or average difference as constant $\pm 90\%$ confidence interval. The results are valid if gap size is $0,3 \leq D_{\text{ekv}}/H \leq 1,7$, on typical summer days, when $8^\circ\text{C} \leq T_{\text{min}} \leq 13^\circ\text{C}$, $17^\circ\text{C} \leq T_{\text{mean}} \leq 24^\circ\text{C}$, $28^\circ\text{C} \leq T_{\text{max}} \leq 33^\circ\text{C}$.

(OMSZ reference daily temperature)

Meteorológiai változó	Lécek pontjai			Nyílt ref.	OMSZ ref.	
	lékméret függvényében az (1) egyenlet szerint					
eltérése a zárt állománytól	a	b	R^2	konsztansként °C vagy %	konsztansként °C vagy %	konsztansként °C vagy %
	maximális eltérés					
napi átlaghőmérséklet				0,5±0,2	0,8±0,3	0,3±0,2
napi maximumhőmérséklet	6,13	-1,43	0,78		6,7±1,3	3,4±0,9
napi maximális hőingás	6,69	-1,76	0,74		9,1±2,7	3,6±1,7
napi minimális páratartalom	-12,53	1,95	0,69		-22±15	-25±23
átlagos eltérés						
napi átlaghőmérséklet				0,3±0,1	0,7±0,4	0,2±0,1
napi maximumhőmérséklet	3,35	-0,50	0,61		5,7±0,7	2,5±0,9
napi maximális hőingás	3,46	-0,49	0,64		8,3±1,8	3,2±2,3
napi minimális páratartalom	-6,76	0,07	0,49		-17±10	-17±9

Lékek növényzete

A lékek összehasonlító elemzése során vizsgáltuk a magyarázó változók (terület, lékindex, kor, FAI) és a fajdiverzitására vonatkozó függő változók összefüggéseit az összes felvett fajra vonatkozóan. Magas korrelációs értékeket kaptunk a lék és szegélyének fajsűrűsége, fajszáma, valamint az erdészeti aszályossági index (FAI) között. A léken belüli fajsűrűség reziduálisa és a FAI között azonban nem áll fenn szignifikáns összefüggés, ami arra utal, hogy magasabb fajsűrűség és fajszám a nyíltabb, fényben gazdag, szárazabb erdők sajátja, tehát inkább táji adottság, mint a lékek nyitásával összefüggő sajátosság (4. táblázat).

4. táblázat: A lékek magyarázó és függő változóinak korrelációs mátrixa az összes fajra vonatkozóan ("+++" vagy "---": $p < 0,001$, "++" vagy "--": $p < 0,01$, "+" vagy "-": $p < 0,05$, "=": nincs hatás).

Table 4: Correlation matrix of independent and dependent variables for all species ("+++" or "---": $p < 0,001$, "++" or "--": $p < 0,01$, "+" or "-": $p < 0,05$, "=": non-effect).

	Terület	Lékindex	Kor	FAI
Cserje- és gyepszintben a lék teljes fajszáma	=	=	=	+++
Cserje- és gyepszintben a lék fajsűrűsége	=	+	=	+++
Cserje- és gyepszintben a szegély fajsűrűsége	=	=	=	+++
Cserje- és gyepszintben a lék egyenletessége	=	=	+++	+++
Cserje- és gyepszintben a szegély egyenletessége	=	=	+++	=
Cserje- és gyepszintben a fajsűrűség reziduálisa	=	++	=	=
Az újulat fajsűrűsége a lékben	=	++	=	+++
Az újulat fajsűrűsége a szegélyben	=	+	=	+++
Az újulat egyedsűrűsége a lékben	+	=	=	=
Az újulat egyedsűrűsége a szegélyben	=	=	=	=
Az újulat magassága a lékben	=	+	+++	++
Az újulat magassága a szegélyben	=	=	++	+++

Az összes fajt vizsgálva megállapítható, hogy az egyenletesség értéke a lékek korának előrehaladtával a lékekben és közvetlen szegélyükben egyaránt nő. A lék formájának ki egyenlítetttsége közepesen erős pozitív összefüggést mutat az újulat fajsűrűségével (mintaköreinek fajszámával). Valószínűsíthetően a körhöz hasonló lékek adottságai kedveznek az erdőállományok állományalkotó fafajai mellett az elegyfajok nagyobb számú megjelenésének is.

A fentihez hasonló korrelációs vizsgálatot úgy is elvégeztük, hogy a teljes fajlistát szociális magatartás típusok (SBT) szerint csoportosítottuk, melyek közül a legfontosabb eredményeket emeljük ki. A természetes kompetitorok (C) fajszámával és fajsűrűségével a lék

nyitása óta eltelt időtartam mutat erős összefüggést a cserje- és gyepszintre vonatkozóan. A kor összefüggése a vonatkozó reziduális értékkel szintén erős, így megállapítható, hogy a jelenség a lékeket a táji sajátosságoktól függetlenül jellemzi (pl. *Carex pilosa*, *Luzula luzuloides*, *Stellaria holostea*, *Poa nemoralis*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Fraxinus ornus*, *Quercus petraea*, *Quercus robur*, *Quercus cerris*, *Tilia platyphyllos*).

A szárazabb klímájú lékek és szegélyeik egyaránt gazdagabbak generalista fajokban (G) a vizsgált növényzeti szintek mindegyikében, mint a nedvesebb állományok mintaterületei. Az újulat esetében az erős pozitív összefüggés az újulat egyedszámára és magassági értékeire is vonatkozik, nemcsak az erdészeti aszályossági index (FAI), hanem a lék korának függvényében is (pl.: *Ajuga reptans*, *Brachypodium sylvaticum*, *Clinopodium vulgare*, *Acer campestre*, *Acer platanoides*, *Tilia cordata*, *Ulmus minor*, *Sorbus torminalis*, *Pyrus pyraster*).

Eredményeink szerint a specialista fajoknak (S) kedvez a dinamikai folyamatok léknyitást követő iránya, a specialisták nagyobb fajszámában az idősebb lékekben fordulnak elő (pl.: *Lathyrus vernus*, *Galium rotundifolium*, *Dryopteris carthusiana*, *Cotinus coggygria*, *Acer pseudoplatanus*, *Acer tataricum*, *Cerasus avium*, *Sorbus domestica*, *Padus avium*). E megállapítás természetesen a vizsgált lékek korának léptékére (2–13 év) vonatkozik, a felújulás ciklusának ezt követő, nagyobbik szakaszáról nincsenek információink.

A léknyitással járó bolygatáshoz erősen kötődő honos gyomfajok (W) és különösen a ruderalis kompetitorok (RC) fajszámra vonatkozó változói a lék korával negatív összefüggést körvonalaznak, tehát az idő előre haladtával „kikopnak” a lékekből, miközben a természetes kompetitorok és specialisták fajszáma növekszik. A ruderalis kompetitorok (RC) fajszáma és fajszűrősége egyaránt magasabb a nagyobb területű lékekben (W – pl.: *Ballota nigra*, *Chelidonium majus*, *Galium aparine*, *Lamium purpureum*, *Sambucus nigra*; RC – pl.: *Calamagrostis epigeios*, *Chenopodium album*, *Taraxacum officinale*, *Bromus sterilis*).

A magyarázó változók hatását a szociális magatartás-típusok csoporttömegére vonatkozóan is vizsgáltuk. A szárazabb klímájú erdőállományokban nyitott lékekben a természetes kompetitorok (C), generalisták (G), specialisták (S) és idegenhonos gyomok (A) nagyobb borításértékekkel vannak jelen. Nedvesebb klímában a zavarástűrő fajok (DT) szerepe kiemelkedő. A zavarástűrők (DT) tömege az idősebb lékekben növekszik, hasonlóan az idegenhonos gyomokhoz (A). A ruderalis kompetitorok (RC) definíciójából logikusan magyarázható az az összefüggés, hogy a típusba tartozó fajok a nagyobb és körhöz hasonló alakú lékekben találják meg azokat a bolygatott felszíneket, melyek kedveznek nagyobb mértékű terjedésüknek (5. táblázat).

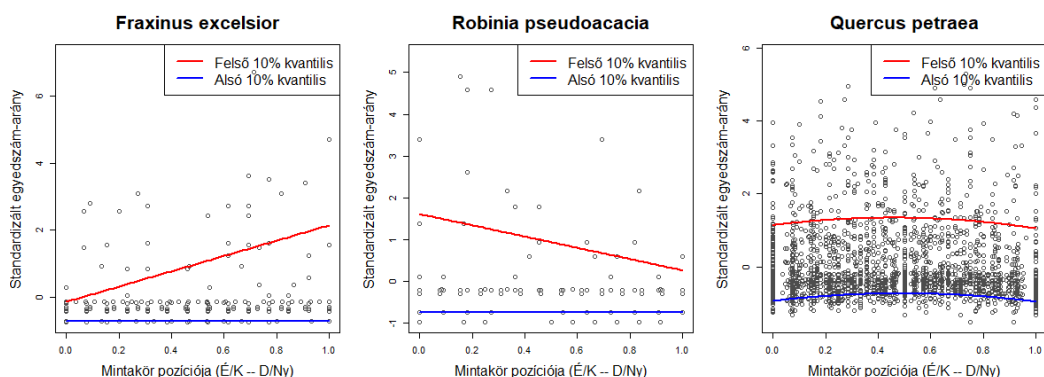
A vizsgálat során arra is választ kerestünk, hogyan indikálhatja az újulat a léteken belüli mikroklíma grádienseket. A tesztek eredményei szerint a fajszám, az egyedszám és az effektív fajszám kicsivel magasabb volt a lék közepén, mint a szélein, és valamivel magasabb a déli és nyugati részen, mint az északi és keleti részen. Unimodális válaszgörbét mutatott a közönséges nyír (*Betula pendula*), a csertölgy (*Quercus cerris*), a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) és a közönséges gyertyán (*Carpinus betulus*). A fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) egyedszáma a lék széleihez közel, de inkább az északi és keleti oldalon ért el

magasabb értékeket. Jobbára a lék hűvösebb, déli és nyugati oldalát preferálta a közönséges bükk (*Fagus sylvatica*), a hegyi juhar (*Acer pseudoplatanus*) és a magas kőris (*Fraxinus excelsior*) (1. ábra). Az adventív fajok csoportja a lékek északi és keleti részén magasabb részesedést mutattak, ami gyakorlatilag az akác mintázatát tükrözi.

5. táblázat: A lékek magyarázó változóinak és a szociális magatartás típusok csoporttömeg értékeinek korrelációs mátrixa az összes fajra vonatkozóan ("+++ vagy "---": $p < 0,001$, "++" vagy "--": $p < 0,01$, "+" vagy "-": $p < 0,05$, "=": nincs hatás, ".": nem végezhető el az összehasonlítás).

Table 5: Correlation matrix of variables and dominance proportion of social behaviour types for all species ("+++ or "---": $p < 0,001$, "++" or "--": $p < 0,01$, "+" or "-": $p < 0,05$, "=": no significant correlation).

	Terület	Lékindex	Kor	FAI
C - természetes kompetitorok	=	=	-	+++
G - generalisták, tág ökológiájú stressztűrők	=	=	=	+++
S - specialisták, szűk ökológiájú stressztűrők	=	=	=	+++
DT - zavarástűrő növények	=	=	+++	---
AC - tájidegen, agresszív kompetitorok	-	=	=	=
W - honos gyomfajok	=	=	=	=
RC - a honos flóra ruderalis kompetitorai	++	++	=	=
Su - unikális specialisták	=	=	--	--
I - meghonosodott és kivadult haszonnövények	=	=	+	=
A - adventív elemek	-	-	+++	+++
NP - természetes pionírok	=	=	=	=



1. ábra: Három jellegzetes élőhelyigényű faj standardizált egyedszámának eloszlása a léken belüli pozíció függvényében, 10% és 90%-os kvantilisre illesztett regresszióval.

Figure 1: Distribution of number of individuals after standardization of three tree species representing different habitat types, along position in gap using quantile (10 and 90%) regression.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A körhöz hasonló alakú lékekben a legmelegebb részeket (É-i és K-i oldal) a nap pályája határozta meg az elméleti várakozásoknak megfelelően. A lécek újulatának elemzése során a mezofil bükk és tipikus bükkös elegyfajként a hegyi juhar, valamint a magas kőris jól indikáltak a transzektek ellenkező oldalán elhelyezkedő árnyékosabb, üdőbb területeket.

A többi fafaj esetében az újulat lékeken belüli diverzitási mutatói és a legtöbb fafaj csemeteszáma a lécek közepén éri el maximumát.

A szabálytalan alakú és/vagy hagyásfákkal tarkított lékekben a meteorológiai változók eloszlása jobb korrelációt mutatott a D_{ekv}/H aránnyal, mint a $D_{át}/H$ aránnyal, vagyis a mikroklíma alakulása pontosabban becsülhető a lécek nyílt felszínének nagysága alapján, mint a két léktengely átlagos átmérője alapján.

A körhöz hasonló kiegyenlített lékforma pozitívan befolyásolja az újulat fajsűrűségét, ami összefügghet azzal, hogy ezekben a lékekben a léknyitás mikroklímát módosító hatása fokozottabban érvényesül. Az egységnyi területre jutó magasabb fajsűrűség a lécek újulatában esélyt ad arra, hogy elegyesebbé váljon az erdőállomány. Az újulat magasabb fajdiverzitása a vizsgált korai felújulási stádiumokban szükséges, de nem elégséges feltétele az állomány ilyen irányú átalakulásának.

A zárt állomány mikroklímája a legkiegyenlítettebb. A nagyobb lékekben időnként még a nyílt területnél is magasabb hőmérsékletek alakulhatnak ki (hőkatlan), de az átlagos napi maximumhőmérsékletek a nagy nyílt területeken a legnagyobbak, és nem a lékekben. A relatív páratartalom minimális értékei a maximumhőmérséklettel összhangban, de azzal fordítottan arányosan változnak, ami fokozza a szélsőséges időjárási helyzetek párolgást kényszerítő (szárító) hatását. Ez a nagy lékméreteknél jelentkező fokozott szárító hatás kedvezőtlenül befolyásolja a mezofil erdei növényfajok és fafajok újulatának életképességét. Az újulat érdekében minden esetben fontos a kielégítő fény mennyiséget biztosító ideális lékméret meghatározása, azzal azonban számolni kell, hogy a lék méretének növelésével a fényigényes ruderalis kompetitor fajok száma és borítása egyaránt emelkedik.

Erdőművelési és természetvédelmi szempontból is pozitív eredmény, hogy a lécek korának növekedésével a felújulást is akadályozó ruderalis és adventív kompetitorok és gyomfajok száma csökken, a természetközeli erdőtársulásokra jellemző kompetitorok, generalisták és specialisták száma növekszik.

A háttérváltozóként használt erdészeti aszályossági index (FAI) és a diverzitást jellemző változók között pozitív összefüggés mutatható ki, mely elsősorban a klíma által befolyásolt táji különbségekre vezethető vissza, a szárazabb erdőtársulásokra jellemző magasabb szerkezeti (nyíltabb állományok) és fajdiverzitási jellemzőkkel hozható összefüggésbe

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk köszönetet mondani a lékek, ill. a mérőhálózat kialakításához nyújtott segítségért Köveskúti Zoltánnak és Schiffer Sándornak. A kutatást a VKSZ_12-1-2013-0034 „Agrárklíma 2” projekt támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bartha D. & Puskás L. (eds) 2013: *Silva naturalis* Vol.1. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron.
- Borhidi A. 1993: *A Magyar Flóra szociális magatartás típusai, természetességi és relatív ökológiai értékszámai*. Janus Pannonius Tudományegyetem, Pécs.
- Cade B.S. & Noon B.R. 2003: A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1(8): 412–420. DOI: [10.2307/3868138](https://doi.org/10.2307/3868138)
- Collins B.S., Dunnean K.P. & Pickett S.T.A. 1985: Responses of forest herbs to canopy gaps. In: Pickett S.T.A. & White P.S. (eds): *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Orlando, Florida, 217–234. DOI: [10.1016/b978-0-12-554520-4.50017-4](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-554520-4.50017-4)
- Collins B.S. & Pickett S.T.A. 1987: Influence of canopy opening on the environment and herb-layer in a northern hardwoods forest. *Vegetatio* 70: 3–10. DOI: [10.1007/BF00040752](https://doi.org/10.1007/BF00040752)
- Csépányi P. 2008: A tölgy és folyamatos erdőborítás. *Erdészeti Lapok* 143(10): 294–297.
- Csiszár Á., Korda M., Zagyvai G., Tiborc V., Süle P., Šporčič D., et al. 2014: Gyertyános-tölgyesben kialakított lékek újulatanak vizsgálata a Soproni-hegység területén. *Erdészettudományi Közlemények* 4(1): 23–35.
- Eredics A. 2014: Mikroklimatikus viszonyok vizsgálata. In: Bartha D. & Puskás L. (eds): *Silva naturalis* Vol. 6. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, 10–34.
- Führer E., Marosi Gy., Jagodics A. & Juhász I. 2011: A klímaváltozás egy lehetséges hatása az erdőgazdálkodásban. *Erdészettudományi Közlemények* 1(1): 17–28.
- Gálhidy L. 2008: *Az aljnövényzet fajösszetételének és tömegességének változásai középhegységi bükkösök mesterséges és szeldöntés nyomán létrejövő lékjeiben*. Doktori értekezés. ELTE Növényrendszertani és Ökológiai Tanszék, Budapest.
- Hill M.O. 1973: Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. *Ecology* 54(2): 427–432. DOI: [10.2307/1934352](https://doi.org/10.2307/1934352)
- Kenderes K., Tímár G., Ódor P., Bartha D., Standovár T., Bodoncz L., et al. 2007: A természetvédelem hatása középhegységi erdeinkre. *Természetvédelmi Közlemények* 13: 69–80.
- Kenderes K., Mihók B. & Standovár T. 2008: Thirty years of gap dynamics in a central european beech forest reserve. *Forestry* 81(1): 111–123. DOI: [10.1093/forestry/cpn001](https://doi.org/10.1093/forestry/cpn001)
- Minckler L.S. & Woerheide J.D. 1965: Reproduction of hardwoods 10 years after cutting as affected by site and opening size. *Journal of Forestry* 63: 103–107.
- Pärtel M., Zobel M., Zobel K. & van der Maarel E. 1996: The species pool and its relation to species richness: Evidence from Estonian plant communities. *Oikos* 75(1): 111–117. DOI: [10.2307/3546327](https://doi.org/10.2307/3546327)
- Standovár T. 2006: *Biológiai megfontolások az erdei életközösségek hatékony védelméhez*. Magyar Tudomány 2006(6): 656–662.



Tobisch T. & Standovár T. 2005: A comparison of vegetation patterns in the tree and herb layers of a hardwood forest. *Community Ecology* 6(1): 29–37. DOI: [10.1556/comec.6.2005.1.4](https://doi.org/10.1556/comec.6.2005.1.4)

Török A. 2000: Égtájiorientált, erdőtípus-érzékeny természetes felújítási rendszer. *Erdészeti Lapok* 135: 170–171.

On-line és digitális irodalom

NOAA NCEI 2017: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Centers for Environmental Information. Elérés: www.ncei.noaa.gov (letöltve: 2018. 08. 01.)

Scilab Enterprises 2012: Scilab: Free and Open Source software for numerical computation (OS, Version 5.XX) [Szoftver]. Elérés: www.scilab.org

Érkezett: 2018. május 4.

Közlésre elfogadva: 2018. május 31.

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

Szenáriók és klímaadatok

A szenáriók (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 szenáriója 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.

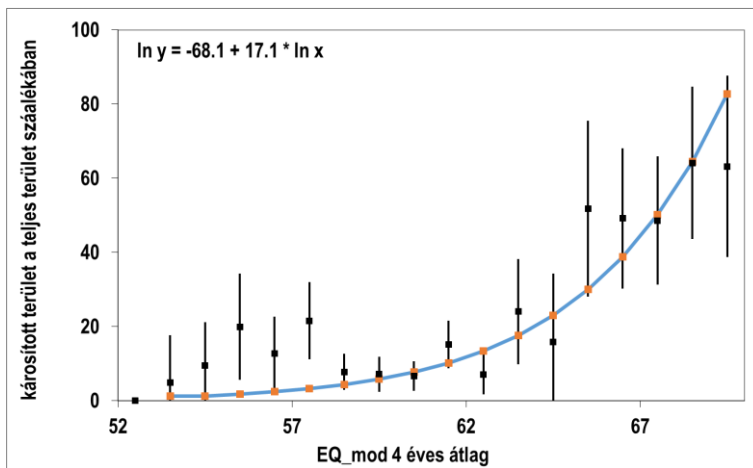
Az aszály-függő jövőbeli mortalitás becslése

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 Rasztovics 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).

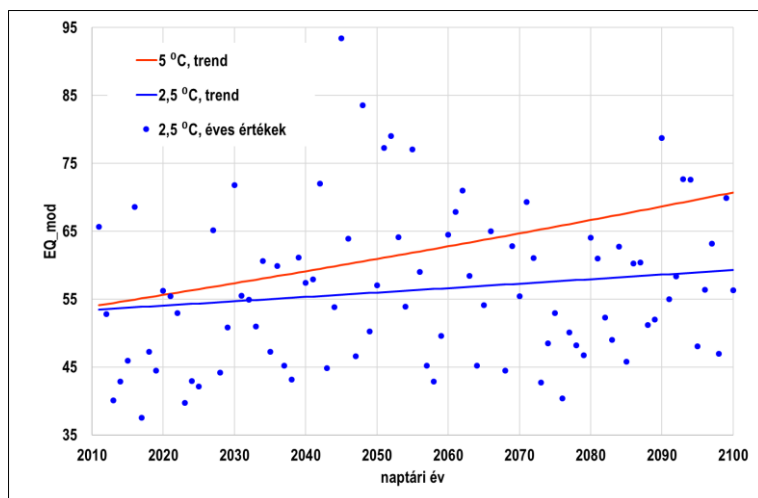


1. ábra: A Rasztovics et al. (2014) által azonosított EQ_mod – mortalitás összefüggés (a hozzájuk tartozó 95%-os konfidencia-intervallumokkal, feketével), az azokra illesztett függvény (sárga pontokkal és kék görbével), valamint annak paramétereit. A lineáris regressziós illesztés R2-értéke 0,82.

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 Rasztovics 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.

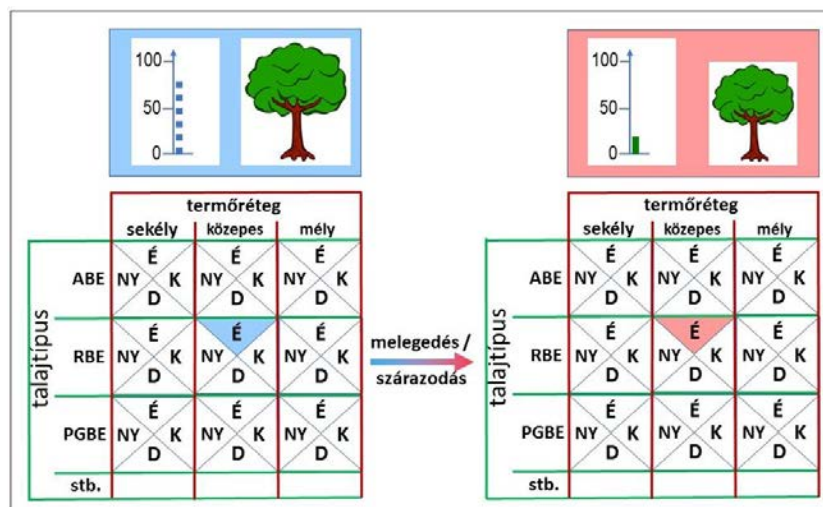
A jövőbeli mortalitás becslésekor azt nem lehet megjósolni, hogy egy-egy évben mekkora lesz az aszály (vagy lesz-e egyáltalán). A modellezés során a 4 éves EQ_mod értékek trendjei (melyek a klímaváltozási forgatókönyveket definiálták) és historikus szórása (4,87) alapján (a ± 3 * szórás tartományán belül 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-szenárióban (a CASMOFOR modellbe beépített) fatermési táblákkal történt. A fanövekedés jövőbeli, a klímaváltozás miatt végbemenő megváltozására nézve az OEA 2003-as adatainak felhasználásával *ceteris paribus* elvvel épített elemzéseket végeztünk. Ezek során olyan állomány-csoportok fafaj-összetételét 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) fafajsortok hibaszűrt adataival számoltunk. A vizsgálat menete az alábbi volt:

- (1). az OEA-ban kimutatott klímátípus, talajtípus, termőréteg vastagság, fizikai talajféleség (Járó 1966), valamint a kitétségi 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 szerinti. Az OEA „termőréteg vastagsága” kategóriái helyett, azoknak a (klímátípus is figyelembe vevő) összevonásával a sekély (0-40cm), közepesen mély (40-60cm) és mély (60cm) kategóriákat alkalmaztunk. Az OEA-ban szereplő kitétségi-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 középmező rozsabarna erdőtalajon, É kitétségen), 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 kitétséggű 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.

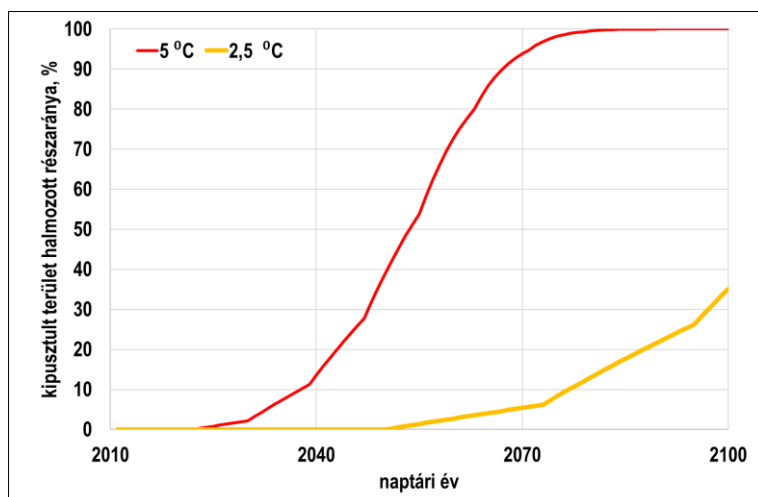
EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

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.

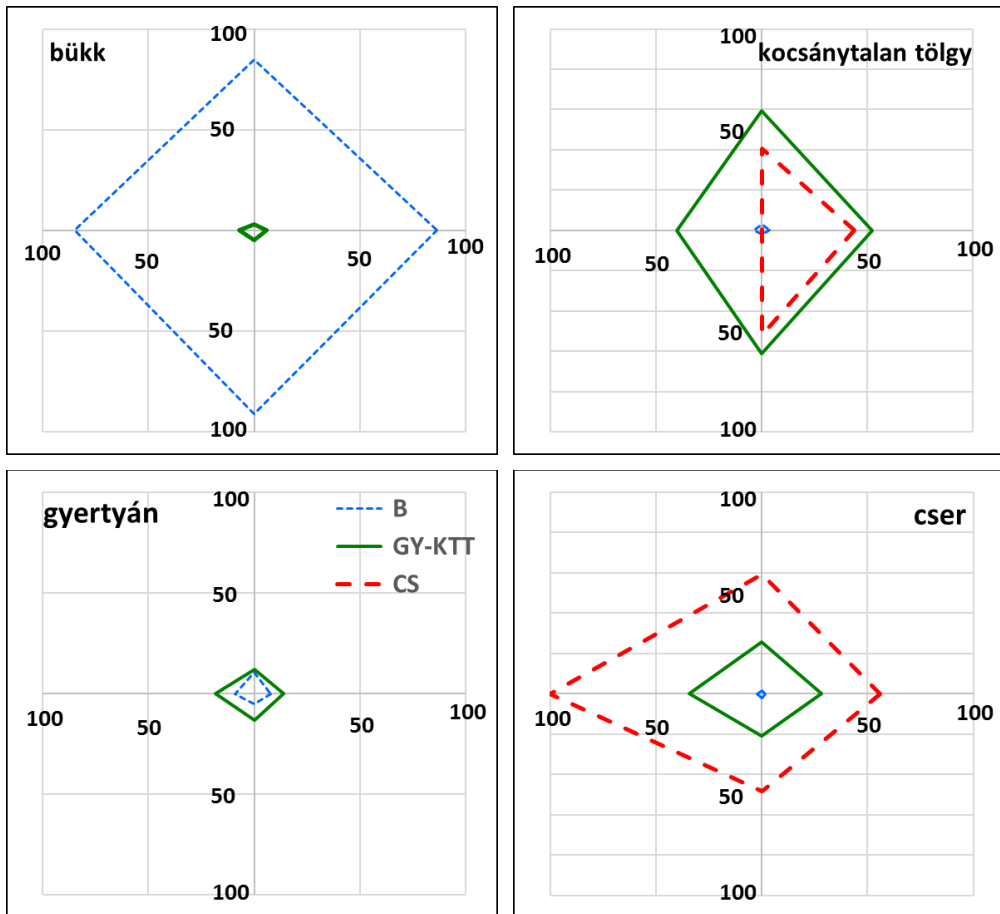
A módszer többek között azért konzervatív, mert az alapjául szolgáló regressziós görbe (melynek alkalmazása egybevág Somogyi (2016) korábbi feltételezésével is) az EQ_mod esetek többségében alábecslést jelent. (A aszály-károk mértéke a Csóka et al. 2016 által talált összefüggésben is hasonló emelkedés 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 fajösszetétel-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 fajoként. 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=bűkk; 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 („bűkk”=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 fafajösszetétel-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.

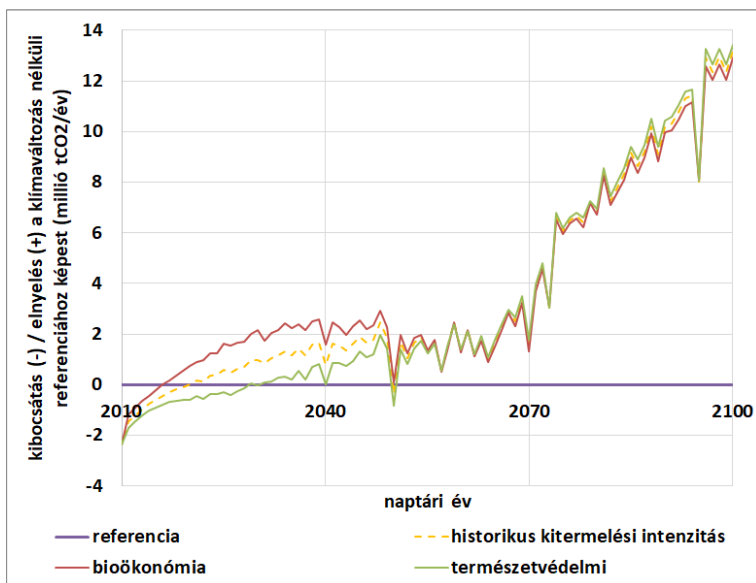
1. táblázat: A referencia-korra becsült potenciális famagasságok átlagos változása (ΔH átlag) a klímátípus-váltás hatására talajmélység-kategóriánként. A táblázat csak azokat az eseteket mutatja, amelyeknél ΔH átlag statisztikailag szignifikánsan eltért a nullától. STD: szórás; N: elemszám az adott klímátípus-váltás 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; „bioökonómia”: 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 – ürfelvételek 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 & Czimer 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 ($T_{\text{július}} = 20 \text{ °C}$ 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.

ERDÉSZETI TECHNOLÓGIÁK SZÉNLÁBNYOMA ÉS ELŐREVETÍTETT KLÍMAKOCKÁZATA

**Polgár András¹, Pécsinger Judit¹, Horváth Adrienn¹, Szakálosné Mátyás Katalin²,
Horváth Attila László², Rumpf János² és Kovács Zoltán³**

¹Soproni Egyetem, Környezet- és Földtudományi Intézet

²Soproni Egyetem, Erdészeti-Műszaki és Környezettechnikai Intézet

³NAIK, Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

Az erdőgazdálkodás az egyetlen olyan gazdasági tevékenység, amely jelentős mennyiségű atmoszférikus szén tartós kivonását is lehetővé teszi. Kutatásunk célja a nyersfa termékek teljes életciklusán belül rávilágítani, az erdei termelési modul hazai fahasználati szubmoduljának szénlábnomára. A fahasználatok technológiai vonatkozásainak környezeti vizsgálata fontos kiegészítést jelenthet az eddigi klímakutatásokhoz. A fahasználat rövidfás munkarendszereinek környezeti hatásmi-nősítését valósítottuk meg az életciklus-elemzés (LCA) módszerével. Közös funkcionális egységre vetítve az elő és vég-használatok összehasonlító környezeti LCA-ját végeztük el: bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokban. A jellemző technológiákat szénlábnomuk (GWP) alapján rangsoroltuk, fahasználati életút szakaszonként differenciáltan és a teljes fahasználati életciklusra vonatkozóan is. Területhasználati megközelítésben a hektáronként vett abszolút szénlábnom (együttesen a fosszilis és biotikus eredetű) vizsgálata szerint a legjelentősebb hatással a véghasználati életútszakasz járt. A szénlábnomhoz való hozzájárulás %-ában a véghasználatok esetén a „nemesnyár (8%) – bükk (9%) – luc (11%) – akác (35%) – tölgy (37%)” növekvő technológiai rangsort kaptuk. Az állományok rangsora az abszolút szénlábnom alapján a teljes technológiai életciklusban a „nemesnyár (77109,06) – luc (120868,7) – bükk (165050,7) – akác (354843,2) – tölgy (439544,1)” rangsort adta (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A technológiai folyamatok tisztán fosszilis eredetű szénlábnomát illetően azonban a teljes életciklusban a „bükk (2326,0) – tölgy (7679,89) – nemesnyár (9063,94) – luc (11109,85) – akác (11206,34)” rangsor adódott (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). Miután megállapítottuk az egyes folyamatok klímaváltozáshoz való hozzájárulását, ökológiai kockázatbecslést kapcsoltunk hozzá. A szén-megkötési potenciál meghatározásával megállapítottuk, hogy a nyersfa termékek alacsony emissziójú nyersanyagként íté-
lhetők meg.

Kulcsszavak: környezeti életciklus-elemzés, szénlábnom, fahasználati technológiák, fahasználat.

CARBON FOOTPRINT AND PREDICTED CLIMATE RISK OF FOREST TECHNOLOGIES

Abstract

Forest management is the only economic activity which also permits the prolonged extraction of significant amounts of atmospheric carbon. The purpose of our research is to determinate the carbon footprint of forest loggings during utilization within the entire life cycle of raw wood products. In addition, the environmental impact assessment of forest logging technologies also can be an important factor in climate change adaption. Shortwood forestry work systems has been assessed by environmental impact assessment using the Life Cycle Analysis (LCA) method. Based on a common functional unit (1 ha), a comparative environmental LCA for intermediate and final cutting was performed in stands of beech, oak, spruce, acacia, hybrid poplar. Based on results, a carbon footprint order (GWP) were calculated for utilization life cycle phases and for the entire tree utilization life cycle. Final cutting had the most significant impact based on the analysis of the absolute carbon footprint (ABF) per hectare (considered fossile and biotic origin together). The distribution of ABF by final cutting showed the following order: hybrid poplar (8%) – beech (9%) – spruce (11%) – acacia (35%) – oak (37%). For the whole

technological life cycle, the ranking of ABF was "hybrid poplar (77109,06) - spruce (120868,7) - beech (165050,7) - acacia (354843,2) - oak (439544,1) (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.]). For the carbon footprint of fossil origin, the ranking was „beech (2326,0) – oak (7679,89) – hybrid poplar (9063,94) – spruce (11109,85) – acacia (11206,34) (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.]). Based on the contribution of each climate change process, an ecological risk assessment has been added. With regard to the determination of carbon storage potential, raw wood products can be considered as low-emission raw materials.

Keywords: environmental life cycle assessment, carbon footprint, forestry technologies, climate change impact assessment.

BEVEZETÉS

Széles körű az egyetértés abban, hogy az emberiségnek fel kell tárnia és ki kell fejleszteni olyan módszereket, amelyek alkalmazásával a gazdasági, ipari folyamatokhoz felhasznált erőforrások minimalizálhatók, valamint a kibocsátások és hulladékok környezeti hatása a környezeti rendszerre nézve nulla közelivé válik. A környezetbarát technológiák e hosszú távú cél elérésének eszközei (Heinimann 2012). Erkman (1997) szerint az ipari ökológia koncepciója átfogja ezen elemző módszereket. A környezeti elemek és rendszerek jellemzőiben az emberi tevékenység következtében bekövetkező változás a környezeti hatás (Pájer 1998). A földhasználatok során a művelési technológiákkal átalakított vegetációs viszonyok és a felszínborítás hatásai mellett, az egyes technológiák sajátos környezeti vonatkozásait is figyelembe kell venni. Álláspontunk szerint a fahasználatok technológiai vonatkozásainak környezeti vizsgálata fontos kiegészítést jelenthet az eddigi klímakutatásokhoz. A környezeti hatások értékelése a változás jelentőségének kifejezését célozza, és egyúttal fejlesztési intézkedéseket, döntéseket készít elő (Polgár 2012).

Mátyás (2006) és Rumpf et al. (2011) szerint a légköri szénmegkötés jelentőségének felismerése kedvező helyzetbe hozta az erdőgazdálkodást. Az erdőgazdálkodás az egyetlen olyan gazdasági tevékenység, amely azon túl, hogy szénsemleges, jelentős mennyiségű atmoszférikus szén tartós kivonását is lehetővé teszi.

A fa, mint nyersanyag szénsemlegessége napjainkban is igazolásra szorul, megannyi tényező figyelembe vételével (Klein et al. 2015).

Az életciklus-elemzés (LCA) kiváló eszköze a környezeti hatások megalapozott vizsgálatának, azonban az erdészeti alkalmazása máig kihívást jelent az LCA közösség számára. Az LCA erdészeti alkalmazásának elmúlt, több mint húsz éves időszakát Heinimann (2012) és Klein et al. (2015) tekintik át munkájukban részletesen.

Az ipari ökológia gondolata neves kutatókig nyúlik vissza. Rober Ayres (Ayres & Kneese 1969), Charles Hall (Hall et al. 1979), Howard T. Odum (Odum et al. 1977) munkássága ösztönözte Ulf Sundberg professzort, hogy az erdészeti műveletek témakörében előzetes energiaelemzéseket végezzen (Sundberg & Svanqvist 1987).

Sundberg (1982) tanulmányában az üzemanyag fogyasztásból adódó költségeket döntő tényezőnek javasolja az erdészeti gépi munkálatok megválasztásában. Az erdészet gépesítése forwarderek és vonszolók használatával teljesen átváltotta a lovas fakitermelést/köze-

lítést közúti tehergépkocsis szállításra. Berg (1995) megállapította, hogy az erdészeti tevékenységek környezeti hatásainak nagy része azon alapul, hogy az erdei műveletek olyan technikai megoldásokat sorakoztatnak fel, amelyek fosszilis eredetű üzemanyag igénye jelentős. A nagy távolságú szállítás és az erdei utak infrastruktúrája a teljes környezeti hatások közel kétharmadáért felelősek az erdei termelési rendszereket illetően (Heinimann & Maeda-Inaba 2004).

Frühwald (1995) szerint az erdészeti szektorban nincs ágazatspecifikusan kifejlesztett LCA és leltáradat gyűjtési (LCI) módszertan, melynek megalkotása a legnagyobb kihívások egyike. A helyzet Heinimann (2012) és Klein et al. (2015) megállapítása szerint napjainkban sem változott jelentősen. A szektor LCA alkalmazása mind a külső (összehasonlító), mind a belső (hatékonyságnövelő) előnyök elérése érdekében is prioritás Frühwald (1995).

Thoroe & Schweinle (1995) kialakították azt a standard erdészeti életciklus modell javaslatot, ami alapul szolgálhat az LCA erdészeti alkalmazásához. Klein et al. (2015) több LCA tanulmány vizsgálata alapján megállapította, hogy a módszertani feltevések között és a későbbi eredményeik között is nagy különbségek mutatkoztak. Elemzésük során fókuszba helyezték a globális felmelegedési potenciál (GWP) értékeket. A nyersfa termékek esetén gyakran használják a „szénsemleges” jelzőt, amelyet a szerzők a tapasztalt GWP értékek alapján inkább finomítani javasoltak „alacsony emissziójú nyersanyagra” (amennyiben a megváltozott erdőgazdálkodás vagy a közvetlen és közvetett földhasználat változás negatív hatása által okozott hosszú távú in situ szén veszteség kizárható).

Klein et al. (2015) az LCA módszertan erdészeti alkalmazásának fejlesztésére, a jövőbeli összehasonlíthatóság biztosítására, javaslatokat fogalmaztak meg az egységesítésre, melyek az ISO 14040-44:2006 szabványok (ISO 2006a, ISO 2006b) előírásai mellett nyújtanak kiegészítést. Modelljük bemutatja az erdei termelés életciklus-elemzésének alapjait. Javaslatot dolgoztak ki a „nyersfa” folyamat lánchoz. Sandin et al. (2016) az erdészeti termékek életciklus-elemzésének specifikumait írták le.

Heinimann (2012) nyomán kijelenthetjük, hogy az erdészet hagyományos, megújuló nyersanyagot, mint terméket szolgáltat különböző ipari és háztartási folyamatok számára.

A „nyersfa termék” rendszerint különböző más végtermékek alapja, és az erdei termelési rendszerben vett ökológiai hatásai csak a teljes hatások egy részét jelentik. Kim et al. (2016) vizsgálták a gyérítés hatását a holt szerves anyag széntárolására vörösfenyő és tölgy állományokban. Tellnes et al. (2017) vizsgálatokat végeztek az erdészeti termékeken alapuló fatermékek szénlábnym számítását illetően.

A korábbi LCA tanulmányok főbb tapasztalatai az alábbiak:

1. csaknem minden tanulmány foglalkozott az elő és véghasználatokkal, valamint a szállítási folyamatokkal (Klein et al. 2015), mely mutatja ezen életút szakaszok jelentőségét.
2. A tanulmányok idő dimenziója változatos, az egyszeri beavatkozásoktól (single moment approach) a teljes rotációs élettartamig (whole rotation approach) terjedt.
3. A térbeli kiterjedés az állomány szinttől a regionális/országos szintig is kiterjedt.

4. A „pillanatnyi megközelítés” leginkább pl. a GWP regionális vagy országos számítása esetén célravezető megoldás.
5. Az erdei rendszernek az erdőterület előkészítésével kell kezdődnie és legalább az erdei útnál kell végződnie, beleértve a teljes erdei termelési lánc releváns elsődleges és másodlagos folyamatait is („bölcsőtől az erdei útig”).
6. A rendszer kötelező részének folyamatcsoportjai: másodlagos folyamatok, erdőterület elő-készítése, erdőterület gondozása, erdészeti műveletek (Klein et al. 2015).

A szakirodalom elemzése rávilágít arra, hogy szükséges olyan hiánypótló, összehasonlító LCA kutatás végzése, mely az európai jelentőségű állományalkotó fafajok (Magyarországon: bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár) esetében lehetőséget nyújt az erdei termelési rendszer környezeti hatásainak mélyebb megértésére. A „nyersfa folyamat láncban” az erdei termelési rendszer és a nyersfa termékek feldolgozási rendszere közötti meghatározó, összekötő életút szakasz a fahasználat fázisa, ezért ennek elemzése kulcsfontosságú.

Kutatásunkban a hazai fahasználat összehasonlító életciklus-elemzésére és a módszer erdészeti adaptálására vállalkoztunk. A kutatás eredményei (GWP) rávilágítanak a fahasználati folyamatok szénlábnomára, mely ismerete nagyban befolyásolja a nyersfa termékek alacsony emissziójú nyersanyagként történő megítélését, valamint a szénmegkötési potenciál pontosabb meghatározását. Ezen információk ismerete segíti a klímakockázatok és a klímaváltozásban betöltött szerep helyesebb identifikálását is.

Kutatásunkban célul tűztük ki az életciklus-elemzés (LCA) módszerének első hazai erdészeti adaptálását, a fahasználati szubmodulra vonatkozóan. Az LCA módszerével – a fő hazai állományalkotó fafajok példáján - a fahasználatokhoz köthető technológiák környezeti hatásainak minősítését végeztük el. Célul tűztük ki az elő és véghasználati munkarendszerek összehasonlító környezeti életciklus-elemzését közös funkcionális egységre vetítve (területhasználati megközelítésben: 1 ha-ra és mennyiségi megközelítésben: 100 m³-re). Célul tűztük ki a kidöntött állófa szénmegkötési potenciáljának jellemzését, valamint a klímaváltozáshoz való hozzájárulás vizsgálatát is az abszolút, biotikus és technológiai szénlábnom (GWP) elemzésével, amely segíti a nyersfa termékek környezeti hatásainak jobb megértését. Az előrevetített klímakockázatok érzékeltetésére elkészítettük az ökológiai kockázati mátrixokat az egyes fafajok és technológiák bontásában.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Az életciklus-elemzés módszerének erdészeti tevékenységre adaptálása érdekében első lépésben a vizsgálati területen (Magyarország) jellemző erdészeti technológiák feltárására és kiválasztására volt szükség. A területen azonosítottuk a fatermesztés, fakitermelés, fahasználat és fafeldolgozás moduljait. Szakirodalmi elemzés alapján megállapítottuk, hogy a legjelentősebb környezeti hatással a fahasználati szubmodul jár. Kutatásunkban ezért a fa-

használati életszakaszokra, azon belül az elő- és véghasználati életút szakaszokra koncentráltunk. Klein et al. (2015) szerinti besorolásban így LCA tanulmányunk a „pillanatnyi megközelítésű” (single moment approach) kategóriába tartozik, mely a legalkalmasabb a GWP értékek meghatározására.

Ezután a kiválasztott fahasználati technológiák anyag és energia elvonásainak és kibocsátásainak környezeti szempontú feltárására volt szükség, melyeket a környezeti életciklus-elemzés (LCA) módszerével vizsgáltunk.

Az alkalmazott módszertan megfelel az ISO 14040:2006 és ISO 14044:2006 szabvány követelményeinek (cél és tárgykör meghatározása, leltárelemzés, hatásértékelés, hatásértelmezés). Az elemzést a GaBi 6.0 Professional (GaBi thinkstep) szoftverrel végeztük el. A hatásértékelés eredményei közül a kiemelten a szénlábnymra (GWP 100 years) koncentráltunk. A klímaváltozáshoz való hozzájárulás jellemzése az abszolút, biotikus és technológiai szénlábnym (GWP) elemzésével segíti a nyersfa termékek környezeti hatásainak megértését.

A kockázatok értékének meghatározásához a kockázatbecslés (Cseh 1999) segítségével juthatunk el. Az USA-EPA definíciója: az ökológiai kockázatbecslés annak a valószínűségét méri fel, hogy egy vagy több stresszor az expozíció révén milyen káros ökológiai hatást (hatásokat) okoz (USEPA 1998). Segítségével értékelni lehet annak valószínűségét, hogy a különféle környezeti stresszorok, mint például a vegyi anyagok, az invazív fajok, az éghajlatváltozás stb. milyen környezetterhelő hatással járnak az egyes ökológiai rendszerekben. A kutatásunkban is felhasznált algoritmus (USEPA, 1998) három fázisból épül fel: problémafelvetés, analízis és kockázatjellemezés. A három fázis egymást időrendi sorrendben követi, ugyanakkor van lehetőség visszacsatolásra. Így például az analízis során kapott eredmények, következtetések alapján van lehetőség a problémafelvetés módosítására, vagy szükség lehet újabb adatok gyűjtésére.

Az LCA erdészeti alkalmazásának lépései a fahasználatokra

Cél és tárgykör meghatározása

Hazai viszonylatban a rövidfás munkarendszerek felső felkészítőhelyi változatait azonosítottuk a főbb állományalkotó fafajok esetén: bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár.

Cél: a vizsgált technológiák összehasonlító környezeti életciklus-elemzése, mely rangsorolást tesz köztük lehetővé, szénlábnymuk (CF-carbon footprint/carbon profile) alapján. Az LCA módszerével a vizsgált technológiák környezeti hatáselemzését valósítottuk meg. A fahasználati technológiák során a rendszerhatárok: vágásterületi munkák – felső felkészítőhelyi munkák – erdei és közúti szállítás ipari/lakossági felhasználásra – vastagfa és vékonyfa tüzelése (energetikai cél) - vágástakarítás. Modellünkben számoltunk az üzemanyag és keőnőolaj előállítás környezeti hatásaival is. A faanyag további tartós felhasználását már nem

vontuk be a vizsgálatokba. Az elemzésbe nem vontuk be a technológiákhoz szükséges gépek és eszközök előállításának környezeti paramétereit, az erdei utak építésének hatásait, és a földhasználat változását.

Figyelembe vett folyamatok: A technológiai sor az elő- és véghasználatok folyamata során általában a következő műveleti lépésekből tevődik össze bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokban: döntés motorfűrészsel/harveszterrel; gallyazás motorfűrészsel/harveszterrel; elődarabolás motorfűrészsel/harveszterrel; közelítés forwarderrel/csörlős vonszolóval; végdarabolás motorfűrészsel; hasítás kézzel; máglyázás forwarderrel/markolós vonszolóval; sarangolás kézzel; felterhelés + szállítás + leterhelés darus; vastagfa és vékonyfa tüzelése (absz. száraz, energetikai cél); apadék égetése (félnedves) és biológiai lebomlása. Szállítás esetén egységesen 40 tkm-rel számoltunk (darus tehergépkocsi). *Funkcióegység:* Területhasználati megközelítésben funkcióegységnek 1 ha erdőállományt, mennyiségi megközelítésben 100 m³ faanyagot tekintettünk, melyet a fahasználati technológiákkal érintünk életút szakaszonként: 1. életszakasz: tisztító vágás (TI), 2. életszakasz: törzskiválasztó gyérités (TKGY), 3. életszakasz: növedékfokozó gyérités (NFGY), 4. életszakasz: véghasználat (VH). *Referenciaáram:* életút szakaszonként változó. Területhasználati megközelítésben a jellemző kidöntendő állófa (m³/ha) mennyisége különböző, amit az állomány kora (év) is befolyásol. Mennyiségi megközelítésben 100 m³ kidöntött állófára vonatkoztatva különböző nagyságú területek jellemzik az egyes életút szakaszokat (ha/100 m³). *Jellemző választékok:* vastagfa, tűzifa, vékonyfa tűzifa, egyéb apadék, apríték. Az elégetett vastagfa/vékonyfa tűzifa és apadék arányát életszakaszonként az 1. táblázatban mutatjuk be, mely jól jelzi az ebből keletkező neutrális CO₂ nagyságrendjét.

Szénlábnym értelmezése: Vizsgálataink során a fahasználati technológiák kimutatott szénlábnyma abszolút értékben értelmezendő (továbbiakban: szénlábnym), mivel a fosszilis eredetű CO₂ kibocsátások mellett tartalmazza az életszakaszokra jellemző mennyiségű tűzifa (absz. száraz) és apadék (félnedves) elégetéséből származó biotikus eredetű (neutrális) CO₂ emisszió mennyiségét is. A különböző piaci ár befolyásolta feltételezések a nyersfa termék magas minőségű faanyagként vagy tűzifaként történő felhasználására érdekes összehasonlítást hozhatnak.

A szénlábnym ily értelmezését indokolja, hogy a Kiotói Jegyzőkönyv első vállalási időszakában még nem volt lehetőség az ipari felhasználású fakitermelés szénelnyelésként történő elszámolására, hanem egységesen minden fakitermelést szénkibocsátásként kellett számításba venni (Führer & Mátyás 2005). Azonban a második vállalási időszakban előrelépés történt ezen a téren, ugyanis a második vállalási időszakban már elszámolható a fapari termékek széntároló funkciója (Frieden et al. 2012).

1. táblázat: Az életszakaszokban jellemző állomány kora (év), a kidöntött állófa (m^3/ha), valamint a tűzifa (vékonyfa, vastagfa) és apadék megoszlása (%) (1 ha hazai erdőállományban).

Table 1: The age (year), felling tree (m^3/ha) and firewood (branchwood, thickwood) and harvesting losses (%) (1 ha).

Állomány	Választék	Előhasználat						Véghasználat	
		1. sz.		2. sz.		3. sz.		4. sz.	
		TI		TKGY		NFGY		VH	
Bükk	vékonyfa %	18 év	37,50	45 év	13,55	75 év	9,50	100 év	8,45
	egyéb apadék %	20 m ³	5,00	35 m ³	2,80	60 m ³	1,60	110 m ³	1,50
	vastagfából tűzifa %		82,87		93,85		86,60		55,00
Tölgy	vékonyfa %	19 év	37,50	35 év	16,00	70 év	10,50	105 év	8,00
	egyéb apadék %	15 m ³	5,00	63 m ³	2,80	135 m ³	1,60	450 m ³	1,50
	vastagfából tűzifa %		82,87		74,85		72,50		57,25
Luc	vékonyfa %	15 év	11,00	29 év	9,50	61 év	9,00	90 év	8,00
	egyéb apadék %	15 m ³	5,00	60 m ³	2,80	90 m ³	1,60	450 m ³	1,50
	vastagfából tűzifa %		26,00		25,00		24,00		23,00
Akác	vékonyfa %	6 év	28,00	15 év	17,00	22 év	11,00	35 év	8,00
	egyéb apadék %	10 m ³	1,50	50 m ³	1,50	64 m ³	1,50	341 m ³	1,50
	vastagfából tűzifa %		82,87		50,97		81,36		70,02
Nemesnyár	vékonyfa %		-		-	9 év	14,50	20 év	8,00
	egyéb apadék %	- m ³	-	- m ³	-	96 m ³	1,50	434 m ³	1,50
	vastagfából tűzifa %		-		-		7,30		4,38

Rövidítések: TI-tisztító vágás, TKGY-törzskiválasztó gyérités, NFGY-növedéfközoző gyérités, VH- véghasználat

Leltárelemzés

A vizsgált technológiák művelési lépéseiről környezeti leltáradatbázist (input-output, elemi áramok) hoztunk létre, területhasználati megközelítésben 1 ha erdőállományra, mennyiségi megközelítésben 100 m³ faanyagra vetítve. Az adatok vonatkoztatási időszaka: 2015/2016 tele. Földrajzi érvényességét tekintve az adatok hazaiak. Az adatok forrásai: saját adatok, szakértői becslés, publikált adatok. Előhasználatokra és véghasználatra vonatkozóan előállítottuk az egyes állományokra jellemző öko-mérleget. Ezután felépítettük a vizsgált technológiák szoftveres életciklus-modelljeit.

Hatásértékelés, hatásértelmezés

A hatásértékelés módszertani lépéseit az ISO 14044:2006 szabvány írja le. Simon (2012) nyomán megállapítottuk, hogy a CML 2001 módszer „GWP 100 years” értéket meghatározó főbb emissziókhöz tartozó karakterizációs faktora jól illeszkedik az IPCC 2007 tanulmányhoz. A módszer tehát alkalmas a szénlábnyom (carbon footprint - CF) számítására.

Az LCA utolsó fázisában a leltár- és hatáselemzési eredmények ellenőrzése történt meg, következtetéseket fogalmaztunk meg. Az eredmények közül a szénlábnyomra koncentráltunk. Feltártuk hatáskategóriánként az életciklus hozzájárulásuk %-os értékeit. A kapott értékekre alapozva felállítottuk a technológiák növekvő környezeti rangsorát. Ezáltal megkaptuk a technológiákra vonatkozó környezeti hatások szénlábnyom alapú hatásminősítését fahasználati életút szakaszonként differenciáltan és a teljes fahasználati technológiai rotációra is. A szénlábnyom értékeinek a faanyag szénmegkötéséhez normalizálása érdekében állományokra jellemző viszonyszámokat képeztünk: a teljes technológiai rotációra jellemző ki-döntött állófa mennyiségét alapul véve, e famennyiség fajonként jellemző széntárolása esetén (Vadász 1924, Ákos 1964) a légkörből megkötött szén-dioxid szükséglethez [kg CO₂/ha] (Buzás 2005 nyomán) viszonyítottuk a kiszámított szénlábnyom értékeket [kg CO₂-Equiv.]. Ezzel a viszony számmal a szénmegkötési potenciált határoztuk meg. Minden értéket megvizsgáltunk területhasználati (1 ha erdőállomány) és mennyiségi (100 m³ faanyag) megközelítésben is. A mennyiségi megközelítés értékeire alapozottan a NÉBIH fakitermelési adatközlését (2016) felhasználva országosan kiterjesztett értékeket is számítottunk.

EREDMÉNYEK

Leltárelemzés

A környezeti tényezők közül jelentős volt bementi oldalon az üzemanyag és kenőolaj felhasználás, kimeneti oldalon a CO₂, valamint a fáradt olaj (reciklált) kibocsátás.

Területhasználati megközelítésben a bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokra vonatkozó technológiai adatokból jól látszott, hogy az egyes életút szakaszokat különböző mennyiségű állófa kitermelése jellemzi, amely a véghasználatok esetén a legnagyobb. Az eredmények elemzésekor tanulmányunkban ezért főként a véghasználati életút szakaszra összpontosítottunk. Az 1 ha területre és 100 m³ faanyagra vetített adatok alakulása jól tükrözte a technológiák részben eltérő művelési lépéseit. A két megközelítésben a leltáradatok között csupán csak a tisztító vágás és a véghasználat életszakaszok esetén volt számottevő (kb. ötszörös) különbség, melyet indokol az életszakaszokban az ipari és tűzifa változó aránya. A 2. táblázatban a tölgy állományra jellemző fahasználati munkarendszer összesített leltáradatait mutatjuk be 1 ha erdőállományra és 100 m³ faanyagra vonatkoztatva.

2. táblázat: A munkarendszer összesített bemeneti és kimeneti környezeti leltáradatbázisa tölgy állományban (Magyarország, Zala megye).

Table 2: Total input and output environmental inventory data of work system in an oak forest stand (Hungary, Zala County).

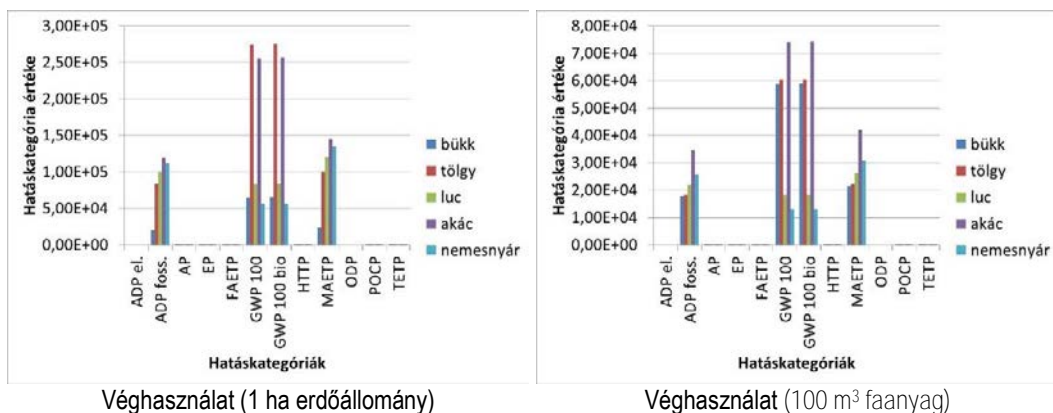
Paraméter	Me	Tölgy							
Funkcióegység		1 ha				100 m ³			
		EH		VH		EH		VH	
		TI	TKGY	NFGY	VH(TRV)	TI	TKGY	NFGY	VH(TRV)
Állomány kora	év	19	35	70	105	19	35	70	105
Kidöntendő állófa (bruttó)	m ³	15	63	135	450	100	100	100	100
Input									
Üzemanyag	kg	6,9	183,7	375,0	1576,3	46,0	291,6	277,8	350,3
Kenőolaj	kg	1,6	35,4	53,9	170,6	10,7	56,1	39,9	37,9
Output									
CO ₂ kibocsátás üzemanyagból	kg	22,1	583,8	1188,9	4986,4	147,3	926,7	880,7	1108,1
CO ₂ kibocsátás tűzifa és apadék elégetéséből	kg	14163,9	49033,4	100118,8	268547,6	94426,0	77830,8	74162,1	59677,2
Teljes CO ₂ kibocsátás	kg	14185,9	49617,7	101307,6	273533,9	94572,7	78758,3	75042,7	60785,3
Fáradt olaj (reciklált)	kg	0,2	15,8	27,5	106,4	1,3	25,1	20,4	23,6

Rövidítések: Me-mértékegység, EH-előhasználat, VH-véghasználat, TI-tisztító vágás; TKGY-törzskiválasztó gyérítés; NFGY-növedékfokozó gyérítés; VH (TRV)-véghasználat tarvágás

Hatásértékelés

Az alábbiakban a CML 2001 (2015. áprilisi) módszer eredményeire összpontosítunk.

A munkarendszerek teljes életciklusuk során a legnagyobb hatással a globális felmelegedésre (GWP 100 years) voltak. Ez a technológiák üzemanyag felhasználásából légkörbe jutó szén-dioxidok mennyiségével magyarázható. Jelentős hataskategóriaként merült fel az abiotikus erőforrás kimerülés (ADP foss.) és a tengervízi ökotoxicitás (MAETP) is. E hataskategóriák az üzemanyag és kenőolaj inputok hozzájárulásával magyarázhatók. Megállapítottuk, hogy az egységesen 1 ha területről a nagyobb mennyiségű faanyag kihozatala nagyobb környezeti hatásokkal jár és ezt jól tükrözik a hataskategóriákban tapasztalt eredmények.



Rövidítések: CML2001 (Ápril 2015) **hataskategóriák**: Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.], Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]; Acidification Potential (AP) [kg SO₂-Equiv.]; Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]; Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]; Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO₂-Equiv.]; Global Warming Potential, excl biogenic carbon (GWP 100 years) [kg CO₂-Equiv.]; Human Toxicity Potential (HTP inf.) [kg DCB-Equiv.]; Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]; Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]; Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]; Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP inf.) [kg DCB-Equiv.].

1-2. ábra: A véghasználati munkarendszerek környezeti hatásai az egyes CML 2001 hataskategóriákban.
 Figure 1-2: The environmental impacts of final harvesting work systems in each CML 2001 category.

A környezeti hatások mértéke a tisztító vágás életút szakaszban volt a legkisebb a többi életút szakaszhoz képest. Törzskiválasztó gyérités és növedékfokozó gyérités életszakaszok esetén az abiotikus erőforrás kimerülés (ADP foss.) és a tengervízi ökotoxicitás (MAETP) hataskategóriákban megközelítőleg azonos nagyságrendű környezeti hatásokat tapasztaltunk. Ellentétben a globális felmelegedés (GWP 100 years) értékeknél, ahol már nagyságrendi növekedés volt tapasztalható NFGY esetén. A legjelentősebb hatással a véghasználati életútszakasz járt, minden hataskategória (kivéve GWP) tekintetében még egy nagyságrenddel magasabb értékek voltak jellemzők az előző életszakaszokhoz képest.

Hatásértelmezés

Szénlábnym számítás, technológiai rangsorok felállítása, a technológiák környezeti hatásminősítése

Szénlábnym hatáskategóriánként az életciklus hozzájárulás %-os értékek alapján technológiai rangsort állítottunk fel. Ezáltal megkaptuk a technológiák abszolút szénlábnym alapú környezeti hatásminősítését. A rangsort területhasználati és mennyiségi megközelítésben táblázatos formában mutatjuk be (3. táblázat).

A területhasználati megközelítés eredményei közül kiemelve, a véghasználat életszakaszban a nemesnyár állományok esetében a legkisebb a technológia hozzájárulása (8%) a többi állományhoz képest. Ezt követi kis különbséggel a bükk (9%), majd a luc (11%) szénlábnyma. A luc állományok életszakaszait megvizsgálva megállapítható, hogy azok közül csak a véghasználatban zajlanak olyan munkafolyamatok, amik jelentősebb szénlábnymmal bírnak. A tölgy állomány az, ami a már jelentősebb fakitermeléssel járó technológiai életszakaszokban (TKGY és NFGY) is, és a véghasználat során is a legnagyobb szénlábnymmal jár (37%), a véghasználati életszakaszú akác állományhoz hasonlóan (35%).

Mennyiségi megközelítésben a munkarendszerek rangsora részben változik csupán. Véghasználati életszakaszban a nemesnyár (6%) és luc (8%) állományok szénlábnyma a legkisebb, míg a bükk (26%), tölgy (27%) és akác (33%) állományok továbbra is jelentős hozzájárulást mutatnak. Hasonló értékeket tapasztalunk NFGY életszakaszban is.

A vizsgált rendszerhatárok között a teljes életútra, vagyis a teljes fahasználati technológiai rotációra vonatkozó szénlábnym alakulását a CML2001 módszer szerint vizsgáltuk.

Hektárra vetítve az állományok rangsora az összesített abszolút szénlábnym alapján a „nemesnyár (77109,06) – luc (120868,7) – bükk (165050,7) – akác (354843,2) – tölgy (439544,1)” rangsort adta (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A teljes technológiai rotáció rangsora a véghasználati életszakasz rangsorától csupán a bükk és luc állományok sorrendjében különbözik. Ennek oka, hogy bükk esetében jelentősebb szénlábnymmal kell számolni az NFGY életszakaszban.

Mennyiségi megközelítésben 100 m³ kidöntött állófára nézve a rangsor: „nemesnyár (68404,0) – luc (98847,0) – tölgy (309009,0) – bükk (323600,0) – akác (337651,0)” (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

A NÉBIH fakitermelési adatközlés (2016) alapján a vizsgált állományokban országosan kiterjesztve mindez a „nemesnyár (122138751) – luc (196313384) – tölgy (364095882) – bükk (372903672) – akác (1053723566)” szénlábnym rangsort jelenti (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

Megvizsgálva a tűzifa (absz. száraz), apadék (félnedves) elégetéséből és biológiai égéséből adódó CO₂ kibocsátási értékeket, árnyaltabb képet kaphatunk a technológiai folyamatok hozzájárulásáról.



3. táblázat: Az egyes technológiák életciklus részesedése és rangsora állományonként fahasználati életút szakaszonként a szénlábnyom (abszolút, incl. biotikus CO₂) tekintetében.

Table 3: The ratio and ranking of the contribution of the life cycle impact of technologies by the carbon footprint of utilization (absolute, including biotic CO₂).

CF	EH						VH					
	TI	TKGY		NFGY		VH		TI	TKGY		NFGY	
		1 ha	100 m ³	1 ha	100 m ³	1 ha	100 m ³		1 ha	100 m ³		
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CML 2001	luc	11	11	luc	11	9	luc	7	7	nemesnyár	8	6
	akác	23	33	bükk	25	36	nemesnyár	8	7	bükk	9	26
	tölgy	29	29	akác	26	25	bükk	21	30	luc	11	8
	bükk	37	27	tölgy	38	30	akác	23	30	akác	35	33
							tölgy	41	26	tölgy	37	27

Rövidítések: CF-szénlábnyom, EH-előhasználat, VH-véghasználat, TI-tisztító vágás, TKGY-törzskiválasztó gyérités, NFGY-növedékfokozó gyérités

A teljes élelciklus szénlábnymát a tüzelésből származó biotikus eredetű CO₂ kibocsátás nagymértékben befolyásolja (88-98%), az állományok egyező rangsora figyelhető meg mindkét esetben.

Hektárra vetítve a technológiai folyamatok fosszilis eredetű szénlábnymát illetően a teljes élelciklusban a „bükk (2326,0) – tölgy (7679,89) – nemesnyár (9063,94) – luc (11109,85) – akác (11206,34)” rangsor adódott (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A legkisebb kibocsátás bükk esetén nagyságrendileg kisebb, mint a többi állományban. A tölgy állományban alkalmazott technológia közepes értéket mutat. A különbségek a technológiai, gépesítési megoldásokból (gépesítettség foka) és az 1 ha-ra eső állományok biológiai, fizikai jellemzőiből (pl. hektáronkénti állománysűrűség, kidöntendő állófa mennyisége, tömege, faanyag sűrűsége, nedvességtartalma) adódnak.

Az állományokon belül tekintve - a biotikus eredetű szénlábnymához képest - a bükk, tölgy, akác esetén legkisebb (1-3% közötti) a technológiai folyamatok fosszilis eredetű szénlábnymának részesedése, míg luc, nemesnyár állományokban már nagyobb (9-12%).

Mennyiségi megközelítésben 100 m³ kidöntött állófára nézve a rangsor: „tölgy (2912,89) – bükk (3763,53) – luc (4403,01) – nemesnyár (7449,54) – akác (8041,48)” (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

A NÉBIH fakitermelési adatközlés (2016) alapján a vizsgált állományokban országosan kiterjesztve mindez a „tölgy (4070675,69) – bükk (6760703,69) – luc (13406635,16) – nemesnyár (14629341,83) – akác (22586567,7)” szénlábnym rangsort jelenti (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

Megállapítottuk, hogy hektáronként a vágásterületi munkák a fosszilis eredetű CO₂ kibocsátás 30-40%-áért, míg a faanyag felterhelése, szállítása, leterhelése a 60-70%-áért felelős.

Szénlábnym vs. szénmegkötés

A szénlábnym értékeinek faanyag szénmegkötéséhez normalizálása érdekében állományokra jellemző viszonyszámokat képeztünk (4. táblázat) területhasználati, mennyiségi megközelítésben és országos kiterjesztésben is.

A teljes technológiára (abszolút szénlábnym) jellemző, valamint a tűzifa, apadék égetése és biológiai égése (biotikus dimenzió) szénlábnym esetén a viszonyszám alakulása 1,54-7,08 közötti. A technológiai folyamatok (fosszilis dimenzió) szénlábnyma esetén: 44,97-177,49 közötti. A viszonyszám értékei jól mutatják, a fahasználati életút szakasz rendszerhatárain belül, az abszolút értékben és dimenzióként tapasztalt pozitív szénmegkötési potenciált és a nagyságrendet.

A fahasználati szubmodul eredményeire alapozva megállapítottuk, hogy a nyersfa folyamat lánc erdei termelés életszakaszában helytálló Klein et al. (2015) megállapítása, miszerint a faanyag alacsony emissziójú nyersanyag. Alapul véve a fahasználati életszakasz vizsgált környezeti hatásait, az erdei termelési szakasz pozitív szénmegkötési potenciálja előrebocsátható a viszonyszámok tükrében.

4. táblázat: Szénlábnym vs. szénmegkötés viszonyzámái.
Table 4: Carbon footprint vs. carbon sequestration ratios.

Megközelítés	Állomány	Kidöntött állófa a teljes technológiai rotációban [bruttó m ³]	Állományra (kidöntött állófa) jellemző CO ₂ szükséglet / Teljes technológiai rotáció [kg CO ₂ -Equiv.]	Állományra (kidöntött állófa) jellemző CO ₂ szükséglet / Tűzifa és apadék égetése és biológiai égése [kg CO ₂ -Equiv.]	Állományra (kidöntött állófa) jellemző CO ₂ szükséglet / Technológiai folyamatok [kg CO ₂ -Equiv.]
Területhasználati (1 ha)	nemesnyár	530	5,76	6,52	48,97
	luc	615	3,93	4,25	52,11
	bükk	225	1,76	1,79	125,03
	akác	465	1,77	1,83	56,05
	tölgy	663	1,96	2,00	112,21
Mennyiségi (400 m ³)	nemesnyár	400	4,90	5,50	44,97
	luc	400	3,12	3,27	70,12
	tölgy	400	1,67	1,69	177,49
	bükk	400	1,67	1,69	143,57
	akác	400	1,54	1,58	64,66
Országos (NÉBIH 2016)	nemesnyár	908733	6,23	7,08	52,02
	luc	994015	3,91	4,19	57,23
	tölgy	505244	1,79	1,81	160,43
	bükk	557642	2,02	2,06	111,42
	akác	1391860	1,72	1,75	80,10

Előrevetített klímakockázat

A globális felmelegedési potenciál (GWP 100 év) alapján rangsorolt technológiákat életút szakaszonként kockázati mátrixokban helyeztük el az éghajlatváltozási forgatókönyvek átlagos hőmérsékletváltozásaival összefüggésben. Ezzel a technológiák környezeti kockázatát a jelenlegi (1980-2010), a 2025-ben (2010-2040), a 2055-ben (2040-2070) és 2085-ben (2070-2100) időszakban lehetett meghatározni.

A környezeti kockázatok osztályozása a következőképp történt: I. osztály: magas kockázati értékek; II-III. osztály: közepes kockázati értékek; IV. osztály: alacsony kockázati értékek.

A mátrixokat elkészítettük tisztító vágás, törzskiválasztó gyérités, növedékfokozó gyérités és véghasználatok esetére is. Az állományokban 1 hektáron jelentkező környezeti hatásokat egyértelműen a fakitermelés volumene határozza meg, mely életszakaszonként egyre növekszik. A véghasználati életszakaszban jelentkeznek a legnagyobb környezeti hatások, ekkor jellemző a legjelentősebb volumenű faanyag kivitel, ezért az alábbiakban csak ezt mutatjuk be. A mátrixokban megjelenített eredményeket az értelmezés során árnyalni kell.

Az egyes életszakaszok összehasonlítása nem kívánatos, mivel a megadott kockázati osztályok életszakaszonként más-más jelentéssel bírnak, ennek feloldása egy kiterjedt táblázatban bővített kockázati osztályokkal lenne lehetséges.

Kiemelve, a véghasználat életszakaszban - a szénlábnymához való hozzájárulás %-ában - a nyár állományok esetében a legkevésbé kockázatos (8%) a technológiai folyamat a többi állományhoz képest, ezt követi a bükk (9%), majd a luc (11%) kockázata. Az akác állományok életszakaszait megvizsgálva megállapítható, hogy azok közül a véghasználatban zajlanak olyan munkafolyamatok (35%), amik jelentősebb környezeti kockázatot jelenthetnek. A mátrixok alapján megállapítottuk, hogy a tölgy állomány az, ami minden egyes technológiai életszakaszban, így a véghasználat során is a legkockázatosabb (37%). Az ezekben végzett műveletek hordozzák magukban a legtöbb környezeti veszélyt, kockázatot már egy gyenge emelkedésű átlaghőmérséklet esetében is.

Ha a kérdést a klímaszcenáriók oldaláról közelítjük meg, akkor egyértelműen láthattuk a mátrixokból, hogy már minimális átlaghőmérséklet emelkedés is jelentős kockázat növekedést eredményez.

5. táblázat: Véghasználat kockázati mátrixa.

Table 5: Risk matrix of final harvesting.

Klíma	Változó	Jelen (1980-2010)	2025 (2010-2040)	2055 (2040-2070)	2085 (2070-2100)
		mérsékelt	meleg	melegebb	melegebb, szárazabb
Hőmérséklet	Átlagos változás [d°C]	mérsékelt	gyenge emelkedés	emelkedés	erős emelkedés
		0	0,9	2,1	3,2
Technológia (CF hozzájárulás [%])	Jellemző	Kockázati osztály			
Nemes nyár (8%)	Technológia környezeti kockázata a GWP 100 years [kg CO ₂ equivalent] érték alapján	IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály
Bükk (9%)		IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály
Luc (11%)		IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály	III. osztály
Akác (35%)		IV. osztály	III. osztály	II. osztály	II. osztály
Tölgy (37%)		II. osztály	I. osztály	I. osztály	I. osztály

A kapott kockázati mátrixok előre vetítik, hogy az egyes erdészeti céllal termesztett fajok és a hozzájuk kapcsolódó adott életszakaszt érintő munkafolyamatok, adott szcenáriókban milyen kockázati értéket képviselhetnek. Így a fahasználati munkarendszerek környezeti tervezési fázisaiban segítségként használhatók fel.

DISZKUSSZIÓ - KÖRNYEZETI KOCKÁZAT A KLÍMAVÁLTOZÁS TEKINTETÉBEN

A bemutatott technológiai folyamatok szénlábnyom alapján történő rangsorolása szám-
szerűsíti, hogy milyen mértékben járulnak hozzá a felmelegedés fokozásához.

Azonban a további vizsgálatok során azt is figyelembe kell venni, hogy a 21. század vége
felé egyre erőteljesebbé váló melegedés és nyári csapadékcsökkenés (Gálos et al. 2015)
hatására a luc és a bükk elterjedési területe Magyarországon drasztikusan csökkenhet (Mó-
ricz et al. 2013). Jelentős változás következhet be a talajban, illetve a biomasszában tárolt
szén mennyiségében (Horváth et al. 2017). Jelenleg egy erdészeti döntéstámogató rendszer
van fejlesztés alatt (Czimer and Gálos 2016), mely javaslatot tesz a klímaváltozáshoz al-
kalmazkodni képes fafajokra. Ha ennek alapján változik a fafajpolitika és a jelenlegi lucosok,
bükkösök területén más fafajok (pl. tölgyesek) telepítése kerül előtérbe, akkor az ezekhez
kapcsolódó technológiai folyamatokon keresztül megváltozik az erdészeti technológiák ha-
zai összesített környezeti kockázata, vagyis a hozzájárulása a légköri üvegház hatású gázok
koncentrációjának növeléséhez.

ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunkban célul tűztük ki az életciklus-elemzés (LCA) módszerének első hazai er-
dészeti adaptálását, a fahasználatokra vonatkozóan.

Tanulmányunkban az elő és véghasználati munkarendszerek életciklus-elemzését vé-
geztük el: hazai bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokban. A jellemző technológiákat
szénlábnyomuk alapján környezeti szempontból összehasonlítottuk és rangsoroltuk. Életút
szakaszonként (tisztító vágás, törzskiválasztó gyérités, növedékfokozó gyérités, véghasz-
nát) előállítottuk az állományokra jellemző környezeti leltáradatbázist. Felépítettük a tech-
nológiák szoftveres életciklus modelljeit (GaBi 6.0 Professional), majd hatásértékelést vé-
geztünk többféle módszerrel.

A technológiák legnagyobb mértékben a globális felmelegedés hatáskategóriájához já-
rultak hozzá. Legnagyobb hatással a véghasználati életút szakasz járt. A jellemző technoló-
giákat szénlábnyomuk (GWP) alapján összehasonlítottuk és rangsoroltuk, fahasználati
életút szakaszonként differenciáltan és a teljes fahasználati életciklusra vonatkozóan is. Te-
rülethasználati megközelítésben az abszolút szénlábnyom (együttesen a fosszilis és biotikus
eredetű) vizsgálata szerint a legjelentősebb hatással a véghasználati életútszakasz járt. A
szénlábnyomhoz való hozzájárulás %-ában a véghasználatok esetén a „nemesnyár (8%) –
bükk (9%) – luc (11%) – akác (35%) – tölgy (37%)” növekvő technológiai rangsort kaptuk.
Az állományok rangsora az abszolút szénlábnyom alapján a teljes technológiai életciklusban
a „nemesnyár (77109,06) – luc (120868,7) – bükk (165050,7) – akác (354843,2) – tölgy
(439544,1)” rangsort adta (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A technológiai
folyamatok tisztán fosszilis eredetű szénlábnyomát illetően azonban a teljes életciklusban a
„bükk (2326,0) – tölgy (7679,89) – nemesnyár (9063,94) – luc (11109,85) – akác (11206,34)”

rangsor adódott (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A szénlábnym értékeket mennyiségi megközelítésben és országos kiterjesztésben is megvizsgáltuk.

A szénlábnym nagyságának érzékeltetésére az állományok becsült szénmegkötését használtuk fel, a szénmegkötési potenciált viszony számmal mutattuk be. A viszony szám egyes értékei (1,54-7,08) jól mutatják, a fahasználati szubmodul rendszerhatárain belül tapasztalt pozitív szénmegkötési potenciált és a nagyságrendet. A kutatás eredményei (GWP) rávilágítanak a fahasználati folyamatok szénlábnymára, mely ismerete nagyban befolyásolja a nyersfa termékek alacsony emissziójú nyersanyagként történő megítélését, valamint a szénmegkötési potenciál pontosabb meghatározását.

A globális felmelegedési potenciál (GWP 100 év) alapján rangsorolt technológiákat életút szakaszonként kockázati mátrixokban helyeztük el az éghajlatváltozási forgatókönyvek átlagos hőmérsékletváltozásaival összefüggésben. Az előrevetített klímakockázati eredmények a fahasználati munkarendszerek környezeti tervezési fázisaiban segítségként használhatók fel. Ezen információk ismerete segíti a klímakockázatok és a klímaváltozásban betöltött szerep helyesebb megítélését is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetünket fejezzük ki az „AGRARKLÍMA.2 VKSZ_12-1-2013-0034” projekt támogatásáért. Kutatásunkat az FSA projekt támogatta. Dr. Horváth Adrienn kutatása az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-4-I kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A munka a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Szechenyi2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Ákos L. 1964: Erdészeti, vadászati, faipari lexikon. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Ayres R.U. & Kneese A.V. 1969: Production, consumption and externalities. *The American Economic Review* 59(3): 282–297.
- Berg S. 1995: The Environmental Loads of Fossil Fuels in Swedish Forestry – an Inventory for a LCA. In: Frühwald A. & Solberg B. (eds): *Life-Cycle Analysis – a Challenge for Forestry and Forest Industry*, EFI Proceedings 8, European Forest Institute, 57–68.
- CML 2001: Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A. et al. 2002: Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Czímber 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* 34(7): 664–673. DOI: [10.1080/02827581.2016.1212088](https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1212088)
- Erkman S. 1997: Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner production* 5(1-2): 1–10. DOI: [10.1016/s0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/s0959-6526(97)00003-6)



- Frieden D., Pena N. & Bird D.N. 2012: Incentives for the use of forest biomass: A comparative analysis of Kyoto Protocol accounting pre- and post- 2012. *Smart Forests* 4: 84–92. DOI: [10.1080/20430779.2012.723513](https://doi.org/10.1080/20430779.2012.723513)
- Frühwald A. 1995: LCA – a Challenge for Forestry and Forest Product Industry. In: Frühwald, A. & Solberg B. (eds): *Life-Cycle Analysis – a Challenge for Forestry and Forest Industry*, EFI Proceedings 8, European Forest Institute, 10–11.
- Führer E. & Mátyás Cs. 2005: Erdőgazdálkodás és klímabizonytalanság. *AGRO-21 füzetek* 41: 124–128.
- Gálos B., Führer E., Czimber K., Gulyás K., Bidló A., Hänsler A., et al. 2015: Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás* 119(4): 425–441.
- Guinée J.B., Heijungs R., Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., et al. 2010: Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science & Technology* 45(1): 90–96.
- Hall C., Lavine M. & Sloane J. 1979: Efficiency of energy delivery systems: I. An economic and energy analysis. *Environmental Management* 3(6): 493–504. DOI: [10.1007/bf01866318](https://doi.org/10.1007/bf01866318)
- Heinimann H.R. 2012: Life Cycle Assessment (LCA) in Forestry – State and Perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(2): 357–372.
- Heinimann H.R. & Maeda-Inaba S. 2004: Environmental Performance Indicators EPIs for Forest Roads Network Systems. In: Heidin I.D. & Krag R. (eds): 2004 International Mountain Logging Conference. A Joint FERIC, UBC and IUFRO d3 conference, published on CD. Forest Engineering Research Institute of Canada, Vancouver, BC, Canada, 1–13.
- Horváth A., Bene Zs. & Bidló A. 2017: Talaj szerves szénkészletének felmérése néhány cser-, kocsánytalan tölgyes és bükkös állományban. In: Bidló A. & Facskó F. (eds): *Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar V. Kari Tudományos Konferencia*. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron, 16–20.
- Kim S., Han S.H., Lee J., Kim C., Lee S-T. & Son Y. 2016: Impact of thinning on carbon storage of dead organic matter across larch and oak stands in South Korea. *iForest Biogeosciences and Forestry* 9: 593–598. DOI: [10.3832/ifer1776-008](https://doi.org/10.3832/ifer1776-008)
- Klein D., Wolf C., Schulz C. & Weber-Blaschke G. 2015: 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(4): 556–575. DOI: [10.1007/s11367-015-0847-1](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0847-1)
- Mátyás Cs. 2006: Erdők a globális és hazai szénforgalomban. In: Szulcsán G. (ed): *Alföldi Erdőkért Egyesület*, Szeged, 5–13.
- 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: 85–96. DOI: [10.2478/aslh-2013-0007](https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0007)
- ISO (2006a). ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework (ISO 14040:2006), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2006b). ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines (ISO 14044:2006), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Nakicenovic N. & Swart R. 2000: Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Odum H.T., Kemp W., Sell M., Boynton W. & Lehman M. 1977: Energy analysis and the coupling of man and estuaries. *Environmental Management* 1(4): 297–315.
- Pájer J. 1998: *Környezeti hatásvizsgálatok*. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron.
- Polgár A. 2012: *Környezeti hatásértékelés a környezetirányítási rendszerekben*. Doktori disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron.
- Rumpf J., Horváth A.L., Major T. & Szakálosné Mátyás K. 2016: *Erdőhasználat*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Sandin G., Peters G.M. & Svanström M. 2016: Life Cycle Assessment of Forest Products: Challenges and Solutions. *Life Cycle Assessment of Forest Products*. In: *Life Cycle Assessment of Forest Products*. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Cham, 25–67. DOI: [10.1007/978-3-319-44027-9_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44027-9_4)
- Simon B. 2012: A rendszerhatárok és a hatásvizsgáló módszer megválasztásának szerepe az LCA eredményében – az elektromos-energia előállítás példáján keresztül. *Eco-matrix* 2012(1-2): 11–24.

- Sundberg U. 1982: A study on cost of machine use in forestry – Proposing fuel consumption as cost determinant. The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Operational Efficiency. Report No. 142.
- Sundberg U. & Svanqvist N. 1987: Fuel consumption as indicator of the economics of mechanization. Scandinavian Journal of Forest Research 2(1-4): 389–398. DOI: [10.1080/02827588709382477](https://doi.org/10.1080/02827588709382477)
- Tellnes L.G.F., Ganne-Chedeville C., Dias A., Dolezal F., Hill C. & Zea Escamilla E. 2017: Comparative assessment for biogenic carbon accounting methods in carbon footprint of products: a review study for construction materials based on forest products. iForest Biogeosciences and Forestry 10: 815–823. DOI: [10.3832/ifor2386-010](https://doi.org/10.3832/ifor2386-010)
- Thoree C. & Schweinle J. 1995: Life Cycle Analysis in Forestry. In Frühwald A., Solberg B. (eds): Life-Cycle Analysis – a Challenge for Forestry and Forest Industry. EFI Proceedings 8, European Forest Institute, 15–16.
- USEPA 1998: Guidelines for Ecological Risk Assessment U.S. Environmental Protection Agency. Risk Assessment Forum, Washington D.C. 2–19.
- Vadász E. 1924: A szén és petróleum múltja és jövője. Athenaeum Kiadó, Budapest.

On-line és digitális források

- Buzás Z. 2005: Buzás Zoltán számítása az Sz. közelében lévő Mátrakeresztes erdőtag CO₂ lekötésének évi értékére. (letöltve: 2017. december 27.)
URL: http://www.fagosz.hu/fataj/FATAJ_online/2006/08_02200226/Kyoto/Buzas_SZ-xx-erdotag-szamitasa.pdf
- Cseh G. 1999: Az ipari kockázatok értékelésének és hatósági szabályozásának elvei és terminológiája. www.mbf.hu [Átdolgozott változat: CD Cégbiztonság, 2004. II. n.év, KJK-KERSZÖV Jogi és Üzleti Kiadó, Budapest, 2004.]
- NÉBIH fakitermelési adatközlés 2016: A 288/2009. (XII. 15.) Korm. rendelettel elrendelt 2016. évi Országos Statisztikai Adatgyűjtési Program 1254 számú adatgyűjtése. Beszámoló az erdősitésekről és a fakitermelésekről a 2016. évben (országos összesítő): 15. (letöltve: 2018. május 9.)
URL: <http://portal.nebih.gov.hu/documents/10182/206281/M%C3%A9rleg-2016.pdf/a723b1fd-c5b2-497c-8049-4f149fb99bd0>

*Érkezett: 2018. május 5.
Közlésre elfogadva: 2018. június 1.*



Forwarder munka közben

Fotó: Horváth Attila László (SOE)

AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS KÉRDÉSE A MAGYAR ERDŐGAZDÁLKODÓK KÖRÉBEN

Jankó Ferenc^{1,4}, Bertalan Laura¹, Pappné Vancsó Judit², Ormos Balázs³,
Németh Nikoletta¹ és Hoschek Mónika¹

¹Soproni Egyetem, Lámfalussy Sándor Közgazdaságtudományi Kar

²Roth Gyula Erdészeti, Faipari, Kertészeti, Környezetvédelmi Szakgimnázium, Szakközépiskola és Kollégium

³Ormos Erdő Bt.

⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Kivonat

Tanulmányunkban országos kérdőíves mintán és interjúk segítségével vizsgáltuk az erdőgazdálkodók éghajlatváltozás-érzékelését és adaptációs tevékenységét. Eredményeink szerint leginkább a hótakarós napok számának csökkenését érzékelik a válaszadók, ám különbségek mutatkoztak az éghajlatváltozás érzékelésében a válaszadók földrajzi elhelyezkedése, és a kezelt erdőterületek jellege alapján. Szakirodalmi összevetésben elmondható, hogy a magyar erdészársadalom a felkészülés szakaszában van, megvalósított adaptációról csak a válaszadók 16%-a számolt be, ugyanakkor többen jelezték, hogy ebben a jogszabályi előírások képeznek akadályt. A már alkalmazkodókról elmondható, hogy közöttük átlagban nagyobb fokú az aggodás, régebb óta érzékelik és jelentősebbnek tekintik a problémát, saját gazdálkodásuk eredményességét tekintve is. Megállapítottuk, hogy az állami erdőgazdaságok nem alkalmazkodnak jobban, s a magas fokú aggodásról sem mondható el, hogy blokkolná az éghajlatváltozáshoz történő alkalmazkodást, a természetvédelmi tényező pedig a kérdőíves adatok szerint ugyan nem hátráltatja az adaptációt, több interjúalany viszont erről számolt be.

Kulcsszavak: éghajlatváltozás, erdészetek, érzékelés, adaptáció, Magyarország.

CLIMATE CHANGE ATTITUDES AND ADAPTATION OF HUNGARIAN FOREST MANAGERS

Abstract

This study utilizes a national questionnaire sample and interviews to examine attitudes to climate change as well as perceptions and adaptation activities among Hungarian forestry managers. The results show the respondents addressing climatic changes are concerned mostly by the decrease in the number of snow-covered days, but differences of opinion can be attributed to geographical location and the forest areas managed. Hungarian forest management is still in the preparation phase with only 16% of respondents reporting the implementation of climate change adaptation measures; however, many foresters claim this is often hindered by legislative constraints. Those who have implemented adaptation measures show an increased concern toward climate change on average; they have been aware of climate change for a longer time and regard it as a serious problem affecting their management activities. The study has evidence that state forest managers do not adapt better than private foresters do, high level of concern and nature conservation factors do not hinder adaptation. However, during the interviews respondents reported that nature conservation factors do, in fact, hinder adaptation processes.

Keywords: climate change, forestries, perception, adaptation, Hungary.

Levelező szerző/Correspondence:

Jankó Ferenc, 9400 Sopron, Erzsébet u. 9., e-mail: janko.ferenc@uni-sopron.hu

BEVEZETÉS

Az éghajlatváltozás régóta a figyelem középpontjában van az erdészeti szektorban, nemcsak a kutatásokat határozza meg egyre inkább, hanem az erdészeti politikát is (NES 2016). A kutatások elsősorban arra irányulnak, hogy az erdőterületeken érzékelhető természeti és ökológiai folyamatokat értsék meg, és jelezzék azokat előre a klimatikus trendekkel összefüggésben, tehát alapvetően természettudományos megközelítésűek (Mátyás 2006a, Somogyi 2003). A magyarországi kutatások nemzetközi összefüggésekben is fontos szerepet kapnak az erdő-sztyepp átmenet vizsgálatában (Mátyás & Sun 2014) Jelen tanulmány empirikus vizsgálatok bázisán az emberi tényező szerepére koncentrál; társadalomtudományi elemzésünk az ágazat szereplőinek a viszonyát kívánja feltárni a megváltozó klíma érzékelése, felfogása, az ahhoz történő alkalmazkodás tekintetében. Kutatásunknak két csomópontja, két fő kérdése van: az egyik az éghajlatváltozás érzékelése, a másik az alkalmazkodási válaszok, stratégiák elemzése, ezek mikéntje a hazai erdőgazdálkodók körében.

Az első kutatási kérdéssel kapcsolatban egy hipotézist fogalmaztuk meg: a hely, a kezelt erdőterület jellege, termőhelyi és mikroklimatikus adottságai befolyásolják az éghajlatváltozás érzékelését. A másodiknál a fő cél az adaptáció motivációinak, tényezőinek a feltárása. Ide vonatkozóan három hipotézisünk van: az állami erdőgazdaságok felkészültebbek, tudatosabbak az éghajlatváltozással való összefüggésben; az erdők természetvédelmi oltalma megnehezíti az alkalmazkodást; a problémával kapcsolatos túlzott aggodás blokkolja az adaptációt, a cselekvést.

SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az éghajlatváltozás tapasztalásának, érzékelésének témája széles körben kutatott, amely területen a közvéleményt célzó kutatások mellett a „természettel” dolgozókra, így a mezőgazdasági és az erdészeti szakemberekre is kiterjed a figyelem, hiszen ők munkájukból kifolyóan hitelesebben tudnak beszámolni a jelenségről (Weber 2010). Röviden utalunk itt Egan & Mullin (2012), Akerlof et al. (2013), Hamilton & Stampone (2013) munkáira, akik a megkérdezettek tapasztalatait a valós klímaadatokkal vetették össze, Myers et al. (2013) pedig demonstrálta a tapasztalati tanulás esetét, ami azt jelenti, hogy a személyes tapasztalás növekvő klímaváltozás-hithez vezet, és annak fordítottját, a motivált gondolkodását, amikor a magas fokú bizonyosság, hit befolyásolja az érzékelést és a tapasztalatot. Az első így az azért hiszem mert látom, a második pedig az azért látom, mert hiszem esete. Ezeket a valóságban nehéz elválasztani. Több tanulmány emeli ki a személyes tapasztalat és a cselekvési motiváltság közötti kapcsolatot is (Lorenzoni & Pidgeon 2006; Broomell et al. 2015), de a társadalomföldrajzi megközelítések a hely és az időbeliség szerepét is hangsúlyozzák ebben a vonatkozásban (Brace & Geoghegan 2010).

Az erdészeti témára fókuszálva a nemzetközi szakirodalomban ma már több olyan tanulmányt találunk, amelyek hasonló kérdéscsoportokkal és módszerekkel készültek. A több országban – döntően Európa nyugati felén – készült esettanulmányok tanulságait összegezve elmondható, hogy egyre inkább foglalkoztatja az erdészeti szakembereket az éghajlatváltozás, azonban az alkalmazkodási cselekvés még többnyire alacsony intenzitású. A téma kutatói az alkalmazkodás számos személyes, vagy földrajzi tényezőire is rámutattak. Az ide vonatkozó kutatások sorában említhetjük Blennow (2012) Svédországban három mintaterületen, két időszakra végzett kérdőíves felmérését, ahol azt tapasztalta, hogy az adaptációs intézkedések fejlődtek, kiterjedtek az idő múlásával, összefüggésben a megkérdozettek kockázatterzékelésével, különösen a déli régiókban. Milad et al. (2012) Németországban készített tizenhárom erdész-interjút, hogy teszteljék azt, hogy a klímaadaptáció mennyire van már benne a gyakorlatban. Eredményeikben arról számoltak be, hogy bár a megkérdozettek, függően attól, hogy mennyire kitétt régiójuk az éghajlatváltozásnak figyelembe veszik az éghajlatváltozást, esetleg tervezik is az adaptációt, munkájuk során azonban ennek még kevés eredménye van, látható, megvalósított stratégiák formájában. Detten & Faber (2013) országos kérdőíves felmérése és interjúja inkább a döntéshozásra, tervezésre helyezte a hangsúlyt. Ide kapcsolódóan Yousefpour & Hanewinkler (2015) ugyancsak németországi vizsgálatával az adaptációs és mitigációs lehetőségek bizonytalanságaira mutatott rá.

Lawrence & Marzano (2014) dél-wales-i területen végzett interjú vizsgálatokat feltárva az adaptáció kérdőjeleit. Egyrészt arra mutattak rá, hogy nem igazán aggodalmaskodnak a klíma miatt a válaszadók, másrészt, hogy a fajpolitikát illetően megoszlottak a vélemények azok között, akik az őshonos fajokat, a lucfenyőt vagy az új fajokat támogatták. Hasonlóképpen a klíma bizonytalanság, illetve -kockázatok eltérő felfogásaira, adaptációban játszott szerepére mutatott rá Nagy-Britannia-szerte Petr et al. (2014). Furness & Nelson (2012) Kanadában, British Columbiában kutatták az érzékelés és a válaszadás kérdését, helyi közösségi erdészeti szervezetek kérdőíves vizsgálatával, ugyanitt készült Nelson et al. (2016) tanulmánya, amely az erdészeti szakemberek adaptációs hajlandóságát elemezte. Lenart & Jones (2014) pedig a klímaváltozásba vetett hit szerepét vizsgálta a cselekvési hajlandóságban az USA-ban, kimutatva az összefüggést.

Ezek mellett más hangsúlyokkal egyre több írást lelünk fel az utóbbi években, így Johnston & Hessel (2012) & Gameren és Zaccai (2015) az adaptációs kapacitásra, képességre fókuszál kanadai, illetve belga interjúvizsgálataival, ugyanezzel a módszerrel Blades et al. (2016) a klímatudomány elfogadottságát tesztelte Sziklás-hegység-beli erdészekkel, Andersson et al. (2017) pedig svédországi–skóciai összehasonlításával arra mutatott rá, hogy az adaptáció, az adaptációs kapacitás befolyásolásban az intézményi környezet, ágazati hagyományok legalább annyira fontos tényezők, mint a személyes tulajdonságok, s az érzékelés. Mostegl et al. (2017) ezer fős mintán vizsgálta Ausztriában az éghajlatváltozás szerepét az erdészeti döntéshozásban. Vizsgálatuk érdekessége az alkalmazott környezetértékelési módszer, az ún. diszkrét választási kísérlet volt. Lakkonen et al. (2018) vizsgálatának különlegessége a helyben, a kezelt erdőben végzett interjúk és ezek kognitív térképezése és elemzése volt, mindazonáltal ők is rámutattak az érzékelés bizonytalanságaira.

Az első, több régiót átfogó vizsgálat Blennow et al. (2012) tanulmányában olvasható, amelyet az érzékelés és a cselekvés koncepcionális megközelítése köré szerveztek. Svédországban, Németországban és Portugáliában folytatott kérdőíves vizsgálataikkal rámutattak arra, hogy a klímaváltozás jelenségébe vetett hit és a tapasztalat nem meglepő módon erős összefüggésben van a cselekvéssel, emellett ezekben a relációkban éles regionális különbségekre mutattak rá. Ez az írás több más tanulmánynak módszertani alapot nyújtott, így például Sousa-Silva et al. (2016) is az érzékelés-adaptáció kapcsolatát kutatta Belgiumban, háromszáz fős erdész mintán. Raftoyannis et al. (2014) a mediterrán országokban végzett összehasonlító kutatásokat, vizsgálva a tűzbiztonsági intézkedések, a közvélemény figyelemfelkeltése és az üzemanyag használat szerepét az éghajlatváltozáshoz való adaptációban. Blennow et al. (2016) később arra hívta fel a figyelmet, hogy az erdészek között – a szakirodalomban a közvélekedéssel kapcsolatosan elterjedt összefüggéssel ellentétben – az egyetemi végzettség, a magasabb tudományos képzettség nem polarizálja az éghajlatváltozásról való gondolkodást és a cselekvési hajlandóságot.

MÓDSZERTAN

2016-2017 folyamán írásban, majd telefonon megkerestük a 22 állami erdőgazdaságot és a magánerdészeteket, hogy elsősorban erdészeti, azaz operatív szinten dolgozó munkatársaik, illetve az erdészeti szakszemélyzet révén töltsék ki a kérdőívünket. A felmérés során 186 kiértékelhető kérdőívhez jutottunk. A kitöltők közül az alap adatokat áttekintve – amelyre 10 kérdés vonatkozott – kilencen voltak nők, életkori megoszlás szerint 1950 és 1989 közötti születésű volt a kitöltők több, mint 93% -a, legnépesebb csoport 30%-kal az 1970-79-es korosztály volt, őket követték az 1960-69-esek 26%-kal. Településnagyság-típusra és megyére a felmérésünk lényegében reprezentatívnak mondható, minden településszintet és megyét az erdők megoszlásával arányosan közel megfelelően képviseltek a válaszadók.

A beérkezett válaszokat a gazdálkodás helye (település, erdészeti kistáj) alapján sík-, domb- és hegyvidéki kategóriába osztottuk be, a megoszlás itt 3:3:4-nek adódott. Egy másik bontásban az erdő-klíma viszonyok figyelembevételével négy nagyrégióra osztottuk Magyarországot, megkülönböztetve az Alföldet (27%), Észak-Magyarországot (23), Dél-Dunántúlt (23; hozzá sorolva Zalát) és Észak-Dunántúlt (27).

Az erdőterületek megoszlására kérdőívünk a fő állományalkotó társulások, természetvédelmi kategóriák, és rendeltetés alapján kérdezett rá. Alanyaink kb. 2/3-a állami 1/3-a magán erdőgazdaságnál dolgozik. Meglehetősen kevés volt az olyan válaszadó, akinek egyoldalú, monokultúrás erdőterülete lenne. Az állományalkotó társulásokat figyelembe véve az 1. táblázatban megjelölt csoportok kialakítására volt mód.

A kérdések következő blokkját a problémaérzékelés jelentette (6 kérdés), az éghajlatváltozással kapcsolatos információszerzésre, a tapasztalás és a probléma aktualitásának időbeli dimenziójára, fontosságára vonatkozó kérdésekkel. Öt pontos Likert-skála alkalmazá-

sával hat kérdésből álló (három-három pozitív és negatív megfogalmazással) aggodás kérdéssort alkottunk, amelyek megfelelő aggregálásával egy 6 és 30 közötti intervallumon (ese-tünkben 11 és 30 között) mozgó, 23,0-as átlagú aggodás-indexet képeztünk. Ugyanitt fontos kérdés volt az, hogy az erdészek lakó, illetve gazdálkodási helyüket tekintve milyen klimatikus vagy időjárási jelenségeket tulajdonítanak az éghajlatváltozásnak. Ezekből egy max. 12-es értéket felvevő klíma-romlás-indexet alakítottunk ki (átlag: 8,2), minden válaszadónál összeszámolva azon válaszokat, amelyek ez irányba mutatnak (pl. összerosódó évszakok, hótakaróval fedett napok száma csökkent stb.). A fordított irányú mutatónál adott rész kérdéseknél a változás hiánya egy, a pozitív irányú változás kettő pontot ért (pl. a nem változó, illetve a növekvő évi csapadékmennyiség), így a „klíma-javulás-index” elméletben 21 pontot vehetett fel, viszont csak 1 és 11 közötti értékek adódtak (3,2-es átlaggal).

A következő kérdésblokk a gazdálkodásra való hatást, a kiszolgáltatottságot, és az alkalmazkodást vizsgálta (6 kérdés). Utóbbi kapcsán nyitott kérdésekkel is megkérdeztük az adott esetben már elvégzett adaptációs cselekvést, illetve a tervbe vett intézkedéseket.

1. táblázat: A válaszadók csoportjai az erdők fő állományalkotó társulás alapján, N.
Table 1: Groups of respondents according to the major species of forest composition.

25% feletti bükkössel (átlag: 10,6) rendelkezik, gyertyános-tölgyes 45%, cseres és tölgyes 40%, fenyves 20% alatt:	29	1. csoport
20% feletti fenyvessel (átlag: 11,4) rendelkezik, bükk 25%, gyertyános-tölgyes 30%, tölgyes 30%, cseres 32% alatt:	23	2. csoport
40% feletti cseresekkel (átlag: 14,5) rendelkezik, bükk 25%, gyertyános-tölgyes 30%, fenyves 20%, egyéb keménylombos 30% alatt:	21	3. csoport
31% feletti egyéb keménylombos erdővel (átlag: 23,5) rendelkezik, bükk 10%, tölgyes 50%, cseres 30%, fenyves 20%, egyéb lágylombos 45% alatt:	56	4. csoport
Bükk 25%, cseres 35%, fenyves 20%, egyéb keménylombos 25% alatt és a gyertyános-tölgyes átlag (18,1) felett:	30	5. csoport
Bükk 25%, cseres 40%, fenyves 20%, egyéb keménylombos 25% alatt és a gyertyános-tölgyes átlag (18,1) alatt:	27	6. csoport
Összesen:	186	

A kérdőívezést egy országos körben végzett interjúzással egészítettük ki, további információk szerzése, a kérdőíves eredmények ütköztetése céljából. Összesen 16 erdőgazdálkodót kérdeztünk meg, figyelve arra, hogy a megkérdezettek a gazdálkodás helyszínét tekintve képviseljék a jelentősebb tájegységeket, illetve vegyesen legyenek állami és magán erdészetek gazdálkodói. Az interjúalanyok kiválasztásánál további szempont volt, hogy lehetőség szerint több évtizedes szakmai és vezetői tapasztalattal rendelkezzenek. Így az in-

terjűalanyok nagyrészt 60 év körüliek, néhány esetben nyugalmazott erdészetvezetők voltak, egy esetben erdőfelügyelő. Az interjúkérdések segítségével – hasonlóan a kérdőív céljaihoz – a klímaváltozás érzékelésére, annak pozitív és negatív hatásaira, az alkalmazott adaptációs stratégiákra, és a főbb akadályozó tényezőkre kérdeztünk rá.

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

Az éghajlatváltozás érzékelése

A felmérésben egyetlen fő mondta azt, hogy nem hallott az éghajlatváltozásról, 13-en pedig nem tapasztalták azt. A legfontosabb információforrásnak a hagyományos és internetes média, illetve a szakmai folyóiratok, rendezvények adódtak 90% körüli említésekkel. Yousefpour & Hanewinkler (2015) Németországban a szakmai képzéseket, a médiát és a szakirodalmat emelte ki hasonló tekintetben.

A többség (42%) az elmúlt 10 évet jelölte meg a klímaváltozás időhorizontjaként, vagyis nagyjából a 2000-es évek dereka óta érzékelik a jelenséget. A rövidebb időszakot megjelölők mintegy 30%-ot, a hosszabb időszakot megjelölők 22%-ot tettek ki a mintában. Az interjúkban általában az 1980-as években jelentkező légköri aszályt és az azt követő szárazodást említették a klímaváltozás első jeleként, mely főként a lucosoknál okozott nagy károkat. De volt, aki már az 1970-es évek végén a cseres-tölgyesekben tapasztalt kocsánytalan tölgy pusztulást (Mátra) is ebben az összefüggésben említette meg. A kérdőívben is megkérdezett időjárási-klimatikus változások mellett (ld. alább) interjúalanyaink a talajvízszint erőteljes csökkenéséről és a hőmérséklet szélsőséges ingadozásáról is beszámoltak.

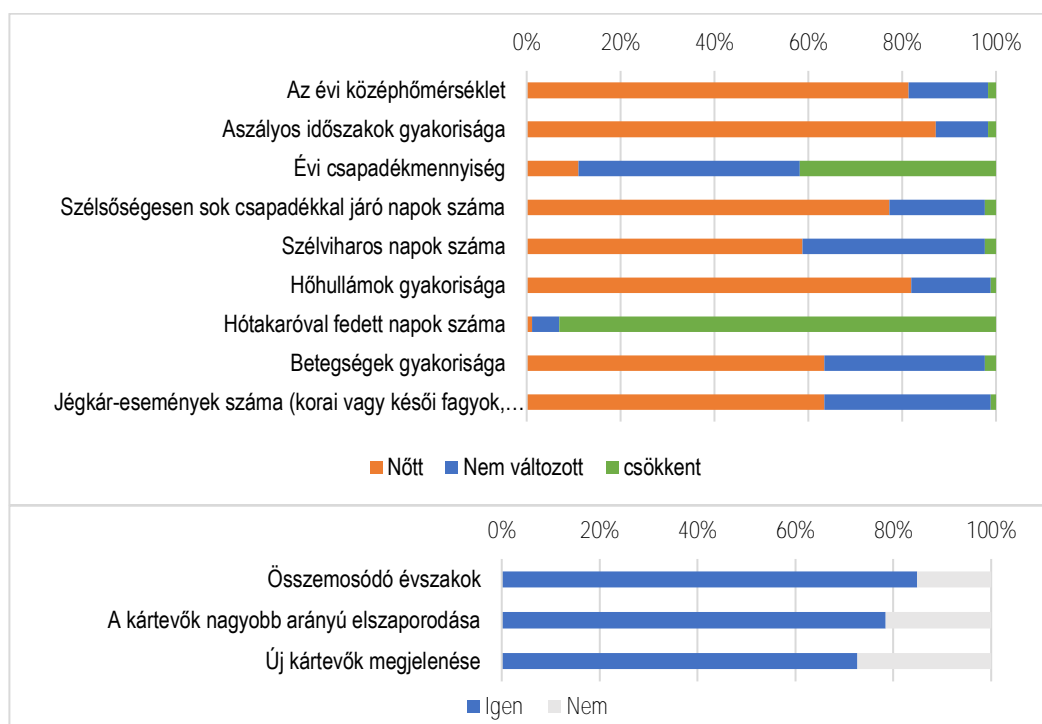
Egy következő kérdésnél a klímaváltozás problémájának aktualitására, egyúttal a jelenséggel kapcsolatos kételyekre kérdeztünk rá, itt a válaszadók abszolút többsége (57%) mondta azt, hogy az éghajlatváltozás hatásait már saját bőrén érzi, saját szemével látja. Egy-harmados volt a válaszadók azon csoportja, akik szerint a klíma mindig is hatott és hatni fog az emberiségre, ők azok nagyjából, akik a problémát a távoli jövőbe kivetítőkkel egyetemben (4%) kételkednek a probléma fontosságában. Egy ilyen kisebb válaszadói csoportról Yousefpour & Hanewinkler (2015) is beszámolt, Mostegl et al. (2017) pedig 20%-ra tette ezek arányát a kisbirtokos erdészek körében.

Az interjúk során jobban kiütközött, hogy a klímaváltozás emberi vagy természeti okait tekintve megoszlik a vélemény. Az antropogén tevékenységet főként a megváltozott földhasználat, a művi környezet növekedése, az ipar és a közlekedés környezetszennyező hatásai, illetve a nagymértékű fosszilis energiafogyasztás miatt tették felelőssé, ugyanakkor azt is többen megemlítették, hogy nem lehet tudni, hogy valójában a természeti folyamatok (vulkánok, szilikátok szén-dioxid kibocsátása) miatt bekövetkező klímaváltozáshoz milyen mértékben járul hozzá az emberi tevékenység.

Kérdőíves adataink alapján nyilvánvalóvá vált, hogy a megkérdezettek leginkább a saját ágazatukat, az erdőgazdálkodást tartják kitettnek a klímaváltozás hatásaival kapcsolatban,

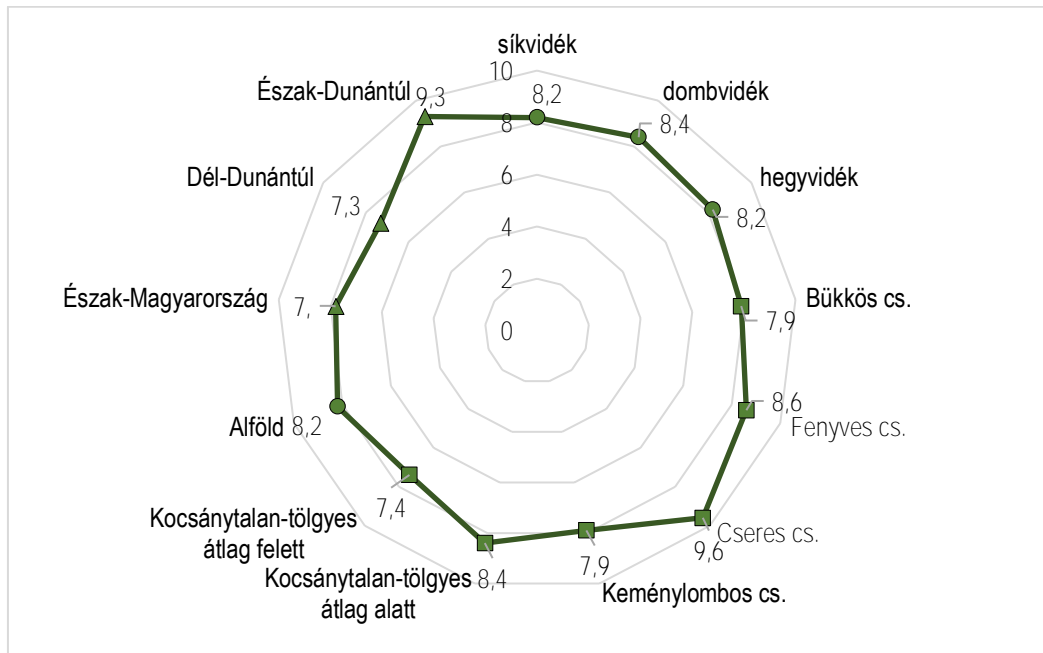
és ezt a hatást egy öt fokozatú skálán túlnyomóan negatívnak ítélték meg. Ehhez hasonlóan értékelték a mezőgazdaságot és a természeti környezetet is.

Az időjárási jelenségeket az éghajlatváltozás vonatkozásában mérlegre tevő kérdés szólt arról, hogy mi az, ami jól látható, érzékelhető a saját lakóhelyet, gazdálkodási helyet tekintve. Összesített adataink szerint a kép meglehetősen egyértelmű, csupán az évi csapadékmennyiség az, ahol jelentősebb fokú bizonytalanság tapasztalható, itt a csökkenésről beszámolóknál többen voltak azok, akik szerint nincs változás. A leginkább problematikusnak pedig a hótakarós napok csökkenése, az aszályos időszakok gyakoriságának növekedése és az összemosódó évszakok jelensége adódott (1. ábra). Nyilván ez az eredmény meglehetősen ország-specifikus, más helyszíneken eltérő eredmények adódtak (vö. Furness & Nelson 2012; Detten & Faber 2013; Sousa-Silva et al. 2016) A módszertanban jelzett háromféle erdő-csoportosításban a válaszadók átlagos klíma-romlás-indexét a 2. ábra mutatja. Ez jelzi már azt, hogy a legnagyobb különbségek a regionális és az erdőtípus szerinti bontásban mutatkoztak, ezeket érdemes hát közelebbről is megvizsgálni, amikor az érzékelés és a hely kapcsolatát vizsgáljuk, hiszen a domborzati típusok kapcsán a hegyvidékekre és a síkvidékekre is számos esetben igaz, hogy valamelyest kisebb mértékben tapasztalják a problémákat.



1. ábra: Az éghajlatváltozásnak tulajdonított időjárási-klimatikus tényezők.

Figure 1: Factors of weather and change attributed to climate change.



2. ábra: A klíma-romlás-indexek értékei az erdők elhelyezkedése és erdőcsoportja alapján (max. 12).
 Figure 2: Indices of climate-worsening based on the location and types of forests (max. 12).

A jellegadó állományalkotó társulások alapján képzett csoportok esetében némiképp „beleillik a képbe”, hogy a 40% feletti cseresekkel rendelkező csoport válaszadói adták a legnagyobb arányú válaszokat az aszályos időszakok, a hóhullámok, a jégkárak gyakoriságának növekedése, az összemosódó évszakok, a kártevők vonatkozásában, egyebekben a „fenyves” csoport rendelkezik a legnagyobb értékekkel, amely viszont az évi csapadékösszeg vagy az aszályos időszakok vonatkozásában a legnagyobb arányban számolt be növekedésről, illetve változatlaniságról. Összességében változatlan időjárási mintázatokról leggyakrabban az egyéb keménylombos és a bükkös csoport számolt be.

A regionális csoportosítás szerint talán még élesebb a kép. Az észak-magyarországi válaszadóknál a legkisebbek (bár ez itt is sok esetben 70% feletti értékeket jelent) a klímaromlást jelző válaszok, s legnagyobbak a változatlaniságról tanúskodó feleletek. A 11 időjárási tényezőtől 9 esetben (három holtversenyben) az Észak-Dunántúlon a legmagasabbak az értékek (összemosódó évszakok, évi középhőmérséklet növekedése, évi csapadékcsökkenés, aszályos időszakok, hóhullámok növekedése, szélviharos napok számának növekedése, kártevők nagyobb arányú elszaporodása, betegségek gyakoribbá válása, több jégkár), míg az Alföldön a leginkább kiugró a hótakaróval fedett napok csökkenésének érzékelése, s szintén az évi középhőmérsékletcsökkenés és az aszályos időszakok növekedése. A Dél-Dunántúlon pedig a szélsőséges csapadékok növekedését és a kártevő problémát (nagyobb arányú elszaporodás, újjak megjelenése) jelezték legnagyobb arányban.

Még egyféleképpen igyekeztünk megnézni, hogy mi befolyásolhatja az éghajlatváltozás tapasztalását, voltaképpen milyen helyi karakter az, ahol nagyobb eséllyel kevésbé láthatók az éghajlatváltozás jelei. A klíma-javulás-indexet felhasználva, az átlag kétszeresét (6) eléréssel képeztünk egy 43 fős csoportot. Ezeknél – a fentiekkel összefüggésben – némiképp nagyobb a síkvidéki és hegyvidéki csoportba tartozók aránya, több a bükkös, a keménylombos és az átlag alatti gyertyános-tölgyes csoport (1., 4., 6. csoport). A minta korösszetételén az is látszik, hogy az idősebbek (1950-1959) fele akkora arányban vannak jelen, míg a legfiatalabbak (1980-1989) arányaiban másfélszer annyian. Ezzel összefügg, hogy a válaszadók többsége, majdnem fele csak az elmúlt néhány évben tapasztalta az éghajlatváltozást. Sokat mond, hogy ez a csoport nagyobb arányban számolt be – lásd részletesebben alább – a gazdálkodás eredményességének javulásáról vagy változatlanságáról a klímaváltozással összefüggésben, s azt is megjegyezhetjük, hogy némiképp kevésbé foglalkoztatja ezt a csoportot a probléma. Vagyis összességében megfogalmazhatjuk, hogy első hipotézisünket bizonyos mértékig elfogadhatjuk, van némi összefüggés a hely és az érzékelés között, továbbá az is látszik, hogy a tapasztalás mikéntje az alkalmazkodás módjára is kihat.

Alkalmazkodás az éghajlatváltozáshoz

Az egész mintát tekintve az mondható el, hogy a válaszadók többsége negatívan értékeli az éghajlatváltozás hatásait a gazdálkodásra, mintegy kétharmaduk romló, 13% sokat romló eredményességről számolt be. Ezzel összefüggésben ugyancsak mintegy kétharmadnyian mondták azt, hogy kiszolgáltatottnak érzik magukat, és összesen 31% nyilatkozta azt, hogy képes úrrá lenni a problémákon – e válaszadók nagyobb része a pénz függvényében válaszolta ezt. Úgy tűnik a tudás–nem-tudás, mint akadály igencsak nagy mértékben megjelenik ennél a kérdésnél – némileg ellentmondásban azzal, amit az érzékelésnél láttunk, vagy, amit alább a felkészülés adatai mondanak. Bár a kérdésfeltevés módja nem volt ugyanaz, mindenesetre Nelson et al. (2016) sokkal jobb arányokról számolt be Kanadában.

Viszont a többség komolyan foglalkozik a felkészüléssel: az ágazat alapvetően a felkészülés fázisában van, hiszen a válaszadók 40-50%-a válaszolta azt, hogy valamilyen formában a szakmai felkészülésnél tart (kollégákkal értekezik, szakmai rendezvények, tanulmányok olvasása), igaz a már változtatók, alkalmazkodók aránya mindössze 16% (ld alább a 3. ábrát). Ez országos összevetésben meglehetősen alacsony: Blennow et al. (2012) Portugáliából több mint 50%-ot, Németországból 48, Svédországból 20%-ot, Sousa-Silva et al. (2016) Belgiumból 32%-ot jelentett.

Az adaptációs döntés befolyásoló tényezőit Blennow et al. (2012) módszerével a 2. táblázatban elemezzük. A személyes jellemzők közül a településnagyságot, az erdőterületek jellemzői közül a dombvidéki és dél-dunántúli elhelyezkedést, illetve az átlag feletti cseres és fenyves faösszetételt lehet kiemelni – szemben azzal, hogy az érzékelésnél a Közép-Dunántúl emelkedett ki a legtöbb tényezőben. Azok, akik már alkalmazkodtak (valamelyest)

az éghajlatváltozáshoz régebb óta érzékelik azt, jobban aggódnak, jelentősebb problémának tekintik, és ami kiváltképp fontos lehet, nemcsak az időjárási jelenségekben, hanem a saját gazdálkodásukban is jóval inkább érzékelik a klíma megváltozását, s emellett az alkalmazkodás képessége (tudás és anyagiak) is aláhúzandó.

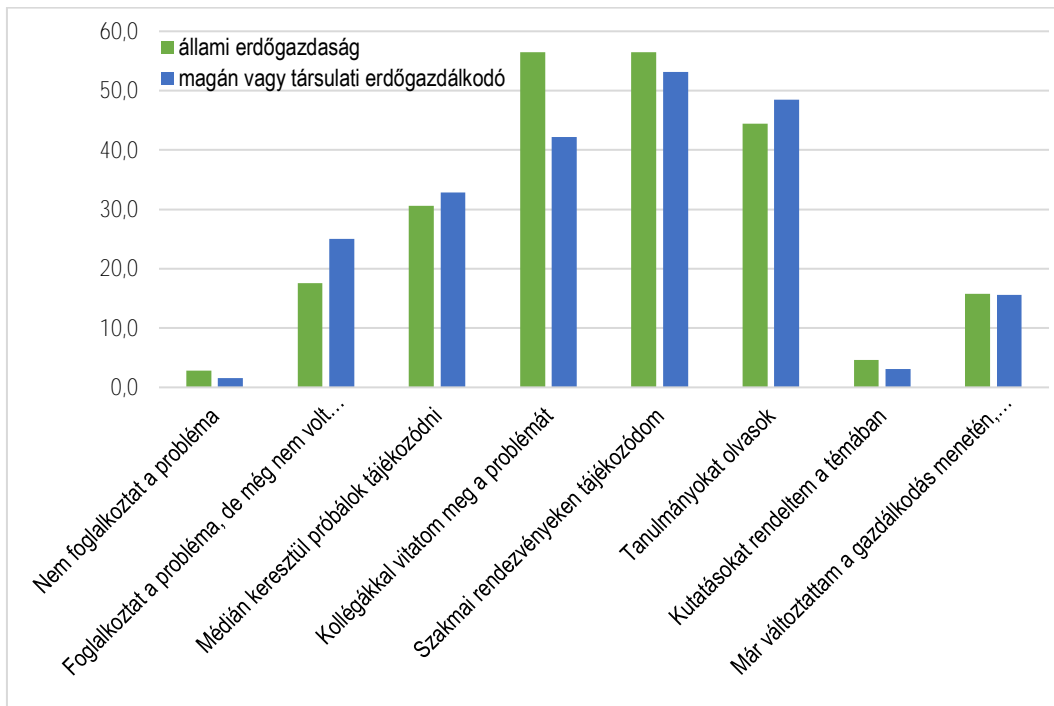
2. táblázat: A válaszadók fontosabb ismérvei az adaptációs cselekvés mentén.
Table 2: Some major features of the respondents according to the adaptation activity.

	Még nem adaptálódott (N=159)	Már adaptálódott (N=27)
Személyes jellemzők		
Férfi	95,0	96,3
Nő	5,0	3,7
50 év feletti (1966 előtt születettek) aránya	32,7	59,3
Budapestiek aránya	2,5	11,1
5000 fő alatti településen lakók aránya	52,2	37,0
egyetemi/főiskolai végzettségűek	82,4	92,6
Az erdőterületek jellemzői		
dombvidéki erdőszet	25,8	37,0
hegyvidéki erdőszet	40,9	37,0
síkvidéki erdőszet	33,3	25,9
alföldi erdőszet	27,7	25,9
észak-magyarországi erdőszet	23,3	22,2
dél-dunántúli erdőszet	21,4	29,6
észak-dunántúli erdőszet	27,7	22,2
Átlag (10,6%) feletti bükkös	32,7	25,9
Átlag (11,4%) feletti gyertyános-tölgyes	35,8	37,0
Átlag (14,2%) feletti tölgyes	38,4	25,9
Átlag (14,5%) feletti cseres	34,0	51,9
Átlag (11,4%) feletti fenyves	25,2	33,3
Átlag (23,5%) feletti egyéb keménylombos	37,1	33,3
Átlag (14,4%) feletti egyéb lágylombos	28,3	25,9
Természetvédelmi oltalom 50% felett	49,7	55,6
Gazdasági rendeltetésű erdő 50% felett	65,4	59,3
Állami erdőgazdaság	62,3	63,0

	Még nem adaptálódott (N=159)	Már adaptálódott (N=27)
Tapasztalta Ön az éghajlatváltozást?		
Igen, az elmúlt néhány évben	31,6	11,1
Igen, az elmúlt 10 évben	39,9	55,6
Igen, már régebb óta	20,3	33,3
Mennyire érzi fontosnak az éghajlatváltozás problematikáját?		
Az éghajlatváltozás a múltban és a jelenben is hatással volt/van az emberiségre és a jövőben sem lesz ez másképp	36,1	25,9
A klímaváltozásnak csak a távoli jövőben lesznek hatásai az emberiségre	3,8	3,7
Az éghajlatváltozás csak gyermekeink/unokáink életére lesz döntő hatással	4,4	7,4
Az éghajlatváltozás hatásait már saját bőrömen is érzem, saját szememmel is látom	55,7	63,0
Aggódás-index	Átlag: 22,6 Range: 11-30	Átlag: 24,1 Range: 17-30
Klíma-romlás index	Átlag: 8,0 Range: 0-12	Átlag: 9,2 Range: 5-12
Befolyásolja-e az Ön gazdálkodásának eredményességét az éghajlatváltozás?		
Igen, sokat romlott	11,7	22,2
Igen, romlott	64,8	66,7
Nem befolyásolta	12,4	11,1
Nem tudja vagy javult	11,0	0,0
Saját alkalmazkodóképesség megítélése		
Teljesen kiszolgáltatottnak érzem magam, nem tudok mit tenni	3,4	7,4
Kiszolgáltatottnak érzem magam, kevés a mozgástér	70,3	37,0
Tudom mit kell tenni a sikeres alkalmazkodáshoz, csak a ráfordítható pénzen múlik	18,6	55,6
Képes vagyok uralni a problémákat, alkalmazkodni a változásokhoz	7,6	0,0

Egy kutatási hipotézisünk arra vonatkozott, hogy professzionálisabbak-e az állami erdészetek. Az aggódás-indexek között mindössze 6 tized különbség van; a magán vagy társulati erdőgazdálkodók árnyalatnyival borúsabbnak látják a jövőt. Némiképp ezzel összefüggésben az állami erdőgazdaságoknál dolgozók 77,8, míg a magán erdőgazdálkodók 79,7%-a számolt be romló gazdálkodási feltételekről az éghajlatváltozással összefüggésben. A kiszolgáltatottságról beszámolók aránya előbbieknél 67,6, utóbbiaknál 71,9 volt, vagyis a má-

sik oldal, a „tudom mit kell tenni”, „képes vagyok uralni a problémákat” válaszokat adók nagyobb arányban voltak az állami erdőgazdálkodóknál. Vagyis e csoport körében árnyalatnyival kisebb a pesszimizmus. A tényleges tevékenységet, a komolyabb felkészülést illetően – a kollégákkal való eszmecsere-től a kutatások rendeléséig – a százalékokat összesítve szintén némiképp az állami erdészetek járnak előbbre, jóllehet a már változtatók aránya szinte azonos, ahogy az a 2. táblázatban is látható volt (3. ábra). Végeredményben azt mondhatjuk, hogy nincs lényeges különbség az erdészetek között, ezért a hipotézisünket nem fogadjuk el.

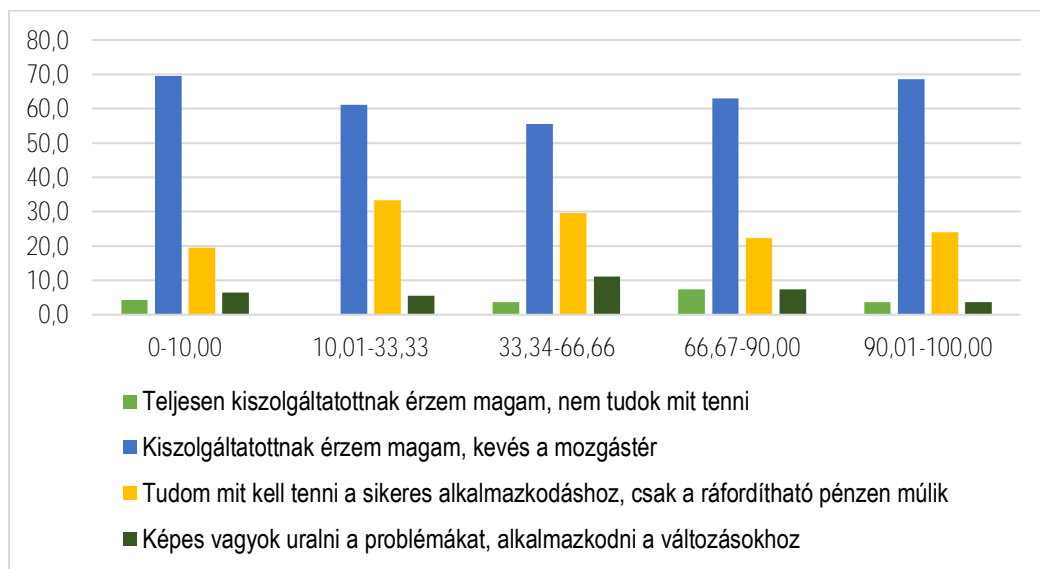


3. ábra: A válaszadók figyelme és az éghajlatváltozás.

Figure 3: Climate change concern of the respondents.

Az alkalmazkodással kapcsolatban a második kérdésünk, hipotézisünk a természetvédelmi oltalomra vonatkozott. Bár a 2. táblázat azt sugallja, hogy van némi összefüggés a természetvédelmi oltalom súlya és az adaptációs cselekvés között, mélyebbre ásva nem ilyen egyértelmű a kép. Az adatsor hisztogramja alapján hasonló elemszámú csoportokra bontottuk a válaszadókat a tekintetben, hogy mekkora általuk kezelt erdő áll valamilyen természetvédelmi oltalom alatt. A gazdálkodás eredményességét leginkább romlónak a negyedik csoport (66,67-90% természetvédelmi erdő) érzékelt, ezt követte az ötödik, majd az első, legkevesebb védett erdőt kezelők csoportja. Az alkalmazkodóképesség megítélésében

szintén nem egyirányú a felsejlő összefüggés, a magas és alacsony arányú természetvédelmi oltalommal jellemezhető csoportoknál nagyobb arányú a kiszolgáltatottság, míg a közepes kategóriákban, a magabiztosság nagyobb (4. ábra).



4. ábra: Az alkalmazkodóképesség megítélése. A válaszadók csoportjai kezelt erdőterületeik természetvédelmi oltalma (%) függvényében.

Figure 4: Evaluation of climate change adaptation skills. Groups are displayed according to the rate of nature protection in managed forest areas (%).

Az adaptációs felkészülést illetően hasonló a helyzet: leginkább a középső csoportok tettek már valamit az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás érdekében, és nagyobb fokú a felkészülési tevékenységük. Egyértelmű statisztikai összefüggésről a természetvédelem alatt álló erdőknél nem lehet beszámolni, hipotézisünket ez esetben el kellene vetnünk. Ugyanakkor az interjúk arra engednek következtetni, hogy a természetvédelmi oltalom megnehezíti az innovatív jellegű adaptációs kezdeményezéseket, illetve a szigorúbb szabályozások merevvé teszik a rendszert, kevés a mozgástér.

Utolsó vizsgálati szempontunk, hogy az aggodás milyen összefüggésben van a cselekvőképességgel, blokkolja-e a túlzott pesszimizmus, jövőfélés a cselekvést, vagyis megfigyelhető-e az a pszichológiából ismert tétel, miszerint a túlzott szorongás ugyanúgy negatívan hat a cselekvésre, mint a problémák lebecsülése. Ehhez a vizsgálathoz az aggodási indexek eloszlása (hisztogramja) alapján képeztünk hat csoportot, majd ezeket két kérdésre adott válaszokkal ütköztettük. Az alkalmazkodási képesség esetén nem fedezhetünk fel összefüggést az aggodás mértékével, a felkészülési tevékenység változtatásnál már némiképp értelmezhetőbb az összefüggés. Aki minimálisan aggodik (első kategória), az kevésbé foglalkozik a témával, felkészülési aktivitása alacsony, változtatást még nem eszközölt gazdálko-

dása menetén, viszont a sor másik végén, a leginkább aggódók igen aktívak mind a felkészülés, mind a cselekvés terén (vö. 2. táblázat). Igaz utóbbinál nincs egyértelmű kapcsolat az aggódás mértékével. Viszont érdekes az, hogy az aggódás mértékének sorrendjében egyre inkább szerepet játszik a médiában való tájékozódás, és a legmagasabb aggódási-indexszel jellemezhető csoportnál már a többi csoporthoz képest kétszer akkora szerepet játszik a média a tájékozódás terén. Lehetséges, hogy a jelentősebb média-fogyasztás vezet a nagyobb mértékű aggódáshoz? Vagy nagyobb aggódás miatt fogyasztunk több vonatkozó média tartalmat? Az igazság inkább valahol középütt lehet. A szakmai felkészülési típusok között – kollégáktól a kutatásokig – nincs egyértelmű összefüggés, bár a legmagasabb értéket a leginkább aggódók produkálták, igaz a közbülső csoportoknál már összekeveredik a sorrend. Végeredményben ide vonatkozó hipotézisünket is el kell vetnünk, a túlzott aggódás nem vezet cselekvőképtelenséghez, sőt, inkább azt mondhatjuk, hogy nagyobb aggódás jelentősebb felkészülési tevékenységet vált ki a válaszadókból.

A végrehajtott és a tervezett adaptáció

Azok a gazdálkodók, akik a megkezdett alkalmazkodásukról számoltak be (ld. 3. ábra), a következő nyitott kérdésben fejtették ki annak mikéntjét. E 26 válaszadó közül mintegy 14-en változtattak a telepített fajokon, az állományok fajösszetételén, ketten az öntözést, talajművelést említették, többen, 22-en pedig az erdőkezelési, -felújítási és -védelmi módok terén avatkoztak be.

Míg az alkalmazkodást tehát kevesen kezdték meg, a jövőre vonatkozó tervekkel azonban az éghajlatváltozást tapasztaló 159 megkérdezett 80%-a rendelkezik, viszont ebből is mintegy 10% egyelőre csak a felkészülés különböző formáit említette (kutatások rendelése, szakirodalom olvasása, mérőállomás telepítése stb.). A válaszadóknak így 68,5%-a az, akik konkrét elképzelésekkel rendelkeznek, s tudni vélik, hogy mi lenne a megoldás a megváltozott körülményekhez való alkalmazkodásban.

Megjegyzendő azonban, hogy többek szerint ehhez felül kellene vizsgálni a jelenleg érvényben lévő szabályozó rendszert, ezt többen megerősítették az interjúalanyok közül is, ahol elhangzott, hogy a természet, az erdő alkalmazkodik a klímaváltozásához, és ezt a szakmának be kell látnia, s ezzel összefüggésben szükség lenne az erdőgazdálkodás és a természetvédelem közötti párbeszédre, illetve kompromisszumokra, mert a helyesen megválasztott fajajpolitika a jövőre nézve, mind ökológiai, gazdálkodói, de klímavédelmi szempontból is elengedhetetlen. Megkérdezetteink szerint tehát a bürokrácia, a törvényi szabályozás, a túlzott természetvédelmi előírások jelentik a legnagyobb akadályt az erdőgazdálkodóknak az alkalmazkodási cselekvésében, mely egyrészt lehetetlenné teszi a gyors reakciót, másrészt elveszi a kedvét az újítani, kísérletezni próbáló gazdálkodóknak. Néhány gazdálkodó ugyanakkor arról számolt be, hogy sikerült az újításokat a természetvédelemmel egyeztetve keresztülvinni, és eredményeket elérni (pl. ökológiai vízpótlás, minitavak rend-

szere). Többen említették, hogy nagyobb önállóságot kellene adni a helyi ismerettel, tapasztalattal rendelkező gazdálkodónak, és megbízni a tudásukban, szándékukban, míg mások kiemelték a tudomány felelősségét, az erdész szakma oktatási, képzési rendszereinek átalakítását is, illetve a szemléletváltás fontosságát.

A kérdőívnel a határozott véleményt megfogalmazók közül 10% a termőhelyi körülmények (klíma, hidrológiai viszonyok, talaj) javítását tervezi elvégezni, 47% említette, hogy a megváltozott körülményekhez igazodva a faállomány összetételén változtatva, esetleg új fajok alkalmazásával tervezi a beavatkozást, 20% pedig az erdőkezelési, erdőfelújítási, erdővédelmi technológiák terén avatkozna be. A jövőbeni tervek kapcsán nagyobb az igénye az ültetendő fajok megváltoztatásának, mint a már megvalósított adaptációs lépések esetében. Az interjúknál a tárgyalt adaptációs tevékenységek között az elegyes erdőszerkezet átalakítás, a fajcserék és nevelővágások említhetők még, de sokan megemlítették itt is, hogy az őshonos fajok mellett teret kellene adni az idegenhonos fajoknak is, mások viszont teljesen elutasították ezt.

KÖVETKEZTETÉSEK

Eredményeink alapján megállapítható, hogy a hazai erdésztársadalom a felkészülés fázisában van az éghajlatváltozással kapcsolatban, jelentős a szakmai figyelem a témában, azonban megvalósított adaptációról csak a válaszadók 16%-a számolt be, ami a külföldi kutatási eredményekkel összevetve alacsonynak mondható. Ugyanakkor többen jelezték, hogy ebben a jogszabályi előírások képeznek számukra akadályt, ennek alapján is fontolóra lehet venni a tudománykommunikáció, illetve a szakpolitikai, a szabályozói környezet módosítását, hogy segítsék az ágazat felkészülését, és alkalmazkodását a megváltozó klímához (Mátyás 2006b, 2016). Tanulmányunk fontos jelzése ezzel összefüggésben, hogy a már alkalmazkodást megvalósítók több mint fele próbálkozott az ültetett fajokkal kapcsolatosan változtatásokat eszközölni, jóllehet többen voltak azok, akik a kezelési, felújítási módszereken változtattak, ugyanakkor a cselekvést tervezők számára a fajok kérdése szerepelt az első helyen.

Míg az éghajlatváltozás érzékelésénél eredményeink rámutattak az erdőterületek elhelyezkedésének és fajaj-összetételének befolyásoló szerepére, az alkalmazkodás tekintetében megfogalmazott hipotéziseinket csak részben tudtuk igazolni, ezért aláhúzendő, hogy az állami erdőgazdaságok nem alkalmazkodnak jobban, mint a magán erdészetek, várakozásunkkal ellentétben a természetvédelmi tényezőt sem tudtuk statisztikailag hátráltató tényezőnek kimutatni, s a magas fokú aggódásról sem mondható el, hogy blokkolná az éghajlatváltozáshoz történő alkalmazkodást. Sőt, a már alkalmazkodást megvalósítókról kijelenthető, hogy közöttük átlagban nagyobb fokú az aggódás, továbbá régebb óta érzékelik a problémát, s azt jelentősebb problémának tekintik, saját gazdálkodásuk eredményességét tekintve is.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Kutatásunkat az Agrárklíma.2 - VKSZ_12-1-2013-0034 elnevezésű projekt támogatta. Köszönettel tartozunk Jacicza Attilának, a Bakony Erdő Zrt. Üzemtervezési és Szakfelügyeleti Osztályvezetőjének a kérdőívek kidolgozásában nyújtott segítségével, Nagy Csabának, a Roth Gyula Szakgimnázium, Szakközépiskola és Kollégium erdőmérnök szaktanárának a kérdőív elemzésében nyújtott segítségével, illetve a kérdőívet kitöltő, interjúalanyként információt adó erdészeknek.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Akerlof K., Maibach E.W., Fitzgerald D., Cedeno A.Y. & Neuman A. 2013: Do people “personally experience” global warming, and if so how, and does it matter? *Global Environmental Change* 23: 81–91. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2012.07.006](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.006)
- Andersson E., Keskitalo E.C.H. & Lawrence A. 2017: Adaptation to Climate Change in Forestry: A Perspective on Forest Ownership and Adaptation Responses. *Forests* 8: 493. DOI: [10.3390/f8120493](https://doi.org/10.3390/f8120493)
- Blades J.J., Klos P.Z., Kemp K.B., Hall T.E., Force J.E., Morgan P. et al. 2016: Forest managers’ response to climate change science: Evaluating the constructs of boundary objects and organizations. *Forest Ecology and Management* 360: 376–387. DOI: [10.1016/j.foreco.2015.07.020](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.07.020)
- Blennow K. 2012: Adaptation of forest management to climate change among private individual forest owners in Sweden. *Forest Policy and Economics* 24: 41–47. DOI: [10.1016/j.forpol.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.04.005)
- Blennow K., Persson J., Tomé M. & Hanewinkel M. 2012: Climate Change: Believing and Seeing Implies Adapting. *PLoS ONE* 7(11): e50182. DOI: [10.1371/journal.pone.0050182](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050182)
- Blennow K., Persson J., Persson E. & Hanewinkel M. 2016: Forest Owners’ Response to Climate Change: University Education Trumps Value Profile. *PLoS ONE* 11(5): e0155137. DOI: [10.1371/journal.pone.0155137](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155137)
- Brace C. & Geoghegan H. 2010: Human geographies of climate change: Landscape, temporality, and lay knowledges. *Progress in Human Geography* 35(3): 284–302. DOI: [10.1177/0309132510376259](https://doi.org/10.1177/0309132510376259)
- Broomell S.B., Budescu D.V. & Por H-H. 2015: Personal experience with climate change predicts intentions to act. *Global Environmental Change* 32: 67–73. DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2015.03.001](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.03.001)
- Detten R. von & Faber F. 2013: Organizational decision-making by German state-owned forest companies concerning climate change adaptation measures. *Forest Policy and Economics* 35: 57–65. DOI: [10.1016/j.forpol.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.06.009)
- Egan P.J. & Mullin M. 2012: Turning Personal Experience into Political Attitudes: The Effect of Local Weather on Americans’ Perceptions about Global Warming. *Journal of Politics* 74(3): 796–809. DOI: [10.1017/s0022381612000448](https://doi.org/10.1017/s0022381612000448)
- Furness R. & Nelson H. 2012: Community forest organizations and adaptation to climate change in British Columbia. *The Forestry Chronicle* 88: 519–524. DOI: [10.5558/ffc2012-099](https://doi.org/10.5558/ffc2012-099)
- Gameren V. van & Zaccai E. 2015: Private forest owners facing climate change in Wallonia: Adaptive capacity and practices. *Environmental Science and Policy* 52: 51–60. DOI: [10.1016/j.envsci.2015.05.004](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.05.004)
- Hamilton L.C. & Stampone M.D. 2013: Blowin’ in the Wind: Short-Term Weather and Belief in Anthropogenic Climate Change. *Weather, Climate and Society* 5: 112–119. DOI: [10.1175/wcas-d-12-00048.1](https://doi.org/10.1175/wcas-d-12-00048.1)
- Johnston M. & Hesseln H. 2012: Climate change adaptive capacity of the Canadian forest sector. *Forest Policy and Economics* 24: 29–34. DOI: [10.1016/j.forpol.2012.06.001](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.06.001)
- Lawrence A. & Marzano M. 2014: Is the private forest sector adapting to climate change? A study of forest managers in north Wales. *Annals of Forest Science* 71(2): 291–300. DOI: [10.1007/s13595-013-0326-4](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0326-4)

- Lakkonen A., Zimmerer R., Kähkönen T., Hujala T., Takala T. & Tikkanen J. 2018: Forest owners' attitudes toward pro-climate and climate-responsive forest management. *Forest Policy and Economics* 87: 1–10. DOI: [10.1016/j.forpol.2017.11.001](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.11.001)
- Lenart M. & Jones C. 2014: Perceptions on climate change correlate with willingness to undertake some forestry adaptation and mitigation practices. *Journal of Forestry* 112(6): 553–563. DOI: [10.5849/jof.13-051](https://doi.org/10.5849/jof.13-051)
- Lorenzoni I. & Pidgeon N. F. 2006: Public views on climate change: European and USA perspectives. *Climatic Change* 77: 73–95. DOI: [10.1007/s10584-006-9072-z](https://doi.org/10.1007/s10584-006-9072-z)
- Mátyás Cs. 2006a: Az előrejelzett klímaváltozás és a magyar erdőtakaró sorsa. In: Fekete G. & Varga Z. (eds): *Magyarország tájainak növényzete és állatvilága*. MTA, Budapest 420–424.
- Mátyás Cs. 2006b: Gének, ökoszisztémák, gazdálkodás: erdészet, paradigmaváltás után: MTA Székfoglaló előadás. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 2: 5–24.
- Mátyás Cs. 2016: Az erdészeti szaporítóanyag megválasztása a klímaváltozás fényében. *Erdészeti Lapok* 151(3): 78–82.
- Mátyás Cs. & Sun G. 2014: Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters* 9(8): 085001. DOI: [10.1088/1748-9326/9/8/085001](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/085001)
- Milad M., Schaich H. & Konold W. 2012: How is adaptation to climate change reflected in current practice of forest management and conservation? A case study from Germany. *Biodiversity and Conservation* 22: 1181–1202. DOI: [10.1007/s10531-012-0337-8](https://doi.org/10.1007/s10531-012-0337-8)
- Mostegl N.M., Pröbstl-Haider U., Jandl R. & Haider W. 2017: Targeting climate change adaptation strategies to small-scale private forest owners. *Forest Policy and Economics* (In Press). DOI: [10.1016/j.forpol.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.10.001)
- Myers T.A., Maibach E.W., Roser-Renouf C., Akerlof K. & Leiserowitz A.A. 2013: The relationship between personal experience and belief in the reality of global warming. *Nature Climate Change* 3: 343–347. DOI: [10.1038/nclimate1754](https://doi.org/10.1038/nclimate1754)
- Nelson H., Williamson T.B., Macaulay C. & Mahony C. 2016: Assessing the potential for forest management practitioner participation in climate change adaptation. *Forest Ecology and Management* 360: 388–399. DOI: [10.1016/j.foreco.2015.09.038](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.038)
- NES 2016: Nemzeti Erdőstratégia 2016-2030. Földművelésügyi Minisztérium Erdészeti és Vadgazdálkodási Főosztály, Budapest, 2016. szeptember.
- Petr M., Boerboom L., Ray D. & van den Veen A. 2014: An uncertainty assessment framework for forest planning adaptation to climate change. *Forest Policy and Economics* 41: 1–11. DOI: [10.1016/j.forpol.2013.12.002](https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.12.002)
- Raftoyannis Y., Nocentini S., Marchi E., Sainz R.C., Guemes C.G., Pilas I. et al. 2014: Perceptions of forest experts on climate change and fire management in European Mediterranean forests. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 7: 33–41. DOI: [10.3832/ifor0817-006](https://doi.org/10.3832/ifor0817-006)
- Somogyi Z. 2003: *Erdők nélkül? L'Harmattan, Budapest.*
- Sousa-Silva R., Ponette Q., Verheyen K., Van Herzele A. & Muys B. 2016: Adaptation of forest management to climate change as perceived by forest owners and managers in Belgium. *Forest Ecosystems* 3(1): 22. DOI: [10.1186/s40663-016-0082-7](https://doi.org/10.1186/s40663-016-0082-7)
- Weber E.U. 2010: What shapes perceptions of climate change? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1: 332–342. DOI: [10.1002/wcc.41](https://doi.org/10.1002/wcc.41)
- Yousefpour R. & Hanewinkler M. 2015: Forestry professionals' perceptions of climate change, impacts and adaptation strategies for forests in south-west Germany. *Climatic Change* 130(2): 273–286. DOI: [10.1007/s10584-015-1330-5](https://doi.org/10.1007/s10584-015-1330-5)

Érkezett: 2018. május 3.

Közlésre elfogadva: 2018. június 1.



Tómezők táj- és természetvédelmi terület, Fraknónádasd

Fotó: Jankó Ferenc (SOE)