

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-termelése (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 klímaelőrebecslések 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 termesztethetők, 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 fajok által felvehető vízmennyiség a szükségesnél kisebb, akkor ez hazánkban a fajok 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 (Barholy & Pongrácz 2017).

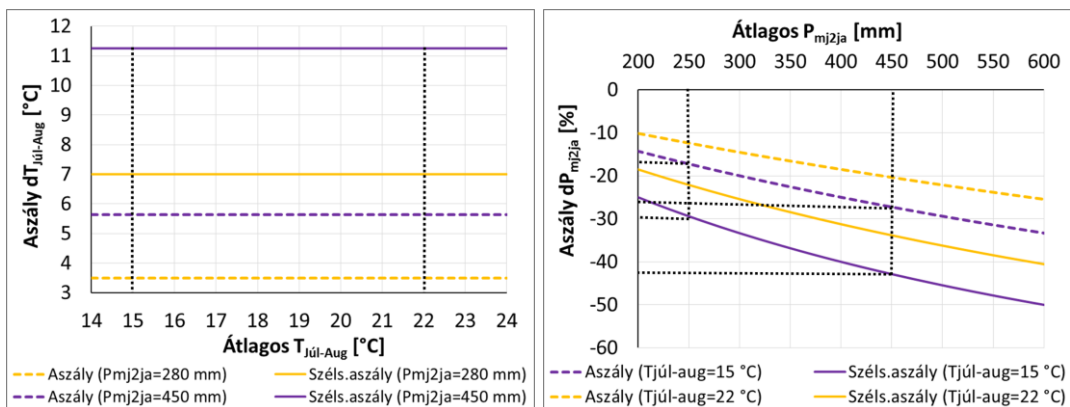
Az erdészeti klímakategóriákat az erdészeti szárazsági mutató (FAI) alapján definiáltuk és határoztuk le (Führer 2010). Az erdőssztyep és a sztyep klímakategória határának kijelöléséhez a FAI osztályozásban következetesen használt 1,25-ös értékhatár különbséget alkalmazva, a sztyep klíma alsó határértékét 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 ($T_{júl-aug}$; 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.

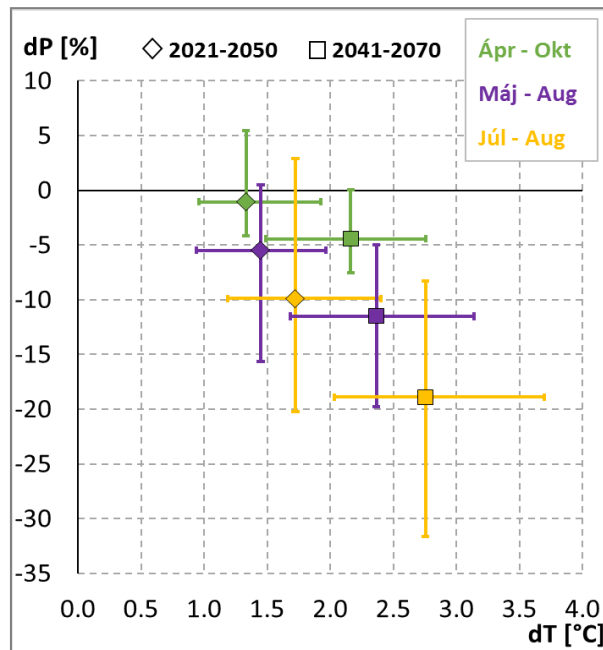
EREDMÉNYEK

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.

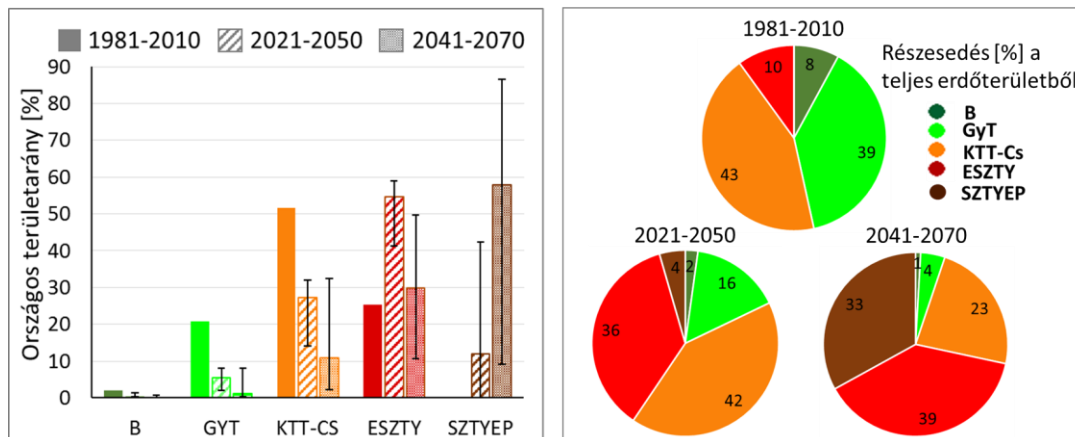


2. ábra: A vegetációs időszak (ápr-okt), a fő növekedési szakasz (máj- aug) és a kritikus hónapok (júl- aug) átlaghőmérsékletének (dT) és csapadékösszegének (dP) várható változása 30 éves jövőbeli időszakokra, az 1981-2010-es referencia periódushoz képest (A1B forgatókönyv alapján). Régió: Nyugat-Zselic,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

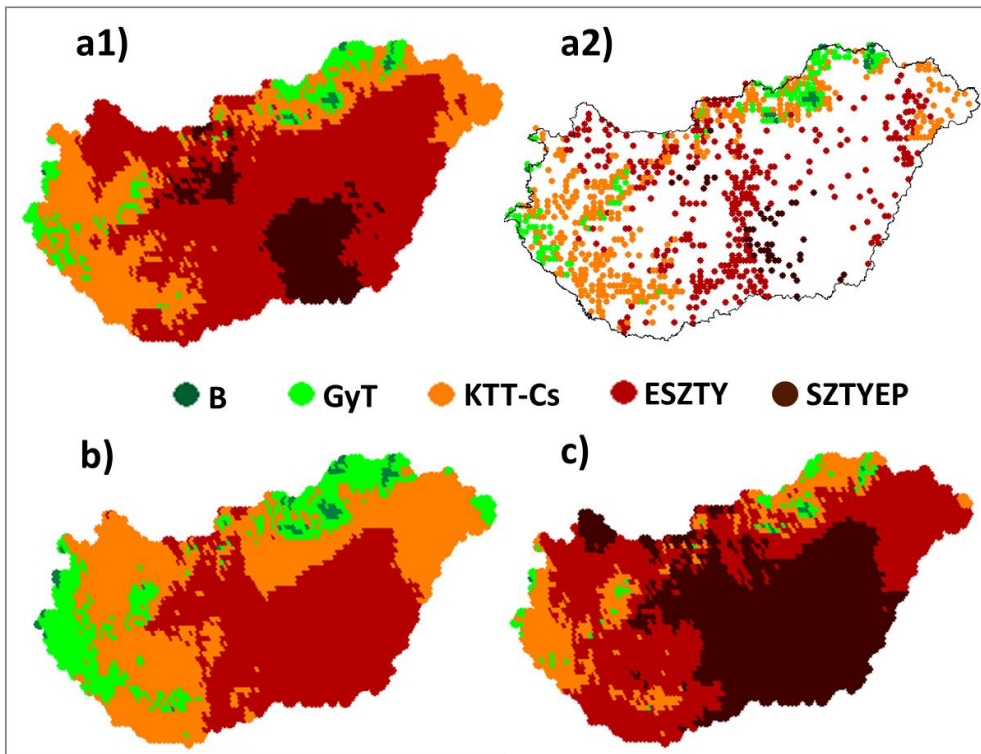
Figure 3: Total area of macroclimatically suitable zones for climate indicator tree species in Hungary (left) and their ratio of the total forest area (right) for 1981-2010, 2021-2050 and 2041-2070. Columns: ensemble mean of the projected changes. Error bars: 66% range of the simulations (emission scenario: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

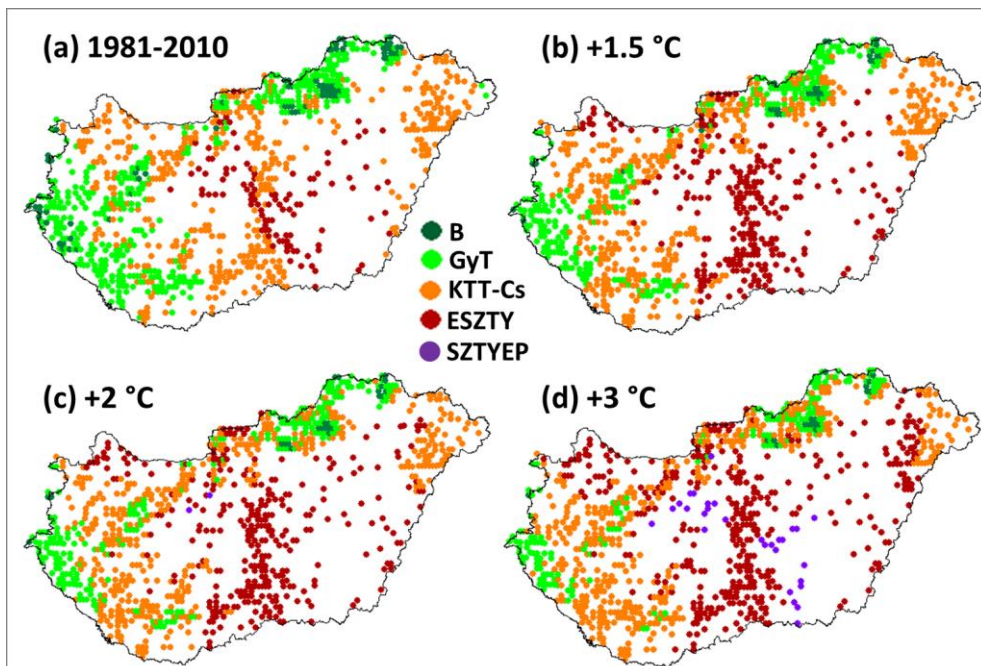
is, ha a csapadékösszeg nem csökken, az Alsó-Tisza, a Nagykunság és a Mezőföld erdőterületei sztyep klímájúak lehetnek, és a mai gyertyános-tölgyes klíma döntő részének helyén cseres tölgyes, a cseres tölgyeseken pedig erdőssztyep klíma várható.

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° * 0,05°-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).

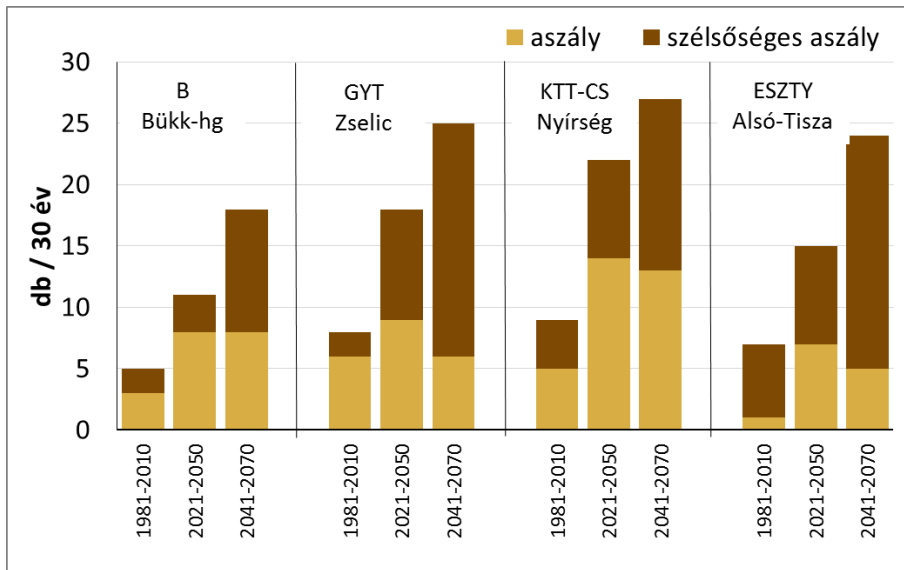


5. ábra: Az erdészeti klímakategóriák a $0,05^\circ * 0,05^\circ$ -os rácsháló erdőterületekre eső pontján (a) 1981-2010-ben, valamint várható előfordulásuk az 1981-2010-es július-augusztusi átlaghőmérséklet (b) 1,5 °C-os, (c) 2 °C-os, (d) 3 °C-os növekedése és konstans csapadékmennyiség esetén.

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 éveknél, 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 fafajok elterjedése, vitalitása, növekedése és szervesanyag-produkciója (növedék) 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 fanövekedés csökkenést, 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., Rasztovits 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 keresztjében. (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 súdú szobogár (*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.*