



Az előre vetített klímaváltozás hatásának növénykémiai vizsgálata bükk (*Fagus sylvatica* L.) fafajon

Visiné Rajczi Eszter, Hofmann Tamás, Albert Levente, Mátyás Csaba

Soproni Egyetem, visine.rajczi.eszter@uni-sopron.hu

DOI: 10.56474/legkor.2022.1.5

1998-ban az Erdészeti Kutatószervezetek Nemzetközi Szövetsége (IUFRO) szervezésében Európa szerte egy bükk (*Fagus sylvatica* L.) származási kísérletsorozat indult a fafaj klimatikus alkalmazkodóképessége tanulmányozására. A magyarországi helyszín Bucsuta (Zala megye), ökológiailag kiemelt helyen fekszik, legközelebb a fafaj szárazsági erdőhatárához. A területen kiválasztott hat azonos korú származás parcella kísérleti elrendezésben helyezkedik el. Kutatócsoportunk növénykémiai vizsgálatokkal járult hozzá a klimatikus alkalmazkodás Bucsután zajló interdiszciplináris tanulmányozásához. Több éven át követtük a szimulált klímaváltozás hatását, összehasonlítva a hat származás enzimes és nem-enzimes antioxidáns rendszereit. Mértük a kiválasztott egyedek leveleiben az összfehérje-tartalmat, a peroxidáz (POD) és polifenol-oxidáz (PPO) enzimek aktivitását, az ABTS (2,2'-azino-di-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav) antioxidáns kapacitást, és meghatároztuk a polifenolok minőségi és mennyiségi spektrumait. Megállapítottuk, hogy az áttelepítéssel szimulált klimatikus stresszre adott válaszok az eredeti származási helytől függően különböznek, és a különbségek kémiai mérésekkel kimutathatók. A peroxidáz enzim aktivitás, az összfehérje-tartalom és egyes polifenolok az adaptáció kémiai indikátorai lehetnek, és hasznosíthatók a klímaváltozás jövőbeli hatásainak előrejelzésében a bükk szaporítóanyag jövőbeli kiválasztásakor.

Phytochemical response of beech (*Fagus sylvatica* L.) to the effects of projected climate change

In the present work the phytochemical effects of climatic stress to European beech (*Fagus sylvatica* L.) populations were evaluated using a provenance test. The test was conducted in the framework of an international test series of IUFRO (International Union of Forest Research Organizations), at the experimental site at Bucsuta, Hungary, with the involvement of 6 relevant provenances. Selected enzymatic (peroxidase: POD, polyphenol oxidase: PPO) and non-enzymatic antioxidants (polyphenolic composition, ABTS (2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline)-6-sulphonic acid) antioxidant capacity) as well as the total protein content were measured from the leaves of selected populations. Results were compared with climatic indexes and average growth parameters of the populations. According to the results significant correlations were found between phenotypic (growth) response to simulated climatic stress and the activity of selected chemical components. The concentrations of certain polyphenols, POD enzyme activity, and total protein content may be chemical indicators of the acclimation potential of populations and may contribute to the forecasting of climate change effects, which can aid in the selection of suitable propagation material for adaptive silviculture.

Bevezetés

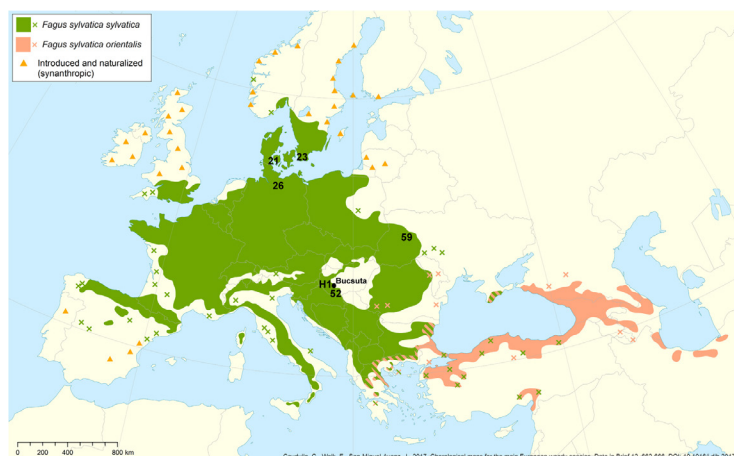
Az éghajlati modellekre alapozott klíma-előrevetítések az ország egész területén szignifikáns melegedést és aszályosodást valószínűsítenek (Bartholy et al., 2014; Gálos et al., 2015).

A klímaváltozáshoz alkalmazkodó erdőgazdálkodás legnagyobb kihívása az erdők ökológiai stabilitásának fenntartása. A veszélyeztetett fajok között a bükk (*Fagus sylvatica* L.) állományok fontos helyet foglalnak el. A bükk Európában a leggyakrabban előforduló, gazdaságilag fontos, kemény lombos faj. Közép- és dél-európai elterjedését a csapadékhiány jelöli ki, ezért a klímaváltozás tükrében fokozott figyelmet érdemel, magyarországi állományai komolyan veszélyeztetettek. A szárazsági határon a rosszabbodó klimatikus feltételek következtében a növekedés visszaesése várható (Mátyás et al., 2009; Jezik et al., 2011; Hlasny et al., 2014). Míg a faj 2012-ben az erdőterület 5,9 %-át adta (110,3 ezer hektáron) (URL1), addig az előrejelzések szerint 2050-re az ország területének mindössze 1 százaléka található optimális éghajlati körülményeket (Gálos és Führer, 2018).

Ezért a faj alkalmazkodóképességét növelni, az erdőgazdálkodás jövőbeni kockázatait csökkenteni kell. Ennek egyik módja lehet a klímateráns populációk, fajok behozatala és felhasználása az erdőfelújításban és a telepítésben. A klímaváltozásra adott reakciót a populációk különböző klimatikus környezetbe történő áttelepítésével szimulálhatjuk.

1998-ban az International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) szervezésében Európa szerte egy bükk (*Fagus sylvatica* L.) kísérletsorozat indult a faj klimatikus alkalmazkodóképessége tanulmányozására (von Wuehlisch és Alia, 2011). A teszthelyszíneken célirányosan megválasztott származási pontok klímájához alkalmazkodott populációk utódnemzedékeit telepítették. A hipotézis szerint a származási helyszínek és a teszthelyszín klimatikus differenciája gyors klímaváltozást imitál, és feltárja az öröklött alkalmazkodóképesség lehetőségeit és korlátait (Mátyás, 1994).

Magyarországon a bucsutai (Zala megye) bükk származási kísérletben 15 országból 36 populáció klímaváltozásra adott reakcióit tanulmányozzák. Bucsuta ökológiailag kiemelt helyen fekszik, legközelebb a faj szárazsági erdőhatárához (Horváth és Mátyás, 2014, 2016). A kutatásainkhoz hat azonos korú populáció (Farchau/Németország, Pidkamin/Ukrajna, Torup/Svédország, Gråsten/Dánia, Bánokszentgyörgy/Magyarország, Magyarregy/ Magyarorszag) parcelláit választottuk ki a tenyészkertben (1. ábra). Ezek közül kettő a hazai mérsékelt kontinentális klímához (magyarországi származások), egy szélsőséges kontinentális (Pidkamin), míg további három atlanti klímához alkalmazkodott (Farchau, Torup, Grasten).



1. ábra. A bucsutai kísérlet populációi és a kiválasztott származási helyek 21: Gråsten (DK), 23: Torup (S), 52: Magyarregy (H), H1: Bánokszentgyörgy (H), 59: Pidkamin (UA), 26: Farchau (D).

A kutatás célkitűzései

Több éven át követtük a szimulált klímaváltozás hatását, összehasonlítva a hat származás enzimés és nem-enzimés antioxidáns rendszereit. Célunk volt az áttelepítéssel szimulált klímaváltozással összefüggő stressztűrő képesség (akklímáció, alkalmazkodás) jellemzése és az alkalmazkodási teljesítmény minősítése.

Módszerek és adatok

Vizsgálatainkat 2013 és 2017 között végeztük, származásonként 8 törzset vizsgáltunk, minden törzsről 20 fénylevetet és 20 árnyéklevet vettünk

(*Visi-Rajczi et al., 2021*). A megfelelő minta-előkészítés után mértük a kiválasztott egyedek leveleiben az összfehérje-tartalmat, a peroxidáz (POD) és polifenol-oxidáz (PPO) enzimek aktivitását, az ABTS (2,2'-azino-di-(3-etilbenzotiazolin)-6-szulfonsav) antioxidáns kapacitást, és meghatároztuk a polifenolok minőségi és mennyiségi spektrumait (*Visi-Rajczi et al., 2021*).

A POD és PPO antioxidáns enzimek bizonyítottan részt vesznek a növények stressz folyamatokkal szembeni védekezési mechanizmusában, a polifenolok jelentős szerepe a stressz elleni védekezésben bizonyított (*Albert et al., 2002*), így bükk esetében is indikátorai lehetnek a klímához való alkalmazkodásnak (*Puccinelli et al., 1998; Zolfaghari et al., 2010*).

A nem-enzimes antioxidáns rendszer vizsgálatánál elsősorban a polifenol alapú adaptációs válaszokat kutattuk, mivel a polifenolok jelentős szerepe a stressz elleni védekezésben bizonyított (*Dübeler et al., 1997*). Mértük a kísérleti alanyok ABTS antioxidáns kapacitását is, mely átfogó képet ad az oxidatív stresszről (*Hassan et al., 2017*). A vizsgált bükk levelekből 44 polifenolt azonosítottunk (38-at név szerint), és kiválasztottuk közülük a leghatékonyabb polifenolos antioxidánsokat, melyek szignifikánsan járulhatnak hozzá a bükk antioxidáns tulajdonságaihoz, és ezen keresztül jelentős szerepet játszhatnak a védekezési és adaptációs folyamatokban (*Visi-Rajczi et al., 2021*).

Mind az enzimes, mind a nem-enzimes antioxidáns rendszerek vizsgálata során nyert mérési eredményeket korreláltattuk az állományok klimatikus paramétereivel (Ellenberg-index – EQ; ökológiai távolság – ΔEQ) és az állományok „teljesítményével” (átlagos mellmagassági törzsátmérő a mintavétel idején). Az Ellenberg-index (EQ) a legmelegebb hónap (július, T_{07} [°C]) középhőmérsékletének és az éves csapadék (P_{ann} , [mm]) hányadosának 1000-szerese (*Ellenberg, 1988*):

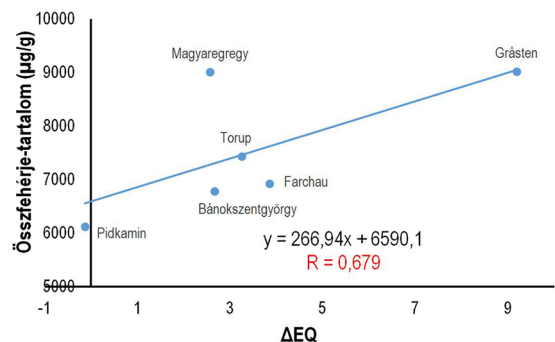
$$EQ = 1000 \cdot T_{07} \cdot P_{ann}^{-1}$$

Az ökológiai távolság (*ecodistance*, *Mátyás, 1994*) a kísérleti helyszín és a származási helyek Ellenberg-indexének különbsége (ΔEQ), az áttelepítéssel szimulált klímaváltozás jellemzője.

Pozitív értéke melegebb és szárazabb, negatív értéke hűvösebb, nedvesebb klímába kerülést jelez. Az index használhatóságát a bükk adaptációjának kutatásában korábbi munkák is alátámasztják (*Fang és Lechowicz, 2006; Czúcz et al., 2013*).

Eredmények

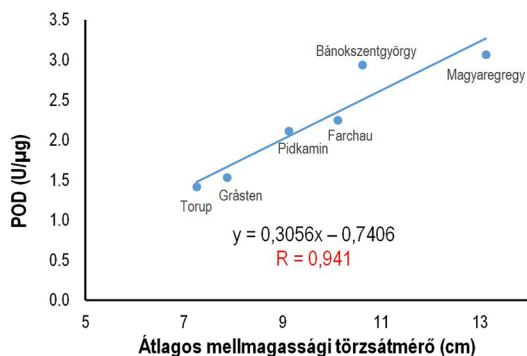
Összfehérje-tartalom és ökológiai távolság (ΔEQ). Megállapítottuk, hogy szignifikáns pozitív kapcsolat van az összfehérje-tartalom és az ökológiai távolság között (2. ábra). Azoknak a származásoknak, amelyek eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódtak (pl. Pidkamin), kisebb volt



2. ábra. Korreláció az Ellenberg-index változása (ΔEQ) és az összfehérje-tartalom között, a 2017-ben vett levélminták esetében.

az ökológiai távolságuk (ΔEQ), jók voltak az alkalmazkodási képességei, amit az alacsonyabb összfehérje-tartalom és az általában jobb növekedési paraméterek bizonyítanak. A hűvösebb, nedvesebb klímából áttelepített, nagyobb ökológiai változást elszenvedett származások (pl. Gråsten) fehérje tartalma az előbbiekhöz viszonyítva magasabb volt, növekedési paramétereik rosszabbak, ami gyengébb adaptációs képességet jelez.

POD enzim aktivitás és átlagos mellmagassági törzsátmérő. Szignifikáns pozitív kapcsolatot ($p < 0,15$) mutattunk ki a származások átlagos mellmagassági törzsátmérője és a POD enzim aktivitása között (3. ábra). A 3. ábra jól mutatja, hogy a legrosszabb teljesítményű, azaz a legkisebb átlagos mellmagassági törzsátmérővel rendelkező, gyenge megmaradású populációk (Gråsten, Torup) esetében a legalacsonyabb a POD enzim aktivitás. Érdekes módon, a pidkamini



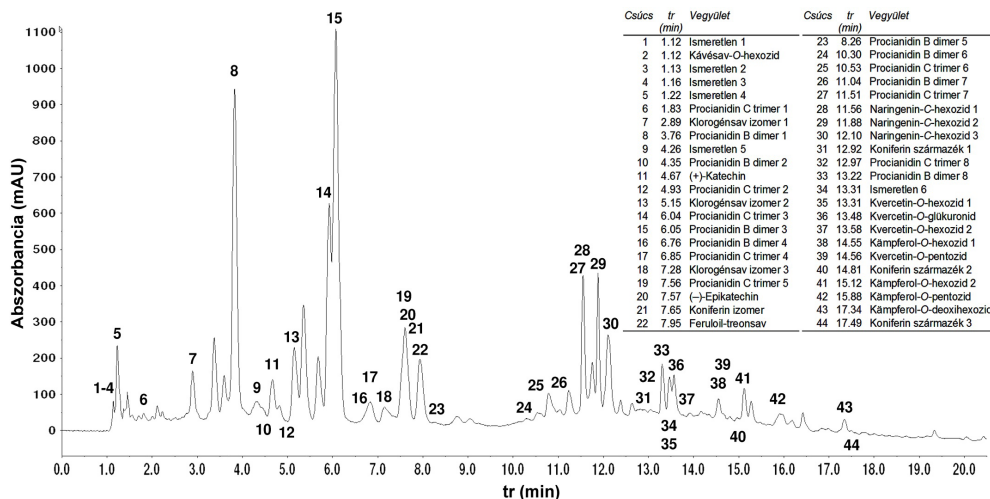
3. ábra. Korreláció az átlagos mellmagassági törzsátmérő és a POD aktivitás között (2017-ben vett levelminták).

származások POD aktivitása és átmérője a gyenge megmaradású populációkhoz volt közelebb, ennél a származásnál azonban a viszonylag kis átmérőhöz nagy átlagos törzsmagasság társult.

Nem enzimes antioxidáns rendszer szerepe

A nem-enzimes antioxidáns rendszer vizsgálatánál elsősorban a polifenol alapú adaptációs válaszokat vizsgáltuk, mivel bizonyított a polifenolok jelentős szerepe a stressz elleni védekezésben.

Kivontuk, elválasztottuk és azonosítottuk a bükk levelek polifenoljait (4. ábra). Összesen 44 vegyületet azonosítottunk, ebből 38-at név szerint. Az azonosított vegyületek mennyiségét egy általunk kidolgozott kromatográfias módszerrel mértük (Hofmann et al., 2017).



4. ábra. A bükk levél kivonat PDA (250–380 nm) kromatogramja.

Származások

	Farchau (26)	Pídkamin (59)	Torup (23)	Bánokszentgyörgy (H1)	M.ereggy (52)	Grästen (21)
ABTS (mg trolox g ⁻¹ dw.)	120,7 ± 49,7 ^a	155,8 ± 27,9 ^a	202,1 ± 33,2 ^{ab}	163,5 ± 78,7 ^a	178,2 ± 54,9 ^a	296,2 ± 84,4 ^b
Á. mellm. törzsátm. (cm)	6,4 ± 2,5 ^a	7,4 ± 1,7 ^{ab}	5,1 ± 2,2 ^a	8,6 ± 2,8 ^{ab}	11,4 ± 4,6 ^b	5,6 ± 1,7 ^a
EQ	25,59	29,58	26,18	26,77	26,87	20,26

1. táblázat. A vizsgált származások átlagos mellmagassági törzsátmérője, ABTS antioxidáns kapacitása és Ellenberg indexe 2014-ből. Az eredmények átlag ± szórásértékben vannak feltüntetve. A különböző kisbetűk szignifikáns korrelációt jeleznek n=8 elemszám és p<0,01 szint mellett.

Meghatároztuk a levélkivonatok antioxidáns kapacitását is az ABTS módszer alapján (1. táblázat). Megállapítottuk, hogy a legrosszabb teljesítménnyel rendelkező állományok (Grästen, Torup) esetében a legmagasabb az ABTS antioxidáns kapacitás. Feltételezhető, hogy ezekben a származásokban az áttelepítés nagyobb stresszt váltott ki, a magasabb antioxidáns kapacitás erre adott válasznak tekinthető.

Elvégeztük a stresszválaszt általánosan jelző ABTS antioxidáns kapacitás, a polifenolok, az Ellenberg index és az átlagos mellmagassági törzsátmérő mérésénél nyert primer adatok korrelációs vizsgálatát az egyes származásokra (2. táblázat).

ABTS antioxidáns kapacitás és polifenol koncentráció. Az ABTS antioxidáns kapacitás és az egyes polifenolok koncentrációi között fennálló szignifikáns pozitív korreláció azt jelezheti, hogy az adott vegyület "erős" antioxidáns, szignifikánsan járul hozzá a levelek antioxidáns tulajdonságaihoz, és

Vegyület	ABTS	EQ	ÁMT	Vegyület	ABTS	EQ	ÁMT
Kvercetin-O-hexozid 1	0,937	-0,756	-0,202	Koniferin izomer	-0,359	-0,265	-0,197
Koniferin származék 2	0,919	-0,706	-0,001	Koniferin származék 3	-0,392	0,791	0,311
(-)-Epikatechin	0,903	-0,781	-0,429	Procianidin B dimer 5	-0,558	0,493	0,808
Kvercetin-O-hexozid 2	0,889	-0,678	-0,107	Procianidin C trimer 8	-0,561	0,872	0,216
Kvercetin-O-pentozid	0,876	-0,693	-0,256	Ismeretlen 1	-0,572	0,677	0,790
(+)-Katechin	0,873	-0,834	-0,084	Ismeretlen 3	-0,594	0,707	0,677
Kávésav-O-hexozid	0,872	-0,632	-0,393	Procianidin B dimer 6	-0,639	0,097	0,137
Procianidin C trimer 3	0,870	-0,851	-0,222	Procianidin C trimer 7	-0,665	0,784	0,057
Procianidin B dimer 4	0,825	-0,838	-0,143	Feruloil-treonsav	-0,683	0,314	0,679
Procianidin C trimer 4	0,817	-0,757	-0,312	Procianidin C trimer 5	-0,694	0,304	0,379
Kempferol-O-hexozid 2	0,815	-0,627	-0,059	Naringenin-C-hexozid 2	-0,733	0,539	0,344
Kvercetin-O-glükuronid	0,811	-0,555	-0,445	Ismeretlen 4	-0,759	0,656	0,582
Procianidin B dimer 2	0,761	-0,513	-0,330	Ismeretlen 5	-0,785	0,793	0,642
Kempferol-O-hexozid 1	0,740	-0,505	-0,014	Naringenin-C-hexozid 1	-0,807	0,638	0,304
Kempferol-O-pentozid	0,732	-0,531	-0,156	Naringenin-C-hexozid 3	-0,824	0,672	0,237
Ismeretlen 2	0,650	-0,435	-0,078	Procianidin C trimer 2	-0,829	0,869	0,075
Procianidin C trimer 1	0,605	-0,525	0,192	Procianidin B dimer 1	-0,849	0,441	0,033
Koniferin származék 1	0,534	0,007	-0,098	Procianidin B dimer 8	-0,849	0,778	0,013
Klorogénsav izomer 2	0,519	-0,200	-0,174	Ismeretlen 6	-0,900	0,848	0,658
Klorogénsav izomer 1	0,382	0,163	0,514	Procianidin B dimer 3	-0,908	0,574	0,498
Klorogénsav izomer 3	0,251	0,135	0,765	Procianidin C trimer 6	-0,944	0,688	0,497
Kempferol-O-deoxihexozid	-0,343	0,660	0,469	Procianidin B dimer 7	-0,954	0,782	0,172

2. táblázat. A származások átlagos ABTS antioxidáns kapacitásnak-, Ellenberg indexének (EQ)-, valamint az átlagos mellmagassági törzsátmérőjének (ÁMT) korrelációja az egyes polifenol koncentrációkkal. Szignifikáns korreláció ($p < 0,05$ $n=6$; $|R| \geq 0,812$) vastagon kiemelve.

jelentős szerepe lehet a védekezési, adaptációs folyamatokban. A korrelációs vizsgálat alapján a vizsgált bükk levelekben a leghatékonyabb antioxidánsok például: kvercetin-O-hexozid 1, kvercetin-O-hexozid 2, koniferin származék 2, (+)-katechin, (-)-epikatechin, kvercetin-O-pentozid, kávésav-O-hexozid, kempferol-O-hexozid 2, procianidin B dimer 3, procianidin C trimer 3 és procianidin C trimer 4.

Egyes vegyületek esetében szignifikáns negatív korrelációt találtunk ($R < -0,812$), ezeknek a vegyületeknek feltételezhetően szignifikáns ABTS prooxidáns hatása van a bükk levél kivonatokban (2. táblázat).

EQ értékek és polifenol koncentráció. A polifenolok koncentrációi és az EQ értékek közötti korrelációk alapján megállapítottuk, hogy a magasabb EQ-val rendelkező (melegebb és szárazabb régiókból származó) bükk származások alacsony koncentrációban tartalmaznak több, nagy antioxidáns hatékonysággal jellemezhető vegyületet (pl. (+)-katechin, procianidin C trimer 3 és procianidin B dimer 4). Ezt a megállapítást a vegyületek koncentrációi és az EQ értékek közötti szignifikáns

negatív korrelációk bizonyítják. Azok a származások, melyek eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódtak evolúciójuk során, általában jobb növekedési paraméterekkel is rendelkeznek. Mivel a busutai kísérleti körülmények között nincsenek fokozott stressznek kitéve, ezért nem termelnek nagyobb mennyiségben hatékony és erős antioxidánsokat.

Mellmagassági törzsátmérő és polifenol koncentráció. Nem találtunk egyértelmű szignifikáns korrelációt a polifenolok koncentrációi és a mellmagassági törzsátmérő között. Megállapítható, hogy egyes vegyületek koncentrációi közvetlen, pozitív kapcsolatban állnak az átmérőnövekedéssel: Ismeretlen 1, Ismeretlen 3, Ismeretlen 4. Ezek a vegyületek markerei lehetnek a bükk származások klimatikus adaptációjának és teljesítményének.

Összefoglalás

Az áttelepítéssel szimulált klimatikus stresszre adott válaszok a genetikai alkalmazkodottságtól (az eredeti származási helytől) függően különböznek, és a különbségek kémiai mérésekkel kimutathatók.

Azok a származások (pl. Pidkamin), melyek eredetileg melegebb és szárazabb klímához adaptálódtak, anyagcseréjük során nem termelnek megemelkedett mennyiségben hatékony és erős polifenolos antioxidánsokat, mivel a bucsutai kísérleti körülmények között nincsenek fokozott stressznek kitéve, ill. jól alkalmazkodtak a klimatikus körülményekhez, ami miatt jobb növekedési paraméterekkel is rendelkeznek.

A legrosszabb teljesítménnyel rendelkező állományok (Gråsten, Torup) ABTS antioxidáns kapacitása és egyes polifenol vegyületeik koncentrációja kiemelkedően magas, míg a POD enzim aktivitások itt mutatják a legalacsonyabb értékeket. Feltételezhető, hogy a klímaváltozás mértéke nagyobb stresszt váltott ki, a megemelkedett antioxidáns kapacitás és polifenol koncentráció, a lecsökkent POD enzim aktivitás erre adott válasznak tekinthető.

Kutatási eredményeink hozzájárulhatnak a jövőbeli erdőfelújításban és telepítésben felhasználható klímateráns bükk populációk kiválasztásához.

Köszönetnyilvánítás. A kutatás a VKSZ_12-1-2013-0034 Agrár-klíma 2 projekt támogatásával valósult meg.

Irodalom

- Albert, L., Hofmann, T., Visi-Rajczi, E., Rétfalvi, T., Németh, Zs. I., Koloszar, J. et al., 2002: Relationships Among Total Phenol and Soluble Carbohydrate Contents and Activities of Peroxidase and Polyphenol Oxidase in Red-Heartwooded Beech (*Fagus sylvatica* L.). 7th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp, Turku/Abo, Finland, Proceedings, 253–256.
- Bartholy, J., Pongrácz, R. and Pieczka, I., 2014: How the climate will change in this century? *Hungarian Geograph. Bull.* 63, 55–67, <https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.5>
- Czúcz B., Gálhidy L., és Mátyás Cs., 2013: A bükk és a kocsánytalan tölgy elterjedésének szárazsági határa. *Erdészettudományi Közlemények* 3, 39–53.
- Dübel, A., Voltmer, G., Gora, V., Lunderstädt, J., and Zeeck, A., 1997: Phenols from *Fagus sylvatica* and their role in defence against *Cryptococcus fagisuga*. *Phytochemistry* 45, 51–57, [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(96\)00771-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(96)00771-6)
- Ellenberg, H., 1988: Vegetation ecology of Central Europe, 4th ed. Cambridge University Press.
- Fang, J. and Lechowicz, M.J., 2006: Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus sylvatica* L.) species in the world. *J. Biogeography* 33, 1804–1819, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01533.x>
- Gálos B. és Führer E., 2018: A klíma erdészeti célú előrevetítése. *Erdészettudományi Közlemények* 8, 43–55, <https://doi.org/10.17164/EK.2018.003>
- Gálos, B., Führer, E., Czímber, K., Gulyás, K., Bidló, A., Hänsler, A., Jacob, D. and Mátyás, Cs., 2015: Climatic Threats Determining Future Adaptive Forest Management – a Case Study of Zala County. *Időjárás* 119, 425–441.
- Hassan, W., Noreen, H., Rehman, S., Gul, S., Kamal, M.A., Kamdem, J.P. et al., 2017: Oxidative Stress and Antioxidant Potential of One Hundred Medicinal Plants. *Curr. Topics Medic. Chem.* 17, 1336–1370, <https://doi.org/10.2174/1568026617666170102125648>
- Hlásny, T., Barcza, Z., Mátyás, Cs., Seidl, R., Kulla, L., Merganičová, K., Trombik, J., Dobor L., and Konopka, B., 2014: Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptation? *Lesnícky časopis – Forestry J.* 60, 5–18, <https://doi.org/10.2478/forj-2014-0001>
- Hofmann, T., Tálos-Nebehaj, E., and Albert, L., 2017: Leaf polyphenols as indicators of climatic adaptation of Beech (*Fagus sylvatica* L.) - an HPLC-MS/MS via MRM approach. *Int. Labmate* 42 (3), 12–14.
- Horváth, A. és Mátyás, Cs., 2014: Növedécsökkenés előrevetítése egy bükk származási kísérlet alapján (Estimation of increment decline caused by climate change, based on data of a beech provenance trial). *Erdészettudományi Közlemények* 4, 91–99, <https://doi.org/10.15177/seefor.16-06>
- Horváth, A. és Mátyás, Cs., 2016: The decline of vitality caused by increasing drought in a beech provenance trial predicted by juvenile growth. *South-east Eur. Forestry* 7, 21–28.
- Jezik, M., Blazenc, M., Strelcová, K., and Ditmarová L., 2011: The impact of the 2003–2008 weather variability on intra-annual stem diameter changes of beech trees at a submontane site in central Slovakia. *Dendrochronologia* 29, 227–235, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.009>
- Mátyás, Cs., 1994: Modelling climate change effects with provenance test data. *Tree Physiol.* 14, 797–804.
- Mátyás, Cs., Bozic, G., Gömöry, D., Ivankovic, M., and Rasztovtis, E., 2009: Juvenile growth response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) to sudden change of climatic environment in SE European trials. *iForest* 2, 213–220, <https://doi.org/10.3832/ifer0519-002>
- Puccinelli, P., Anselmi, N. and Bragaloni, M., 1998: Peroxidases: suitable markers of air pollution in trees from urban environments. *Chemosphere* 36, 889–894.
- Visi-Rajczi, E., Hofmann, T., Albert, L., and Mátyás, Cs., 2021: Tracing the acclimation of European beech (*Fagus sylvatica* L.) populations to climatic stress by analyzing the antioxidant system. *iForest* 14, 95–103, <https://doi.org/10.3832/ifer3542-013>
- von Wuehlisch, G. and Alia, R., 2011: COST E52 Final Report-Genetic Resources of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) for sustainable forestry. Proceedings of the COST E52 'Evaluation of beech genetic resources for sustainable forestry'. (Monografias INIA: Serie Forestal 22).
- Zolfaghari, R., Hosseini, S. M., and Korori, S.A.A., 2010: Relationship between peroxidase and catalase with metabolism and environmental factors in Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in three different elevations. *Int. J. Environ. Sci.* 1, 243–252.
- URL1: Statisztikai tükrök. Az erdőgazdálkodás jellemzői. <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/regiok/orsz/erdogazd12.pdf>