

A TÁPANYAG-UTÁNPÓTLÁS HATÁSA AZ AKÁC (*ROBINIA PSEUDOACACIA* L.) LEVÉLBEN TÖRTÉNŐ ELEMAKKUMULÁCIÓJÁRA: EGY TÁPIÓSZELEN LÉTESÜLT KÍSÉRLET EREDMÉNYEI

Benke Attila, Toldi Valter, Süle Tamás és Bereczki Katalin

Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

A gyakran marginális környezeti feltételek között folytatott ültetvényeszerű fatermesztés alapja a korlátozott adottságokat lehetőleg jobban hasznosítani képes fajták alkalmazása. Kutatásunk során ezért gyenge homoki termőhelyen létesített kísérleti ipari faültetvényben vizsgáltuk különböző akácklónok tápanyag-hasznosítási képességét, levéletük tápelemtartalma alapján. A kísérletben négy kísérleti klón (OBE01, OBE34, OBE53, OBE69) vizsgálata folyt különböző tápanyag-utánpótlás kezelések mellett. Az egyes klónok elemhasznosítás képességét a levelek nitrogén-, foszfor-, kálium-, vas-, mangán-, réz-, cink- és nikkeltartalma alapján értékeltük, a kezelések levél elemtartalomra gyakorolt hatását pedig módosított z-érték számításával elemeztük. Bár klónonként és elemenként változó mértékben, de a tisztán műtrágya kezelés jellemzően negatív hatással volt az akácklónok makro- és mikroelem felvételére (13 szignifikánsan negatív és 5 pozitív kapcsolat), szemben a szerves trágyát is tartalmazó kezelésekkel, melyek hatása döntően pozitív volt (12 szignifikánsan negatív és 27 pozitív kapcsolat). A klónok közül az OBE53-as elemfelvétele mutatta a legszorosabb kapcsolatot a tápanyag-utánpótlással.

Kulcsszavak: fehér akác, tápanyag-utánpótlás, z-érték, makro- és mikroelem, tápanyag-hasznosítás

EFFECTS OF FERTILIZATION ON NUTRIENT ACCUMULATION IN BLACK LOCUST (*ROBINIA PSEUDOACACIA* L.) LEAVES: RESULTS OF AN EXPERIMENT IN TÁPIÓSZELE

Abstract

The basis of plantation forestry under often marginal environmental conditions is the use of varieties that can utilize the limited ecological conditions. In our research, the nutrient utilization capacity of different black locust clones (OBE01, OBE34, OBE53, OBE69) was investigated based on the nutrient content of their foliage. In the experimental plantation, which was established in poor sandy soil, different nutrient supplementation treatments were applied. Element utilization was evaluated based on leaf nitrogen, phosphorus, potassium, iron, manganese, copper, zinc and nickel contents, while the effect of each treatment on leaf element content was analyzed by calculating modified z-scores. Generally, the pure chemical fertilizer treatment had a predominantly negative effect on the macro- and microelement uptake of black locust clones (13 significantly negative and five positive relationships), compared to



the treatments including organic fertilizer, which showed a predominantly positive effect (12 significantly negative and 27 positive relationships). Among the clones, the element uptake of OBE53 showed the strongest relationship with fertilizer applications.

Keywords: black locus, fertilization, z-score, macro- and micronutrients, nutrient utilization

BEVEZETÉS

A fehér akác (*Robinia pseudoacacia* L.) mind erdőállományai területfoglalása, mind élőfa-készlete tekintetében a hazai erdőgazdálkodás legjelentősebb faja; e tendencia várhatóan a jövőben sem fog jelentősen változni, hiszen állományainak összterülete a középhosszú távon tervezett erdőtelepítések adatait figyelembe véve várhatóan több ezer hektárral fog növekedni az elkövetkező évtizedekben (Nemzeti Földügyi Központ Erdészeti Főosztály 2023, Lett et al. 2020). A faj a második világháborút követő erdőtelepítési programokban is kiemelt szerepet kapott; az 1951 és 2019 közötti időszakban csak a nemes nyárok területének növekedése haladta meg az akácét (219, illetve 167 ezer hektár; Lett 2021). Népszerűségének oka többért: gyorsan növő fafajról van szó, fája tartós és széleskörűen hasznosítható, képes a gyenge minőségű termőhelyek hasznosítására is, visszaszerző képessége pedig kiváló, ami miatt állományainak vegetatív felújítása könnyen kivitelezhető (Bartha et al. 2008). Az akáctelegek ösztönzésének másik fontos eleme az igénybe vehető állami támogatások voltak, amelyek az utóbbi időszakban a hagyományos erdőállományok mellett a legfeljebb 20 éves vágásfordulóval kezelhető, kifejezetten faipari alapanyag termelését célzó ipari célú fás szárú ültetvények létrehozására is kiterjedtek (VP5- 8.1.1-16 kódszámú pályázati felhívás; 135/2017. (VI. 9.) Kormányrendelet). Eme, nem erdőként nyilvántartott ültetvénytípus esetében, nevéből is adódóan, az elsődleges termelési cél az ipari feldolgozásra alkalmas faanyag termelése rövid termelési ciklus alatt, amihez gyors növekedésű, megfelelő törzsalakot fejlesztő, és nem utolsó sorban, termőhelyálló szelektált fajták alkalmazása ajánlott. A fenotípusos előnyöket mutató akácegyedek szelektálása már az 1930-as években elkezdődött Magyarországon (Keresztesi 1983), a kifejezetten ipari célú faültetvények telepítésére alkalmas klónok nemesítése pedig jelenleg is folyamatosan zajlik (Ábri et al. 2022, Németh et al. 2022).

A levélszövet tápelemtartalma közeli rokon fajok között, és egy faj eltérő földrajzi származásai között is olykor jelentős különbséget mutat, ami a tápelemek levéllakkumulációjának erős genetikai meghatározottságát feltételezi (Houdegbe et al. 2022, Tinkov et al. 2016). Emellett, ugyanakkor, termőhelyi (elsősorban talajtani) és klimatikus tényezők is befolyásolják a növényi levelek elemtartalmát (Watanabe et al. 2007). Előbbi jelentőségét támasztják alá azok a megfigyelések, amelyeket tápanyag-utánpótlási kísérletekben tettek kutatók; a kijutatott többlet tápanyagok kimutatható tápelemtartalom változásokat indukáltak a vizsgált növények levélszövetében (Bedbabis et al. 2010, Ma et al. 2013, Wang et al. 2022, Yan et al. 2019, Yang, 2018). A talajban megtalálható többlet tápanyagok növényi szövetekbe történő beépítése azonban az egyszerű fiziológiai folyamaton túl fontos élettani célokat is szolgálhat; a növények abiotikus stressztényezőkkel szembeni tűrőképességét megnövelhetik egyes tápelemek levelekben történő felhalmozása (Boshkovski et al. 2020, Chen et al. 2023, Z. Wang et al. 2015). Biotikus hatások is előidézhetik emellett egyes elemek levélszövetben való megnövekedett jelenlétét, ami a stresszválasz reakciókban részt

vevő, makro- és mikroelemeket is tartalmazó enzimek megnövekedett aktivitásából is eredhet (Hančević et al. 2018). Összességében feltételezhető, hogy azok a növényfajok, -fajták, melyek levélszövetükben azonos környezeti körülmények között magasabb szintű makro- és mikroelem-akkumulációra képesek, ellenállóbbak lesznek egyes környezeti stressztényezőkkel szemben, így alkalmazásukkal ökológiailag stabilabb erdőállományok, faültetvények hozhatók létre, és magasabb termésbiztonság érhető el.

Jelen kutatásunk célja négy szelektált akác klón levélben történő elemakkumulációjának felmérése volt egy gyenge homoki termőhelyre telepített kísérleti ipari célú faültetvényben. A kísérletben komplex műtrágyával, szerves trágyával, és kombinált szerves-szerves trágyával kezelt parcellákban is vizsgáltuk a levélszövetben történő elemfelhalmozódást, így a tápanyag-utánpótlás típusok hatásának értékelésére is lehetőségünk nyílt a kutatás során. Eredményeinkkel az akác ipari célú faültetvények termesztés-fejlesztéséhez szeretnénk hozzájárulni, a termőhelyállók akácfaültetvények fiziológiai alapú szelekciójának elősegítése révén.

ANYAG ÉS MÓDSZER

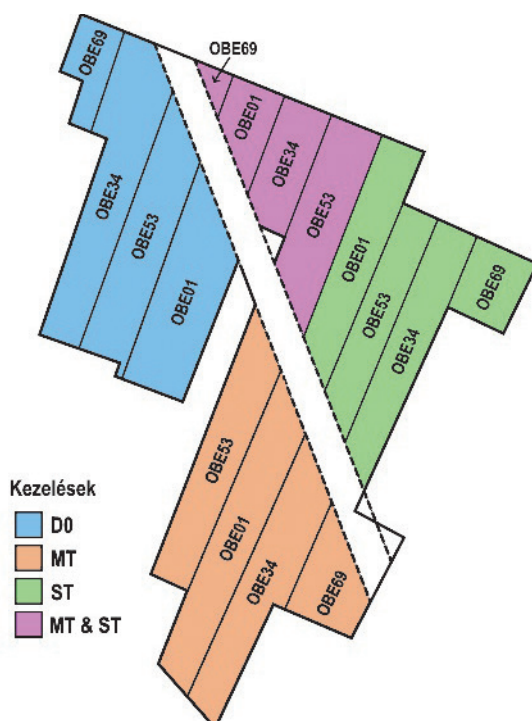
Levélminta-gyűjtés

A tápanyag-utánpótlás vizsgálatoknak helyet adó kísérleti akác ipari célú faültetvény Tápíószelén létesült 2018 tavaszán (É 47°18'21", K 19°53'11"). A kísérlet területének termőhelytípus változata a következő: erdőössztyepp klímába tartozó, többletvízhatástól független karbonátos humuszos homoktalaj, igen sekély termőréteggel és homok fizikai talajféleséggel; a három talajszelvény vizsgálata alapján készített termőhelyfeltárás eredményei szerint a termőréteg humusztartalma 0,73 és 1,14%, mésztartalma pedig 3,35 és 7,94% között változott. Az 5,64 ha kiterjedésű, ismétlések nélkül kialakított két tényező (fajta × tápanyag-utánpótlás kezelések) kísérlet (1. ábra) kezelése az alábbiak szerint alakultak:

- Fajta-kezelés: *Robinia pseudoacacia* cv. OBE01, OBE34, OBE53 és OBE69 (nemesítő és fajtatulajdonos: Silvanus Csoport Kft.)
- Tápanyagutánpótlás-kezelések: D0: nullkezelés (kontrol parcella); MT: tisztán műtrágya kezelés 27%-os ammónium-nitrát és 14:7:21 arányú NPK műtrágya alkalmazásával, 2019-ben és 2020-ban a vegetációs időszakban több alkalommal, összesen 354/90/273 kg NPK hatóanyagot kijuttatva hektáronként; ST: tisztán szerves trágya kijuttatás 100 tonna/hektár dózisban, az ültetvény telepítését megelőzően; MT & ST: kombinált szerves és szerves trágya kezelés, a fent említett dózisok kijuttatásával. A műtrágya kezelések területre történő kijuttatása a következő időpontokban történt: 2019. április 30., június 4. és július 30., illetve 2020. június 5. és július 10.

A kísérletben 2018 és 2020 között évente egy alkalommal gyűjtöttünk levélmintákat a nyári-kora őszi időszakban az elemakkumuláció vizsgálatok céljára, a következő metodikát követve: fajta-tápanyag-kezelés-kombinációként 3 × 5 növényről 3-3 kifejlett és ép összetett levelet gyűjtöttünk, a korona alsó harmadából (tekintettel a fák fiatal korára, és az állomány még harmadik évben sem teljes záródására, a gyűjtési magasságtól függetlenül a levelek jellemzően fénylevél típusúnak voltak tekinthetők). Az 5-ös csoportok között törekedtünk megfelelő, parcellánként változó, de legalább

10 méteres távolságot tartani, és a mintavételi helyeket a parcella hossz tengelye mentén eltoltnak kijelölni annak érdekében, hogy az adott kezelés-kombinációk tápanyag-akkumulációs hatását minél jobban reprezentálják a minták. A mintagyűjtésekre 2018. szeptember 5-én, 2019. augusztus 15-én és 2020. június 30-án került sor. 2018-ban és 2019-ban az egyes fákrol gyűjtött levelek külön-külön papírzacskóba kerültek, míg 2020-ban az 5-5 fáról gyűjtött leveleket egy közös mintavételi zacskóba helyeztük (kompozit minták). Megjegyzendő, hogy a 2020-as évben végzett mintavételezésünk technikai okokból az utolsó műtrágyakezelést megelőzte, ezért az elemakkumulációs vizsgálatok eredményei összesen négy alkalommal kijuttatott, mintegy 260/65/200 kg/ha hatóanyag hatására vonatkoznak.



1. ábra: A kísérleti terület sematikus rajza (jelmagyarázat: D0: nullkezelés; MT: tisztán műtrágya kezelés;

ST: tisztán szerves trágya kezelés; MT & ST: együttes szervetlen és szerves trágya kezelés)

Figure 1: Schematic map of the experimental area (legend: D0 – zero treatment (control); MT – inorganic fertilizer treatment; ST – organic fertilizer treatment; MT & ST – combined treatment of inorganic and organic fertilizer)

Elemvizsgálatok

A begyűjtött levélmintákat a laboratóriumba szállítást követően 40°C-on szárítottuk, majd daráltuk és homogenizáltuk. Az elemtartalom-vizsgálatokat (kálium, réz, cink, mangán, vas, nikkel) salétromsavas mikrohullámú roncsolást követően (Milestone, Italy) Agilent 5110 ICP-OES műszerrel (Agilent Technologies, VIC, Australia) végeztük. A levélminták összes foszfortartalmát UV-1601 spektrofotométerrel detektáltuk (Shimadzu, Japan). Az össznitrogén-tartalmat száraz

égetéses eljárással, CN628 elemanalizátor (Leco, MI, USA) készülékkel határoztuk meg. Az elemvizsgálatokat az érvényben lévő hazai és nemzetközi szabványok előírásai alapján végeztük.

Statisztikai értékelés

A laboratóriumi vizsgálatok során nyert elemtartalom adatok statisztikai értékelését R programkörnyezetben végeztük (R Core Team 2022). Az elemakkumulációs adatok átlag- és szórásértékeinek számításához a 'dplyr' csomagot használtuk (Wickham et al. 2023). Az egyes kezelés-kombinációk tápanyagfelvételre gyakorolt hatásának elemzéséhez elemenként és kezelés-kombinációnként módosított z-értéket számítottunk, az alábbi képlet szerint:

$$z_{ki} = \frac{x_{ki} - A_0}{\sigma_k}$$

ahol x_{ki} a k kezelés-kombináció i-dik mérési eredménye, A_0 az adott kezelés-kombináció nullkezelésének számtani közepe, míg σ_k a k kezelés-kombináció mérési eredményeinek a szórása. A módosított z-érték ennek megfelelően pozitív értéket vesz fel abban az esetben, ha az adott mérési eredmény értéke meghaladja a kontrolkezelés átlagát, és negatívát, ha alacsonyabb annál. Illetve, minél nagyobb a kezelés-kombináció mérési eredményeinek szórása, a z-érték annál jobban közelít a nullához.

A z-értékek kezelés-kombinációk közötti eltérésének mértékét szignifikanciavizsgálattal ellenőriztük elemenként. Az adathalmaz eloszlásának vizsgálatához Shapiro-Wilk tesztet (Shapiro & Wilk 1965), szignifikanciavizsgálatához pedig Kruskal-Wallis próbát végeztünk (Kruskal & Wallis 1952); mindkét elemzéshez a 'stats' csomag 4.2.0.-es verzióját használtuk (R Core Team 2022). Ugyancsak e programcsomagot alkalmaztuk a kezelésszámok (z-érték) páronkénti összevetése során használt Wilcoxon-próba (Wilcoxon 1945) elvégzéséhez. Az egyes akácklónok elemakkumulációs mintázatának, illetve a különböző tápanyagkezelések elemfelvételre gyakorolt hatásának elemzéséhez főkomponens analízist (Pearson 1901) végeztünk a 'FactoMiner' csomag alkalmazásával (Lê et al. 2008). A vizsgálati eredmények képi megjelenítéséhez a 'ggplot2' (Wickham 2016) és a 'ComplexHeatmap' (Gu et al. 2016) csomagokat, az elkészített ábrák utószerkesztéséhez pedig a Paint.net programot használtuk (Brewster 2023).

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Az elemtartalom-vizsgálat eredményei alapján a vizsgált akácklónok leveleiben a makroelemek, így a nitrogén, a foszfor és a kálium mutatták a legmagasabb értékeket (1. táblázat). Átlagos mennyiségük 40,07 (nitrogén), 12,33 (kálium), illetve 2,71 mg/g (foszfor) értéknek felelt meg. A vizsgált mikroelemek esetében, amint az várható volt, több nagyságrenddel alacsonyabb értékeket mértünk. Az egyes elemek levelekben mért átlagos mennyisége a következő volt: $9,44 \times 10^{-3}$ mg/kg (réz), $8,31 \times 10^{-2}$ mg/kg (cink), $6,06 \times 10^{-2}$ mg/kg (mangán), $7,00 \times 10^{-2}$ mg/kg (vas), illetve $4,31 \times 10^{-3}$ mg/kg (nikkel). A mikroelemek közül tehát nagyobb mennyiségben a cink, a vas és a mangán (10^{-2} mg/kg), míg kisebb mennyiségben a réz és a nikkelt fordult elő a levelekben (10^{-3} mg/kg). Eme értékek,

legalábbis nagyságrendjüket tekintve, jórészt megfelelnek egyes szárazföldi növény levelében mért elemtartalom értékeknek (Dehelean et al. 2019, Li et al. 2019, Oliveira et al. 2010), ami, vélhetően, a vizsgált növényi levélszövetek hasonló felépítésének, illetve a bennük lejátszódó élettani folyamatok hasonlóságának köszönhető.

Az egyes elemek hasznosításának z-érték alapú összehasonlítása során mind a fajták, mind a tápanyagutánpótlás-kezelések esetében figyeltünk meg különbségeket, bár elemenként változó mértékben (2. ábra). Az egyes fajták esetében a különbségek elsősorban a tisztán műtrágya kezelése hatásában nyilvánultak meg; e kezelés az OBE53–OBE01–OBE34–OBE69 sorrendben egyre erőteljesebb negatív hatással volt egyes elemek levelekben való jelenlétére. Példaként, amíg az OBE53 esetében az MT kezelés csak a levelek káliumtartalmát befolyásolta negatívan, addig az OBE69 esetében ez a kapcsolat a foszfor, a kálium, a réz, a cink és a vas esetében is kimutatható volt. A tisztán műtrágya kezelés elemfelvétellel gyakorolt szignifikáns pozitív hatását csak nitrogén (OBE01, OBE53), a vas (OBE01), a mangán (OBE69) és a nikkel (OBE69) esetében figyeltük meg.

1. táblázat: Az egyes akácklónok kezelésenként mért átlagos elemakkumulációja (jelmagyarázat: D0 – nullkezelés (kontrol); MT – műtrágya kezelés; ST – szervesztrágya kezelés; MT & ST – szervesztrágya és szervetlen szervesztrágya kombinált kezelés)

Table 1: The average element accumulation of black locust clones per treatment (legend: D0 - zero treatment (control); MT – inorganic fertilizer treatment; ST – organic fertilizer treatment; MT & ST - combined treatment of inorganic and organic fertilizer)

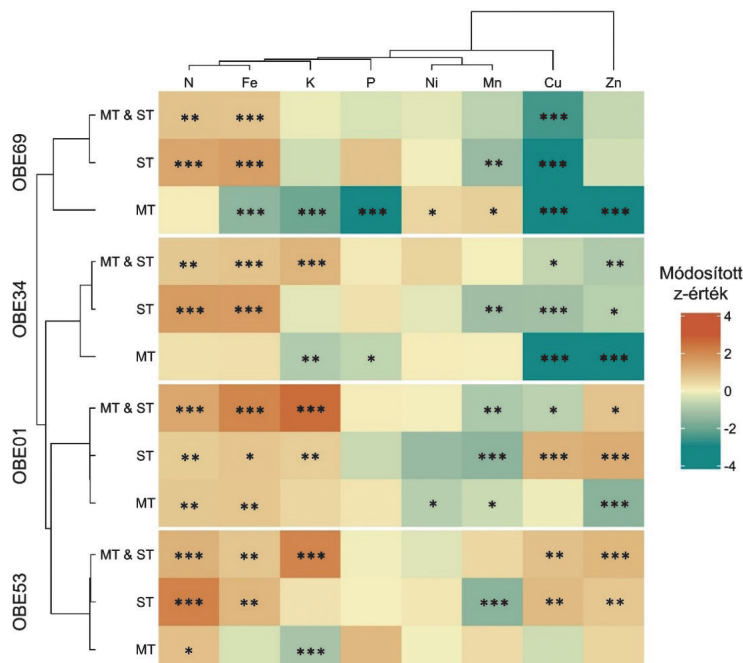
Fajta	Kezelés	N	P	K	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
		(%)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/kg)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/kg)
OBE01	D0	3,52 ±0,52	2,61 ±0,65	10,9 ±2,83	8,46 ±2,52	0,045 ±0,043	0,071 ±0,015	0,058 ±0,017	2,87 ±7,36
	MT	3,74 ±0,57	2,65 ±0,74	11,7 ±2,96	8,36 ±2,27	0,025 ±0,012	0,066 ±0,018	0,066 ±0,017	2,35 ±3,92
	ST	3,79 ±0,38	2,62 ±0,48	12,7 ±2,45	12,0 ±3,08	0,213 ±0,246	0,058 ±0,012	0,066 ±0,013	8,07 ±11,0
	MT & ST	3,90 ±0,520	2,75 ±0,34	14 ±1,72	7,57 ±1,50	0,047 ±0,049	0,065 ±0,014	0,083 ±0,015	2,75 ±2,83
OBE34	D0	3,79 ±0,47	2,67 ±0,53	13,6 ±2,81	13,0 ±4,2	0,094 ±0,092	0,068 ±0,018	0,063 ±0,016	1,29 ±1,03
	MT	3,92 ±0,62	2,42 ±0,40	12,1 ±2,09	8,04 ±2,45	0,015 ±0,010	0,070 ±0,023	0,067 ±0,012	2,17 ±1,76
	ST	4,32 ±0,49	2,88 ±0,56	13,2 ±2,09	10,5 ±2,09	0,050 ±0,043	0,066 ±0,024	0,077 ±0,010	2,81 ±3,59
	MT & ST	4,05 ±0,53	2,87 ±0,42	15,7 ±2,30	11,6 ±5,34	0,069 ±0,082	0,069 ±0,027	0,082 ±0,024	3,50 ±3,87
OBE53	D0	4,05 ±0,54	3,17 ±0,62	12,5 ±2,92	7,94 ±1,30	0,065 ±0,062	0,063 ±0,015	0,064 ±0,013	2,39 ±2,09
	MT	4,25 ±0,55	3,35 ±0,47	11,1 ±3,21	7,47 ±1,13	0,046 ±0,080	0,070 ±0,019	0,060 ±0,017	17,6 ±56,5

Az 1. táblázat folytatása / Table 1: continued

Fajta	Kezelés	N	P	K	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni
		(%)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/kg)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/kg)
	ST	4,88 ±0,47	3,11 ±0,28	12,7 ±2,19	9,28 ±1,32	0,116 ±0,260	0,052 ±0,012	0,074 ±0,011	5,47 ±6,05
	MT & ST	4,43 ±0,49	3,25 ±0,37	14,7 ±1,86	10,1 ±2,27	0,264 ±0,388	0,072 ±0,021	0,100 ±0,051	7,76 ±11,2
OBE69	DO	3,68 ±0,45	2,44 ±0,74	11,4 ±1,99	12,4 ±4,84	0,120 ±0,114	0,063 ±0,022	0,073 ±0,046	1,46 ±1,09
	MT	3,71 ±0,43	1,70 ±0,36	8,4 ±2,45	7,21 ±1,76	0,017 ±0,006	0,071 ±0,023	0,062 ±0,011	3,35 ±3,13
	ST	4,13 ±0,40	2,50 ±0,36	11,2 ±2,40	8,39 ±2,55	0,100 ±0,130	0,053 ±0,010	0,092 ±0,020	3,59 ±4,72
	MT & ST	3,95 ±0,43	2,35 ±0,37	11,3 ±1,65	8,71 ±1,67	0,115 ±0,113	0,058 ±0,013	0,094 ±0,026	1,46 ±1,27

A tisztán műtrágya kezelésekkal szemben a tisztán szervestrágya, illetve a kombinált szervetlen-szervestrágya kezelések határozottabb hatással voltak egyes elemek akáclevelekben való jelenlétére. Genotípustól függetlenül e kezelések szignifikánsan megnövelték a levelek nitrogén- és vastartalmát, a kombinált kezelés pedig jelentős hatással volt a káliumtartalomra is az OBE01, OBE34 és OBE53 klónok esetében. Említésre méltó megfigyelés, hogy egyetlen tápanyag-utánpótlás kezelés sem volt pozitív hatással az akáclevelek foszfortartalmára. A réz esetében a tápanyag-utánpótlások hatása erős függést mutatott a klónokkal: az OBE34 és OBE69 klónok esetében mindhárom kezelés szignifikáns réz tartalom csökkenést okozott a kontrolterülethez képest. Ezzel szemben az OBE53 klónnál a szervestrágyát is tartalmazó kezelések statisztikailag igazolható módon megnövelték az akáclevelek réz tartalmát. Az OBE01 klón e tekintetben nem mutatott konzekvens viselkedést: a kombinált kezelés szignifikánsan csökkentette, a szervestrágya kezelés szignifikánsan megnövelte a réz jelenlétét a levélszövetekben. A cink esetében szignifikáns pozitív kapcsolat csak a szervestrágyát is tartalmazó kezelések esetében került kimutatásra, és csak az OBE01 és OBE53-as klónok esetében. A tisztán műtrágyakezelés ellenben erős negatív hatással volt a levelek cinktartalmára három klón esetében is (OBE01, OBE34, OBE53). A levelek mangántartalmát a tisztán szervestrágya kezelés mind a négy klón esetében csökkentette, az OBE01-es klón esetében pedig a másik két kezelés is negatív hatást gyakorolt a mangán jelenlétére a levelekben. A foszfor mellett a nikkelt mutatta a leggyengébb kapcsolatot a tápanyag-utánpótlás kezelésekkal: az OBE69 esetében a tisztán műtrágya kezelés szignifikánsan megnövelte, az OBE01 esetében pedig ugyanez a kezelés csökkentette a levelek nikkeltartalmát.

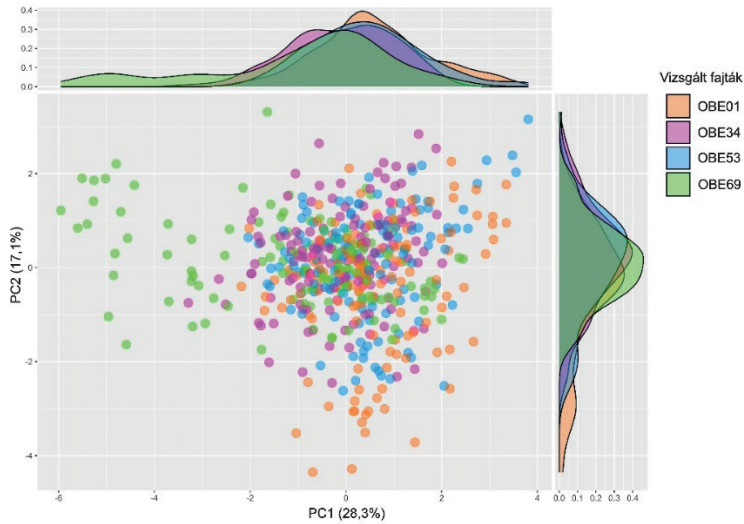
A módosított z-értékek főkomponens analízisének eredményeit a 3. és 4. ábrák, valamint a 2. táblázat szemlélteti.



2. ábra: Az egyes tápanyag-utánpótlás-kezelések hatása az akácklónok leveleinek makro- és mikroelemek tartalmára, a kontrol kezelésekhez viszonyítva (megjegyzés: az összehasonlítás módosított z-érték alapon történt; a csillagokkal jelzett szignifikancia szintek a kontrol kezeléshez viszonyított eltérés mértékére utalnak: üres cella – nincs szignifikáns különbség, * – $0,01 < p \leq 0,05$, ** – $0,001 < p \leq 0,01$, *** – $p \leq 0,001$; jelmagyarázat: D0 – nullkezelés (kontrol); MT – műtrágya kezelés; ST – szervestrágya kezelés; MT & ST – szervetlen és szervestrágya kombinált kezelés)

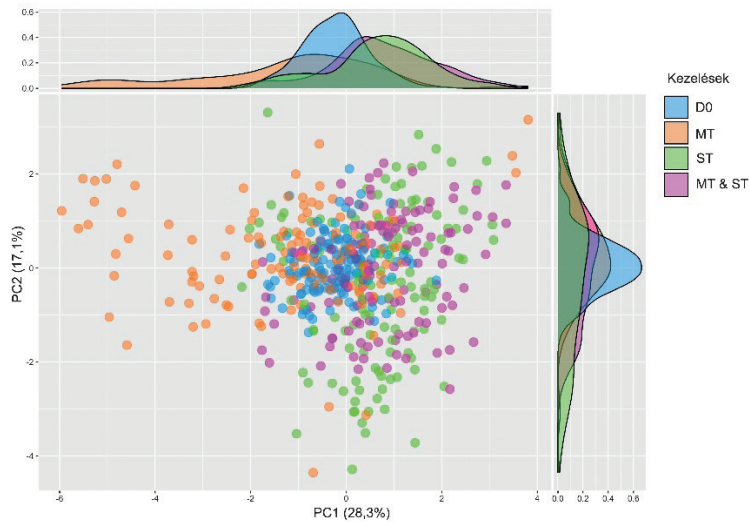
Figure 2: Effect of nutrient treatments on the macro- and micronutrient content of black locust clone leaves compared to control treatments (note: comparisons are made on a modified z-score basis; asterisks indicate the extent of difference compared to control treatment: empty cell - no significant difference, * – $0.01 < p \leq 0.05$, ** – $0.001 < p \leq 0.01$, *** – $p \leq 0.001$; legend: D0 – zero treatment (control); MT – inorganic fertilizer treatment; ST – organic fertilizer treatment; MT & ST – combined treatment of inorganic and fertilizer fertilizer)

A 3. ábra eloszlásgörbéi alapján megállapítható, hogy a vizsgált akácklónok leveleik tápelem-tartalom mintázata alapján (a nyolc elemet együttesen értékelve) csak kis mértékben térnek el egymástól, és ez az elkülönülés is csak az első főkomponens értékeire vezethető vissza. Az OBE01, OBE34 és OBE53-as klónok pontfelhőinek átfedése jelentős a PC1 tengely mentén, egyedül az OBE69-es klón pontthalmaza mutat egyedi elhelyezkedést. Az eredményeket a 2. és 4. ábrákkal összevetve megállapítható, hogy a PC1 tengely mentén elkülönülő OBE69 pontok a műtrágyakezeléssel érintett megfigyelésekhez tartoznak, vagyis az e klón esetében megfigyelt, a tisztán műtrágyakezelés hatására előállt alacsonyabb foszfor-, kálium-, cink-, réz- és vastartalomnak köszönhető a részben egyedi mintázat. Ezt alátámasztja a főkomponens elemzés során meghatározott, teljes varianciához való hozzájárulása az egyes elemeknek (2. táblázat). Az első főkomponens képviselte varianciához ugyanis a vas (20,3%), a kálium (20,1%) és a cink (18,6%) járulnak hozzá a legnagyobb mértékben.



3. ábra: Az egyes fajta-kezelés kombinációhoz tartozó megfigyelések ábrázolása 1-es és 2-es főkomponens értékeik alapján, klónok szerinti bontásban (megjegyzés: az egyes főkomponensek neve mellett szereplő számok a főkomponens által képviselt variancia mértékét mutatják)

Figure 3: Plot of the observations for each variety-treatment combination by their first two principal component values, broken down by clones investigated (note: the numbers next to axes indicate the amount of variance represented by the principal component)



4. ábra: Az egyes fajta-kezelés kombinációhoz tartozó megfigyelések ábrázolása 1-es és 2-es főkomponens értékeik alapján, kezelésekre szerinti bontásban (megjegyzés: az egyes főkomponensek neve mellett szereplő számok a főkomponens által képviselt variancia mértékét mutatják; jelmagyarázat: D0 – nullkezelés (kontrol); MT – műtrágya kezelés; ST – szerves-trágya kezelés; MT & ST – szerves-trágya és szervetlen és szerves-trágya kombinált kezelés)

Figure 4: Plot of the observations for each variety-treatment combination by their first two principal component values, broken down by nutrient treatments (note: the numbers next to axes indicate the amount of variance represented by the principal component; legend: D0 – zero treatment (control); MT – inorganic fertilizer treatment; ST – organic fertilizer treatment; MT & ST – combined treatment of inorganic and organic fertilizer)



Az egyes tápanyag-utánpótlás kezelések főkomponens értékeit szemlélve megállapítható (4. ábra), hogy az első főkomponens mentén az egyes kezelések pontfelhői a klónok esetében megfigyelthez képest határozottabban elkülönülést mutatnak. Az elkülönülés a szervesetlen és szerves-trágya kezelések tekintetében jelentős elsősorban; előbbi negatív, utóbbiak pozitív irányban térnek el a kontrolkezeléstől. E megfigyelés ugyancsak összhangban van az egyes elemek tekintetében megfigyelt z-érték adatokkal: a szignifikáns kapcsolatokat figyelembe véve a tisztán műtrágya kezelés többségében negatív hatással van az elemek levélszövetben való relatív (kontrolhoz viszonyított) mennyiségére (13 negatív kapcsolat az 5 pozitívval szemben), míg a szerves-trágyát is tartalmazó kezelések esetében a mérleg pozitív irányba tolódik el (12 negatív a 27 pozitív kapcsolattal szemben; 2. ábra).

A második főkomponens által képviselt varianciára a nikkelnak (40,3%) és a mangánnak (33,5%) volt a legnagyobb hatása. Ugyan a PC2-es tengely mentén sem a fajták, sem a kezelések nem mutattak határozott szegregációt, a klónok közül az OBE01-es-hez tartozó pontok (megfigyelések) negatív tartományba eső értékei figyelemre méltóak voltak. A levelek kontrolkezeléshez viszonyított nikkel- és mangántartalma e klón esetében mutatta a legnagyobb számú (4 db) statisztikailag igazolható negatív eltérést.

2. táblázat: Az egyes makro- és mikroelemek (változók) hozzájárulása az első két főkomponens képviselte varianciához

Table 2: The contribution of the macro- and microelements to the variance represented by the first two principal components

Vizsgált elemek	PCA1	PCA2
N	14,6%	1,8%
P	14,6%	11,6%
K	20,1%	6,6%
Cu	8,5%	0,2%
Zn	18,6%	2,2%
Mn	3,0%	33,5%
Fe	20,3%	3,7%
Ni	0,1%	40,3%

A levélszövetek elemtartalmára, illetve az egyes elemek egymáshoz viszonyított arányára számos tényező, így az elemek rendelkezésre állása (termőhely), a klíma, az egyedek kora, illetve a fajok, sőt, az egyedek közötti különbségek is hatással vannak (Ågren, 2008). Mindazonáltal, általánosságban, az általunk is vizsgált elemek közül a nitrogén, a foszfor és a mangán mennyisége a levelekben növekedési ráta függő, és általában azonos, a növekedéssel pozitív kapcsolatot mutat; a kálium felvétele levélbiomassza mennyiségének növekedésével arányos, ami beépíthetőségének korlátozottságát feltételezi; a vas és a cink felvehetőségét általában a talajban való korlátolt elérhetőségük szabályozza, míg a réz az első (növekedési intenzitás-függés) és a második csoport (biokémiailag determinált) jellegzetességeit mutatja (Ågren & Weih, 2012). Eredményeink alapján, az elemtartalom változás irányát és mértékét figyelembe

véve a vizsgált makro- és mikroelemek a következő három csoportba voltak sorolhatók: 1.) a tápanyagkezelések pozitív hatással voltak a levélszövetekben való jelenlétükre (nitrogén, kálium, vas); 2.) a tápanyag-utánpótlás hatása az akkumulációjukra genotípusfüggő, de jellemzően negatív irányú (mangán, réz, cink); 3.) a tápanyag-utánpótlás érdemben nem változtatta meg a mennyiségüket a levelekben (foszfor, nikkel). Ågren & Weih eredményeit is alapul véve, a makroelemek közül a nitrogén és a kálium esetében feltételezhető, hogy a növények az általunk vizsgált kísérletben a tápanyag-utánpótlás hatására nagy mennyiségben tudták őket hasznosítani (fedezni tudták az intenzív növekedés keltette tápanyagigényüket) és hogy utóbbi nem érte el a beépíthetőségi határát, ami e két elem talajban való korlátozott elérhetőségére utalt. A foszfor nem tartozott a limitáló tápelemek közé, vagyis a növények a növekedési intenzitásuk fenntartásához a kontrol parcellákban is megfelelő mennyiségben tudták felvenni a talajból. A vas korlátozottan volt elérhető, míg a nikkel megfelelő mennyiségben állt a növények rendelkezésére a tápanyagkezelés alatt nem álló területeken, a mangán, a réz és a cink felvehetőségét, így hasznosítását pedig környezeti faktorok (alacsony elérhetőség), vagy más elemek jelenléte (intenzívebb hasznosítása) korlátozhatta (Ågren & Weih, 2012).

Kutatásunk rámutatott arra, hogy a gyenge homoki területeken létesített akácültetvények tápanyag-utánpótlása képes élettani változásokat előidézni a kiültetett növényekben, ami végső soron hozzájárulhat az ültetvények növekedésének, termőhelyállóságának fokozásához. Az egyes klónok makro- és mikroelemhasznosítása között tapasztalt különbségek pedig nemesítési és termesztésfejlesztési jelentőséggel bírnak, és olyan klónok szelektálására hívják fel a figyelmet, melyek képesek a tápanyag-utánpótlás hatására előállt kedvezőbb elemviszonyokat növekedésük és ellenállóképességük fokozására fordítani. Eredményeink ugyanakkor megalapozó jellegűnek tekintendők, a tápanyaghasznosítás növekedéssel, valamint a biotikus és abiotikus károsítókkal szembeni toleranciával való kapcsolatának feltárása további kutatásokat igényel.

ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során egy gyenge homoki termőhelyen létesített kísérleti akác ipari célú faültetvényben végeztünk tápanyaghasznosítási vizsgálatokat. A kísérletben négy akácklón (OBE01, OBE34, OBE53, OBE69) tesztelése folyt különböző tápanyag-utánpótlás kezelések (nullkontrol, műtrágya, szervestrágya, valamint együttes szervetlen és szervestrágya kijuttatás) mellett. Az egyes klónokhoz tartozó növények tápanyaghasznosítását a leveleik tápelemtartalma alapján értékeltük, az értékelésbe pedig a következő makro- és mikroelemeket vontuk be: nitrogén, foszfor, kálium, réz, cink, vas, mangán és nikkel. A kontrolkezeléshez viszonyított tápanyagfelvételt módosított z-érték számításával elemeztük. A három éven keresztül végzett elemzések során az egyes elemek hasznosításában jelentős különbségeket figyeltünk meg: a többlet tápanyagkijuttatás pozitív hatással volt a levélszövetek nitrogén-, kálium- és vastartalmára, klónoktól függően, de jellemzően negatívan befolyásolta a levelek mangán- réz- és cinktartalmát, illetve nem okozott változást a növények foszfor- és a nikkelhasznosításában. Az egyes klónok között, bizonyos elemek hasznosítása tekintetében, jelentős különbségek mutatkoztak: az OBE01 és OBE53 klónok leveleiben megnövekedett, az OBE34 és OBE69 klónok levélzetében ellenben szignifikánsan lecsökkent a réz- és a cinktartalom



a kezelések hatására. A teljes elemsor együttes értékelése során tápanyag-hasznosítás mintázatuk alapján a klónok határozott elkülönülést ugyanakkor nem mutattak; az egyes tápanyagkezelések hatása viszont jelentősen eltérő volt. A tisztán műtrágya kezelés döntően negatívan befolyásolta a klónok elemhasznosítását, míg a szerves-trágyát is tartalmazó kezelések, elemektől függően ugyan, de jellemzően pozitív hatással voltak rá. A klón-kezelés kombinációban megfigyelt tápanyaghasznosítás-variáció kialakulásáért legnagyobb mértékben a vas, a kálium és a cink levélszövetekbe történő eltérő beépülése volt felelős. Eredményeink fontos ismeretekkel szolgálhatnak a tápanyag-utánpótlás növekedésre és stressztoleranciára gyakorolt hatásának fiziológiai alapú kutatásaihoz.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatásunk kivitelezéséhez nyújtott segítségéért külön köszönettel tartozunk Pogrányi Kálmánnak (Silvanus Csoport Kft.), valamint Kiss Lászlónénak és Palkovits Lászlónénak (Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézet). Kutatásunkat a 2017-1.3.1-VKE-2017-00022 azonosítószámú, „A fatömeg hozamot és faanyagminőséget jelentősen növelő, a gyakorlatban eddig nem alkalmazott állománynevelési és trágyázási eljárások kidolgozása új, gyorsnövésű fajtákkal létesített erdészeti ültetvényekben” című projekt finanszírozásában végeztük. A 2017-1.3.1-VKE-2017-00022 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Versenyképességi és kiválósági együttműködések (VKE_17) pályázati program finanszírozásában valósult meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Ábri T., Keserű Z., Borovics A., Rédei K. & Csajbók J. 2022: Comparison of Juvenile, Drought Tolerant Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Clones with Regard to Plant Physiology and Growth Characteristics in Eastern Hungary: Early Evaluation. *Forests* 13(2). <https://doi.org/10.3390/f13020292>
- Ågren G.I. 2008: Stoichiometry and Nutrition of Plant Growth in Natural Communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39: 153–170. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173515>
- Ågren G.I. & Weih M. 2012: Plant stoichiometry at different scales: Element concentration patterns reflect environment more than genotype. *New Phytologist* 194(4): 944–952. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04114.x>
- Nemzeti Földügyi Központ Erdészeti Főosztály 2023: Magyarország erdeinek összefoglaló adatai 2022. https://nfk.gov.hu/Magyarország_erdeivel_kapcsolatos_adatok_news_513
- Bartha D., Csiszár Á. & Zsigmond V. 2008: Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). In: Botta-Dukát Z. and Balogh L. (eds.): The most important invasive plants in Hungary. Institute of Ecology and Botany Hungarian Academy of Sciences, Vácrátót, 63–76.
- Bedbabis S., Ferrara G., Ben Rouina B. & Boukhris M. 2010: Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. *Scientia Horticulturae* 126(3): 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.07.020>
- Boshkovski B., Tzerakis C., Doupis G., Zapolska A., Kalaitzidis C. & Koubouris G. 2020: Relationships of Spectral Reflectance with Plant Tissue Mineral Elements of Common Bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) Under Drought and Salinity Stresses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 51(5): 675–686. <https://doi.org/10.1080/10103624.2020.1729789>
- Brewster R. 2023: Paint.net (Version 5.0.3) [C#, C++, C++/CLI]. <https://getpaint.net/>

- Chen R., Zhu J., Zhao J., Shi X., Shi W., Zhao Y. et al. 2023: Relationship between Leaf Scorch Occurrence and Nutrient Elements and Their Effects on Fruit Qualities in Chinese Chestnut Orchards. *Forests* 14(1). <https://doi.org/10.3390/f14010071>
- Dehelean A., Cristea G., Balazs Z., Magdas D.A., Feher I., Voica C. & Puscas R.H. 2019: Macro- and Microelemental Distribution in *Phaseolus Vulgaris* L. Tissue Irrigated with Water with Varying Isotopic Compositions. *Analytical Letters* 52(1): 111–126. <https://doi.org/10.1080/00032719.2018.1431655>
- Gu Z., Eils R. & Schlesner M. 2016: Complex heatmaps reveal patterns and correlations in multidimensional genomic data. *Bioinformatics* 32(18): 2847–2849. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw313>
- Hančević K., Radić T., Pasković I. & Urlić B. 2018: Biochemical and physiological responses to long-term *Citrus tristeza* virus infection in Mexican lime plants. *Plant Pathology* 67(4): 987–994. <https://doi.org/10.1111/ppa.12799>
- Houdegebe A.C., Achigan-Dako E.G., Sogbohossou E.O.D., Schranz M.E., Odindo A.O. & Sibiya J. 2022: Leaf elemental composition analysis in spider plant [*Gynandropsis gynandra* L. (Briq.)] differentiates three nutritional groups. *Frontiers in Plant Science* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.841226>
- Keresztesi B. 1983: Breeding and cultivation of black locust, *Robinia pseudoacacia*, in Hungary. *Forest Ecology and Management* 6(3): 217–244. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(83\)80004-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(83)80004-8)
- Kruskal W.H. & Wallis W.A. 1952: Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47(260): 583–621. <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>
- Lê S., Josse J. & Husson F. 2008: FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* 25(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- Lett B. 2021: Amit a számok mutatnak – Az erdőtelepítések tapasztalatai 1920–2020. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron. http://publicatio.uni-sopron.hu/2169/1/EVGI_kozlemenyek_15_ASZM_Erdotelepitese_k_tapasztalat_egyben.pdf
- Lett B., Horváth S. & Fülöp V.G. 2020: Amit a számok mutatnak az akácról Az akácgazdálkodás szerepe a magyar erdőgazdálkodásban. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron. http://publicatio.uni-sopron.hu/1957/1/EVGG_13_Akacgazdalkodas_szerepe_a_magyar_erdogazdalkodasban.pdf
- Li Y., Song H., Zhou L., Xu Z. & Zhou G. 2019: Vertical distributions of chlorophyll and nitrogen and their associations with photosynthesis under drought and rewatering regimes in a maize field. *Agricultural and Forest Meteorology* 272–273: 40–54. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.026>
- Ma C., Zhang W., Wu M., Xue Y., Ma L. & Zhou J. 2013: Effect of aboveground intervention on fine root mass, production, and turnover rate in a Chinese cork oak (*Quercus variabilis* Blume) forest. *Plant and Soil* 368(1): 201–214. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1512-0>
- Németh J., Pogrányi K., Horváth S. & Németh M. 2022: Új akác fajtákkal létesített ültetvények a fenntartható jövőért. https://fataj.hu/wp-content/uploads/2022/05/AKAC_Silvanus_HU.pdf
- Oliveira S.R., Gomes Neto J.A., Nóbrega J.A. & Jones B.T. 2010: Determination of macro- and micronutrients in plant leaves by high-resolution continuum source flame atomic absorption spectrometry combining instrumental and sample preparation strategies. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 65(4): 316–320. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2010.02.003>
- Pearson K. 1901: LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2(11): 559–572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- R Core Team. 2022: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>
- Shapiro S.S. & Wilk M.B. 1965: An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* 52: 591–611.
- Tinkov A.A., Nemereshina O.N., Suliburska J., Gatiatulina E.R., Regula J., Nikonov A.A. & Skalny, A.V. 2016: Comparative Analysis of the Trace Element Content of the Leaves and Roots of Three Plantago Species. *Biological Trace Element Research* 173(1): 225–230. <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0626-2>
- Wang M., Li G. & Liu Y. 2022: Nursery fertilization affected field performance and nutrient resorption of *Populus tomentosa* Carr. Ploidy levels. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 15(1): 16–23. <https://doi.org/10.3832/ifer3912-014>
- Wang Z., Xia C., Yu D. & Wu Z. 2015: Low-temperature induced leaf elements accumulation in aquatic macrophytes across Tibetan Plateau. *Ecological Engineering* 75: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.015>



- Watanabe T., Broadley M.R., Jansen S., White P.J., Takada J., Satake K. et al. 2007: Evolutionary control of leaf element composition in plants. *New Phytologist* 174(3): 516–523. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02078.x>
- Wickham H. 2016: *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd ed. 2016). Springer-Verlag GmbH, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Wickham H., François R., Henry L., Müller K. & Vaughan D. 2023: *dplyr: A Grammar of Data Manipulation* (Version 1.1.2). <https://cran.r-project.org/web/packages/dplyr/index.html>
- Wilcoxon F. 1945: Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1(6): 80–83. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- Yan Z., Hou X., Han W., Ma S., Shen H., Guo Y. et al. 2019: Effects of nitrogen and phosphorus supply on stoichiometry of six elements in leaves of *Arabidopsis thaliana*. *Annals of Botany* 123(3): 441–450. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy169>
- Yang H. 2018: Effects of nitrogen and phosphorus addition on leaf nutrient characteristics in a subtropical forest. *Trees* 32(2): 383–391. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1636-1>

Érkezett: 2024. szeptember 30.
Közlésre elfogadva: 2025. január 14.