

# AKÁCKLÓNOK DRÓNOS TÁVÉRZÉKELÉSES MÓDSZERREL TÖRTÉNŐ VIZSGÁLATÁNAK ELŐZETES EREDMÉNYEI

Ábri Tamás<sup>1</sup>, Szabó Loránd<sup>2</sup> és Szabó Gergely<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet, Ültetvényeszerű Fatermesztési Osztály

<sup>2</sup>Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Földtudományi Intézet, Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék

## Kivonat

Ebben a tanulmányban a Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézete és a Debreceni Egyetem közös kutatási projektje kerül bemutatásra. A kutatómunka célja egy nyírségi akácklón összehasonlító kísérlet vizsgálata drón (UAS=uncrewed aerial system) segítségével. A vizsgálatok során fmagasság és különféle vegetációs indexek (NDVI, GNDVI, NDRE, LCI) mérésére került sor. A fotogrammetriai és multispektrális vizsgálatok eredménye alapján a klónok között szignifikáns különbségek mutatkoztak. A(z) NK2 és PL251 klónok kimagasló növekedést és jó egészségi állapotot mutattak, míg az 'Üllői' fajta gyengébben teljesített. Néhány vegetációs index (NDRE, LCI, CCCI) és a fák magassága között közepes mértékű korrelációt tapasztaltunk ( $r=0,587-0,593$ ), ami alátámasztja az erdészeti távérzékelésben rejlő lehetőségeket az erdőgazdálkodás hatékonyságának növelésére. A kutatás rávilágít arra, hogy az UAS-technológia integrálása az erdőgazdálkodásba pontos, költséghatékony és részletes adatokat biztosít, hozzájárulva az akác termesztési technológiájának fejlesztéséhez.

*Kulcsszavak:* akácklónok, drón, fotogrammetria, vegetációs index

## REMOTE SENSING ANALYSIS OF BLACK LOCUST CLONES: EARLY EVALUATION

### Abstract

In this study, a joint project by the University of Debrecen and the Forest Research Institute (University of Sopron), aimed to study growth and vitality of black locust clones with remote sensing technologies. A clone trial established in 2020 in Eastern Hungary (Nyírség) tested newly-bred clones using uncrewed aerial system (UAS)-based photogrammetry to measure tree heights and multispectral analysis to monitor vegetation indices (NDVI, GNDVI, NDRE, LCI, CCCI). The results showed significant differences between clones. Clones NK2 and PL251 showed superior growth performance and health, while 'Üllői' cultivar performed the lowest. Moderate correlations ( $r=0.587-0.593$ ) were found between some vegetation indices (NDRE, LCI, CCCI) and tree heights, emphasizing the potential of remote sensing in efficient forest management. This study highlights the value of integrating UAS technology in forestry, offering cost-effective, accurate, and comprehensive data for improving black locust growing technology.

*Keywords:* akácklónok, UAS, photogrammetry, vegetation index

## BEVEZETÉS

Az akác (*Robinia pseudoacacia* L.) a XVII. század elején került Európába, napjainkban az egyik legelterjedtebb exóta fafaj az „Öreg Kontinensen”. A különböző környezeti hatásokkal szembeni alkalmazkodóképessége, értékes faanyaga, gyors fiatalkori növekedése, jó sarjadzóképessége, könnyű szaporíthatósága, gyakori és bőséges magtermése, továbbá relatíve magas fatermése miatt hazánkban is előszeretettel ültették, ültetik. A fatermesztésen túl, méhészeti jelentősége is meghatározó (Nicolescu et al. 2018).

Az akác termesztési technológiájának fejlesztésében, nemesítésben, új klónok előállításában hazánk évtizedek óta az élen jár, melyet számos magyar és idegen nyelvű tanulmányon túl az is bizonyít, hogy több ország küldte/küldi hozzánk erdészeti kutatóit az akáctermesztés tanulmányozása céljából. A több évtizedre visszanyúló kutatómunka célja a fafaj törzsalakjának javítása, valamint a fatermés és nektártermelés fokozása. Ennek eredményeként ma számos államilag elismert akácfajtaival, fajtajelölt klónnal rendelkezünk (Ábri et al. 2023a).

A hazai akác kutatás legújabb iránya az újonnan szelektált, kiváló tulajdonságokkal rendelkező akácegyedek vegetatív úton (gyökérdugványról vagy mikroszaporítás által) történő továbbszaporítása, magas genetikai értékű, erős gyökérszerű, stressztűrő csemeték előállítása, majd azok tág hálózatba történő ültetésével akác iparifa célú ültetvények létrehozása. Az ezirányú kutatómunka 2019-ben indult az ERTI és a Napkori Erdőgazdák Zrt. közös projektjeként (Borovics et al. 2022).

A fentiekhez kapcsolódóan egy Napkor település közelében található kísérleti célú akác iparifa ültetvényben végzünk fatermési és növényélettani vizsgálatokat, melyek során vegetatív úton előállított akácklónok, illetve egy államilag elismert fajta növekedését, CO<sub>2</sub> megkötését (fotoszintézisének intenzitását), párologtatását és vízhasznosítását, valamint vegetációs index (VI) értékeit vizsgáljuk innovatív módon (Ábri et al. 2022).

Ez utóbbiak, napjainkban tapasztalt fokozott érdeklődés miatt külön említést érdemelnek. A VI-k a távérzékelte spektrális adatok kombinációiból számított, a növényállomány egyes jellemző tulajdonságait jellemző értékek, melyek segítségével képet kaphatunk a földfeletti zöld biomaszra mennyiségről, a növények klorofill és egyéb levél pigment tartalmáról, ezáltal az általános egészségi állapotukról, stressztűrő-képességükről, valamint tápanyag-ellátottságukról (Janda 2023). Az elmúlt évtizedekben számos VI-t fejlesztettek ki, melyek közül a legnépszerűbb a normalizált vegetációs index (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), melynek -1 és +1 közötti értéke meghatározza, hogy a növények levélzete a fotoszintetikusan hasznos sugárzásból mennyit nyel el, illetve ver vissza. Minél többet elnyel, annál aktívabb a növényzet vegetációs aktivitása, mely összefüggésben van a levelek klorofill-tartalmával (Rouse et al. 1974, Bannari et al. 1995). Érdemes még megemlíteni a zöld normalizált vegetációs indexet (Green Normalized Difference Vegetation Index – GNDVI), valamint a vörös él spektrumot (vörös tartomány felső határa) használó LCI (Leaf Chlorophyll Index) és NDRE (Normalized Difference Red Edge) indexeket, továbbá az NDRE és NDVI értékek hányadosából képzett CCCI-t (Canopy Chlorophyll Content Index) is, melyeket különböző mezőgazdasági és erdészeti kultúrák megfigyelése során igen gyakran alkalmaznak és sok esetben sokkal pontosabb adatokat szolgáltatnak a növényállomány klorofill-tartalmával, egészségi állapotával kapcsolatban, mint az NDVI (Gitelson et al. 1996, Long et al. 2009, Xue és Su 2017, Jorge et al. 2019, Bronson et al. 2020, Csajbók et al. 2022, Ecke et al. 2022).

A famagasság és a különböző VI-k vizsgálata történhet terepi (pl. lézeres magasságmérő vagy kézi NDVI mérőműszer segítségével), illetve légi eszközök és azokra szerelt szenzorok alkalmazásával (Burkhart et al. 2018, Krause et al. 2019, Guimarães et al. 2020, Ábri et al. 2022). Ez utóbbiak

közül a különböző szenzorokkal felszerelt légi drónokat (UAS=Uncrewed Aerial System) érdemes kiemelni, melyekkel napjainkban egyre gyakrabban végeznek növényállomány-felmérést (Torresan et al. 2017, Dainelli et al. 2021, Ecke et al. 2022).

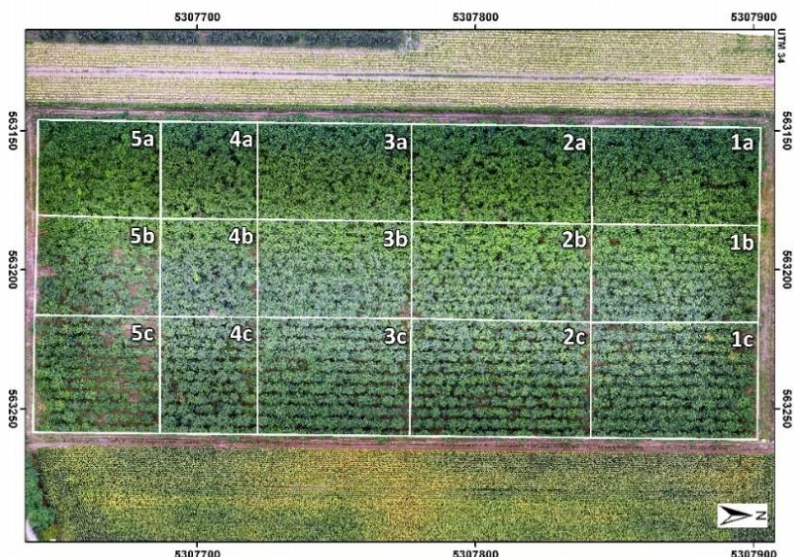
Ebben a tanulmányban a Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézet Ültetvényyszerű Fatermesztési Osztálya és a Debreceni Egyetem Természetföldrajzi és Geoinformatikai Tanszék közös kutatómunkája, az UAS-alapú távérzékeléses állományvizsgálat kezdeti eredményei kerülnek bemutatásra. A vizsgálat során a célkitűzéseink a következők voltak: (1) a kísérleti ültetvényben lévő akácklónok összehasonlítása légi felvételekből származó magasság és vegetációs index értékeik alapján; (2) az UAS-alapú mérésekből származó magassági és vegetációs index értékek közötti kapcsolat (korreláció) értékelése.

## ANYAG ÉS MÓDSZER

### A kísérleti ültetvény bemutatása

A vizsgált kísérleti ültetvény a Nyírség közepén, Napkor település határában létesült enyhén savanyú humuszos homoktalajon. A térségben, a sokéves átlag (30 év, 1991-2020) alapján, az évi átlaghőmérséklet 10,6 °C, az éves átlagos csapadékmennyiség 537 mm (Ábri et al. 2023b).

A 2020 tavaszán létrehozott akác klónkísérletbe 1 éves vegetatív úton szaporított csemetéket ültettünk 3 különböző ültetési hálózatban (2,5 × 2,5 m; 3,0 × 3,0 m; 4,0 × 4,0 m). A kísérlet célja az Erdészeti Tudományos Intézet és a Napkori Erdőgazdák Zrt. munkatársai által szelektált 'Farkasszigeti' (PL040), 'Püspökladányi' (PL251), 'Laposi' (NK1) és 'Napkori' (NK2) fajtajelölt klónok vizsgálata, összevetve az államilag elismert 'Üllői' akáccal. A kísérleti terület, illetve a vizsgált klónok elhelyezkedése az 1. ábrán látható.



1. ábra: Ortofoto a napkori kísérleti területről (2023. augusztus 16.). A számok a vizsgált klónokat (1 – PL251; 2 – NK1; 3 – PL040; 4 – NK2; 5 – 'Üllői'), a betűk az ültetési hálózatokat (a – 2,5 × 2,5 m; b – 3,0 × 3,0 m; c – 4,0 × 4,0 m) jelölik  
Figure 1: Orthophoto of the experimental plantation at Napkor (16th August 2023). Numbers indicate the clones (1 – PL251; 2 – NK1; 3 – PL040; 4 – NK2; 5 – 'Üllői'), and the letters indicate the planting spacings (a – 2.5 × 2.5 m; b – 3.0 × 3.0 m; c – 4.0 × 4.0 m)

## Drón-alapú felmérések és szenzorparaméterek

A vizsgálat során három UAS-felmérést végeztünk. Az első adatgyűjtésre 2022 februárjában, lombtalan állapotban került sor: egy DJI Phantom 4 típusú drón reptetésével 248 db képet készítettünk, 60 méter magasságból, 1,6 cm/pixel felszíni felbontással (Ground sampling distance = GSD).

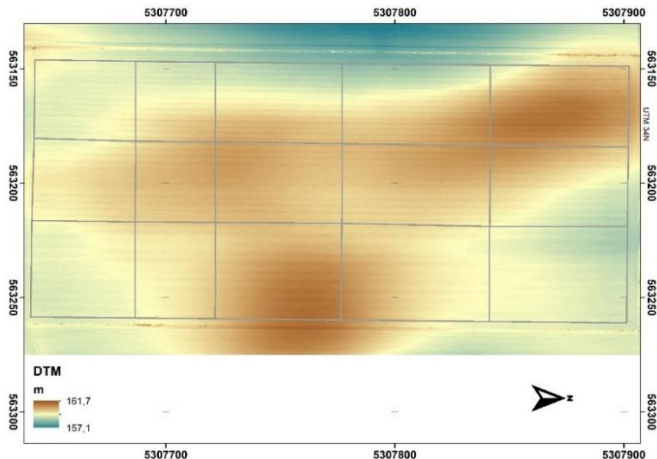
A következőkben a fenti drón felhasználásával lombos fenofázisban végeztük a légifényképezést 2023 augusztusában a fajtajelölt klónok magassági értékük szerinti összehasonlítása miatt. A légifényképezés a fentiekhez hasonlóan 60 méteres magasságból történt, és összesen 882 db képet használtunk fel. Az előző repüléshez képest azért volt szükség lényegesen több képre, mert a fák lombja jelentősen takarta a felszínt, valamint a szomszédos lombokat is. A GSD ismét 1,6 cm/pixel lett.

A területről 2023. augusztus 16-án készítettünk multispektrális ortofotót is. Az adatgyűjtést egy DJI M200 drónnal végeztük, melyre egy MicaSense RedEdge-Mx RED szenzort rögzítettünk. A repülésen 330 felvétel készült, felvételenként 5 hullámtartományban (kék – Blue=B, zöld – Green=G, vörös – Red=R, vörös tartomány felső határa (vörös él) – Red Edge=RE, közeli infravörös – Near-InfraRed=NIR).

Vetületi rendszernek mindhárom esetben az UTM-34-et választottuk. A vetületi illesztéshez földi illesztőpontokat (GCPs – Ground Control Points) használtunk a terepen, melyeket nagy pontosságú, RTK (Real-Time Kinematic)-módban használt SatLab300 geodéziai GNSS vevővel mértünk be, majd ezekkel a koordinátákkal georeferáltuk a fotogrammetriai modellt. A vetületi transzformációk átlagos hibája mindkét esetben körülbelül 1 cm volt (február: 0,7 cm, június: 1,3 cm).

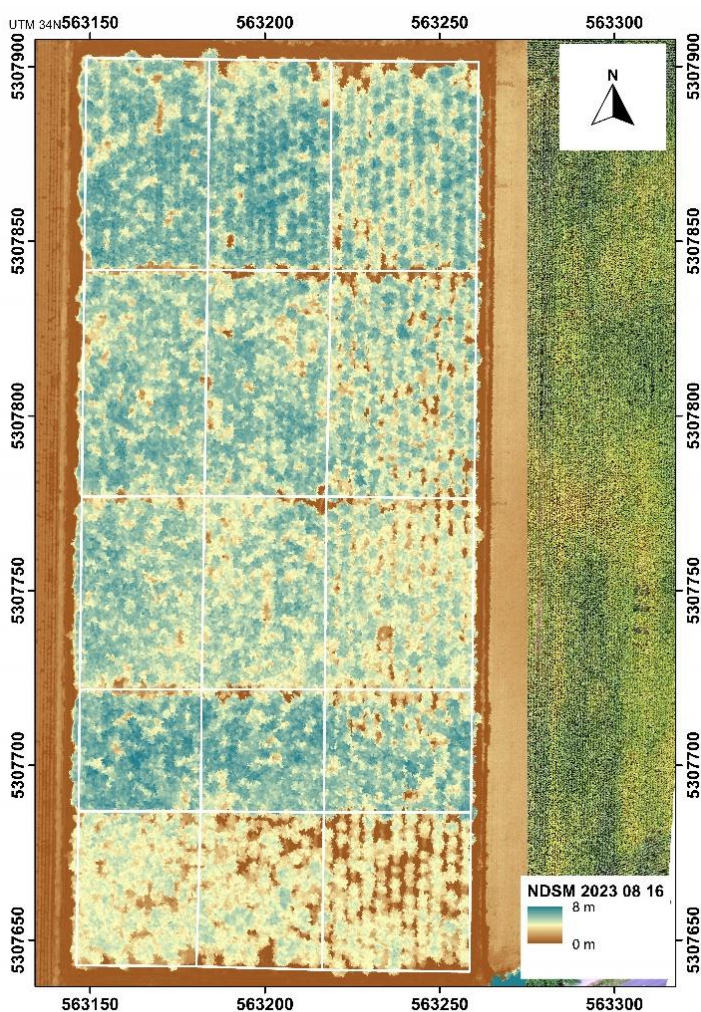
## Adatfeldolgozás

A képeket Agisoft Metashape 1.7 szoftverrel dolgoztuk fel. A 2022. februári felvételekből előállítottuk a felszín pontfelhőjét, mely a földfelszín pontjai mellett tartalmazta a felszínen elhelyezkedő objektumok (itt a fák) pontjait is. Mivel ennél az adatgyűjtésnél számunkra a felszín magassága volt a lényeges, azaz domborzatmodellt akartunk előállítani, ezért leszűrtük a fákhöz tartozó pontokat a Metashape szoftver automata pontfelhő-osztályozó eljárásával. A megmaradt pontok kizárólag a felszínhez tartoznak, így ebből az adatbázisból elkészítettük a terület digitális domborzatmodelljét (DTM – Digital Terrain Model) (2. ábra).



2. ábra: A kísérleti terület domborzatmodellje  
Figure 2: Digital Terrain Model of the experimental site

A 2023. augusztusi felvételek alapján elkészítettük a felszínmodell (DSM – Digital Surface Model), melyben a lombos fák jól detektálhatók voltak. A DSM-ből kivontuk a februári DTM-et, így megkaptuk tisztán a felszínen elhelyezkedő objektumok, azaz a fák magasságait (nDSM – Normalized Digital Surface Model). Az nDSM adatbázisban ArcMAP szoftverben megkerestük a lokális maximumokat, így automata módszerrel detektáltuk az egyes fákat. Mivel a fák lombkoronájának legmagasabb pontja nem minden esetben pontosan középen helyezkedik el, ezért ezek a részletek nem szabályos alakúak lettek. A foltokat vektorizáltuk, majd minden folt centroidjára helyeztünk egy 80 cm átmérőjű kört, ezzel biztosítva azt, hogy biztosan a körön belül legyen minden fa legmagasabb részlete. Az egyes körök területéről zonal statistics eljárással lekérdeztük a legmagasabb értékeket, így megkaptuk minden fa legnagyobb magasságát (3. ábra). Ezek közül a 2,5 m × 2,5 m hálózat fáiból véletlenszerűen kiválasztottunk 30 db-ot klónonként, azaz összesen 150 fát.



3. ábra: Normalizált felszínmodell (nDSM)  
Figure 3: Normalized Digital Surface Model (nDSM)



A multispektrális felvételek szoftveres feldolgozását követően az adatokat MS Excel fájlba exportáltuk, majd különböző VI-eket (NDVI, GNDVI, NDRE, LCI, CCCI) számoltunk az alábbi képletek segítségével.

$$\text{NDVI (Rouse et al. 1974 alapján)} = (\text{NIR-R})/(\text{NIR+R})$$

$$\text{GNDVI (Gitelson et al. 1996 alapján)} = (\text{NIR-G})/(\text{NIR+G})$$

$$\text{NDRE (Gitelson és Merzylak 1994 alapján)} = (\text{NIR-RE})/(\text{NIR+RE})$$

$$\text{LCI (Datt 1999 alapján)} = (\text{NIR-RE})/(\text{NIR+R})$$

$$\text{CCCI (Long et al. 2009 alapján)} = \text{NDRE/NDVI}$$

Úgy, ahogy a magasságmérésnél, ebben az esetben is a  $2,5 \times 2,5$  m-es ültetési hálózathoz kiválasztott 30 mintafa/klón VI értékeit vizsgáltuk.

### Statisztikai elemzés

A páronkénti összehasonlításra LSD és Games-Howell tesztek alkalmaztunk. Az NDVI értékek esetében, azok túltelítődése miatt részletes statisztikai elemzés nem történt.

A korreláció és regresszió analízis esetében mindhárom ültetési hálózat klónonként 30 mintafaját (összesen 450 fa) vizsgáltuk Spearman-féle módszerrel.

## EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

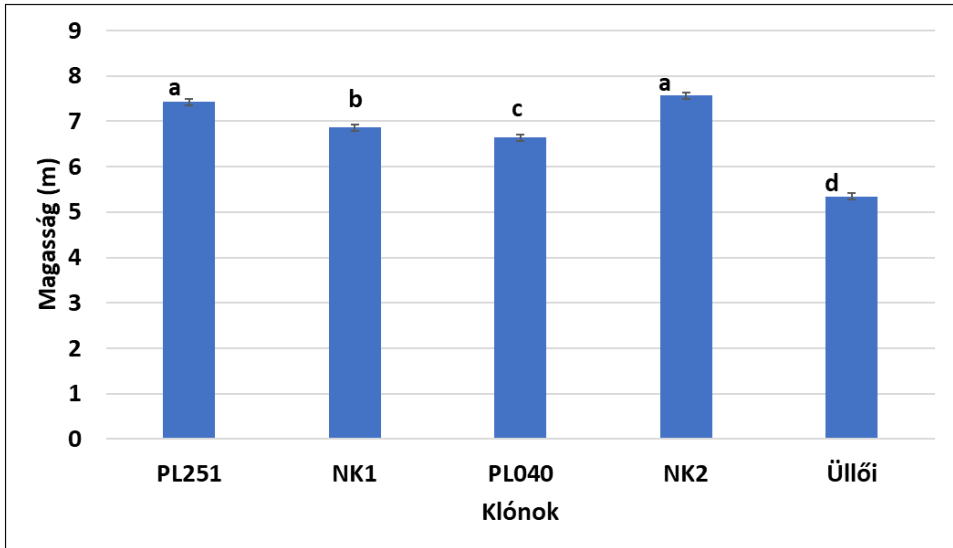
A légi fotogrammetriával és a terepi eszközökkel végzett magasságmérés eredményei közötti korrelációt, így a drónokkal történő átlagos famagasság meghatározásának alkalmazhatóságát számos tanulmány igazolta (Krause et al. 2019, Moe et al. 2020).

A vizsgált akáklónok magassági értékei között szignifikáns ( $p = 0,05$ ) eltérés mutatkozott. Legjobb az NK2-es (7,6 m) és PL251-es (7,4 m) fajtajelölt klónok, leggyengébbnek az 'Üllői' akác (5,3 m) bizonyult. Az NK1 esetében 6,9 m, még a PL040 jelzésű klónnál 6,6 m volt a vonatkozó érték (4. ábra). Ha ezt az eredményt összehasonlítjuk a korábbi terepi mérésekével, megállapítható a hasonló tendencia, miszerint a  $2,5 \times 2,5$  m-es ültetési hálózatban az NK2-es és a PL251-es klónok a legmagasabbak és az 'Üllői' a legalacsonyabb (Ábri et al. 2023b).

A VI értékek alkalmasak a fák növekedésének és egészségi állapotának monitorozására (Xue és Su 2017, Ecke et al. 2022). A fajtajelölt klónok igen magas NDVI és GNDVI értékeket mutattak, mely megfelelő vitalitásra utal. Ugyanakkor, érdemes megjegyezni, hogy az NDVI esetében a sűrű növényzet (magas biomasszatömeg) miatt túltelítődés figyelhető meg. A VI-k közötti (NDVI-NDRE és NDVI-LCI) eltérések a különböző hullámhossz tartományok miatti különbségekre vezethetők vissza.

Az 1. táblázatot megvizsgálva látható, hogy mind a négy VI esetében a PL251 klón bizonyult a legjobbnak (NDVI:  $0,9360 \pm 0,0050$ ; GNDVI:  $0,8027 \pm 0,0091$ ; LCI:  $0,6889 \pm 0,0117$ ; NDRE:  $0,5530 \pm 0,0134$ ), ugyanakkor NDVI tekintetében az NK1-től (NDVI:  $0,9347 \pm 0,0051$ ), GNDVI esetében az NK2-től (GNDVI:  $0,7964 \pm 0,0106$ ) nem különbözött 0,05 szignifikancia szint mellett. Leggyengébbnek mindegyik vizsgált mutatóban a PL040 mutatkozott,  $0,9260 \pm 0,0050$  NDVI és  $0,7849 \pm 0,0064$  GNDVI, valamint  $0,6536 \pm 0,0091$  LCI és  $0,5137 \pm 0,0110$  NDRE értékekkel. A kontroll Üllői akác NDVI ( $0,9323 \pm 0,0050$ ) és GNDVI ( $0,7911 \pm 0,0154$ ) értékeit csak a PL251-es klón, LCI

értékét ( $0,6566 \pm 0,0180$ ) a PL251 ( $0,6889 \pm 0,0117$ ), NK1 ( $0,6644 \pm 0,0174$ ) és NK2 ( $0,6682 \pm 0,0151$ ) klónok múlták felül jelentősen ( $p = 0,05$  szinten). Az Üllői NDRE értékét ( $0,5140 \pm 0,0214$ ) az NK2 ( $0,5297 \pm 0,0169$ ) és a PL251 ( $0,5530 \pm 0,0134$ ) klónok haladták meg szignifikánsan ( $p = 0,05$ ).



4. ábra: A vizsgált klónok ( $n = 30$  fa/klón) összehasonlítása magasság (m) szerint a  $2,5 \times 2,5$  m-es ültetési hálózatban,  $\pm$ standard hiba, a betűk a klónok közötti szignifikáns ( $p=0,05$ ) különbséget jelölik

Figure 4: Comparison of the clones ( $n=30$  trees per clone) by UAV height measurement (planting spacing:  $2,5 \times 2,5$  m),  $\pm$ standard error, small letters indicate significant differences ( $p=0.05$ ) between the clones

1. táblázat: A vizsgált akácklónok ( $n=30$  fa/klón) összehasonlítása vegetációs index (NDVI, GNDVI, NDRE, LCI) értékeik alapján a  $2,5 \times 2,5$  m-es ültetési hálózatban, átlag $\pm$ szórás, a betűk a klónok közötti szignifikáns ( $p = 0,05$ ) különbséget jelölik

Table 1: Comparison of the clones ( $n=30$  trees per clone) by vegetation indices (NDVI, GNDVI, NDRE, LCI) at planting spacing  $2,5 \times 2,5$  m, mean $\pm$ standard deviation, small letters indicate the significant differences ( $p=0.05$ ) between the clones

Klón	n	NDVI	GNDVI	NDRE	LCI
NK1	30	<b>0,9347 (<math>\pm 0,0051</math>)</b>	0,7888 ( $\pm 0,0134$ ) <sup>b</sup>	0,5243 ( $\pm 0,0205$ ) <sup>bc</sup>	0,6644 ( $\pm 0,0174$ ) <sup>b</sup>
NK2	30	0,9280 ( $\pm 0,0041$ )	<b>0,7964 (<math>\pm 0,0106</math>)</b> <sup>ab</sup>	0,5297 ( $\pm 0,0169$ ) <sup>b</sup>	0,6682 ( $\pm 0,0151$ ) <sup>b</sup>
PL040	30	0,9260 ( $\pm 0,0050$ )	0,7849 ( $\pm 0,0064$ ) <sup>bc</sup>	0,5137 ( $\pm 0,0110$ ) <sup>c</sup>	0,6536 ( $\pm 0,0091$ ) <sup>c</sup>
PL251	30	<b>0,9360 (<math>\pm 0,0050</math>)</b>	<b>0,8027 (<math>\pm 0,0091</math>)</b> <sup>a</sup>	<b>0,5530 (<math>\pm 0,0134</math>)</b> <sup>a</sup>	<b>0,6889 (<math>\pm 0,0117</math>)</b> <sup>a</sup>
Üllői	30	0,9323 ( $\pm 0,0050$ )	0,7911 ( $\pm 0,0154$ ) <sup>b</sup>	0,5140 ( $\pm 0,0214$ ) <sup>c</sup>	0,6566 ( $\pm 0,0180$ ) <sup>c</sup>



A klónok ( $n = 30$  fa/klón/ültetési hálózat, összesen 450 fa) átlagos magassága és vegetációs index értékei közötti összefüggést is vizsgáltuk. A Spearman-féle korrelációs analízis eredményét a 2. táblázatban foglaltuk össze. A vizsgált változók között minden esetben kimutatható kapcsolat volt, mely  $p = 0,01$  szinten szignifikáns. A legszorosabb pozitív korreláció a(z) LCI és NDRE ( $r=0,99$ ), LCI és GNDVI ( $r=0,91$ ), valamint a GNDVI és NDRE ( $r=0,90$ ) értékek között mutatkozott. Közepes erősségű kapcsolatot figyeltünk meg az NDVI-GNDVI ( $r=0,51$ ), NDVI-NDRE ( $r=0,56$ ) és NDVI-LCI ( $r=0,61$ ) esetében, továbbá az átlagos magasság (H) értékek és vörös él spektrumot alkalmazó VI-k (H-NDRE:  $r=0,59$ ; H-LCI:  $r=0,59$ ) között is ezt tapasztaltuk. A másik kettő VI és a magasság adatok között igen gyenge (H-NDVI:  $r=0,23$ ), illetve gyenge (H-GNDVI:  $r=0,41$ ) korrelációt figyeltünk meg.

2. táblázat: A vizsgált akác fajtajelölt klónok ( $n = 450$ ) magasság és vegetációs index értékei közötti korreláció ( $p = 0,01$ )  
 Table 2: Correlation of tree height and vegetation indices values, data for 450 sample trees. The correlation is significant at  $p = 0.01$  level

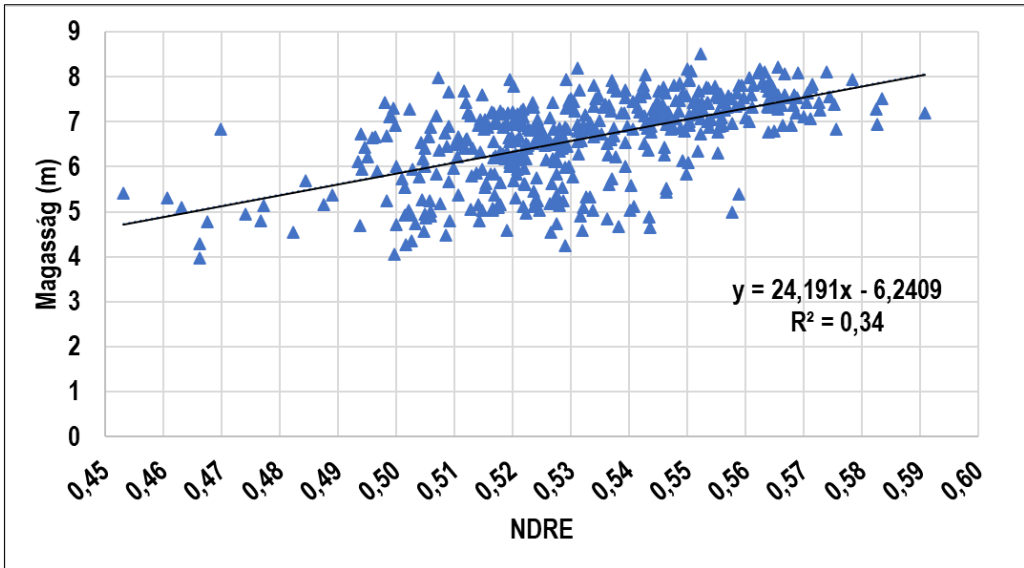
	H	NDVI	GNDVI	NDRE	LCI
H	1,00	0,23	0,41	0,59	0,59
NDVI	0,23	1,00	0,51	0,56	0,61
GNDVI	0,41	0,51	1,00	0,90	0,91
NDRE	0,59	0,56	0,90	1,00	0,99
LCI	0,59	0,61	0,91	0,99	1,00

Jelmagyarázat: H=magasság; a különböző színek a korreláció erősségét jelölik: fekete=igen laza vagy nincs kapcsolat, kék=laza, zöld=közepes, piros=igen szoros

Note: H=height; different colors indicate the strength of correlation: black = very weak or no correlation, blue = weak, green = moderate, red = very strong

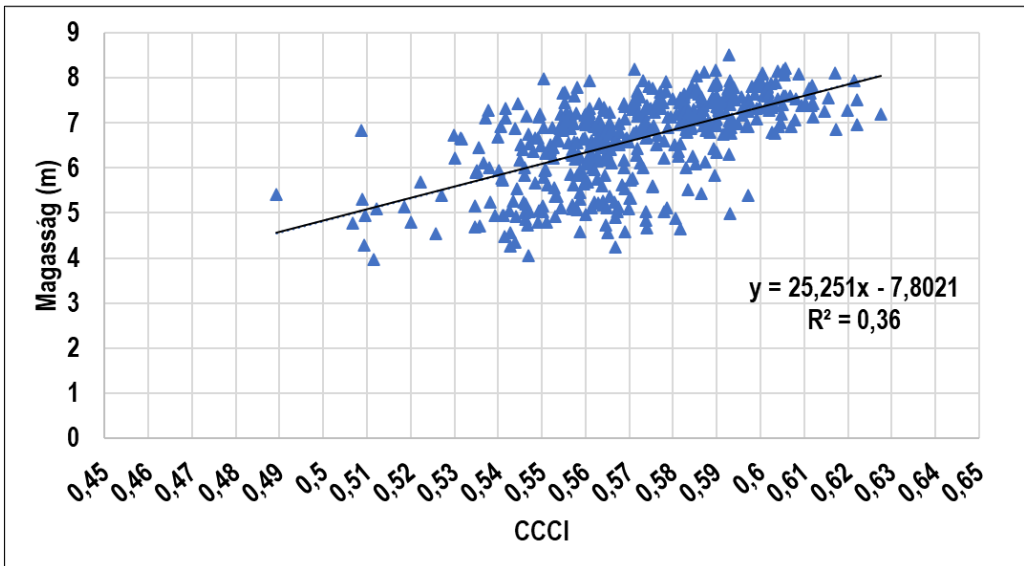
Ahogy az a korrelációs mátrixban (2. táblázat) látható a magassági értékek leginkább a vörös él hullámhossz tartományt használó vegetációs indexekkel korrelál. Ezek közül is a H-NDRE kapcsolat a legszorosabb. A vonatkozó értékeket lineáris regresszióval is vizsgáltuk, az eredmény ( $R^2 = 0,34$ ) gyenge-közepes kapcsolatot feltételez (5. ábra).

Az utóbbi évtizedekben több tanulmány foglalkozott az ún. Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) értékkel, mely az NDRE és NDVI hányadosa és a lombzat egységnyi területére eső klorofilltartalmára lehet belőle következtetni (Fitzgerald et al. 2006). A CCCI jobban korrelál a levél klorofill mennyiségével, mint az NDRE vagy az NDVI (Long et al. 2009).



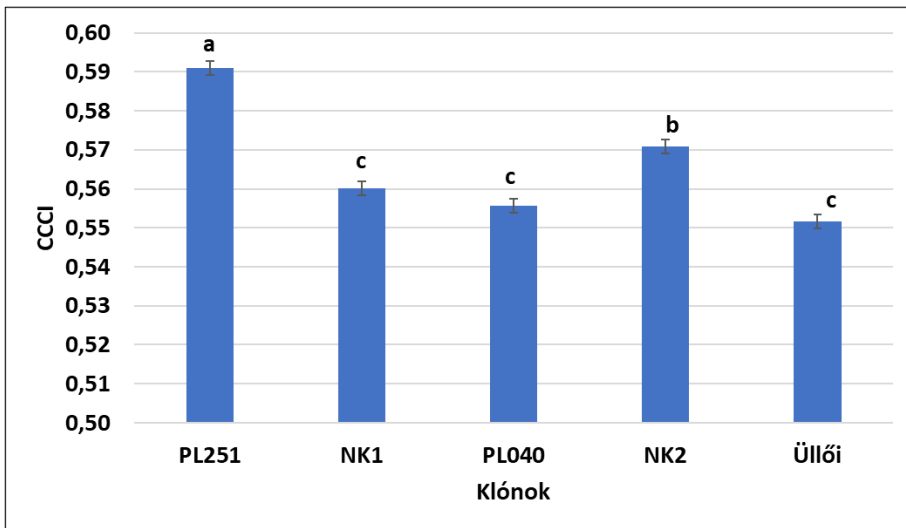
5. ábra: Lineáris regresszió a magasság és NDRE értékek között  
Figure 5: Linear regression between height and NDRE values

A vizsgált akácklónok magasság és CCCI értékei is viszonylag jól illeszkedtek az egyenesre, közöttük is gyenge-közepes, de valamivel erősebb kapcsolatot találtunk ( $R^2 = 0,36$ ), mint a H-NDRE esetében (6. ábra).



6. ábra: Lineáris regresszió a magasság és CCCI értékek között  
Figure 6: Linear regression between height and CCCI values

A fajtajelölt klónokat ( $2,5 \times 2,5$  m-es ültetési hálózattól 30 fa/klón) összehasonlítottuk CCCI értékük alapján. A statisztikai kiértékelés (ANOVA, LSD post hoc teszt) eredménye azt mutatta, hogy a két legjobb növekedésű klón, azaz a PL251 (0,5909) és NK2 (0,5709) rendelkezett a legmagasabb CCCI értékkel és a legalacsonyabb magasságú Üllői a legkisebbel (0,5517). Ugyanakkor az NK1 (0,5602) és PL040 (0,5557) klónok szignifikánsan ( $p = 0,05$ ) nem különböztek a kontroll Üllői akáctól (7. ábra).



7. ábra: A vizsgált akácklónok ( $n=30$  fa/klón) összehasonlítása CCCI értékeik alapján a  $2,5 \times 2,5$  m-es ültetési hálózatban, átlag $\pm$ standard hiba, a betűk a klónok közötti szignifikáns ( $p = 0,05$ ) különbséget jelölik

Figure 7: Comparison of the studied black locust clones ( $n = 30$  trees per clone) based on their CCCI values at  $2.5 \times 2.5$  m planting spacing, mean  $\pm$  standard error; letters indicate significant differences ( $p = 0.05$ ) among clones

Az UAS-ok erdőgazdálkodásban történő alkalmazásának előnyei a következők: (1) alacsony üzemeltetési költségek és nagy intenzitású adatgyűjtés; (2) számos, feladatorientáltan adaptálható szenzor szerelhető rájuk; (3) az adatgyűjtés megtervezése, a nem megfelelő időjárás körülmények elkerülése és az adatok igény szerinti rendelkezésre állásának biztosítása; valamint (4) a valós idejű műveletekben való felhasználás lehetősége. A különböző szenzorokkal felszerelt drónok döntéshozatalban betöltött szerepe egyre fontosabbá válik a kutatók és az erdészek számára (Guimarães et al. 2020). Az UAS-alapú állományfelvételekről, azok előnyeiről a hazai erdészeti szakirodalomban is számos alkalommal beszámoltak (Pataki és Ruff 2015a, 2015b, Kertész 2023, Koren 2023).

A fentebb leírtakkal kapcsolatban meg kell említeni, hogy hazánkban a pilóta nélküli légi járművek használatáról szóló szabályozás – 38/2021. (II. 2.) Korm. rendelet a pilóta nélküli állami légi járművek repüléséről – rendkívül összetett, kevésbé átlátható, ami nehezíti a gyakorlatban történő alkalmazásának elterjedését.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A napkori akác klónkísérletben végzett UAS-alapú felvételezés eredményei alapján megállapítható, hogy a módszer alkalmas az erdészeti kísérleti állományokban magasság mérésére és vegetációs indexek vizsgálatára. A klónok között szignifikáns különbségeket lehetett kimutatni. Magasság tekintetében az NK2 és PL251 fajtajelölt klónok bizonyultak a legjobbnak 7,6 m és 7,4 m értékekkel, a vegetációs indexek alapján a PL251 mutatta a legjobb eredményeket (NDVI: 0,94; GNDVI: 0,80; LCI: 0,69; NDRE: 0,55; CCCI: 0,57). A vizsgált fajtajelölt klónok magasság és NDRE, LCI, valamint CCCI értékei között közepes erősségű, a magasság és GNDVI között laza kapcsolat (korreláció) mutatkozott.

A vizsgálat célja vegetatív úton szaporított akácklónok és egy államilag elismert fajta növekedési, valamint vegetációs index (VI) értékeinek összehasonlítása volt UAS-alapú távérzékelési módszerekkel. A felmérések három időpontban történtek: 2022 februárjában lombtalan állapotban digitális domborzatmodell (DTM), 2023 augusztusában lombos fenofázisban digitális felszínmodell (DSM) és normalizált felszínmodell (nDSM), továbbá 2023 augusztusában multispektrális ortofotó előállítás céljából.

Az eredmények alapján a vizsgált klónok között szignifikáns különbségek voltak kimutathatók mind a magassági adatok, mind a vegetációs indexek tekintetében. A legnagyobb növekedést az NK2 és a PL251 klónok mutatták (7,6 m és 7,4 m értékekkel), míg a legalacsonyabb értékeket az 'Üllői' akác esetében mértük. A vegetációs indexek közül a PL251 (NDVI: 0,94; GNDVI: 0,80; LCI: 0,69; NDRE: 0,55; CCCI: 0,57) mutatta a legjobb eredményeket. A magassági adatokkal legerősebb korrelációt az NDRE és az LCI, valamint az NDVI és NDRE értékekből származtatott CCCI mutatta.

Az UAS-technológia és a kapcsolódó fotogrammetriai, illetve multispektrális feldolgozási módszerek alkalmazása lehetővé tette az akácklónok növekedési és élettani jellemzőinek objektív, nagy pontosságú és hatékony értékelését. Az eredmények alátámasztják a módszertan gyakorlati használhatóságát akácnevelési programokban és ültetvény-szintű döntéstámogatásban. A jövőbeli vizsgálatok során indokolt a hosszabb időtávú monitorozás, valamint a vegetációs indexek és a növényélettani paraméterek közötti összefüggések részletes elemzése.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk megköszönni Támba Miklósnak és a Napkori Erdőgazdák Zrt. munkatársainak, hogy biztosították a kísérleti területet, az akáccsemetéket, valamint a klónkísérlet fenntartásával kapcsolatos munkákat.

Továbbá a szerzők köszönetüket fejezik ki a bírálóknak értékes észrevételeikért és javaslataikért, amelyek jelentősen hozzájárultak a kézirat szakmai minőségének és tudományos értékének növeléséhez.

## 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): 292. <https://doi.org/10.3390/f13020292>
- Ábri T., Cseke K., Keserű Z., Porcsin A., Szabó F. M. & Rédei K. 2023a: Breeding and improvement of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) with a special focus on Hungary: a review. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 16(5): 290. <https://doi.org/10.3832/IFOR4254-016>
- Ábri T., Borovics A., Csajbók J., Kovács E., Koltay A., Keserű Z. & Rédei K. 2023b: Differences in the Growth and the Ecophysiology of Newly Bred, Drought-Tolerant Black Locust Clones. *Forests* 14(9): 1802. <https://doi.org/10.3390/f14091802>
- Bannari A., Morin, D., Bonn, F. & Huete A. R. 1995: A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13(1-2): 95-120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Borovics A., Keserű Zs., Rédei K., Ábri T., Rásó J. & Tamba M. 2022: Szinkronban a gyakorlat és a kutatás az akáctermeztetés innovációs fejlesztésében – A Napkori Erdőgazdák Zrt. és a SoE ERTI együttműködése. *Erdészeti Lapok* 157(3): 86-88.
- Bronson K. F., Conley M. M., French A. N., Hunsaker D. J., Thorp K. R. & Barnes E. M. 2020: Which active optical sensor vegetation index is best for nitrogen assessment in irrigated cotton? *Agronomy Journal* 112(3): 2205-2218. <https://doi.org/10.1002/agj2.20120>
- Burkhardt H. E., Avery T. E. & Bullock, B. P. 2018: *Forest measurements*. Waveland Press, Long Grove.
- Csajbók J., Buday-Bódi E., Nagy A., Fehér Z. Z., Tamás A., Virág I. C. et al. 2022: Multispectral Analysis of Small Plots Based on Field and Remote Sensing Surveys – A Comparative Evaluation. *Sustainability* 14(6): 3339. <https://doi.org/10.3390/su14063339>
- Dainelli R., Toscano P., Di Gennaro S. F. & Matese A. 2021: Recent advances in Unmanned Aerial Vehicles forest remote sensing – A systematic review. Part II: Research applications. *Forests* 12(4): 397. <https://doi.org/10.3390/f12040397>
- Datt B. 1999: A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves. *Journal of Plant Physiology* 154(1): 30-36. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(99\)80314-9](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(99)80314-9)
- Ecke S., Dempewolf J., Frey J., Schwaller A., Endres E., Klemm H. J. et al. 2022: UAV-based forest health monitoring: A systematic review. *Remote Sensing* 14(13): 3205. <https://doi.org/10.3390/rs14133205>
- Fitzgerald G. J., Rodriguez D., Christensen L. K., Belford R., Sadras V. O. & Clarke T. R. 2006: Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agriculture* 7: 233-248. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9011-z>
- Gitelson A. & Merzlyak M. N. 1994: Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology* 143(3): 286-292. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81633-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81633-0)
- Gitelson A. A., Kaufman Y. J. & Merzlyak M. N. 1996: Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58(3): 289-298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Guimarães N., Pádua L., Marques P., Silva N., Peres E. & Sousa J. J. 2020: Forestry remote sensing from unmanned aerial vehicles: A review focusing on the data, processing and potentialities. *Remote Sensing* 12(6): 1046. <https://doi.org/10.3390/rs12061046>
- Janda T. 2023: *A növények és a stressz – Vészhelyzet, válasz, védekezés*. Libri Könyvkiadó Kft., Budapest.
- Jorge J., Vallbé M. & Soler J. A. 2019: Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images. *European Journal of Remote Sensing* 52(1): 169-177. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- Kertész P. 2023: Mindennapi munka az erdőgazdálkodásban – drónnal. *Erdészeti Lapok* 158(6): 256-259.
- Krause S., Sanders T. G., Mund J. P. & Greve K. 2019: UAV-based photogrammetric tree height measurement for intensive forest monitoring. *Remote Sensing* 11(7): 758. <https://doi.org/10.3390/rs11070758>
- Koren B. 2023: Drónok használata az erdészeti távérzékelésben – Általános iránymutatás ortofotó készítéséhez. *Erdészeti Lapok* 158(9): 359-361.
- Long D. S., Eitel J. U. & Huggins D. R. 2009: Assessing nitrogen status of dryland wheat using the canopy chlorophyll content index. *Crop Management* 8(1): 1-8. <https://doi.org/10.1094/CM-2009-1211-01-RS>
- Nicolescu V. N., Hernea C., Bakti B., Keserű Z., Antal B. & Rédei K. 2018: Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) as a multi-purpose tree species in Hungary and Romania: a review. *Journal of Forestry Research* 29: 1449-1463. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0626-5>

- Moe K. T., Owari T., Furuya N. & Hiroshima T. 2020: Comparing individual tree height information derived from field surveys, LiDAR and UAV-DAP for high-value timber species in Northern Japan. *Forests* 11(2): 223. <https://doi.org/10.3390/f11020223>
- Pataki Zs. & Ruff J. 2015a: Drónok használata az erdészeti távérzékelésben I. *Erdészeti Lapok* 150(6): 168-169.
- Pataki Zs. & Ruff J. 2015b: Drónok használata az erdészeti távérzékelésben II. *Erdészeti Lapok* 150(10): 297-300.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A. & Deering D. W. 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication* 351(1): 309.
- Torresan C., Berton A., Carotenuto F., Di Gennaro S. F., Gioli, B., Matese A. et al. 2017: Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing* 38(8-10): 2427-2447. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
- Xue J. & Su B. 2017: Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

*Érkezett: 2025.06.23.*

*Közlésre elfogadva: 2025.09.22.*