

NDVI és terméshozam összefüggésvizsgálata kukoricában különböző fenológiai fázisokban eltérő repülési beállításokkal

LENGYEL LEHEL - SZÉLES ADRIENN - BOJTOR CSABA -
HARSÁNYI ENDRE - NAGY JÁNOS - ILLÉS ÁRPÁD

Debreceni Egyetem MÉK

Földhasznosítási, Műszaki és Precíziós Technológiai Intézet, Debrecen

Összefoglalás

Kutatásunk során a mezőgazdaság egyik legfontosabb kihívására kerestünk megoldásokat. A világ népességének növekedése, a termőterületek csökkenése és leromlása új kihívások elé állítja az agráriumot. A gabonanövények kulcsfontosságú szerepet töltenek be az élelmezésben, közülük a kukorica kiemelkedő jelentőséggel bír, mivel világszerte termesztik. A modern mezőgazdaságban a precíziós gazdálkodás egyre nagyobb szerepet kap, így a távérzékelés és az adatelemzés kiemelt fontosságúvá vált.

A 2024-es év időjárási körülményei eltértek a megszokottól: a tavasz csapadékos és meleg volt, míg a nyári hónapok rendkívüli forróságot és kiemelkedő számú hőségnapot hoztak. Kísérleteinket a kukorica fejlődésének négy különböző fenológiai fázisában végeztük (V5, V10, R1 és R3). A vegetációs időszakon kívül háromféle repülési beállítást alkalmaztunk: RTK nélküli, RTK-val végzett, valamint RTK és magasságkövetés kombinációjával végzett méréseket. A vizsgálat során három különböző FAO-számú hibridet elemeztünk, és a kontroll mellett öt eltérő tápanyagszinten értékeltük az eredményeket.

Megfigyeltük, hogy a korai (V5 és V10) fenológiai fázisokban szorosabb összefüggés mutatkozott az NDVI értékek és a terméshozam között, ami az év kedvező tavaszi és kora nyári időjárásával magyarázható. A repülési beállítások három mérési időpontban hasonló eredményeket mutattak, azonban az R1 fenológiai fázisban eltérések jelentkeztek. Feltételezhető, hogy a virágzás során a levelekre rakódó nagymennyiségű pollen befolyásolta az NDVI értékeket. Emellett az RTK és

magasságkövetéssel végzett felvételek ortomozaik-készítése időigényesebbnek bizonyult, és a használt WebODM szoftverrel néhány esetben többszöri próbálkozást igényelt. Eredményeink értékes adatokat szolgáltatnak, és megfelelő kiindulópontként szolgálnak további kutatásokhoz.

Kulcsszavak: UAV, multispektrális, tartamkísérlet, vegetációs index, RTK

Correlation study of NDVI and yield in maize at different phenological stages with different flight settings

L. LENGYEL – A. SZÉLES – CS. BOJTOR – E. HARSÁNYI – J. NAGY – Á. ILLÉS
University of Debrecen, Faculty of Agricultural and Food Sciences and
Environmental Management, Institute of Land Use, Engineering and
Precision Farming Technology, Debrecen

Summary

In this research, the authors sought solutions to one of the most important challenges facing agriculture. The growth of the world's population and the decline and degradation of arable land pose new challenges for agriculture. Cereal crops play a key role in food production, with maize being of particular importance as it is grown worldwide. Precision farming is playing an increasingly important role in modern agriculture, making remote sensing and data analysis of paramount importance.

The weather conditions in 2024 were unusual: spring was rainy and warm, while the summer months were exceptionally hot with an above-average number of heat days. The experiments were conducted during four different phenological stages of corn development (V5, V10, R1, and R3). Outside the growing season, we used three types of flight settings: measurements without RTK, with RTK, and with a combination of RTK and altitude tracking. During the study, three hybrids with different FAO numbers were analyzed, and the results were evaluated at five different nutrient levels in addition to the control.

It was observed that in the early (V5 and V10) phenological phases, there was a closer correlation between NDVI values and crop yield, which can be explained by the favorable spring and early summer weather conditions of the year. The flight

settings showed similar results at three measurement times, but differences appeared in the R1 phenological phase. It can be assumed that the large amount of pollen deposited on the leaves during flowering influenced the NDVI values. In addition, the creation of orthomosaics from RTK and altitude tracking images proved to be more time-consuming and, in some cases, required multiple attempts with the WebODM software used. These results provided valuable data and serve as a good starting point for further research.

Keywords: UAV, multispectral, long-term experiment, vegetation index, RTK

Bevezetés

Napjaink mezőgazdaságának olyan kihívásokkal kell megküzdenie, amelyekre korábban nem volt példa. Az egyre gyorsabban gyarapodó népesség és a klímaváltozás miatt bekövetkező szélsőséges időjárási jelenségek együttesen növelik az agrárágazat terheit (*Balázs et al. 2025*). A világ népessége várhatóan az elkövetkező ötven-hatvan évben tovább növekszik, és 2080 körül éri el csúcspontját, amikor a Föld lakossága megközelítheti a 10,3 milliárd főt (*UN DESA 2024*). Mivel a termőföldek bővítésének lehetőségei korlátozottak, a fenntartható élelmiszertermelés érdekében kulcsfontosságú a meglévő területek hatékonyabb hasznosítása (*Foley et al. 2011*).

A gabonanövények termesztése alapvető szerepet játszik a globális élelmiszerbiztonság fenntartásában (*Rátonyi et al. 2022*). A kukorica – mint az egyik legfontosabb kultúrnövény – kiemelt szerepet tölt be ebben a folyamatban, mivel világszerte termesztik, és alapanyagot biztosít az élelmiszeripar, a takarmányozás és az ipar számára egyaránt. Ugyanakkor termesztése egyre nagyobb kihívások elé állítja a gazdálkodókat, mivel a mezőgazdasági termelés nehezen alkalmazkodik az éghajlati és időjárási változásokhoz (*Wilson et al. 2022*). A precíziós növénytermesztés hatékonyságának növelése kulcsfontosságú feladat a modern gazdálkodásban (*Neményi 2018*).

A precíziós mezőgazdaság jelentős mértékben hozzájárul ahhoz, hogy a szántóföldi gazdálkodás alkalmazkodni tudjon a növekvő környezeti, gazdasági, piaci és társadalmi kihívásokhoz (*Stafford 2000*). A precíziós mezőgazdaság jelentősen összefügg a technológia és a tudomány

eredményeivel, és azoknak a fizikai megvalósulásával (Nagy és Búvár 2022) A drónokban található infravörös érzékelők alkalmasak a növények egészségi állapotának felmérésére, lehetővé téve a gazdák számára, hogy gyorsan reagáljanak (Ahirwar et al. 2019). A spektrális képalkotással végzett kiváló minőségű távérzékelés drónokkal különösen izgalmas lehetőségeket nyújt a precíziós mezőgazdaság számára (Kulbacki et al. 2018). Empirikus vizsgálatok szerint a vegetációs indexek, amelyek a spektrális visszaverődés változásait mérik, szorosan összefüggenek a növények levélfelületének, biomasszájának és élettani működésének jellemzőivel.

Ezek az indexek, különösen a szélessávú és közeli infravörös tartományban alkalmazottak, megbízhatóan jelzik a növényekben található klorofill mennyiségét és az energiaelnyelést (Myneni et al. 1995). A normalizált differencia vegetációs index (NDVI) az egyik legelterjedtebb és leggyakrabban alkalmazott vegetációs index (Jiang et al. 2006). A népszerűsége annak köszönhető, hogy bármely olyan multispektrális szenzorral kiszámítható, amely rendelkezik látható és közeli infravörös (NIR) sávval. Matematikailag az NDVI (Huang et al. 2021) a következőképpen írható le:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red).$$

A termesztett növények várható hozamának előzetes becslése kulcsfontosságú a betakarítási időpontot meghatározó döntések megalapozásához, ezért ez az agronómiai kutatások egyik lényeges területe (Spitkó et al. 2022).

Anyag és módszer

Kutatásunkat a Debreceni Egyetem Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telepén végeztük, azon belül az 1983-ban létrehozott komplex trágyázási tartamkísérletben, ahol több mint 40 éve folynak kukorica tápanyag- és hibridkísérletek. A kísérleti területen az alpművelés szántással történt, amelyet egy menetben végeztünk el a magágy előkészítésével. A vetésre 2024. április 11-én, 73 400 tő/ha tőszámmal került sor, míg a betakarítást augusztus 20-án hajtottuk végre. A rendkívül száraz július és augusztus (1. ábra) miatt összesen 100 mm öntözővizet juttattunk ki lineár öntözőrendszer segítségével.

1. ábra. A 2024-es tenyészidőszak havi csapadékösszegeinek alakulása a csapadékösszegek sokéves átlagával összehasonlítva (Debrecen-Látókép, 2024)

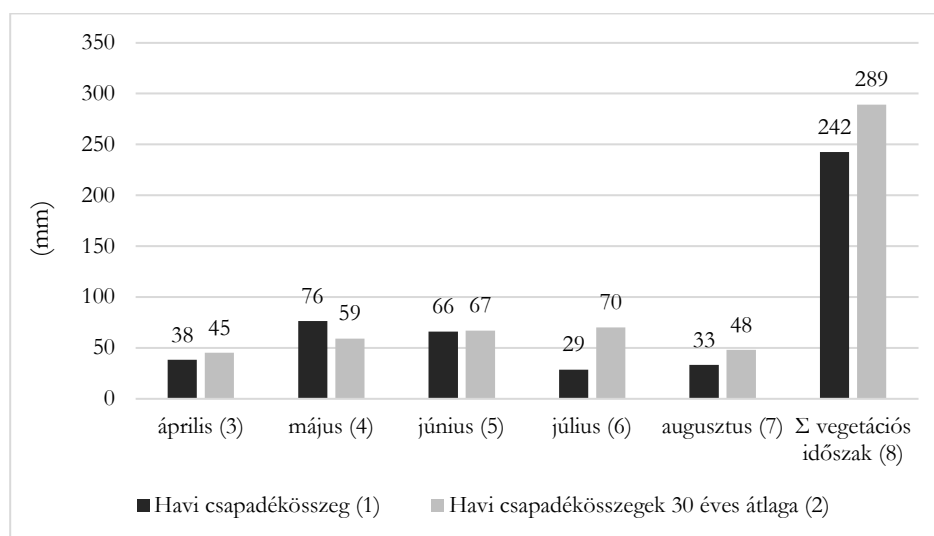


Figure 1. Monthly precipitation sums for the 2024 growing season compared to the long-term average precipitation sums (Debrecen-Látókép, 2024). (1) Monthly precipitation sum, (2) 30-year average of monthly precipitation sums, (3) April, (4) May, (5) June, (6) July, (7) August, (8) Σ vegetation period

2024-ben a vizsgálati időszakban a hőmérséklet jelentősen meghaladta az átlagos értékeket, különösen áprilisban és augusztusban (2. ábra). Az augusztusi hőmérséklet 2,42 Celsius-fokkal, az áprilisi pedig 1,72 Celsius-fokkal volt magasabb a sokéves átlagnál. A hőségnapok száma elérte az 51-et. A tavaszi átlag feletti hőösszeg hatására a vegetációs időszak mintegy 10 nappal közelebb tolódott a vetés időpontjához (Hungaromet 2024).

Kutatásunk során három különböző FAO-számú hibridet vizsgáltunk, amelyeket érési idejük alapján választottunk ki. Az első egy 470 FAO-számú korai érésű, a második egy 520 FAO-számú késői érésű, míg a harmadik egy 420 FAO-számú középkorai érésű hibrid volt. A kísérleti területen a foszfor- és káliumtrágyázás ősszel történt, míg a nitrogén műtrágya kijuttatása tavasszal, vetés előtt, precíz zón parcellaszintű kijuttatási technológiával zajlott. A vizsgálatok során kontroll és öt különböző növekvő nitrogéndózisú kezelést alkalmaztunk (1. táblázat).

2. ábra. A 2024-es tenyészidőszak hőmérséklet értékeinek alakulása a sokéves átlaggal összehasonlítva (Debrecen-Látókép, 2024)

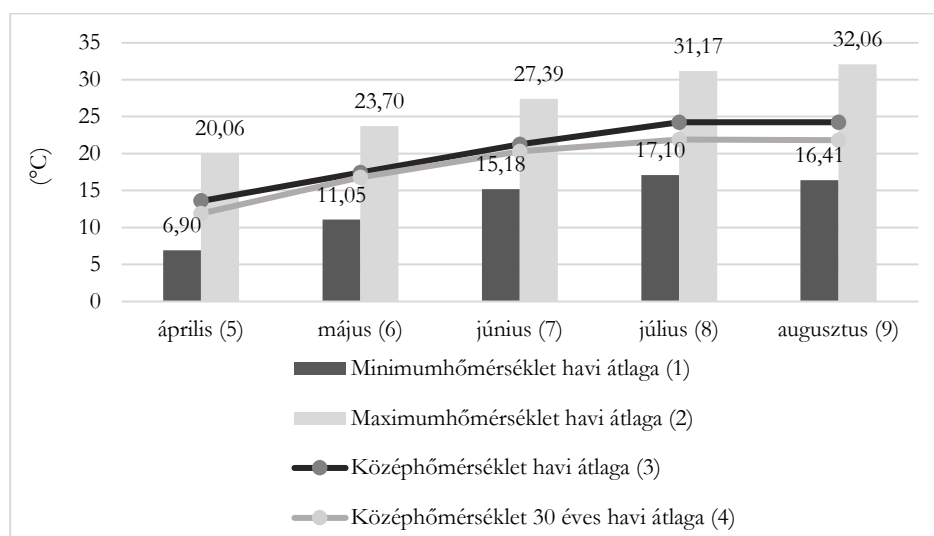


Figure 2. Temperature values for the 2024 growing season compared to the long-term average (Debrecen-Látókép, 2024). (1) Monthly average of the minimum temperature, (2) Monthly average of the maximum temperature, (3) Monthly average of the mean temperature, (4) 30-year monthly average of the mean temperature, (5) April, (6) May, (7) June, (8) July, (9) August

A felméréseket napos, tiszta időben végeztük a felvételek minőségének biztosítása érdekében, valamint arra is figyeltünk, hogy az adatgyűjtés minden alkalommal azonos napszakban, 10 és 12 óra között történjen. A felvételezés időpontjait a kukorica fenológiai fázisaihoz igazítottuk, a V4 és R3 közötti fejlődési szakaszokat vizsgálva. A kutatás során egy DJI MAVIC 3M típusú drónt alkalmaztunk, amely egy 20 megapixeles RGB kamerával és négy darab, egyenként 5 megapixeles multispektrális kamerával rendelkezik (Green, Red, Red Edge és Near-Infrared). A kamerák hullámhossztartománya a következő volt: Green - 560 nm \pm 15 nm, Red - 650 nm \pm 16 nm, Red Edge - 730 nm \pm 16 nm, Near-Infrared - 860 nm \pm 26 nm. A beépített napsugárzás-érzékelő folyamatosan rögzítette a beérkező fényt, amelyet a rendszer eltárolt, lehetővé téve a fényviszonyok korrekcióját a képadatok 2D-s feldolgozása során (DJI 2024).

1. táblázat. A kisparcellás kísérlet tápanyagutánpótlási szintjei nitrogén, foszfor, kálium és összes makroelemre vonatkoztatva

A tápanyagutánpótlási szintek (1)	N (kg/ha)	P ₂ O ₅ (kg/ha)	K ₂ O (kg/ha)	Összes (2) (kg/ha)
Kontroll (3)	-	-	-	-
Szint 1	30	23	27	80
Szint 2	60	46	54	160
Szint 3	90	69	81	240
Szint 4	120	92	108	320
Szint 5	150	115	135	400

Table 1. The nutrient replenishment level of the small-plot experiment refers to nitrogen, phosphorus, potassium, and all macroelements. (1) Nutrient replenishment levels, (2) Total (kg/ha), (3) Control

A nyers felvételeket RGB és multispektrális képekre osztottuk a kiterjesztés alapján, majd a multispektrális felvételekből WebODM szoftverrel ortofotókat készítettünk. Az NDVI-index előállítása a QGIS szoftverben történt, ahol a raszterkalkulátor segítségével az egyes monocsatornákból számítottuk ki az indexértékeket. Az így keletkezett GEOTIFF fájlokat NDVI érték alapján szűrtük, eltávolítva a nulla alatti értékeket, amelyek jellemzően talajt, vizet, árnyékokat vagy vegetáció nélküli területeket jeleztek. A felső 2%-ba eső kiugróértékeket is kiszűrtük kumulatív vágással, majd a kísérleti parcellák méretének megfelelő poligonokat hoztunk létre. Ezek után az attribútumtábla kódolása következett a hibrid, tápanyagszint és ismétlésszám megjelölésével. A poligonokhoz zónastatisztikai elemzést végeztünk, figyelembe véve a pixelek átlagértékeit. Az adatokat Excel formátumban exportáltuk időpont, tápanyagszint, hibrid és repülési beállítás szerint. A statisztikai elemzéseket Jamovi 2.3.28.0 és Minitab szoftver segítségével végeztük el, ahol vizualizációkat készítettünk, valamint Pearson-féle korrelációs analízist hajtottunk végre a változók közötti összefüggések feltárása érdekében. Továbbá a statisztikai elemzés során varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaztunk kezelés kombinációk hatását vizsgáltuk az NDVI értékekre (tápanyagszint × NDVI érték, tápanyagszint × termés). Az elemzést 5%-os szignifikancia szinten végezzük,

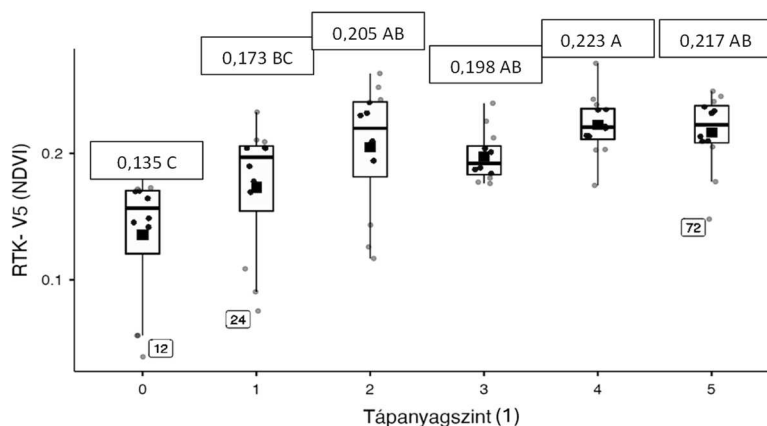
így az eredmények alapján 95%-os megbízhatósággal dönthetünk. Ha a p-érték kisebb, mint 0,05; elutasítjuk a nullhipotézist, azaz a kezelés(ek)nek van hatása az NDVI értékekre.

A repülési beállítások különböző konfigurációban történtek. Az első beállítás során kizárólag GNSS műholdas helymeghatározást alkalmaztunk RTK-korrektció nélkül. A második beállításnál már RTK korrekciót is használtunk. Mindkét esetben a repülési paraméterek egységesek maradtak. Ezekkel a beállításokkal biztosítottuk az adatok összehasonlíthatóságát és a kísérlet megbízhatóságát: – repülési magasság: 90 méter; elülső és oldalsó átfedés: 80%; kamera szöge: 90°; repülési sebesség: 4,1 m/s; repülési útvonal: előre meghatározott.

Eredmények

RTK nélkül V5 fenológiai fázisban (3. ábra) a legmagasabb NDVI értéket a 4. tápanyagszinten mértünk 0,223 értékkel, amely önálló statisztikailag elkülöníthető csoportba tartozik 0 és 1-es tápanyagszinttől.

3. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten – V5 fenológiai fázisban RTK nélkül



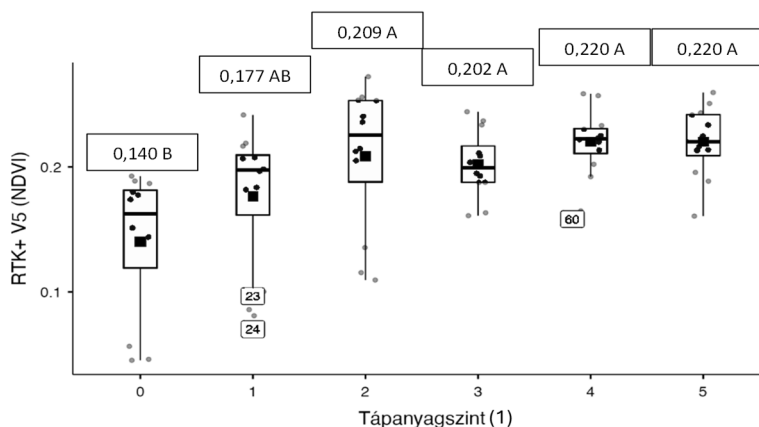
Forrás: saját szerkesztés

Figure 3. NDVI values at different nutrient levels – V5 phenological phase without RTK. (1) Nutrient level, Source: own construction

A 2-es, 3-as és 5-ös tápanyagszint teljes mértékben nem különböző statisztikai csoport. A legalacsonyabb NDVI értéket a kontroll (0) tápanyagszinten mértem 0,135 értékkel, amely minden tápanyagszinttől elkülönülő statisztikai csoportba tartozik. A V5 fenológiai fázisban a hibridek átlagában a 3. tápanyagszinten az NDVI értékekben visszaesést tapasztaltunk, majd a 4. tápanyagszinten újra növekedett az érték, viszont az 5. tápanyagszint a provokatív magas tápanyagszint már nem növelte az NDVI értéket. A legnagyobb százalékos eltérés az NDVI értékekben a kontroll és 4-es tápanyagszint között volt, ahol a 4. tápanyagszint több mint 49%-kal magasabb NDVI értéket eredményezett, mint a kontroll tápanyagszinten mért értékek. Viszont a legmagasabb tápanyagszint a 4. tápanyagszinthez képest csupán 2% eltérést eredményezett, ami nem volt szignifikáns.

Az RTK+ V5 fenológiai fázisban (4. ábra) a legmagasabb NDVI értékeket a 4. és az 5. fenológiai fázisban mértük, amelyek azonos statisztikai csoportba is tartoznak, a két tápanyagszintben az értékek szórása mutatott eltérést.

4. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
V5 fenológiai fázisban RTK-val



Forrás: saját szerkesztés

Figure 4. NDVI values at different nutrient levels – V5 phenological phase with RTK. (1) Nutrient level, Source: own construction

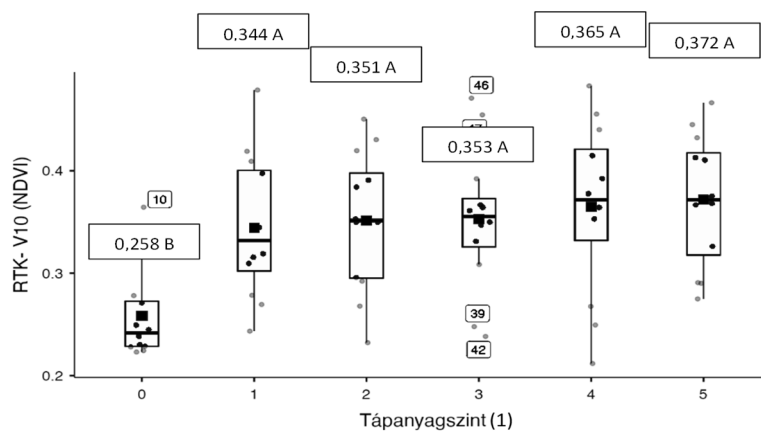
A kontroll parcellák esetében kaptuk a legalacsonyabb NDVI értéket, amely egy külön statisztikai csoportba tartozik. A vegetációs index mértékének emelkedése a 2. tápanyagszintig volt megfigyelhető utána már jelentős eltérés nem volt tapasztalható.

A V10-es fenológiai fázis során megfigyeltük, hogy az RTK- és az RTK+ felvételezések hasonló adatokat eredményeztek (5-6. *ábra*), hiszen mindkettő esetben a kontroll jelentősen elmaradt a trágyázott parcellák értékeitől. A kontroll parcellák értékei megegyeznek a két beállítási során és a statisztikai csoportjuk is. A kezelt parcellák esetében nem szignifikánsan, de minimálisan magasabb értékek tapasztalhatók az RTK+ során, ezen parcellákon mind a két esetben 1-5. hasonló értékek figyelhetők meg, nem tapasztalható jelentős emelkedés a tápanyagszint növelésével.

Az R1 fenológiai fázis során az NDVI értékek a két beállítási esetén jelentős eltérést mutattak (7-8. *ábra*), hiszen az RTK+ során sokkal magasabb vegetációs index értékek voltak tapasztalhatók, úgy, hogy a két felmérés között megközelítőleg 10 perc telt el – ennek oka valószínűleg a kukorica virágzása, hiszen a pollenszórás fő ideje a délelőtti 11 óra. Az RTK- beállítási esetben a trágyázott értékektől jobban elmarad a kontroll, mint az RTK+ esetében. Az RTK+ beállítási során a kezelt parcellákon az értékek szórása nagyon kicsi. Mindkét felvételezés során a legalacsonyabb értéket a kontroll parcella eredményezte. Az RTK-nélkül minden adat ugyan abba a statisztikai csoportba tartozik (A), ami az RTK+ beállítási négy különböző statisztikai csoport is megfigyelhető. Megállapítható, hogy a két beállítási során a V10-hez hasonlóan a kezelt parcellák között nem volt jelentős eltérés az NDVI értékek tekintetében.

Az R3 fenológiai fázisban az értékek nem mutatnak jelentős eltérést a különböző beállítási esetekben (9-10. *ábra*), nem szignifikánsan, de az RTK- esetében valamelyest alacsonyabbak. Mindkét esetben a 4. tápanyagszint eredményezte a legmagasabb NDVI értéket és a kontroll a legalacsonyabbat, illetve az NDVI értékek emelkedése a második tápanyagszintig volt megfigyelhető. A két felvételezési beállítási értékei ugyanazon a tápanyagszinten ugyanabba a statisztikai csoportba tartoznak.

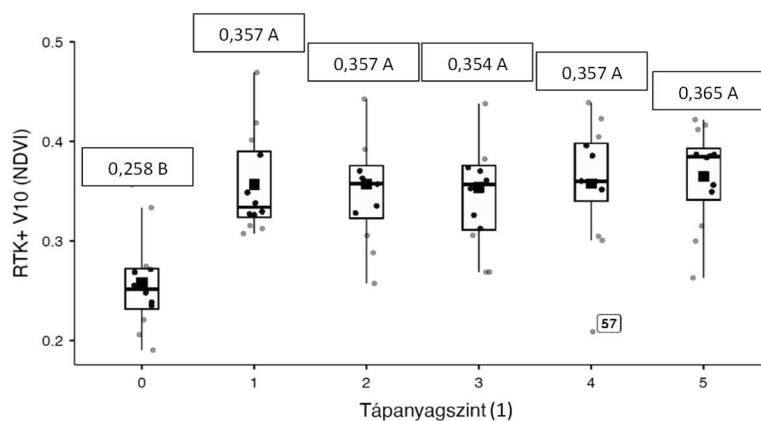
5. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
V10 fenológiai fázisban RTK nélkül



Forrás: saját szerkesztés

Figure 5. NDVI values at different nutrient levels - V10 phenological phase without RTK. (1) Nutrient level, Source: own construction

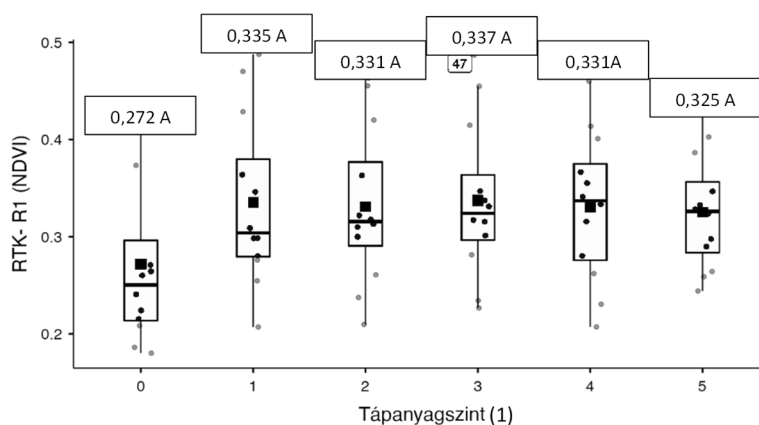
6. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
V10 fenológiai fázisban RTK-val



Forrás: saját szerkesztés

Figure 6. NDVI values at different nutrient levels - V10 phenological phase with RTK. (1) Nutrient level, Source: own construction

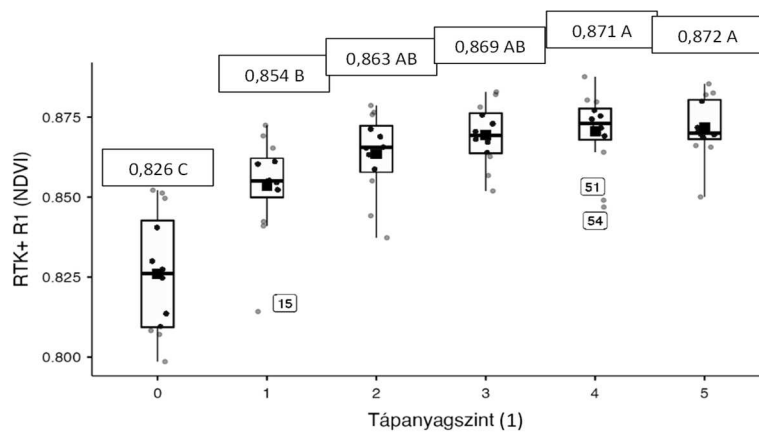
7. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
R1 fenológiai fázisban RTK nélkül



Forrás: saját szerkesztés

Figure 7. NDVI values at different nutrient levels – R1 phenological phase without RTK. (1)
Nutrient level, Source: own construction

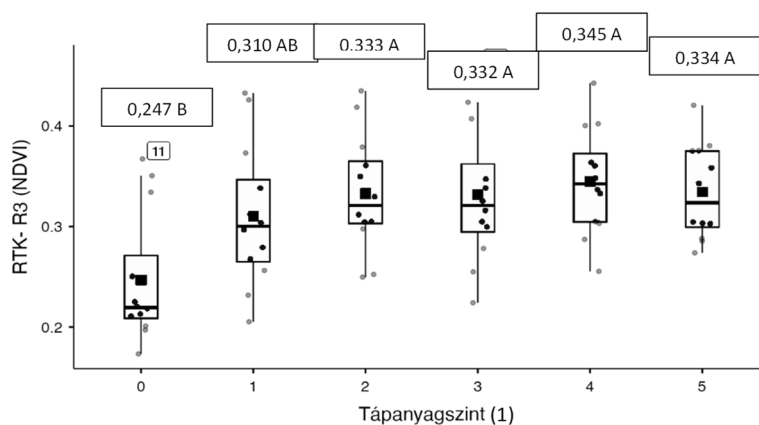
8. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
R1 fenológiai fázisban RTK-val



Forrás: saját szerkesztés

Figure 8. NDVI values at different nutrient levels – R1 phenological phase with RTK. (1)
Nutrient level, Source: own construction

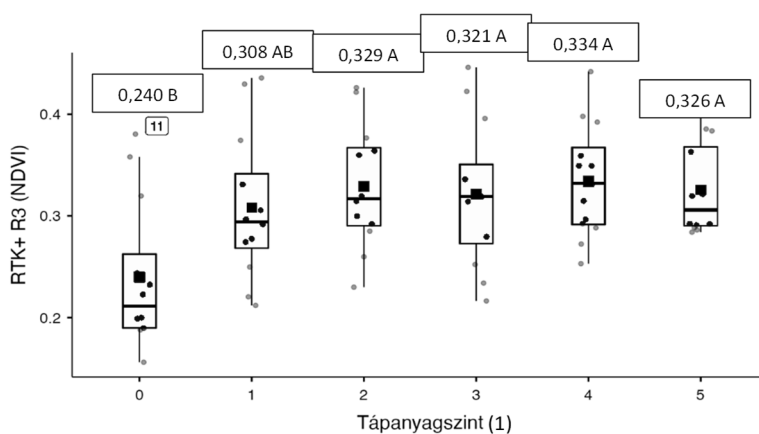
9. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
R3 fenológiai fázisban RTK nélkül



Forrás: saját szerkesztés

Figure 9. NDVI values at different nutrient levels – R3 phenological phase without RTK. (1) Nutrient level, Source: own construction

10. ábra. Az NDVI értékek eltérő tápanyagszinten –
R3 fenológiai fázisban RTK-val

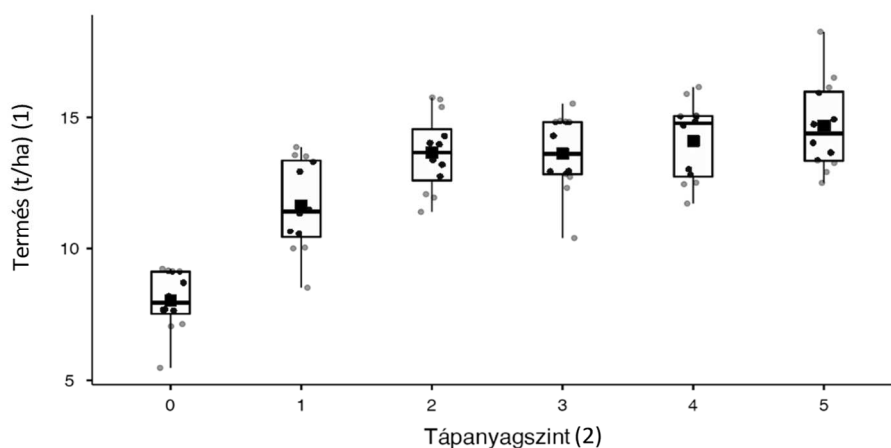


Forrás: saját szerkesztés

Figure 10. NDVI values at different nutrient levels – R3 phenological phase with RTK. (1) Nutrient level, Source: own construction

A tápanyagszintenként vizsgált termés is igazodik az NDVI értékekben tapasztalható tendenciákhoz, amely szerint a 2. tápanyagszint után a trágyázás emelésével nem tapasztalható jelentős növekedés. A terméseredményeket összehasonlítva az NDVI értékekkel nem minden esetben a legmagasabb tápanyagszinten volt a legnagyobb NDVI érték (11. ábra).

11. ábra. A termés mennyiségének alakulása eltérő tápanyagszinteken (Debrecen-Látókép, 2024)



Forrás: saját szerkesztés

Figure 11. Yield variation at different nutrient levels (Debrecen-Látókép, 2024).

Korreláció analízis vizsgálatok

A V5 fenológiai fázis során az NDVI érték és a termés hozam közötti kapcsolat erőssége hasonlóan alakult a két felvételezési módnál (2. táblázat). Az RTK nélküli méréseknél az összefüggés értéke $r=0,638^{***}$ volt, míg az RTK-val végzett felvételezéseknél ez az érték $r=0,601^{***}$ lett. A két mérési mód közül a V5 korai fenológiai szakaszban az RTK nélküli repülés mutatta a kissé erősebb kapcsolatot a termés hozammal, azonban mindkét felvételezési módszernél a tápanyagszintek átlagában statisztikailag igazolható, szignifikáns ($p<0,001$) összefüggést állapítottunk meg.

A V10 fenológiai fázisban az NDVI és a termés mennyisége közötti kapcsolat erőssége a két repülési módnál közel azonos volt (3. táblázat). Az RTK nélküli felvételezés esetében $r=0,474^{***}$, míg az RTK-val végzett mérésnél

$r=0,494^{***}$ értéket kaptunk. Ez utóbbi beállítás mutatta a kissé nagyobb összefüggést a terméshozammal, ugyanakkor mindkét esetben statisztikailag szignifikáns ($p<0,001$) kapcsolatot állapítottunk meg. A V10 fenológiai fázisban tapasztalt korreláció erőssége összességében kisebb volt a V5 fenofázishoz képest, ahol a legalacsonyabb összefüggési érték is magasabb ($r=0,601^{***}$), mint a V10-es fenofázisban mért legmagasabb érték ($r=0,494^{***}$).

2. táblázat. V5 fenológiai fázisban mért különböző beállítású NDVI értékek összefüggése a termés mennyiségével Pearson-féle korreláció mátrix alapján

	RTK- V5	RTK+ V5
Pearson féle r érték (1)	0,638 ^{***}	0,601 ^{***}
df	70	70
p érték (2)	<0,001	<0,001
n	72	72

Megjegyzés: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$. Forrás: saját szerkesztés.

Table 2. Correlation between NDVI values measured at different settings in phenological phase V5 and crop yield based on Pearson's correlation matrix. (1) Pearson's r value, (2) p value, Note: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$. Source: own construction.

3. táblázat. V10 fenológiai fázisban mért különböző beállítású NDVI értékek összefüggése a termés mennyiségével Pearson-féle korreláció mátrix alapján

	RTK- V10	RTK+ V10
Pearson féle r érték (1)	0,474 ^{***}	0,494 ^{***}
df	70	70
p érték (2)	<0,001	<0,001
n	72	72

Megjegyzés: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$. Forrás: saját szerkesztés.

Table 3. Correlation between NDVI values measured at different settings in the V10 phenological phase and crop yield based on Pearson's correlation matrix. (1) Pearson's r value, (2) p value, Note: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$. Source: own construction.

Az R1 fenológiai fázis során a két eltérő felvételezési beállítás között jelentős különbséget tapasztaltunk az NDVI és a termésmennyiség közötti összefüggés mértékében (4. táblázat). Az RTK nélküli felvételezésnél az összefüggés erőssége $r=0,232^*$ volt, mérsékelten szignifikáns ($p<0,05$) eredménnyel. Ezzel szemben az RTK-val végzett felvételezések során lényegesen magasabb, $r=0,795^{***}$ értéket kaptunk, amely $p<0,001$ szinten volt statisztikailag szignifikáns. Az RTK-val kapott eredmények tehát jelentősen meghaladták az RTK nélküli mérés értékeit.

4. táblázat. R1 fenológiai fázisban mért különböző beállítású NDVI értékek összefüggése a termés mennyiségével Pearson-féle korreláció mátrix alapján

	RTK- R1	RTK+ R1
Pearson féle r érték (1)	0,232*	0,795***
df	70	70
p érték (2)	0,050	<0,001
n	72	72

Megjegyzés: * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$. Forrás: saját szerkesztés.

Table 4. Correlation between NDVI values measured at different settings in the R1 phenological phase and crop yield based on Pearson's correlation matrix. (1) Pearson's r value, (2) p value, Note: * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$. Source: own construction.

Korábbi kutatások adatai is ezt az eredményt támasztják alá, *García-Martínez et al.* (2020) szerint az NDVI és a terméshozam közötti legerősebb összefüggés a vetés utáni 79. napon, azaz az R1 fenológiai szakaszban figyelhető meg. *Kayahan et al.* (2020) eredményei szintén hasonlóak voltak, akik virágzáskor rendkívül magas, $r=0,972$ -es korrelációt mértek az NDVI és a termés között. Kutatásunkban az RTK-val végzett felvételezések álltak legközelebb ezekhez a korábbi vizsgálatokhoz.

Az R3 fenológiai fázisban az NDVI és a terméshozam között számított összefüggések mértéke a két felvételezési beállítás esetében hasonlóan alakult (5. táblázat). Az RTK nélküli repülés során az összefüggés $r=0,480^{***}$ volt, míg az RTK-val történő felvételezés esetében $r=0,436^{***}$ értéket kaptunk. Ebben a fenofázisban az RTK nélküli felvételezés eredményezett valamivel erősebb korrelációt. Mindkét esetben magas statisztikai szignifikanciát tapasztaltunk

($p < 0,001$). Az R3 fenológiai fázisban számított korrelációs együttható azonban alacsonyabb volt más korábbi kutatások eredményeihez képest, *Lykhovyd* (2020) kutatásában például $r = 0,92$ értéket mértek. Az adatok alacsonyabb szintje a korábbi kutatásokhoz viszonyítva az adott év rendkívüli augusztusi hő- és szárazságviszonyaival magyarázható.

5. táblázat. R3 fenológiai fázisban mért különböző beállítású NDVI értékek összefüggése a termés mennyiségével Pearson-féle korreláció mátrix alapján

	RTK- R1	RTK+ R1
Pearson féle r érték (1)	0,480***	0,436***
df	70	70
p érték (2)	<0,001	<0,001
n	72	72

Megjegyzés: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Forrás: saját szerkesztés.

Table 5. Correlation between NDVI values measured at different settings in phenological phase R3 and crop yield based on Pearson's correlation matrix. (1) Pearson's r value, (2) p value, Note: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Source: own construction.

Következtetések

Az átlagos eredmények alapján az NDVI értékek a kontrolltól a 2. tápanyagszintig növekedtek, majd stagnáltak, kisebb pozitív és negatív ingadozásokkal. A Pearson-féle korreláció a legmagasabb értéket az RTK nélküli beállításoknál mutatta ($r = 0,638^{***}$), az átlagos érték pedig $r = 0,6036$ volt, minden esetben magas szignifikanciával ($p > 0,001$). Meglepő módon a V5 fenológiai fázisban mutatkozott a legerősebb összefüggés a termés és az NDVI között, amit az adott 2024-es év kedvező tavaszi csapadékviszonyai és hőösszegfeltételei magyarázhatnak. A tápanyagszintek és az NDVI közötti összefüggés ebben a fázisban átlagosan $r = 0,517$ értéket mutatott.

A kezeletlen kontrollparcellák minden esetben lényegesen alacsonyabb NDVI értékeket adtak, és a kezelt parcellákon nem volt egyértelmű tendencia az NDVI növekedésében a tápanyagszintek emelkedésével. A mért korrelációk összefüggés mértéke alacsonyabb volt, mint a V5 esetében ($r = 0,482$, $p < 0,001$). Az R1 fenológiai fázis eredményei eltértek az előző mérési időpontokétól,

vélhetően a virágzás alatti pollenzóródás hatására. Az RTK használatával készült felvételek a kutatás során a legmagasabb NDVI értékeket eredményezték. A kontroll után az 1. és 2. tápanyagszinten az NDVI értékek jelentősen nőttek, majd a tápanyagdózis további emelésével visszafogottabb növekedést tapasztaltunk.

A termés és az NDVI közötti korreláció beállításonként eltérő eredményeket hozott. Az RTK nélküli beállítás esetén $r=0,232^*$ ($p<0,05$), RTK alkalmazásával $r=0,795^{***}$, míg magasságkövetésnél $r=0,406^{***}$ értéket kaptunk. Az átlagos korreláció $r=0,4776$ volt, ami alacsonyabb a V5 és V10 mérési időpontoknál kapott értékekhez képest, azonban az eltérő szignifikancia szintek miatt nem minden esetben releváns. Az RTK nélküli beállításnál alacsony korrelációt kaptunk ($r=0,162$, $p=0,175$), míg RTK alkalmazásával erős kapcsolat mutatkozott ($r=0,676^{***}$, $p<0,001$). Az átlagos korreláció pedig $r=0,376$, amely az eltérő szignifikancia miatt nem minden esetben értelmezhető egyértelműen.

A termés és az NDVI közötti korreláció minden beállításban hasonló tendenciát mutatott, egységesen magas szignifikanciával ($p<0,001$). Az átlagos érték $r=0,456$ volt, ami az eddigi legalacsonyabb átlag. Az NDVI és a tápanyagszint közötti korreláció értékei közel azonosak voltak minden beállításban, és minden esetben magas szignifikanciát mutattak ($p<0,001$), az átlagos érték $r=0,370$.

A legmagasabb korrelációt a szakirodalmi adatokhoz képest ellentétes időpontban a V5 fenológiai fázisban tapasztaltuk, amelyet az adott év időjárási viszonyai magyarázhatnak. A növény fejlődésével párhuzamosan a korreláció mértéke folyamatosan csökkent. Ez köszönhető a tenyészidőszak korai és középső fázisában a kukorica számára rendkívül kedvező csapadék és hőmérséklet értékeknek, mely időjárási környezet a tenyészidőszak generatív fázisában kedvezőtlenre változott.

Köszönetnyilvánítás

A TKP2021-NKTA-32 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

IRODALOM

- Ahirwar, S.–Swarnkar, R.–Bhukya, S.–Namwade, G.*: 2019. Application of drone in agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 8. 1: 2500–2505. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.264>
- Balázs E.–Sági L.–Rádi F. (szerk.)*: 2025. Agrár innováció tartópillérei – Precízió, digitalizáció, fenntarthatóság. *Agri-Biotech*. Elérhető: https://www.agri-biotech.hu/wp-content/uploads/2025/01/precizio-digitalizacio-fenntarthatosag_B5-vegleges1.pdf
- DJI*: 2024. <https://ag.dji.com/mavic-3-m> (Letöltve: 2024. 09. 24.)
- Foley, J. A.–Ramankutty, N.–Brauman, K. A.–Cassidy, E. S.–Gerber, J. S.–Johnston, M.–Mueller, N. D.–O’Connell, C.–Ray, D. K.–West, P. C.–Balzer, C.–Bennett, E. M.–Carpenter, R. S.–Hill, J.–Monfreda, C.–Polasky, S.–Rockström, J.–Sheehan, J.–Siebert, S.–Tilman, D.–Zaks, D. P.*: 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 478. 7369: 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- García-Martínez, H.–Flores-Magdaleno, H.–Ascencio-Hernández, R.–Khalil-Gardezi, A.–Tijerina-Chávez, L.–Mancilla-Villa, O. R.–Vázquez-Peña, M. A.*: 2020. Corn Grain Yield Estimation from Vegetation Indices, Canopy Cover, Plant Density, and a Neural Network Using Multispectral and RGB Images Acquired with Unmanned Aerial Vehicles. *Agriculture*. 10. 7: 277. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070277>
- Huang, S.–Tang, L.–Hupy, J. P.–Wang, Y.–Shao, G.*: 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 32. 1: 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Hungaromet*: 2024. Debrecen Éghajlati jellemző https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/varosok_jellemzoi/Debrecen (Letöltve: 2024. 10. 01.)
- Jiang, Z.–Huete, A. R.–Chen, J.–Chen, Y.–Li, J.–Yan, G.–Zhang, X.*: 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*. 101. 3: 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>
- Kayahan, N.–Ustuntaş, T.–Aydın, C.*: 2020. Determination of the Relationship between NDVI and Yield by Using Remote Sensing for Silage Corn in Konya Region. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*. 34. 1: 84–90. doi:10.15316/SJAFS.2020.199
- Kulbacki, M.–Segen, J.–Knieć, W.–Klempous, R.–Kluwak, K.–Nikodem, J.–Kulbacka, J.–Serester, A.*: 2018. Survey of drones for agriculture automation from planting to harvest. [In: 2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES).] 353–358. IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/INES.2018.8523943>

- Lykhovyd, P.:* 2020. Sweet corn yield simulation using normalized difference vegetation index and leaf area index. *Journal of Ecological Engineering*. 21. 3: 228–236. <https://doi.org/10.12911/22998993/118274>
- Myneni, R. B.–Hall, F. G.–Sellers, P. J.–Marshak, A. L.:* 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 33(2): 481–486. <https://doi.org/10.1109/36.377948>
- Nagy J.–Búvár G.:* 2022. Precíziós Növénytermesztés Magyarországon. *Növénytermelés*. 71. 3–4: 105–118.
- Neményi, M.:* 2018. Precision crop production and artificial intelligence – the future of sustainable agriculture. *Acta Agraria Debreceniensis*. 150: 47–58. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/150/1701>
- Rátonyi T.–Ujpal I.–Bácskai I.–Harsányi E.–Ragán P.:* 2022. Talajszkenner adatok alapján lehatárolt menedzsment zónák NDVI és termés adatainak vizsgálata. *Növénytermelés*. 71. 3–4: 183–197.
- Spitkó T.–Szőke Cs.–Sipos Á.–Kovács A.–Csepregi-Heilmann E.–Pintér J.–Berzy T.–Marton L. Cs.:* 2022. A kukorica eltérő fenofázisban mért NDVI értékei és terméskomponensei közötti összefüggés vizsgálata. *Növénytermelés*. 71. 3–4: 211–223.
- Stafford, J. V.:* 2000. Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 76. 3: 267–275. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0577>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA):* 2024. Population Division – World Population Prospects 2024.
- Wilson, A. B.–Ávila-Díaz, A.–Oliveira, L. F.–Zuluaga, C. F.–Mark, B.:* 2022. Climate extremes and their impacts on agriculture across the Eastern Corn Belt Region of the US. *Weather and Climate Extremes*. 37: 100467. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100467>

A szerzők levelezési címe – Address of the authors:

Lengyel Lehel – Dr. Széles Adrienn – *Dr. Bojtor Csaba –
Dr. Harsányi Endre – Dr. Nagy János – Dr. Illés Árpád
Debreceni Egyetem MÉK
Földhasznosítási, Műszaki és Precíziós Technológiai Intézet
Debrecen
Böszörményi út 138.
H-4032
*bojtor.csaba@agr.unideb.hu