



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEINEK
VIZSGÁLATA A BÚZATERMESZTÉSBEN**

DOI: 10.54598/006600

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

CSÁKVÁRI EDINA

Gödöllő

2025

A doktori iskola

megnevezése: **Környezettudományi Doktori Iskola**

tudományága: Környezettudomány

vezetője: **Csákiné Dr. Michéli Erika**
egyetemi tanár, az MTA doktora
MATE
Talajtani és Agrokémiai Tanszék, Környezettudományi Intézet

Témavezetők: **Dr. Gyulai Ferenc**
professor emeritus, az MTA doktora
MATE
Természetvédelmi és Tájökológiai Tanszék, Vadgazdálkodási
és Természetvédelmi Intézet

Dr. Berke József
főiskolai tanár, az MTA kandidátusa
Gábor Dénes Egyetem
Dróntechnológia és Képfeldolgozás
Tudományos Műhely

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása
Dr. Gyulai Ferenc

.....
A témavezető jóváhagyása
Dr. Berke József

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	6
2. CÉLKITŰZÉSEK	9
3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	11
3.1 A mezőgazdaság hatása az agrobiodiverzitásra Magyarországon és az Európai Unióban.....	11
3.2 A változó klíma hatása a mezőgazdaságra és a búzatermesztésre.....	16
3.3 Ősi gabonák szerepe az ökológiai mezőgazdaságban	17
3.4 Modern technológiák a környezettudományban: távérzékelés és digitális képfeldolgozás	20
3.4.1 Földfelszíni és légi távérzékelés	20
3.4.1.1 Az elektromágneses sugárzás	22
3.4.1.2 Adatgyűjtő eszközök	23
3.4.1.3 Felvételezés és adatgyűjtés.....	23
3.4.2 Digitális képfeldolgozás.....	24
3.4.2.1 Digitális képek felbontása	25
3.4.2.2 Digitális képfeldolgozás a fenotipizálásban	26
3.4.2.3 Növényi paraméterek digitális mérése	28
3.5 A növényzet reflektanciája, mint mezőgazdasági állapotjellemző.....	29
3.5.1 Látható fénytartományban érzékelő RGB kamerák a fenotipizálásban.....	31
3.5.2 RGB vegetációs indexek.....	32
3.6 A drónos távérzékelés gyakorlati alkalmazási területei a környezettudományban.....	35
3.6.1 Hazai alkalmazások.....	37
3.6.2 Nemzetközi alkalmazások.....	39
4. ANYAG ÉS MÓDSZER	43
4.1 A vizsgált növények	43
4.2 Szántóföldi (nem kontrollált) terepi kísérlet.....	44
4.2.1 A vetett fajták terméshozamának és szemminőségi paramétereinek mérése	46
4.2.2 Légi felvételezés drónra szerelt RGB kamerával.....	47
4.3 Fitotronban végzett (kontrollált) kísérlet	49
4.3.1 Kísérleti elrendezés	49
4.3.2 A laboratóriumi növények felvételezése RGB kamerával	51

4.3.2.1 Az RGB felvételek digitális képfeldolgozása: a képek előfeldolgozása	52
4.3.2.2 Az RGB felvételek digitális képfeldolgozása: digitális információk kinyerése	53
4.4 Adatfeldolgozás és statisztikai elemzés	54
5. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE	57
5.1 A szántóföldi kísérlet eredményei	57
5.1.1 A búzafajták terméshozama és szemminőségi paraméterei	57
5.1.2 A vetett búzafajták vizsgálata RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel	59
5.2 A laboratóriumi kísérlet eredményei	60
5.2.1 A kezelések (szárazság és tápanyaghiány) és a digitális geometriai paraméterek közti összefüggés	60
5.2.2 A fajták elkülönítése digitális geometriai paraméterekkel	63
5.2.3 A digitális geometriai paraméterek és a fajták közötti összefüggés a kezelések és az idő függvényében	69
5.2.3.1 A terület, mint legpontosabb indikátor és a fajták közötti összefüggés a kezelések és az idő függvényében	69
5.2.3.2 A fajták, a kezelések és az idő együttes hatása a területváltozásra	74
5.2.4 A kezelések (szárazság és tápanyaghiány) és az RGB adatokból származtatott vegetációs indexek közti összefüggés	76
5.2.5 A fajták elkülönítése az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel	79
5.2.5.1 A vNDVI index és a fajták közti összefüggés a kezelések és az idő függvényében	85
5.2.6 A digitális geometriai paraméterek és a vNDVI index közti kapcsolat	87
5.3 Eredmények megbeszélése	88
5.3.1 Régi és új nemesítésű búzafajták termesztése alacsony ráfordítású, környezetkímélő extenzív gazdálkodásban	88
5.3.2 Digitális képfeldolgozás alkalmazása búzafajták fenotipizálására	90
5.3.3 Búzafajták elkülönítése korai fejlődési szakaszban RGB kamerával és digitális képfeldolgozással	91
5.3.4 A tápanyaghiány és a szárazságstressz detektálása a búzafajták korai fejlődési szakaszában RGB kamerával és digitális képfeldolgozással	92
5.3.5 A kutatás ismert korlátai	93

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	95
6.1 A régi gabonák szerepe az agrobiodiverzitás fenntartásában	95
6.2 A képképző technológia a digitális fenotipizálásban	95
6.3 Fejlesztési irányok	96
7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	98
8. ÖSSZEFOGLALÁS	99
9. SUMMARY.....	101
8. MELLÉKLETEK.....	103
M1. Irodalomjegyzék.....	103
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó tudományos publikációk	118
M3. A vetett fajták szemminőségi paramétereinek laboratóriumi mérése és kalibrációs adatai	120
M4. A fitotronban nevelt búzafajták digitális geometriai paraméterkönyvtára (online melléklet).....	121
M5. A fitotronban nevelt búzafajták RGB adatai (online melléklet)	121
M6. Statisztikai adatelemzés	122
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	143

1. BEVEZETÉS

Magyarország meghatározó agrártermeléssel rendelkező ország Közép-Kelet-Európában. Mezőgazdasága a nemzetgazdaság egyik jelentős ágazata, nemcsak gazdasági, de társadalmi, politikai és környezetvédelmi területen is fontos szerepet tölt be (Burger 2009). Az iparszerű, intenzív, nagy anyag- és energiafelhasználású mezőgazdaság homogén, monokulturális tájat eredményez, ami nem tölti be az ökológiai funkciókat, ezzel a környezeti és társadalmi veszélyeket növeli. Az intenzíven művelt agrárterületek biodiverzitási szintje és környezeti érzékenysége alacsony (Kleijn et al. 2009, Batáry et al. 2011, Gonthier et al. 2014, Sutcliffe et al. 2015, Emmerson et al. 2016), a talajok és a vízkészletek szennyezettségi szintje pedig magas (Moss 2008, Withers et al. 2014). Az intenzív mezőgazdaság a környezeti terhelés mellett, a társadalomra is negatív hatással bírhat. Az élőmunkát kiszorítva vidéki munkanélküliséghez vezethet, ami hozzájárul az elvándorlás felgyorsulásához (White 2012).

A klímaváltozás és a szélsőséges időjárási viszonyok egyre gyakoribb előfordulása szintén hatással van a mezőgazdaság alakulására és a növénytermesztés eredményességére (Howden et al. 2007, Vos et al. 2022). A szűkített genetikai állományú nemesített intenzív fajták kiszoríthatják a környezet változásaihoz jól alkalmazkodó régi extenzív fajtákat, helyettük a kedvezőtlenebb adottságú területeken még több műtrágyát, növényvédőszer alkalmaznak a gazdálkodók. A túlzott műtrágya és növényvédőszer használat helyett a megfelelő fajtaválasztásra kell törekedni, legyen szó modern fajtahasználatról vagy régi fajták újra termesztésbe vonásáról (Szalay 2009), hiszen a mezőgazdasági növények génkészletének beszűkülése, beltartalmi értékeinek romlása hozzájárul a mezőgazdaság homogenizálódásához (Bavec 2017).

Napjainkban egyre nagyobb igény mutatkozik mind a gazdálkodók, mind a fogyasztók részéről az egészséges alapanyagok és élelmiszerek előállítására, ennek köszönhetően az ökológiai gazdálkodás előtérbe került (Niggli 2015, Nipers et al. 2024). Különösen gabonafélék esetében fontos a diverz genetikai állománnyal rendelkező régi fajták újra termesztésbe vonása, mivel az egyik legmeghatározóbb élelmiszer alapanyag. Bár hozamuk általában alacsonyabb, de termesztésük is kisebb környezetterheléssel jár, nagyobb ellenállóképességük révén pedig stabilabb jövedelemforrást biztosítanak, és beltartalmi értékeinek köszönhetően jól

beilleszthetőek napjaink modern reformétkezésébe (Dreisigacker et al. 2005, Bonman et al. 2015, Wingen et al. 2017, Vikram et al. 2021). Mindezt figyelembe véve meg kell teremteni az egyensúlyt az intenzív mezőgazdaság és a környezetminőséget szem előtt tartó fenntartható agrárium között.

A fenti igényt az Európai Unió és Magyarország is felismerte, ezért a 61/2009. (V. 14.) FVM rendelet alapján az Európai Mezőgazdasági Vidékfejlesztési Alapból agrár-környezetgazdálkodási támogatást nyújt többek között őszi búzát (pl. *Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum* cv. 'Bánkúti 1201') és alakort (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) termesztő gazdák számára, a kultúrtörténeti és genetikai szempontból kiemelkedő jelentőségű, veszélyeztetett, ritka szántóföldi növényfajták megőrzésének ösztönzésére. Az alakor, vagy egyszemű búza a múltban már bizonyította sokrétű felhasználási módját, ezért egyre nagyobb szerepet tölt be a mai modern mezőgazdaságban is. Rusztikussága és a változó klímához való alkalmazkodóképessége arra ösztönzi a gazdákat, hogy újra termesztésbe vonják, lehetőleg az ökológiai gazdálkodás keretein belül (Kan et al. 2022). Bár a modern nemesítésű és az ősi búzafajtákról szóló összehasonlító vizsgálatok száma egyre növekszik, még mindig sok tudásbeli hiányosság tapasztalható a kenyérbúzák egyes genotípusainak környezeti, táplálkozási és egészségügyi előnyeiről, vagy éppen hiányosságairól.

Ahhoz, hogy a mai változó klímában fenntartható módon, a környezeti és természeti adottságokat szem előtt tartva megfelelő mennyiségben és minőségben lehessen termelni és élelmiszert előállítani, a hagyományos növénynemesítési eljárások mellett szükség van a modern digitális technológiák alkalmazására, ill. a hagyományos és modern technológiák együttes használatára. A mai ismereteink szerint a földfelszíni és légi távérzékelés, ill. a digitális képfeldolgozás mezőgazdasági és növénynemesítési kutatásokban történő alkalmazása lehetővé teszi a mezőgazdasági területek és a környezet változásaihoz jól alkalmazkodó különböző régi és új nemesítésű növényfajok és fajták pontos és viszonylag gyors vizsgálatát. Az így nyert adatok felhasználásával megtervezhetjük a környezeti feltételekhez igazodó beavatkozások módját, ami hozzájárulhat az agrárterületek környezetterhelésének, és a túlzott műtrágya és vegyszerhasználatból adódó magas költségek csökkentéséhez (Pierce & Nowak 1999, Hatfield et al. 2008). További előnye, hogy a távérzékeléses adatgyűjtésben alkalmazott mérési módszerek nem járnak a növényi egyed károsodásával (Berke et al. 2006, 2010ab) és viszonylag

alacsony laborköltségűek (Richardson et al. 2007, Hunt et al. 2011, Costa et al. 2020). A mezőgazdaság számos területén hasznosítható, növénynemesítési kutatásokban és a gyakorlati növénytermesztésben egyaránt. Alkalmazható többek között fajta-monitoringra (Tillet et al. 2001), gyomtérképek készítéséhez (Hemming & Rath 2001, Ahmad et al. 2008), a fajták növekedési állapotának meghatározására, biomasszatömeg becslésére (Bendig et al. 2015). A távérzékelés és a digitális képfeldolgozás közvetetten termésbecslésre is használható, mivel a biomasszatömeg szoros összefüggésben áll a növények felépítésével, klorofill- és nitrogéntartalmával (Kawashima & Nakatani 1998, Yadav et al. 2010, Fageria et al. 2011, Wang et al. 2014), a nem elégséges nitrogéntartalom pedig a termés csökkenéshez járulhat hozzá (Prasertsak & Fukai 1997, Adhikari et al. 1999). A környezeti stressz okozta növényi betegségek, károsodások korai felismerése lehetővé teszi a megfelelő preventív intézkedés kiválasztását, ami a gazdálkodók számára gazdasági szempontból további jelentős megtakarításokat eredményezhet. Az alacsonyabb mennyiségű és a megfelelő területen kijuttatott növényvédőszerek, műtrágyák alkalmazása pedig a környezet számára jelenthet alacsonyabb terhelést.

2. CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezés egyik fő célja a hagyományos és modern nemesítésű őszi búzafajták és alakorfajták termés hozamának és szemminőségi paramétereinek vizsgálata extenzív termesztési körülmények között. A másik fő célja a digitális képelemzés, mint modern technológia alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata a földfelszíni távérzékeléses adatgyűjtés és a légi távérzékelés eszközeivel a búzatermesztésben. Céлом annak a vizsgálata, hogy a látható tartományban érzékelő RGB eszközök mennyire alkalmasak a gabonák digitális fenotipizálására és elkülönítésére korai fejlődési szakaszban, valamint a szárazság és a tápanyaghiány tüneteinek korai detektálására. Hosszútávú célom, hogy a kifejlesztett technológia felhasználható legyen a növény nemesítési programokban, különösen a ritka és veszélyeztetett szántóföldi növények genetikai erőforrásainak megőrzésének és az agrobiodiverzitás fenntartásának érdekében.

A fenti célok eléréséhez régi és modern nemesítésű búzafajtákat vizsgáltam nem kontrollált (szántóföldi kisparcellás) és kontrollált (laboratóriumi körülmények között fitotronban) kísérletben. A vizsgálatba genetikailag diverz búzafajtákat vontam be: két őszi búzát (Mv Magdaléna és Bánkúti 1201) és három alakor búzát (Mv Alkor, Schiemann és Böződi). A szántóföldi kísérletben drónra szerelhető RGB kamerával felvételeztük a vetett fajtákat, valamint aratást követően mértem a termés hozamot és laboratóriumban közel-infravörös optikai analizátorral a szemminőségi paramétereket. A laboratóriumi kísérletben növénynevelő klímakamrában 75 előnevelt egyedet vizsgáltam bokrosodásig, és három kezelést alkalmaztam: kontroll, tápanyaghiány és szárazság. Állványra szerelt RGB kamerával három időpontban felvételeztem az egyedeket, és digitális képelemzéssel feldolgoztam a fajták geometriai és RGB adatait 225 felvételen.

Mindkét kísérletben olyan digitális képelemző szoftvert alkalmaztam, ami szabad forráskódú, bárki számára hozzáférhető és széleskörben használatos (ImageJ, Ferreira & Rasband 2012), valamint olyan DSLR fényképezőgépet használtam, ami kereskedelmi forgalomban is kapható (Canon EOS 30D).

Kutatási kérdéseim a következők voltak:

- (1) Sikerrel termesztethetők-e a régi és új nemesítésű búzafajták alacsony ráfordítású, környezetkímélő extenzív gazdálkodásban?
- (2) Alkalmas-e a kidolgozott technológia búzafajták digitális fenotipizálására?
- (3) Elkülöníthetők-e a búzafajták korai fejlődési szakaszban kereskedelmi forgalomban kapható RGB DSLR kamerával és digitális képfeldolgozó eljárással?
- (4) Kimutatható-e búzafajták korai fejlődési szakaszában a tápanyaghiány és a szárazságstressz hatása kereskedelmi forgalomban kapható RGB DSLR kamerával és digitális képfeldolgozó eljárással?

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1 A mezőgazdaság hatása az agrobiodiverzitásra Magyarországon és az Európai Unióban

Magyarország agrár-természetvédelmi kérdéseinek megértéséhez történelmi-szociológiai kontextusban szükséges értelmezni a mezőgazdaság mai helyzetét, egyúttal a közép-kelet-európai országok politikai változásait is vizsgálni érdemes. A posztszocialista közép-kelet-európai országok történelmi és politikai fejlődése bár hasonló, ezzel együtt a lokális tényezőket mindig figyelembe kell venni (Yakusheva 2019). Az 1950-es években zajlott kollektivizálás nemcsak Magyarországon, de más posztszocialista országokban is komoly hatást gyakorolt a biodiverzitásra. Például Szlovákiában és Csehországban a kisméretű családi gazdaságokat nagy állami gazdaságokba és szövetkezetekbe integrálták (Swain 1999). A mezőgazdaságot rendkívüli mértékben intenzifikálták, nőtt a monokulturális táblák mérete, és egyre több vegyszert kezdtek el használni (Ángyán et al. 2003). Ezzel ellentétben néhány kelet-közép-európai országban (pl. Lengyelországban, Romániában) fennmaradtak a kis családi gazdaságok (Tryjanowski et al. 2011, Babai et al. 2015).

A demokráciába való átmenet új gazdasági, politikai és jogi kereteket jelentett, és új megközelítést vezetett be a természetvédelmi szakpolitikába (Yakusheva 2019). Az 1989-es rendszerváltástól kezdődően a központilag szabályozott szocialista államgazdaságok áttértek a piacorientált gazdálkodásra, ami egyaránt pozitívan és negatívan is befolyásolta a biodiverzitást és az ökoszisztémákat (Báldi & Batáry 2011a). Ezek a változások hozzájárultak a biodiverzitás növekedéséhez a mezőgazdasági területeken, mivel elkezdődött a szántóföldek extenzifikációja és felhagyása, valamint a műtrágyák és peszticidek alacsonyabb használata. Magyarországon a többi posztszocialista országhoz hasonlóan a természetvédelmi intézmények megerősödött hatáskörrel bírtak, és lehetséges volt új védett területeket alapítani. Másrészt a földprivatizáció az élőhelyek degradációját és fragmentációját vonta maga után, ami a regenerálódó termőföldek újboli beszántásához vezetett (Mihók et al. 2015, 2017). Sok extenzíven használt földterületet felhagytak Magyarországon és a környező országokban is (pl. Lengyelországban, Szlovákiában, Ukrajnában, Romániában, lásd Feranec et al. 2000, Kuemmerle et al. 2008, Liira et al. 2008, Pazúr et al. 2014, Lieskovský et al. 2015, Cegielska et al. 2018), ennek hatására az egykori legelőket és fajgazdag kaszálókat ma az idegenhonos inváziós

fajok (pl. homoki gyepeken *Asclepias syriaca*, *Conyza canadensis*, *Tragus racemosus*) (Berki et al. 2023, Csákvári et al. 2023, Penksza et al. 2025), vagy a nagy mezőgazdasági vállalatok intenzív használata veszélyezteti (Molnár et al. 2012, Csecserits et al. 2016, Balázs 2018). Másfelől a szántóföldek felhagyása a lehetséges negatív hatások mellett lehetőséget kínál a biológiai sokféleséget növelő passzív és aktív ökológiai helyreállításra – restaurációra (Csákvári et al. 2021a, 2022).

Több kelet-közép-európai ország 2004-es Európai Unióhoz való csatlakozása változásokat hozott a környezetpolitikába. A tagországok új kötelező természetvédelmi szakpolitikai elemeket vezettek be, mint például a Natura 2000 hálózat területeit (CBD 2014), amik a mezőgazdasági területeket is érintik. Megnyíltak az új agrár-természetvédelmi uniós források (pl. LIFE programok, vidékfejlesztési alapok, agrár-környezetvédelmi programok), amik hozzájárultak az élőhelyek és fajok védelméhez, az ökológiai helyreállításhoz és a mezőgazdaság zöldítéséhez. Ezzel szemben megjelentek olyan intézkedések is, amik negatívan hatottak az agrár-ökoszisztémákra. A növekvő EU-s Közös Agrárpolitikai (KAP) támogatások elsősorban a mezőgazdaság intenzifikációjához vezettek, és csökkentették a biodiverzitást a posztsovjeti és a nyugati tagországokban egyaránt (Pe'er et al. 2014, 2020, Leventon et al. 2017). A KAP környezetre gyakorolt negatív hatásai a korábbi tapasztalatokból kifolyólag ismertek voltak az új tagországok számára már 2004-es bevezetésük előtt is (Donald et al. 2002). Ennek ellenére mégsem vették figyelembe a lokális viszonyokat és minden módosítás nélkül vezették be azokat (Báldi & Batáry 2011ab). A rendszerváltás óta nagy léptékű változások történtek a környezetpolitikában, anélkül, hogy figyelembe vették volna a megalapozott tudományos tanácsokat és kutatási eredményeket (Sutcliffe et al. 2015).

Magyarországon a mezőgazdaság jelentős hatással van a biológiai sokféleségre, mivel az ország 60,3%-a mezőgazdasági terület (CBD 2014), ezért elengedhetetlen, hogy a földhasználat-tervezésnél figyelembe vegyék a zöld szakpolitikai ajánlásokat és kötelezettségeket. A jelenlegi európai zöld megállapodásban (European Green Deal, COM 2019) felismerték, hogy sürgős szükség van a környezeti kihívások leküzdésére. A jövőbeli KAP-reformot össze kell egyeztetni a Green Deal politikájával és annak 2030-ig szóló biodiverzitási stratégiájával, melynek célja a természet védelme és az ökoszisztémák leromlásának hosszú távú visszafordítása. Sajnos jelenleg csak néhány EU-tagállam kezdte el kidolgozni ökológiai

helyreállítási stratégiáját a biodiverzitás csökkenésének és az ökoszisztémák degradációjának megfékezésére (Navarro et al. 2017). És ugyancsak néhány tagállam értékelte országos szinten is az ökológiailag helyreállított (restaurált) területeket (pl. északi országok, lásd. Hagen et al. 2013, Kotiaho et al. 2016, Tolvanen & Aronson 2016). Magyarországon, Török et al. (2019) szerint 2002 és 2016 között a területek csupán 1,06-5,29%-án valósult meg helyreállítás, attól függően, hogy mit tekintünk ökológiailag helyreállítandó területnek (rekultiváció vs. restauráció). Ezek az erőfeszítések messze vannak a jelenlegi 30%-os restaurációs céltól (UNEP/FAO 2020), ezért a jövőbeni tudományos-politikai döntéshozói vitáknak a gyakorlatban történő hatékony helyreállításra és a mezőgazdaság valódi zöldítésére kell összpontosítaniuk (Díaz et al. 2019, Fischer et al. 2021).

Az Alkotmány kimondja, hogy a kormány felelőssége a természeti erőforrások, különösen a mezőgazdasági területek, az erdők, az ivóvízkészletek és a biológiai sokféleség védelme (HC 2011). Ennek ellenére az intézményi változások csökkentették a természetvédelem hatáskörét, a Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium megszűnése után a Vidékfejlesztési Minisztériumhoz, majd az Agrárminisztériumhoz került (Krasznai 2021). További akadályt jelent a környezetpolitika ágazati integrációjának lassú előrehaladása, a gazdálkodási intézkedések hosszú távú nyomon követésének és a hozzáférhető monitoring-adatbázisoknak a hiányosságai, valamint, hogy az élőhelyek/fajok megfigyelésére összpontosító természetvédelmi és mezőgazdasági/környezetgazdálkodási alaputatásokat gyakran összeegyeztethetetlennek tartják a sikeres tudományos pályafutással (Mihók et al. 2015, 2017, Devictor & Meinard 2020, NKP 2020). Ezért szükséges Magyarországon és más közép-kelet-európai országokban érvényesíteni a természetvédelmi-agrár törekvések kormányzati, nem kormányzati és civil szférán belüli érdekeit, valamint adaptív társadalmi és intézményi intézkedéseket megalkotni (Krasznai 2021). Az 5. Nemzeti Környezetvédelmi Programot 2022 decemberében fogadta el a kormány (NKP 2020). A 2026-ig szóló határozat az EU 8. Környezetvédelmi Cselekvési Programjával (Environment Action Program) összhangban többek között a mezőgazdaság zöldítésére, az ágazati együttműködés fokozására, a környezetvédelmi jogszabályok felülvizsgálatára, a természetvédelem intézményi és gazdasági hátterének javítására, valamint az uniós források hatékony felhasználására, a társadalommal való együttműködésre és a nemzeti parkok

gyakorlati természetvédelmi kutatásának támogatására irányuló erőfeszítéseket tartalmaz.

Bár a zöld átmenet 2050-ig szóló jövőképét már a 7. és 8. Környezetvédelmi Cselekvési Programban is meghatározták, a megvalósítás olyan hosszútávú kihívást jelent, ami társadalmi-gazdasági változásokat tesz szükségessé. Az EU-s kutatások mellett, hazai vizsgálatok is készültek ökológus és agrárkutatók bevonásával azokról a kutatási témákról, amiknek a teljesítése 2050-ig elengedhetetlen ahhoz, hogy földhasználat váltással nőjön az agrobiodiverzitás. Csákvári et al. (2021b) által meghatározott fő természetvédelmi-agrár kutatási témák tényleges célokat határoznak meg a jövőre nézve, amelyeket a biológiai sokféleség további csökkenésének elkerülése érdekében szükséges végrehajtani. A cél a legsürgetőbb ökológiai hiányterületek megfogalmazása volt, amelyek érvényesek és beépíthetők a magyar és a közép-kelet-európai szakpolitikába. Ugyanakkor az egyes régiók helyi viszonyait is figyelembe kell venni a mezőgazdasági és a természetvédelmi döntéseknél (Tryjanowski et al. 2011, Yakusheva 2019). Például Magyarországon a mezőgazdaság és az erdőgazdálkodás jelentős hatással van a biológiai sokféleségre (az ország 60,3%-a mezőgazdasági terület; 20,7%-a erdő vagy erdőültetvény, CBD 2014), ezért különösen fontos a földhasználat-tervezés és területrendezés összekapcsolása az európai Green Deal szakpolitikával és a biológiai sokféleséggel, mezőgazdasággal, erdőgazdálkodással kapcsolatos releváns stratégiáival. Ennek elősegítésére a hazai ökológus és agrárkutatók 7 klasztert és 14 kutatási témát azonosítottak (1. ábra). Az értekezésben megfogalmazott célkitűzések és vizsgált fajták, alkalmazott módszerek része vagy egésze több ilyen kutatási témába is beilleszthető, ezek a legfontosabb földhasználat-váltással kapcsolatos agrár-természetvédelmi vonatkozású tématerületek, úm.:

- Földhasználat változásának hatása a biológiai sokféleségre és az ökoszisztémákra:
 - Tájhasználat változásai, különböző gazdálkodási módok vizsgálata: innovatív technológiák, táji sokféleség hatása a lokális biodiverzításra.
 - A természeti adottságoknak leginkább megfelelő és az ökoszisztéma-szolgáltatásokhoz legjobban igazodó tájhasználat meghatározása, a természeti és kulturális értékek társadalmi-gazdasági kontextusának figyelembevételével, különös tekintettel a hagyományos természeti erőforrás-használat újragondolására.

- A tájszerkezet hatása az élőhelyek fajösszetételére, funkcionális diverzitására és az ökoszisztéma-funkciókra. Másodlagos, antropogén és degradált élőhelyek szerepe a konnektivitás fenntartásában.
- A jogszabályok, szakpolitikai változások hatása az ökoszisztémákra:
 - A fennmaradást biztosító hagyományos tájhasználati módok vizsgálata és támogatási rendszerekbe történő beépítésük lehetőségeinek feltárása.
- A környezeti változások egészségügyi következményei:
 - A globalizáció, a klímaváltozás és a földhasználat átalakulása miatt felbukkanó inváziós fajok és kórokozók kutatása a biodiverzitás megőrzése és a járványok kialakulásának kivédése céljából.

Egyes kutatási kérdésekkel a múltban mélyebben foglalkoztak a nyugat-európai, mint a közép-kelet-európai országokban (pl. a biológiai sokféleséggel kapcsolatos tudományos ismeretek, Tryjanowski et al. 2011), de megfigyelhető, hogy a hatékony természetvédelmi gyakorlat érdekében a következő kutatási témák egyre fontosabbá válnak a poszt szocialista országokban is:

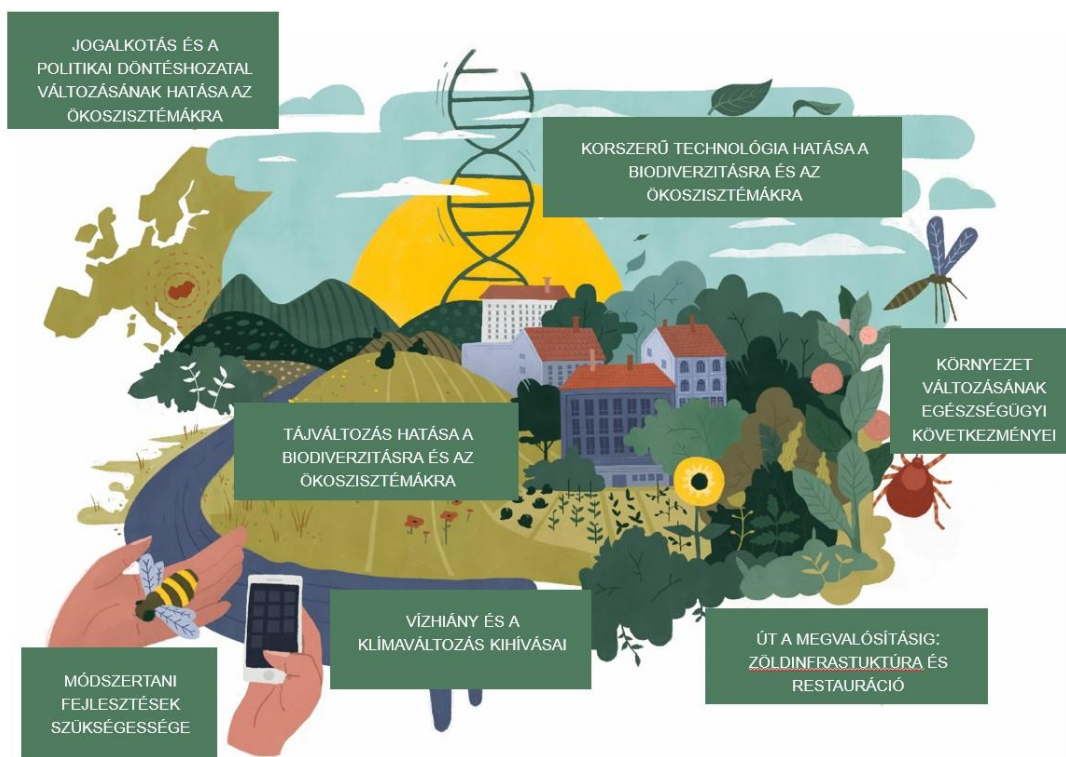
- A technológia hatása a biológiai sokféleségre és az ökoszisztémákra:
 - Őshonos és veszélyeztetett fajok konzerváció-genetikája – a beltenyésztettség és a genetikai változatosság felmérése. A hosszútávú megőrzés érdekében növényi DNS/mag/élő sejt vonal bank felállítása a régióra. Fontosabb őshonos hazai fű és kétszikű fajok szaporítási feltételeinek tesztelése gazdálkodó partnerek bevonásával.
 - Infokommunikációs technológiák, big data elemzések adaptálása és fejlesztése a természetvédelmi célok elérése érdekében.
- Módszertani fejlesztések szükségessége:
 - Élőhelymodellezés a gyorsuló klímaváltozás tükrében, és az élőhelyek átalakulása miatt leginkább veszélyeztetett fajok rangsorának meghatározása a modellek segítségével.

Egyes kutatási kérdések különösen fontosak lehetnek a pannon biogeográfiai régió értékeinek védelme szempontjából, úm.

- Vízhány okozta és éghajlati kihívások:
 - A víz szerepe az Alföldön: a víz visszatartás lehetőségei, megvalósíthatósága és működtetése a klímaváltozás hatásainak mérséklése, a természetvédelmi

szempontból kiemelt jelentőségű fajok és élőhelyek megőrzése és a mezőgazdasági művelés diverzifikálása érdekében.

- A mediterránosodó klíma és extrém időjárási események hatása a vízi és szárazföldi ökoszisztémákra, a klímaváltozás hatásainak vizsgálata hosszútávú adatsorok elemzésével.



1. ábra: A hét fő klaszter, beleértve a tizennégy ökológiai és agrár-ökológiai vonatkozású kiemelt kutatási témát, amik 2050-re vonatkozó jövőképeket célozzák meg (Csákvári et al. 2021b után módosítva).

3.2 A változó klíma hatása a mezőgazdaságra és a búzatermesztésre

A változó klíma jelentős hatással van a mezőgazdaságra, különösen a gabonák termesztésére, ami széles körű kutatások és tudományos vizsgálatok tárgyát képezi. A hőmérsékleti ingadozások, a csapadék eloszlásának változása és az extrém időjárási viszonyok (pl. aszályos időszakok, árvizek) mind komoly kihívásokat jelentenek a mezőgazdaság számára (Hatfield et al. 2011). Az aszályos időszakok csökkentik a talaj nedvességtartalmát és vízmegtartó képességét, ami a növények károsodásához és alacsonyabb terméshezamhoz vezethet (Lobell & Field 2007). A magasabb hőmérséklet növeli a növények vízigényét és hőstresszt idézhet elő, amik további veszteségeket okozhatnak a termésben (Trnka et al. 2014). A hirtelen

bekövetkező extrém időjárási jelenségek (úm. fagyok, kánikula, viharok, jégesők) mind hozzájárulnak a mezőgazdasági kockázatok növekedéséhez, csökkentve a termésbiztonságot (Trnka et al. 2014).

A búza különösen érzékeny az éghajlati változásokra, termesztése nagymértékben függ az optimális hőmérsékleti és csapadékviszonyoktól, így a globális klímaváltozás közvetlenül hat a búzatermesztésre. Az éghajlati szélsőségek növekvő előfordulása befolyásolja a növények növekedési fázisait, a betakarítás időpontját, valamint a terméshozamot (Lobell & Field 2007). A tudományos és technológiai innovációk segíthetnek a termelési problémák enyhítésében és a globális élelmiszerbiztonság kialakításában, ugyanakkor a klímaváltozás mérsékléséhez globális összefogásra és átfogó intézkedésekre van szükség. A klímaváltozás hatásainak ellensúlyozására különböző irányokat és stratégiákat kell kidolgozni a mezőgazdaságban, úm.:

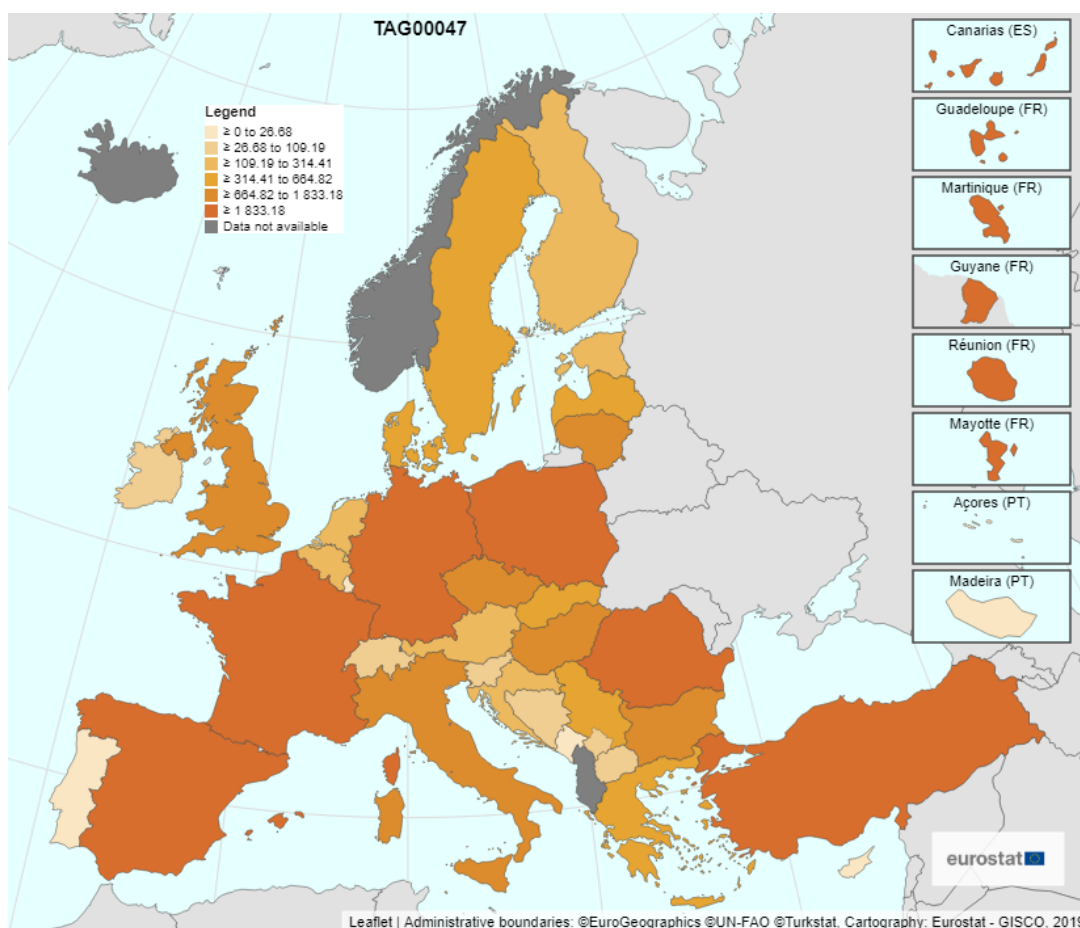
- Fenntartható mezőgazdaság: Timár et al. (2024) kimutatták, hogy az intenzív mezőgazdaság tovább növeli a szárazságot, különösen az Alföldön. A talaj egészségének megőrzésére irányuló fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok segíthetnek csökkenteni a klímaváltozás káros hatásait.
- Megfelelő vízgazdálkodási stratégiák: a vízmegtartó technológiák alkalmazása, a precíziós öntözés/öntözésvezérlés, csepegtető öntözés vagy a talajnedvesség javítása segíthet csökkenteni az aszályok hatásait (Saad et al. 2020).
- Ellenállóbb fajták nemesítése: pl. öntözést nem igényelő, szárazságtűrő fajták elengedhetetlenek a fenntartható termelés biztosításában és a terméshozam stabilizálásában a megváltozott éghajlati viszonyok között (Hickey et al. 2019).
- Monitoring rendszerek: a modern technológiai eszközök lehetővé teszik a gazdálkodók számára, hogy időben detektálják a különböző abiotikus és biotikus károk okozta tüneteket, és reagáljanak rájuk (Su et al. 2018, Lassalle 2021).

3.3 Ősi gabonák szerepe az ökológiai mezőgazdaságban

A búza az egyik leggyakoribb gazdasági növény Magyarországon és az Európai Unióban egyaránt (2. ábra) (Eurostat 2020). Napjainkban a közönséges vagy vetési/őszi búza (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*) mellett az őszi pelyvás gabonafajok, úm. az alakor búza (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) is egyre fontosabb szerepet tölt be a fenntartható mezőgazdálkodásban. Az őszi pelyvás búzák köztermesztésbe való újboli bevezetését az ökológiai gazdálkodás elterjedése segítette elő. Mégis az őszi búzafajták genetikai erőforrásainak teljeskörű kihasználása

még várat magára a mai búzanemesítési programokban és a gyakorlati növénytermesztésben (Charmet 2011, Mefleh et al. 2019, Ruiz et al. 2019). A KSH adatai szerint az alakor jelenlegi vetésterülete alacsony (nem éri el az 1000 ha-t), de évről évre növekvő tendenciát mutat, ill. vetésterületének 70%-a ökológia gazdálkodásban van. Míg az őszi búza vetsésterülete közel egymillió hektár, de csupán 1,5%-át termesztik ökológiai körülmények között.

Egyes őszi búzafajták genotípusai alacsonyabb terméshozamuk ellenére számos előnnyel rendelkeznek a modern nemesítésű búzákkal szemben, amit az ökológiai szemléletű gazdálkodásban, alacsony ráfordítás mellett érdemes kihasználni (Csákvári et al. 2021c). Ilyen előny elsősorban a jó ökológiai alkalmazkodásukban rejlik, mint például a biotikus és az abiotikus stresszel szembeni toleranciájuk, vagy a betegségekkel, kártevőkkel szembeni rezisztenciájuk (Guzmán et al. 2009, Hajnalová & Dreslerová 2010, Zaharieva & Monneveux, 2014).



2. ábra: A vetési búza, a tönkölybúza, az alakor búza és a durumbúza együttes termesztési területe, terméshozama (1000 ha) az Európai Unióban, 2019 (Eurostat 2020).

A vadon elő alakor legkorábbi szemmaradványait a délkelet-törökországi Karcadağ-hegység „termékeny félhold” területére eső részén találták meg (Charmet 2011, Gyulai 2019), majd a középkortól kezdődően a 20. század elejéig egész Európa-szerte elterjedt (Zaharieva & Monneveux 2014). Az alakor a 17. század folyamán a Kárpát-medencéből teljesen eltűnt, kivéve Erdélyt, ahol egészen a 20. század végéig fenntartották termesztését (Szabó 1976, Péntek & Szabó 1981, Hajnalová & Dreslerová 2010) (3. ábra). Az alakorra, ill. más régi fajtákra is jellemző, hogy genetikai izolációjuk révén fejlődnek ki a helyi környezeti körülmények között, míg a nemesített fajtákat általában erős emberi szelekció hozza létre (Jacomet 2006). Az alakor az ökológiai tényezőkhez való alkalmazkodás eredményeként betegségekkel, kártevőkkel és környezeti stresszel szemben ellenálló, mindamellett magas a tápértéke (Guzmán et al. 2009, Hajnalová & Dreslerová 2010, Goriewa-Duba et al. 2018) és fehérjetartalma, ami a kutatások szerint 13,2% és 28,5% között mozog (Zaharieva & Monneveux 2014). További kutatások kimutatták, hogy az alakor egyes genotípusai elfogadható terméshozamot biztosítanak még gyenge, tápanyagszegény talajokon is (Castagna et al. 1995, Bencze et al. 2020). Emellett újra felfedezték, mint jó beltartalmi értékkel rendelkező egészséges terményt az alternatív élelmiszergyártásban és minőségi termékészítésben. Egyes kutatások szerint gliadin tartalma kevésbé káros a glutén intoleranciában szenvedő betegek számára (Charmet 2011, Zaharieva & Monneveux 2014), bár más kutatások arra hívják fel a figyelmet, hogy az ősi búzák hasonlóan a modern fajtákhoz nem járulnak hozzá a krónikus betegségek csökkentéséhez (Ribeiro et al. 2016, Dinu et al. 2018, Shewry 2018). Azok a mechanizmusok, amik révén biztonsággal kimutatható, hogy az ősi búzák egészségesebbnek és táplálóbbnak bizonyulnak, mint a modern búzafajták, még nem tisztázottak (Shewry 2018). A korlátozott számú genotípus-vizsgálat miatt a környezeti adottságokhoz való alkalmazkodásuk sem minden esetben tisztázott, ezért szükségesek új kutatások modern eszközökkel.



(a)

(b)

3. ábra: (a) A gyomok hagyományos módon való eltávolítása, “kifésülése” az alakor szárkötegből. Erdély, Béta. (b) Az alakor betakarítása kaszával. Erdély, Körispatak (Képek forrása: Hajnalová & Dreslerová 2010).

3.4 Modern technológiák a környezettudományban: távérzékelés és digitális képfeldolgozás

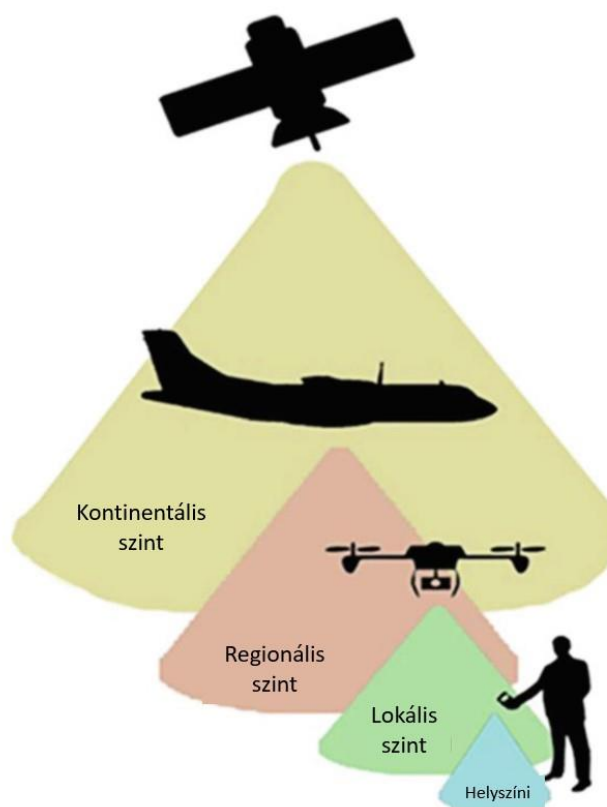
3.4.1 Földfelszíni és légi távérzékelés

A földfelszíni és légi távérzékelés célja információk gyűjtése és mérése különböző objektumokról, jelenségekről vagy bizonyos anyagok tulajdonságairól egy olyan adatrögzítő eszközzel, ami nincs fizikai kapcsolatban a megfigyelés tárgyával (Belényesi et al. 2008ab, Khorram et al. 2012). Természettudományi kutatásoknál a távérzékelés a szárazföld felszínéről, az óceánokról vagy a légkörről visszavert és elnyelt elektromágneses sugárzást vizsgálja. Ezáltal lehetővé válik az egyes objektumok vagy területek azonosítása, el- és lehatárolása, valamint megkülönböztetése (Short 2010, Khorram et al. 2012).

Napjainkban a kézi és légi adatgyűjtő eszközök széles skálája ismert. A földi megfigyelés mellett különböző magasságokban, eltérő platformokra telepíthetők műszerek, úm. sárkányrepülő, drónok (100–500 m), kis magasságon repülő gépek (300 m–3km), nagy magasságon repülő gépek (3–10 km), műholdak sarkközei pályán (600–1000 km), műholdak geostacionárius pályán (36 000 km) (Belényesi et

al. 2008a). Az elektromágneses információkat leggyakrabban földi eszközökkel, repülőgépekre, drónokra, illetve föld körüli pályára állított eszközökkel gyűjtik (Kozma-Bognár & Berke 2020, Sabins & Ellis 2020, Pandžić et al. 2022) (4. ábra).

A távérzékelésben használt érzékelők, vagy más néven szenzorok alkalmasak arra, hogy a szem számára nem látható elektromágneses-tartományban is végezhesünk földi és/vagy légi felvételezést és monitorozást. Ezáltal viszonylag rövid idő alatt nagy mennyiségű adat gyűjthető oly módon, hogy a megfigyelés tárgyával közvetlen fizikai kapcsolatba nem kerülünk (Kristóf & Belényesi 2016). A távérzékelés másik előnye, hogy a vizsgált területéről rendszeres időközönként nyerhetők adatok, ami segíti az időbeli változások kimutatását (Khorram et al. 2012). A távérzékelte adatok térbeli jellegűek, a megfigyelt területek és objektumok földrajzi elhelyezkedésük alapján koordináta-rendszerben is elhelyezhetők és térképen ábrázolhatók (McRoberts et al. 2010), ezáltal más térképi információkkal (pl. népsűrűségi adatok, úthálózat) összevethetők és földrajzi információs rendszerekben (GIS) rögzíthetők. A kellően részletes távérzékelési adatok sokszor a terepi megfigyeléseknél hatékonyabban felhasználhatók, például a növényzet növekedésének (Acorsi et al. 2019), egészségi állapotának jellemzésére (Lassalle 2021), élőhelyek azonosítására (Kerr & Ostrovsky 2003).



4. ábra: A távérzékeléses adatgyűjtés platformjai (Pandžić et al. 2022 alapján).

3.4.1.1 Az elektromágneses sugárzás

A távérzékeléses adatgyűjtés alapját az elektromágneses hullámok visszaverődésének szenzorok általi érzékelése és mérése adja (Liu & Bao 2021). Az elektromágneses sugárzás olyan energia, ami szabályos hullámmintázattal jellemezhető. A látható fény az elektromágneses sugárzásnak csak egy kategóriája, más típusai, mint például a rádióhullámok, az infravörös, vagy a gammasugárzás együttesen alkotják az elektromágneses spektrumot. Az elektromágneses sugárzás a spektrumon belül nagyon változatos a hullámhossz tekintetében (Khorram et al. 2012, Sabins & Ellis 2020).

Amikor az elektromágneses sugárzás bármilyen objektummal vagy felülettel (pl. növényzet, víz, légköri gázok) érintkezik, kölcsönhatásba lép velük, amik a következők lehetnek: abszorpció (elnyelés), reflexió (visszaverődés), szóródás, objektum általi emisszió (kibocsátás) és az elektromágneses sugárzás transzmissziója (továbbhaladás) az objektumon keresztül. A távérzékelés elsősorban a visszavert és kibocsátott elektromágneses sugárzás érzékelésén és rögzítésén alapszik. Alapvetően a távérzékelést az teszi lehetővé, hogy minden objektumnak, felületnek és anyagnak egyedi kibocsátása és visszaverődési tulajdonsága van. Ezeket együttesen spektrális ujjlenyomatként nevezzük. A távérzékeléses szenzorok ezeket az egyedi spektrális adatokat gyűjtik (Khorram et al. 2012, Sabins & Ellis 2020). Ha a hullámhossz függvényében ábrázoljuk a visszaverődő és beeső sugárzás intenzitásának hányadosát, megkapjuk az ún. spektrális reflektancia görbét, ami minden felszínborításra és objektumra nézve sajátos (Szalay 2014).

Az elektromágneses sugárzás abszorpciójára és reflektanciájára a légkör folyamatos hatással van. A légkör összetétele és ebből adódóan az elnyelés mértéke állandóan változik a földrajzi hely, az éghajlat, az évszakok és a napszakok függvényében. Amikor az elektromágneses sugárzás belép a légkörbe, elsősorban az elnyelés és a szóródás következtében sebessége, hullámhossza és így intenzitása, valamint spektrális eloszlása, a fénytörés következtében pedig eredeti iránya is megváltozik (Szalay 2014). A légköri reflexió következtében a szenzorba nemcsak a vizsgált objektumról visszaverődő elektromágneses sugárzás érkezik be. Amíg az elektromágneses sugárzás a vizsgált objektumról eljut az érzékelőbe adott utat tesz meg, melynek során szintén fellépnek a légköri hatások, amik megváltoztatják a szenzor által érzékelt radiometriai tulajdonságokat. Ezért minden nagy magasságú

távérzékelés esetén a mérés és adatfeldolgozás során korrigálni kell a légkör inhomogenitásából adódó geometriai hibákat (Toutin 2011, Szalay 2014).

3.4.1.2 Adatgyűjtő eszközök

A távérzékelés adatgyűjtő rendszerei lehetnek passzív és aktív jellegűek. A passzív szenzorok a jelenleg világszerte működő szenzorok legelterjedtebb kategóriája, ezek a vizsgált felszínről vagy objektumokról természetes módon visszavert vagy kibocsátott elektromágneses sugárzást rögzítik (Fitzgerald 2010). A passzív rendszereknél a távérzékelésre használható optikai ablak kb. 300 nm-től 14 000 nm-ig terjed, ami azt jelenti, hogy távérzékelés ezekben az atmoszférikus tartományokban lehetséges, mivel a légköri gázok elnyelése itt a legalacsonyabb mértékű (Salisbury & D'Aria 1994, Kozma-Bognár & Berke 2020). A passzív rendszerek alkalmazása tiszta és napfényes időszakokban lehetséges. A széles érzékelési tartományú rendszerek elektro-optikai elven működnek, a beérkező elektromágneses sugárzást különböző optikai eszközökkel (pl. lencse, tükör, spektrográf stb.) a szenzor fényérzékeny felületére, fotodiódákra vetítik (Szalay 2014, Rustamov et al. 2018). Ezzel szemben az aktív érzékelők, mint például a radarok (RADio Detection And Ranging) mesterségesen létrehozott elektromágneses sugárzást bocsátanak ki a vizsgált objektum irányába, majd rögzítik, hogy az elektromágneses sugárzás mekkora része verődik vissza a rendszerbe (Jensen 2005, Khorram et al. 2012).

3.4.1.3 Felvételezés és adatgyűjtés

A digitális felvételek és a távérzékelte adatok feldolgozását megelőzi a pontos adatgyűjtés, aminek tartalmaznia kell a következőket: GPS mérés (koordináták, magasság, tracklog fájl, látható műholdak), meteorológiai adatok, színhőmérséklet és fényintenzitás, talajminta és növényminta begyűjtése (László et al. 2014). A különböző feldolgozási, interpretációs technikák tulajdonképpen döntéshozási folyamatok, amely során a felvétel egyes pixeleit spektrális tulajdonságai alapján meghatározott matematikai kritériumrendszer szerint felismerjük és kategóriákba, osztályokba soroljuk (Kristóf 2005). Ha a klasszifikáció megfelelően pontos, a végeredményként keletkező osztályok megfelelnek az általunk definiált kategóriáknak. Ilyen például a NÖVMON projekt (Országos Szántóföldi Növénymonitoring és Termésbecslés) keretében végzett tematikus osztályozás által létrehozott növényterkép (László et al. 2014), vagy a NÖSZTÉP projekt (Nemzeti

ökoszisztéma-szolgáltatás térképezés és értékelés) keretében végzett Ökoszisztéma-alaptérkép (Agrárminisztérium 2019, Vári et al. 2022, Tanács et al. 2023) létrehozása.

A kvantitatív elemzés a távérzékelte felvételeket mérésekként kezeli, a földfelszíni objektumok fizikai-kémiai paramétereit számítja ki a reflektancia-modellek invertálásával. Általában a növényzet sajátos visszaverődéséből adódó nagy kontrasztot használja ki a vörös és közeli infravörös tartomány között. Ehhez fontos, hogy az alkalmazott szenzor tartalmazza a szükséges hullámsávokra érzékeny csatornákat. Kvalitatív elemzéseket abban az esetben végeznek, ha a cél a földfelszíni objektum elkülönítése, a felszínborítás vizsgálata véges számú kategória alapján. Alkalmazható több időpontú felvétel alapján az egyes kategóriák konverziójának, a területi kiterjedés változásainak vizsgálatára (Kristóf 2005).

3.4.2 Digitális képfeldolgozás

A digitális képalkotás magával vonja a digitális képfeldolgozás szükségességét is. A digitális képfeldolgozás a vizuális adatok feldolgozásával, elemzésével és kiértékelésével foglalkozik. Célja, hogy hasznos információkat nyújtson a képekből kinyert adatokból. A képfeldolgozási eljárások magában foglalják a képek javítását (zajszűrés), az értékes adatok kinyerését és elemzését (Berke et al. 2010b, 2020). A környezettudományban a digitális képfeldolgozás legfontosabb termékei közé tartoznak a tematikus térképek és a színkódolt, osztályozott képek, amik ábrázolják a vizsgált objektumok bizonyos jellemzőit vagy térbeli mintázatot mutatnak (McRoberts et al. 2010, Khorram et al. 2012). A távérzékelést és ezzel együtt a digitális képfeldolgozást sokszor a felszínborítási kategóriák kiterjedésének és változatosságának feltérképezésére alkalmazzák, ezek a térképek pedig fontos adatokat szolgáltatnak különböző alkalmazási területeken, mint például az ökológiában (Yang et al. 2019), továbbá területi tervezéshez (Franklin & Wulder 2002), vízkészletek nyomon követéséhez (Koponen et al. 2002), környezeti hatásvizsgálatokhoz és szakpolitikai döntéshozatalnál nyújtanak fontos input adatokat (Kerr & Ostrovsky 2003, Tanács et al. 2023). A távérzékelte adatok felhasználásával kapcsolatos egyik legfontosabb szempont, hogy az így nyert kimenet megfelelően értékelte legyen, sőt lehetőség szerint szakemberek által terepen validálva. Ha a kimenet például egy osztályozott térkép, fontos annak pontosságát vizsgálni, hiszen minden térkép tartalmaz(hat) hibákat, és az elemző szakértő

felelőssége a hibák jellemzése és korrigálása. A legszélesebb körben elfogadott módszer a távérzékeléssel készült térképek pontosságának értékelésére a referenciaadatokkal való összehasonlítás, amelyet megfelelő számú terepi mintaterületen gyűjtött adatokkal szükséges összevetni. A validálás legfontosabb eszköze a hibamátrix, ami számszerűsíti az egyes térképi osztályok pontosságát, valamint magának a térképnek a pontosságát az összes osztály kombinációjával (Congalton 1991, Khorram et al. 2012).

3.4.2.1 Digitális képek felbontása

Az érzékelők az adatokat korábban analóg formában rögzítették, pl. repülőgépre szerelt kamerával gyűjtött légi felvételeken. Napjainkban gyakoribb a digitális formátumban gyűjtött és tárolt adatok rögzítése, azaz kétdimenziós mátrixot vagy képet hoznak létre, ami pixelekből (képpontokból) áll, így tárolva az elektromágneses sugárzás adatait (Berke et al. 2010b, 2020, Khorram et al. 2012, Ansari et al. 2014). A kép információtartalma függ a felbontástól, ami térbeli, spektrális, időbeli és radiometriai lehet (Jung & Vohland 2022).

A térbeli vagy geometriai felbontás a kép részletességének mértékét fejezi ki, ami által információ nyerhető többek között a tárgyak helyéről, elhelyezkedéséről, alakjáról, felületéről. Digitális képek esetében ez egy adott pixellel rögzített területre vonatkozik. Mivel a pixelek négyzet alakúak, ezért a felbontás a pixel oldalhosszával fejezhető ki (Khorram et al. 2012, Sabins & Ellis 2020). A terepi felbontás a repülés magasságától és az üzemeltetett szenzor látószögétől szintén függ. A maximális repülési sebességet a szenzor mintavételi frekvenciája (frame rate [frames/s]) alapján kell megválasztani (Szalay 2014).

A spektrális felbontást a hullámhossztartomány szélessége és/vagy az érzékelő által rögzített spektrális csatornák (sávok) száma adja meg (Khorram et al. 2012). Az érzékelő szenzorok különböző számú és szélességű hullámhossztartományokban mérnek, ami alapján 3 fő kategória különíthető el. A pánkromatikus (fekete-fehér) felvételeket készítő érzékelők egy széles spektrális sávban, igen nagy geometriai felbontással rendelkeznek (pl. a QuickBird műhold fedélzeti érzékelője pánkromatikus képek esetén 62 cm-es térbeli felbontással rendelkezik). A multispektrális szenzorok 20 vagy annál kevesebb, viszonylag széles sávban, sávonként 10–100 nm sáv szélességgel érzékelnek. A hiperspektrális szenzorok 20-nál több, diszkrét sávban dolgoznak. Általában 2–10 szenzor összehangoltan

működik együtt (Kozma-Bognár & Berke 2020). Állandó, vagy a hullámhossztartomány függvényében változó sáv szélesség a jellemző, ami akár 2, 5, 10 nm is lehet. Egy adott rendszerben széles hullámhossztartományban történik adatgyűjtés, ún. VIS (látható), NIR (közel infravörös), SWIR (rövidhullámú infravörös) hullámhossztartományokban ~400 nm-től 2500 nm-ig. A nagy csatornaszámú (több mint 100), széles spektrális tartományú (400–1000 nm vagy több), és szűk sáv szélességű (kevesebb, mint 10 nm) felvételeket nevezik nagy felbontású hiperspektrális rendszereknek, ill. képalkotó spektroszkópiának (Szalay 2014, Jung & Vohland 2022).

Az időbeli felbontás alatt azt az időtartamot értjük, ami alatt az érzékelő egy adott földrajzi területet ismételt detektál, pl. az ENVISAT-1 műholdak a Föld adott pontját 35 naponként tapogatták le. Egyes műholdak, mint például a geostacionárius pályán mozgó GOES műholdak visszatérési ideje bizonyos helyeken kevesebb, mint egy óra. Ezek a műholdak leginkább meteorológiával és éghajlati kutatásokkal kapcsolatos adatokat szolgáltatnak, mivel durva, 8 km-es térbeli felbontással rendelkeznek, ami a földfelszín tanulmányozására kevésbé alkalmas (Khorram et al. 2012).

Végül a radiometriai felbontás adja meg az érzékelő fényerejét bináris bitmélységben kifejezve (Jensen 2005). A bináris bitmélységet jellemzően a következő szürkeárnyaltos szintek tartományaiban fejezik ki: 8 bites (0-255), 10 bites (0-1023), 11 bites (0-2047), 12 bites (0-4095) és 16 bites (0-65 535) (Abrams & Comer 2013, Emeter 2019). Attól függően, hogy a szenzor hány bites a felvételen egy pixel maximális értéke változhat. A nagyobb felbontású szenzor érzékenyebb a visszavert (reflektált) vagy kisugárzott (emittált) sugárzási energia változásaira (Szalay 2014). A műholdak közül a Landsat 9 14 bites radiometriai felbontásra is képes, ami jelentős innovációt jelent a Landsat 8 bites felbontású műholdjához képest. Ez a fejlesztés nagyban hozzájárult a különböző felszínborítási kategóriák minél pontosabb osztályozásához (USGS 2022).

3.4.2.2 Digitális képfeldolgozás a fenotipizálásban

A modern növény-nemesítés egyik fő célja olyan genotípusok létrehozása, amelyek jól alkalmazkodnak a környezeti változásokhoz, produktívak és ellenállóak a kártevőkkel, betegségekkel szemben. Emellett fontos a költséghatékonyság, ezért a kevésbé erőforrás-igényes és fenntartható (extenzív) fajták nemesítése a cél, amelyek jól

beilleszthetők az alacsony ráfordítású ökológiai vagy akár a precíziós mezőgazdaságba is (Pieruschka & Schurr 2019, Kim 2020). A kereskedelmi és a tudományos célú növénynemesítő programok jellemzően hagyományos fenotipizálást használnak a fajták számos tulajdonságának értékelésére, például a növényi tulajdonságokat, úm. a termés hozamot, a biomasszatömeget, a növény magasságot vagy a biotikus és az abiotikus stressztényezőkkel szembeni ellenállóképességet manuális módszerekkel mérik (Uzal et al. 2018, Kim 2020). A fentiek alapján elmondható, hogy a hagyományos nemesítési módszerek gyakran költségesek, időigényesek és nagy munkaerőforrást követelnek. Emellett a növényi jellegek meghatározásához általában valamilyen destruktív módszert alkalmaznak, így a hosszú távú kutatásokban csak korlátozott mennyiségben és ismétlésszámban biztosítottak az erőforrások (Busemeyer et al. 2013, Walter et al. 2019, Selvaraj et al. 2020). A hagyományos kézi nemesítés mellett és annak fejlesztése érdekében szükséges újszerű megközelítések kidolgozása és új technológiák alkalmazása. Ezzel lehetővé válik nagy populációk gyors, precíz és ismételhető fenotipizálása, ami elősegíti a nemesítési szelekciós folyamatok minőségi és mennyiségi fejlesztését és a reziliens genotípusok megtalálását (Busemeyer et al. 2013, Uzal et al. 2018, Kim 2020, Niazian & Niedbala 2020).

A távérzékelés és a képalkotó technológiák fejlődésével lehetőség nyílt különböző növénypopulációk gyors és pontos fenotipizálására kisléptéktől kezdődően egészen a szántóföldi méretekig (Kim 2020). A növénynemesítés efféle modern megközelítése potenciális megoldással szolgálhat adott nemesítési feladatoknál (Uzal et al. 2018). A nemesítésben is használatos távérzékelés számos szenzort, platformot, kép- és adatfeldolgozási technológiát foglal magába, de jelenleg még hiányosságok tapasztalhatók a módszertanban és nehézségek a költséghatékonyság szempontjából (Hickey et al. 2019, Kim 2020). Például a felvételek minőségének és az adatok feldolgozási sebességének növelése gyakran csak költséges beruházással érhető el. A berendezések (pl. szenzorok, UAV platformok, a standard felvételezést biztosító klímakamrák) beruházási költségei is viszonylag magasak (Kim 2020, Omari et al. 2020). A fényviszonyok, a megvilágítás erőssége és szöge mind hatással van a képek standardizálására, amit a felvételezésnél és képfeldolgozásnál is figyelembe kell venni. A nagy mennyiségű nyers adat előállítása, tárolása és feldolgozása szintén kihívások elé állítja a szakembereket (Kim 2020, Omari et al. 2020).

A képalkotó eljárások korlátai mellett (Walter et al. 2019) a módszer gyorsasága, a roncsolásmentes vizsgálat adta lehetőségek, a valós idejű és nagy felbontású felvételek mégis életképes alternatívát jelentenek a hagyományos fenotipizálással szemben (Yadav et al. 2010, Walter et al. 2019). Az elmúlt években a növényfajok és fajták digitális képelemzését a kereskedelmi és kutatási célú növénynemesítési programokban, valamint a mezőgazdasági kutatásokban sokrétűen alkalmazták (Emődi et al. 2014, 2015, Scharr et al. 2016, Uzal et al. 2018, Walter et al. 2019, Niazan & Niedbała 2020). Az új technológiák növekvő népszerűséggel és hatékonysággal alkalmazhatók nemcsak a növénynemesítésben, de a növények környezeti terhelésre adott válaszainak megértésében is (Liu & Pattey 2010, Niazan & Niedbała 2020).

3.4.2.3 Növényi paraméterek digitális mérése

A növényfajták eltérő genetikai háttérrel rendelkeznek, ami különböző morfológiai tulajdonságokban nyilvánul meg. A földfelszíni és légi távérzékelés, valamint a digitális képfeldolgozás alkalmazásával számos információ és paraméter (geometriai és spektrális) mérhető és elemezhető, ami segít az egyes fajták elkülönítésében és azok morfológiai jellemzőinek és habitusának vizsgálatában. A digitális fenotipizálás lehetővé teszi a fajták növekedési és fejlődési állapotának objektív és pontos monitorozását és segíthet a legjobban teljesítő fajták kiválasztásában és új fajták nemesítésében. A módszer tehát hozzájárul a fenotípus-genotípus kapcsolat jobb megértéséhez, valamint a növénynemesítés fejlesztéséhez (Busemeyer et al. 2013, Pieruschka & Schurr 2019, Kim 2020, Omari et al. 2020, Brainard et al. 2021). Többek között mérhetők a következő paraméterek:

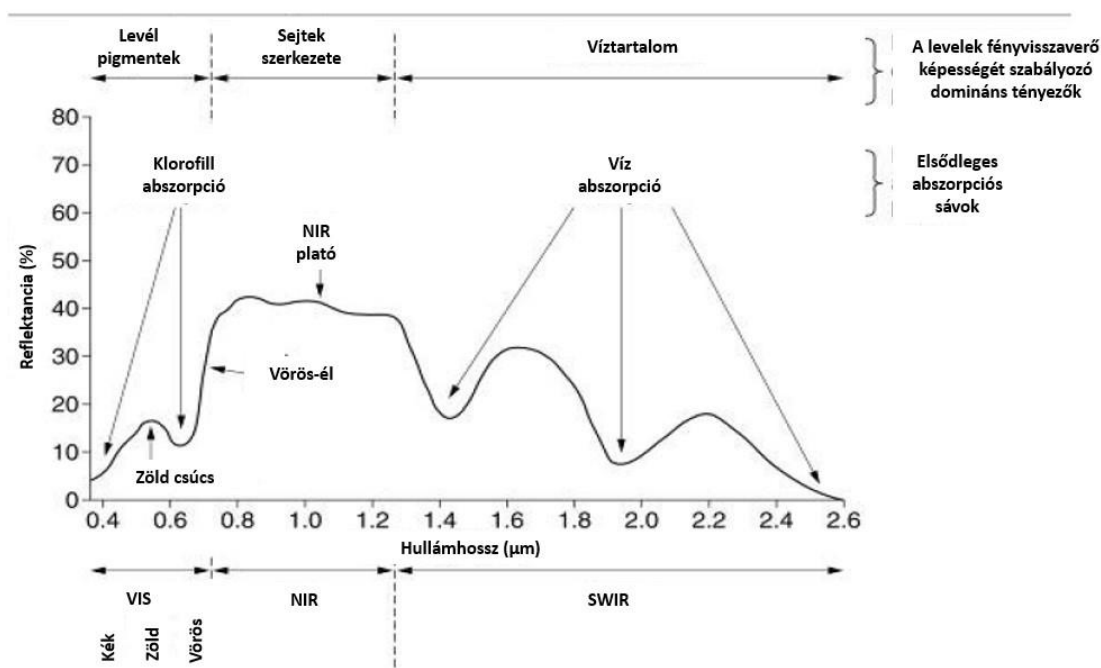
- Növénymagasság és biomaszatömeg: a digitális képfeldolgozási technikák, mint az RGB képek elemzése lehetővé teszik a növények magasságának és biomaszatömegének mérését (Fanourakis et al. 2014, Bendig et al. 2015, Acorsi et al. 2019, Lu et al. 2019).
- Levélfelület és levelek állapota: képfeldolgozási módszerekkel a levelek számát, alakját, méretét és színét is mérhetjük, sőt a levelek elváltozásai is kimutathatók, amik pl. betegségek, szárazság vagy tápanyaghiány tüneteire utalnak (Liu & Pattey 2010, Fanourakis et al. 2014, Wang et al. 2014, Golbach et al. 2016).
- Növekedési ütem és fenológiai fázisok: pl. a csírázás, a virágzás, a termésérés szakaszai fajtánként különböznek. A digitális képfeldolgozás képes ezeket a

fázisokat nyomon követni és elemezni, ami fontos az egyes fajták növekedésének, fejlődésének és fenológiai jellemzőinek elkülönítésében (Dana 2008, Golbach et al. 2016, Zhang et al. 2018).

- Spektrális jellemzők: a spektrális jellemzők, ill. az azokból számolt vegetációs indexek a növények eltérő növekedési ütemét, állapotát, a fajták közti eltéréseket képesek jelezni (Bendig et al. 2015, Wiratmoko et al. 2020, De Swaef et al. 2021).

3.5 A növényzet reflektanciája, mint mezőgazdasági állapotjellemző

Elsősorban a növényzet eltérő élettani és szöveti sajátosságaiból adódóan a látható (VIS, 380–720 nm) és közeli infravörös (NIR, 720–1300 nm) csatornákon mért reflektancia értékek egyedi, ezért a növények spektrális ujjlenyomata fajonként változó (Kristóf 2005, Szalay 2014). Egy adott faj spektrális reflektancia görbéjében mégis tapasztalhatók eltérések, mivel a visszavert és az elnyelt sugárzás mértéke függ a növény pillanatnyi fizikai, kémiai tulajdonságaitól, valamint a szövetekben lévő pigmentek, lignin, víz jelenlététől is. Továbbá a növény fejlődési szakasza és egészségi állapota is hatással van a spektrális tulajdonságokra (Bácsatyai & Márkus 2001, Kristóf 2005, Keyworth et al. 2009) (5. ábra).



5. ábra: A növényzet spektrális jelleggörbéje. Az egyes tartományokban különböző molekulák jelenléte a meghatározó: Kék tartomány (400–500 nm): klorofill-b, antocianin; Zöld tartomány (500–600 nm): xantofill, karotinoidok; Vörös tartomány

(600–700 nm): klorofill-a; Vörös-él (700–800 nm): zöld biomasszatömeg; 970 nm: víz, SWIR (1,4–3 μm): víz, lignin jelenléte (Keyworth et al. 2009 után módosítva).

A visszavert sugárzás jelentős része a növényeknél 380 nm és 2500 nm közti tartományban mérhető, de a növényzet monitorozása szélesebb hullámhossztartományban is lehetséges. A látható fénytartomány (VIS) 380 és 720 nm között mérhető. Itt a különböző abszorpciós pigmentek, ún. klorofillok, karotinoidok, xantofillok jelenléte határozza meg a spektrális tulajdonságokat. A kék tartományban a klorofill-b és az antocianin, a zöld tartományban a xantofill és a karotinoidok, vörösben a klorofill-a pigmentek vannak jelen (Keyworth et al. 2009). A zöld tartományban magasabb a klorofill-b pigment reflektanciája, mivel itt hiányzik a zöld színtest, ami azt elnyelné. Míg a kék és vörös tartományokban a klorofill pigmentek elnyelik a fotoszintézishez szükséges fényt (Sabins & Ellis 2020). A látható tartományban mért spektrális tulajdonságok alapján következtethetünk a klorofilltartalomra. A növények klorofilltartalma jól korrelál a nitrogénnel, kimutatható, hogy magasabb klorofilltartalom esetén magasabb a növények nitrogéntartalma is (Wang et al. 2014, Yadav et al. 2010).

A közeli infravörös (NIR) fénytartomány 720–1300 nm közt található, itt a növényi sejtek és szövetek struktúrája meghatározó (Keyworth et al. 2009). Az egészséges növényzet jól veri vissza a közeli infravörös elektromágneses sugárzást, ezért ez a sáv a növényi biomassza mennyiségének becslésére alkalmas (Bendig et al. 2015). Magasabb klorofilltartalom esetén a növényzet az asszimilációhoz szükséges fényt elnyeli a látható fénytartományban, míg közeli infravörös tartományban a visszaverődés meghatározó. A beteg vagy gyér vegetáció több fényt ver vissza a látható és kevesebb fényt a közeli infravörös tartományban (Sabins & Ellis 2020).

A közép infravörös (MIR) fénytartomány 1300 és 3000 nm között található. Ebben a tartományban a sejtekben jelenlévő víz és a sejtfal szilárdságát növelő lignin általi elnyelés határozza meg az adott fajra jellemző sajátos optikai tulajdonságokat (Tamaki & Mazza 2011) és az eltérő spektrális reflektancia görbéket. A vegetáció nedvességtartalmának meghatározására szolgáló sáv (Granlund et al. 2018).

A távoli infravörös vagy termális (FIR) fénytartomány 8000–14000 nm közötti, hőtérképezésre alkalmas sáv. Hőkamerával kimutathatóak a növényi betegségek, ill. szárazság okozta stressz általi változások, mivel stressz hatására a növények sztomái bezáródnak, ezáltal a transpiráció csökken, ami a hűtőhatás csökkenését vonja maga után (Buitrago et al. 2016).

3.5.1 Látható fénytartományban érzékelő RGB kamerák a fenotipizálásban

Digitális eszközökkel gyűjtött fenotípusos adatokkal meghatározható, hogyan befolyásolják a környezeti tényezők a növények morfológiai jellemzőit, ami alapvetően meghatározza a fejlődést, az alkalmazkodóképességet és végsősoron a termelési potenciált (Fahlgren et al. 2015, Tardieu et al. 2017). A különböző típusú kérdések megválaszolását segíti, hogy a piacon számos típusú optikai szenzor létezik (pl. RGB kamerák, multispektrális, hiperspektrális, közeli infravörös érzékelők, hőkamerák), amik fenotipizálásra is használhatóak. A különböző érzékelők az elektromágneses sugárzás bizonyos tartományának elnyelődésének és visszaverődésének mérésére szolgálnak, ezáltal jellemezhetők a növények spektrális és morfológiai tulajdonságai (Busemeyer et al. 2013, Li et al. 2014, Kim 2020). Annak ellenére, hogy a fenotipizáló platformok számos érzékelővel felszerelhetők (Walter et al. 2019), a digitális képelemzés és a növényi jellemzők minőségi kinyerése kihívásokkal teli. A szenzorok közül érdemes a célnak megfelelő költséghatékony megoldást választani (Fahlgren et al. 2015, Kim 2020).

Az RGB kamerával történő képalkotás a fenotipizálás fontos eszközévé vált, nagy múltra tekint vissza és széles körben használt technológia a különböző mezőgazdasági kutatásokban is. Ez többek között annak köszönhető, hogy a 400 nm és 750 nm közötti elektromágneses-hullámhossztartományban való mérés a legegyszerűbb és leggazdaságosabb választás (Walter et al. 2019, Omari et al. 2020). Az RGB-alapú képalkotó technológiák lehetővé teszik a növényi paraméterek gyors, nem destruktív mérését, ill. más multi- és hiperspektrális eszközökhöz képest alacsonyabb árfekvésűek (Richardson et al. 2007, Hunt et al. 2011, Costa et al. 2020). A mérés során digitális fényképezőgéppel felvételeket készítenek a növényekről, és a képek elemzése, megfelelő képfeldolgozó szoftverekkel, lehetővé teszi a növények jellemzőinek és növekedési dinamikájának követését, amik mind fontos információt nyújtanak a fenotípusról (Abebe et al. 2023).

RGB képekkel számos fenotípusos paramétert mérhetünk (Abebe et al. 2023), ideértve a 3.4.2.2 fejezetben tárgyalt morfológiai és spektrális jellemzőket. A növények képi elemzése révén pontos növekedési görbéket alkothatunk, amik segítenek megérteni a genotípusok közötti különbségeket. RGB felvételeken a levelek színét is elemezhetjük, amelyek közvetett módon jelezhetik a fotoszintetikus aktivitást és a növények tápanyagellátottságát (Richardson et al. 2007). A zöld szín intenzitása például összefüggésben áll a klorofilltartalommal, ami a növények

fotoszintetikus aktivitásának fontos mutatója (Baresel et al. 2017, továbbá lásd. 3.5 fejezet). Az RGB képekkel történő színelemzés lehetővé teszi a növények egészségi állapotának gyors észlelését és diagnosztizálását, mivel a növények stresszreakciói a vízhiányra, tápanyaghiányra vagy betegségekre gyakran színváltozásokkal járnak (Zarco-Tejada et al. 2005).

Számos kutatás RGB kamera segítségével azonosított különböző magjellelmzőket (Dana & Ivo 2008, Gyulai et al. 2015, Goriewa-Duba et al. 2018, Uzal et al. 2018, Zhang et al. 2018), vagy becsült klorofill-tartalmat és nitrogén-koncentrációt a levelek RGB jellemzői alapján (Yadav et al. 2010, Wang et al. 2014). Más kutatások digitális képfeldolgozással mérték a fenotipizálásához szükséges növényi jellemzőket (Hemming & Rath 2001, Golzarian & Frick 2011, Golbach et al. 2016, Brainard et al. 2021). Az RGB kamerák szintén használhatók a növényzet szerkezeti változásainak észlelésére és monitorozására és a termésmennyiség meghatározására (Bendig et al. 2014, Berger et al. 2014, Fanourakis et al. 2014, Golzarian & Frick 2011, Wang et al. 2014, Acorsi et al. 2019, Lu et al. 2019). A hagyományos és a precíziós mezőgazdaságban gyakran alkalmazzák az RGB érzékelőket a föld feletti biomasszatömeg becslésére is, ami alapvető fontosságú paraméter a termésátlag meghatározásához (Acorsi et al. 2019, Lu et al. 2019). Ezt számos tényező befolyásolhatja, úm. az adott fajta fejlődési szakasza, betegségek, tápanyaghiány vagy -többlet, aszály okozta szárazságstressz (Fageria et al. 2011, Wang et al. 2014).

3.5.2 RGB vegetációs indexek

A növények esetében elsősorban a látható, a közeli infravörös, és a távoli infravörös tartományok alkalmasak a mérések kivitelezésére. Az ezekben a spektrumokban mért reflektancia értékekre számos vegetációs index épül (Hatfield et al. 2008, Sabins & Ellis 2020), ezek időbeni változásaiból következtethetünk többek között a biomasszatömeg változására (Bendig et al. 2014, 2015, Acorsi et al. 2019, Kraus et al. 2019, Lu et al. 2019), vagy a vegetáció állapotváltozására (Clark et al. 1995, van Iersel et al. 2018). Az RGB-alapú vegetációs indexek olyan mutatók, amelyek a látható fénytartomány 'Red' (vörös), 'Green' (zöld), 'Blue' (kék) sávjaira építenek. Alkalmasak a növények egészségének és morfológiai jellemzőinek mérésére. Az RGB értékek alapján számított vegetációs indexek előnye, hogy nem igényelnek speciális eszközöket (úm. multi- és hiperspektrális kamerákat), így akár

drónok vagy földi megfigyelés által, hagyományos fényképezőgépek segítségével is végezhetők a mérések (Hunt et al. 2011).

Az értekezésben Biró et al. (2024) strukturális hasonlósági index (Wang et al. 2004) alapján csoportosított 16 különböző vegetációs indexet vizsgálok, amik a látható tartományban, a 'Red' (0–255), a 'Green' (0–255), és a 'Blue' (0–255) sávokból számolhatók:

- 1) BGI (Blue/Green Index) = B/G ; Zarco-Tejada et al. (2005) munkájukban szőlőültetvények állapotának értékelésére használták. Klorofill-a és klorofill-b tartalmat becsültek többek között a BGI indexszel.
- 2) BI (Brightness Index) = $((R^2+B^2+G^2)/3)^{1/2}$; Richardson & Wiegand (1977) a növényzet, a talaj és a víz elkülönítésére használta.
- 3) ExB (Excess Blue) = $1.4b-g$, ahol $b = B/(R+G+B)$, $g = G/(R+G+B)$. Wiratmoko et al. (2020) az olajpálma kártevőjét, a pecsétviaszgombát vizsgálták légifelvételken. Az index segítségével egyedszinten mérték a fertőzöttség súlyosságát.
- 4) GCC (Green Percentage Index) = $G/(R+G+B)$; Richardson et al. (2007) lombkoronaszerkezet és fotoszintetikus aktivitás közötti összefüggést vizsgáltak egy kereskedelmi forgalomban kapható webkamera segítségével, hogy egy költséghatékony módszer fejlesszenek ki a fenológiai változások monitorozására.
- 5) GLI (Green Leaf Index) = $(2G-R-B)/(2G+R+B)$; Louhaichi et al. (2021) búzatáblákon vizsgálták ludak kártételét légifotók és földi megfigyelés kombinálásával.
- 6) GR (Simple red-green Ratio) = G/R ; Gamon & Surfus (1999) a kaliforniai tölgy és a napraforgó korai levélfejlődését vizsgálták az NDVI index mellett a GR indexszel, ami az antocianok mérésre alkalmas.
- 7) HUE (Overall Hue Index) = $\text{atan}(2(B-G-R)/30.5(G-R))$; Hada et al. (2024) genetikai kutatásokat kiegészítve lenfajtákat magvait vizsgálták RGB színtérben.
- 8) MGRVI (Modified Green Red Vegetation Index) = $(G^2-R^2)/(G^2+R^2)$; az indexet Bendig et al. (2015) fejlesztették ki és elsőként vizsgálták árpnál a biomasszatömeg előrejelzésére. Azt találták, hogy a látható tartományra épülő indexek pontosabb előrejelzést adnak a növények korai fejlődési stádiumában a

későbbi szakaszokhoz képest, ill. a különböző vegetációs indexek kombinációja nem javított jelentősen a becslés pontosságán.

- 9) MVARI (Modified Visible Atmospherically Resistant Vegetation Index) = $(G - B)/(G + R - B)$; Cen et al. (2019) munkájukban a rizs föld feletti biomaszatömegét vizsgálták különböző növekedési szakaszokban. Céljuk volt egy robosztus modell kidolgozása a növényi jelegek becslésére, ami hasznosítható a precíziós mezőgazdaságban és a modern növénynemesítési programokban. Azt találták, hogy az RGB képekből származtatott MVARI index megbízhatóbb becslést nyújt, mint a multispektrális képekből nyert vegetációs indexek.
- 10) RCC (Red Chromatic Coordinate Index) = $R/(R + G + B)$; De Swaef et al. (2021) a hagyományos növénynemesítési programok és terepi fenotipizálás kiegészítéseként olyan takarmányfüveket (nádképű csenkesz és két angolperje genotípus) vizsgáltak, amiknek jó a termőképessége és jól tűrik a szárazságot. Az RCC, a szintén vizsgált MGRVI indexhez képest kisebb mértékben bizonyult megfelelőnek.
- 11) RGBVI (Red Green Blue Vegetation Index) = $(G^2 - (B * R)) / (G^2 + (B * R))$; Bending et al. (2015) munkájukban az MGRVI mellett elsőként fejlesztették ki az RGBVI indexet. Azt találták, hogy az utóbbi index megbízhatóbb eredményt ad a biomaszatömeg becslésére a tavaszi árpa korai fejlődési stádiumában.
- 12) PRI (Photochemical Reflectance Index) = R/G ; Gamon et al. (1997) 20 növényfaj esetében vizsgálták az indexet. Mind a terepi, mind a laboratóriumi kísérletek azt mutatták, hogy a PRI index gyorsan változott a besugárzás és a fiziológiai állapot változásának hatására, ezért a fotoszintetikus sugárzás hatékonyságának fontos mutatója.
- 13) TGI (Triangular Greenness Index) = $G - 0.39 * R - 0.61 * B$; Hunt et al. (2011) a mezőgazdasági távérzékeléses adatgyűjtés számára fejlesztették ki annak érdekében, hogy alacsony költségű érzékelőkkel, mint a kereskedelmi forgalomba kapható digitális fényképezőgépek, mérni lehessen a levelek klorofilltartalmát és közvetetten a nitrogéntartalmukat.
- 14) VEG (Vegetative Index) = $G / (R^{0.667} * B^{0.334})$; Hague et al. (2006) terepi kísérletben traktorra szerelt hagyományos CCD kamerával sikeresen szegmentálták a VEG indexszel a gabonanövényeket a gyomoktól.

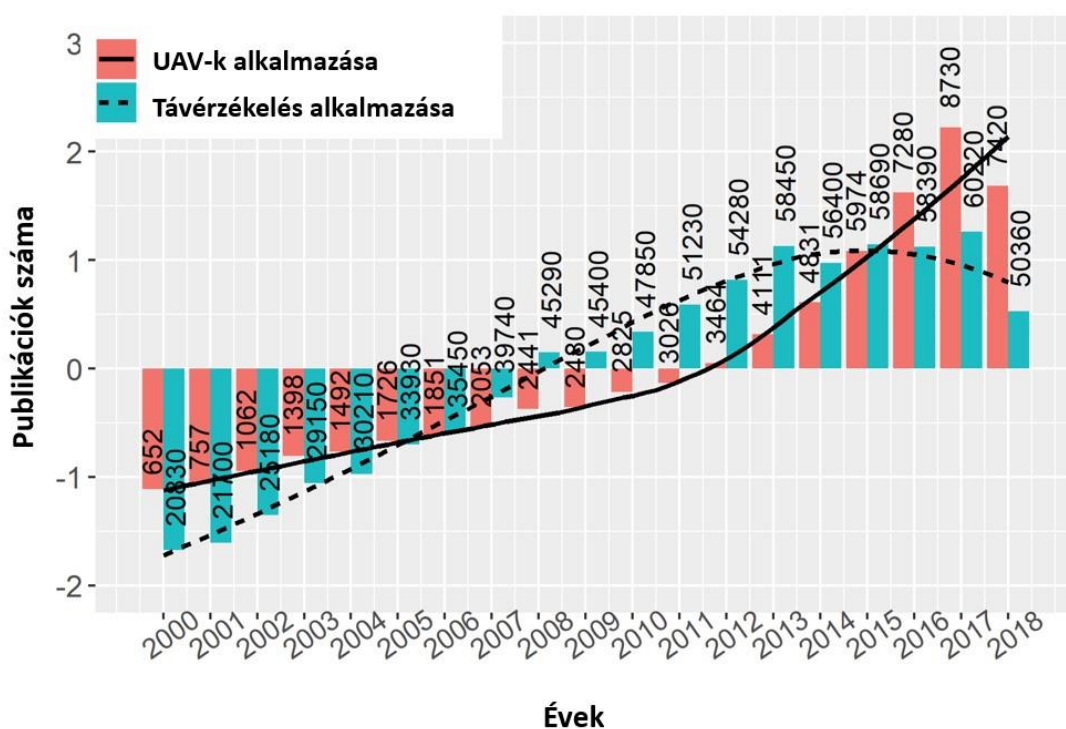
15) vNDVI (Visible Normalized Difference Vegetation Index) = $0.5268 \cdot (r^{0.1294} \cdot g^{0.3389} \cdot b^{-0.3118})$, ahol $r = R/(R+G+B)$, $g = G/(R+G+B)$, $b = B/(R+G+B)$. A leggyakoribb és széles körben alkalmazott index a mezőgazdaságban az NDVI index, ami a vegetációs aktivitására, biomasszatermelésére enged következtetni. Értékét a növényzet által a NIR és a RED sugárzási tartományban visszavert intenzitások különbségének és összegének hányadosa adja ($NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$). Mértékegység nélküli, -1-től +1-ig terjedő szám (Huang et al. 2021). Az infravörös sáv kiváltására Costa et al. (2020) kifejlesztették a vNDVI indexet, ami az NDVI-hoz hasonlóan pontosan megbecsüli az NDVI értékeket az RGB adatokból. Eddig citrusféléken, szőlőn és cukornádon tesztelték költséghatékony alternatívaként a távérzékeléses fenotipizáláshoz.

16) WI (Woebbecke Index) = $(g-b)/(r-g)$, $r = R/(R+G+B)$, $g = G/(R+G+B)$, $b = B/(R+G+B)$. Woebbecke et al. (1995) digitalizált színes képeken sikeresen azonosították a gyomnövények maradványait különböző talajokban.

3.6 A drónos távérzékelés gyakorlati alkalmazási területei a környezettudományban

A távérzékelés, ezzel együtt az UAV hordozóeszközök (*Unmanned Aerial Vehicle*, azaz pilóta nélküli repülőgép/drón) használata katonai célokra (pl. katonai és civil objektumok felismerése és megfigyelése, műveleti terület realisztikus ábrázolása) a legelső és leggyorsabban fejlődő alkalmazási terület mind az Európai Unióban, mind globális viszonylatban (Chaturvedi et al. 2019). Az UAV alkalmazások döntő többségét a katonai alkalmazások teszik ki, mivel az innovatív technológiák jellemzően elsőként a haditechnikában jelennek meg, többek között magas bekerülési költségük miatt (Restás 2013). Mára viszont alkalmazásuk egyre inkább elfogadott és általános módszerré vált számos más területen hazai és nemzetközi szinten egyaránt a különböző gazdasági ágazatok szereplői, valamint a civil szféra számára is (Kerle et al. 2019). Lehetővé vált, hogy a kutatók és a gyakorlati szakemberek innovatív megoldásokat dolgozzanak ki egyre összetettebb környezeti, társadalmi és gazdasági kihívások megoldására. A számítástechnika és a digitális képalkotás csökkenő költségei, a nyílt forráskódú szoftverek fejlődése, a rendelkezésre álló térinformatikai adatok gyors növekedése és a növekvő képfelbontás mind hozzájárultak ehhez a fejlődéshez (Khorram et al. 2012).

A környezetről való adatgyűjtés kulcsfontosságú a természettudomány minden területén egyed és közösségi szerveződési szinteken. Az UAV hordozóeszközökkel történő környezet-monitoring, valamint vegetációs vizsgálatok az egyik legjelentősebb kutatási és alkalmazási terület megbízhatóságának és időtakarékoságának köszönhetően. Nowak et al. (2019) szerint a távérzékelési technológiák alkalmazása a környezetbiológiában 2013-ig folyamatosan nőtt, míg 2013-tól stagnált. Ezzel szemben az UAV-k alkalmazása a környezetbiológiában 2000-től folyamatosan nő, és a jövőben is ez a tendencia várható (Nowak et al. 2019, 6. ábra). A távérzékelési eszközöket, különböző érzékenységgű és különböző hullámhosszon működő szenzorokat számos területen hasznosítják, úm. természet- és környezetvédelem, környezet- és tájgazdálkodás, mezőgazdaság, erdőgazdálkodás, hidrológia, geológia, katasztrófavédelem, honvédelem, vagy sport- és szabadidős tevékenység (Khorram et al. 2012, Kristóf & Belényesi 2016, Sabins & Ellis 2020). A fejezetben áttekintem azokat az egyetemeket és kutatóközpontokat, ahol a környezettudományon belül különböző alkalmazási területeken használnak távérzékelést.



6. ábra: Az általános távérzékelési módszereket és a pilóta nélküli légi járműveket (UAV) használó környezetbiológiai publikációk számának összehasonlítása. Mivel az UAV-t alkalmazó publikációk száma rendszerint alacsonyabb az általános távérzékelést használó publikációkhoz képest, az eredmények ezért centráltak (piros

és kék oszlopdiagram jelzi). Az általános távérzékeléses és az UAV-publikációk tényleges éves száma az adott oszlop tetején található (Nowak et al. 2019 alapján).

3.6.1 Hazai alkalmazások

Napjainkban a hazai gyakorlati természet- és környezetvédelemben vegetációtérképezésre és monitoringra széleskörűen alkalmaznak drónokat (Vastag et al. 2019, Bakacsy 2023ab). A Magyar Madártani és Természetvédelmi Egyesület, a Kiskunsági és a Körös-Maros Nemzeti Parki Igazgatóságok a mezőgazdasági területek legfontosabb indikátorfaját, a fokozottan védett tűzokot monitorozták. Azt vizsgálták, hogy milyen mértékben alkalmazható dróntechnológia a tűzokfészkek előzetes felderítésére, ill. a veszélyeztetetté vált fészkek utólagos ellenőrzésére. A terepszínű tűzoktyúk detektálása a nagyfelbontású felvételeken is komoly kihívást jelentett, ezért hőkamera és RGB kamera kombinációját használták (LIFE 2016).

A Szegedi Tudományegyetem kutatói az Agrártudományi Kutatóközpont szakembereivel közösen a 2020-as évben kezdték el a legveszélyesebb idegenhonos inváziós növényfajok (*Ailanthus altissima*, *Asclepias syriaca*, *Elaeagnus angustifolia*, *Robinia pseudoacacia*, *Solidago* spp.) monitorozását. A földfelszíni terepi adatokat drónfelvételek térinformatikai elemzésével, valamint műholdas távérzékelési adatokkal is kiegészítik. Elsősorban alföldi mintaterületeken kutatják a tájváltozást és a környezeti tényezőket. Céljuk az inváziós növényfajokat visszaszorító adatok összegyűjtése, ill. a térbeli kiterjedésüket bemutató digitális webtérkép előállítás, amit a jövőben elérhetővé tesznek a lakosság számára. Ezzel az élőhelyrekonstrukciós munkák tervezésének hatékonysága is növelhető mind térben, mind időben (Bakacsy et al. 2023ab, Balogh et al. 2023).

Az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén madárfajok csoportban való együttmozgását vizsgálták. A kutatók 52 drón alkalmazásával 200 x 200 m-es területen arra keresték a választ, hogy az egyes madarak mozgásából milyen finom módon alakulnak ki a hatalmas rajok. A drónok egymással kommunikáltak és repültek közös céljuk felé, csoportosan elkerülve az akadályokat. A leírt matematikai modellben elég minden egyednek „körülnéznie” és a tapasztalt átlagos mozgásirányba repülnie ahhoz, hogy az egész, akár tízezres raj összerendeződjön a közös vonuláshoz (Balázs et al. 2020).

A Gábor Dénes Főiskolán a Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatósággal, a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatósággal és a Kis-Balaton Üzemmnökséggel közösen vizsgálták a magas aranyvessző (*Solidago gigantea*) inváziós faj Zimányi-

sziget őshonos növényközösségére gyakorolt hatását egy több éves kutatás során. Drónfelvételek alapján készült ortofotók és SFD alapú 75 sávós hipertemporális görbék alapján megállapították, hogy a területet 2018-ban átlagosan 28,5%-ban volt borított a vizsgált inváziós fajjal. A kutatás során pontosan követhető volt a *S. gigantea* borításának vegetációs időszakon belüli változása (Berke et al. 2010a, Vastag et al. 2019).

Hazai vonatkozásban a precíziós mezőgazdaságban bírnak a legnagyobb szereppel az UAV eszközök. Bai et al. (2022) szerint a drónok használata a precíziós technológiákon belül nem elhanyagolható (17%), és a folyamatos innovációnak és inputoknak köszönhetően várhatóan jelentősen növekedni fog a jövőben. Ebben az állam jelentős szerepet tölt be, különösen a szakképzések és a jogszabályok harmonizációja révén. Alkalmazásuk széleskörű, például permetező drónok alkalmazása, szántóföldek belvíz- és aszály detektálása és monitoringja (Tobak 2020), gabonák nitrogénellátottságának vizsgálata, megdőlés vizsgálat, vadkár és jégkár felvételezés, kelésvizsgálat, agrotechnikai hibák (pl. ablakos vetés) kimutatása, növényi stressz (kártévők, kórokozók, víz- és tápanyaghiány) kutatása, hozammérés és előrejelzés, parlagfű fertőzöttség kimutatása gyomtérképeken. Használják továbbá műholdfelvételek kiegészítéseként is, input adatot szolgáltatnak menedzsmentzóna lehatárolására és tematikus digitális térképek készítéséhez (Milics 2018).

A legtöbb hazai agráregyetemen, agrárkutatóintézetben és vállalatoknál alkalmaznak drónokat mezőgazdasági kutatásokhoz. A Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Karán több drón-alapú mezőgazdasági kutatás folyik, mint például az „Eye in the sky” projekt. A Széchenyi István Egyetem Mezőgazdaság és Élelmiszertudományi Karán vizsgálják a helyspecifikus adatgyűjtés lehetőségeit földközeli távérzékelési módszerekkel a precíziós mezőgazdaság fejlesztésének érdekében. A felvételezéseknél UAV-ra (DJI drón) szerelhető RGB és IR szenzorokat alkalmaztak a következő kutatási és gyakorlati kérdések megválaszolásához: parlagfű-fertőzöttség, vadkármonitoring, ablakos vetések és aszályos területek detektálása, hozammérés (Milics 2018).

Az erdőgazdálkodásban a távérzékelés segítségével nyomon követhetők az erdőpusztulások, és az azokat kiváltó tényezők. A betegségek már kezdeti fázisban detektálhatók és a veszteségek csökkenthetők a különböző fafajok esetében. Emellett a fenntartható erdőkezelésekre, károk hatásainak csökkentésére,

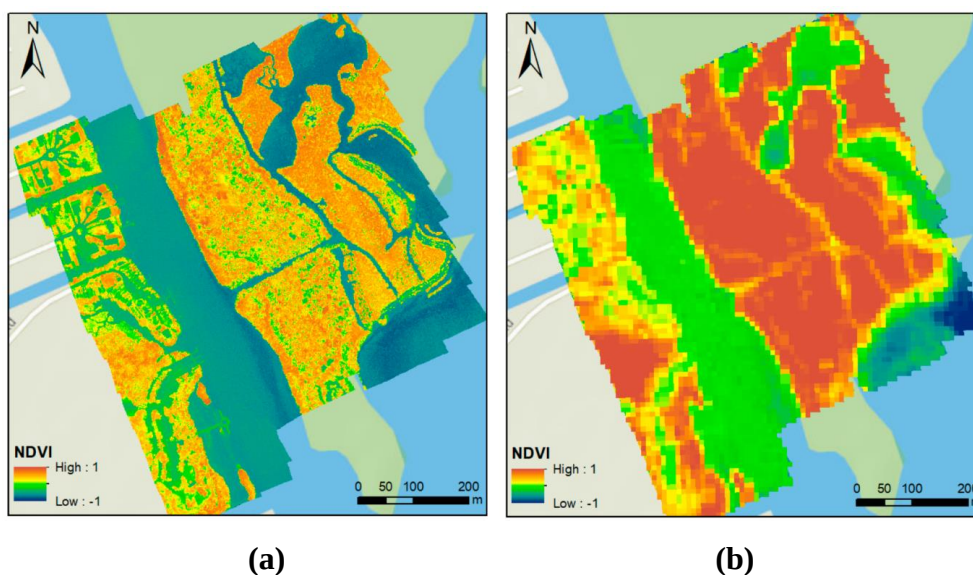
erdőmonitorozásra is gyorsabb és hatékonyabb megoldást jelenthet a földi megfigyelésekhez képest (Tang & Shao 2015, Torresan et al. 2017). A kutatás-oktatásban a Soproni Egyetem Erdőmérnöki Karán alkalmazzák a technológiát. A hazai erdőgazdaságokban többek között erdőrészetek fafajösszetételének meghatározására, ezen belül az invazív fafajok (úm. *Robinia pseudoacacia*, *Ailanthus altissima*, *Prunus serotina*, *Celtis occidentalis*) kiszűrésére, a beteg faegyedek detektálására, a faegyedek paramétereinek (magasság, törzsátmérő, térfogat stb.) meghatározására alkalmaznak drónokat. Az Ipoly Erdő Zrt. és a Budapesti Erdőgazdaság Zrt. az erdőtervezésben és erdőművelésben alkalmaznak drónokat, például fafajösszetételt és erdőszerkezetet vizsgálnak, ill. az erdőkárosodások pontos meghatározására használják, amihez megfelelő gyakorisággal és felbontásban készítenek távérzékelte felvételeket (Pataki & Ruff 2015).

Az Öntözési és Vízgazdálkodási Kutatóközpontban (ÖVKI) számos vízgazdálkodással kapcsolatos kutatás folyik, úm. távérzékeléses adatgyűjtés dróntechnológiával a talaj–növény rendszer hidrológiai állapotának felmérése céljából, GIS-alapú térképezések és fotogrammetriai elemzések. Drónokat alkalmaznak a vízgazdálkodás területén belvíz, szikesedés, meliorált területek felmérésére; növényélettani vizsgálatoknál kelési hatékonyság, NDVI érték, gyomfertőzöttség, érettségi fok, állománysűrűség, hiánybetegségek megállapítására. Továbbá digitális domborzati modell (DDM) generálására morfológiai vizsgálatokhoz erózió, defláció követésére, valamint térfogat számítási feladatok elvégzéséhez. A Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszékén a Water@Risk projekt keretében interaktív térkép és GeoApp fejlesztését végzik. Elsődleges céljuk a vízgazdálkodás és a szélsőséges időjárási helyzetekből eredő kockázatok mérséklését támogató aszály- és belvízmonitoring megoldások kifejlesztése határon átnyúló projekt keretében (EU Interreg – IPA CBC Magyarország-Szerbia; Tobak 2020).

3.6.2 Nemzetközi alkalmazások

A távérzékelés és az UAV rendszerek alkalmazása nagy jelentőséggel bír nemcsak hazai, de nemzetközi téren is. Az Európai Unión belül Hollandiában elterjedt módszer az UAV rendszerrel történő ártéri növénytakaságok időszoros monitorozása és a felszínborítás klasszifikációja az árvízvédelemi intézkedések támogatása érdekében. Van Iersel et al. (2018) munkájukban összehasonlították a

multitemporális (több időszakot felölelő) és az egyetlen időpontban UAV-val gyűjtött adatok osztályozási pontosságát ártéri területeken. A terepi referenciaadatokkal kiegészített adathalmazt Random Forest módszerrel értékelték. Kimutatták, hogy két, vagy annál több időlépték használata növeli az osztályozási pontosságot. Módszerük alkalmas nagy ártéri területek gyors és pontos monitorozására. Európán kívül, az USA-ban a nehezen megközelíthető part menti magroveerdők vizsgálatára gyakran használnak drónokat, valamint drónokra szerelt multispektrális kamerákat. Yang et al. (2019) tanulmányában kimutatta, hogy a multispektrális érzékelővel felszerelt UAV-k jó lehetőséget adnak a műholdfelvételek javítására, mivel azoknál nagyobb térbeli felbontást biztosítanak és valósidejű megfigyelésre adnak lehetőséget. Az UAV és a műholdas távérzékelési adatok összehasonlításához NDVI és objektumorientált osztályozási módszereket alkalmaztak (7. ábra).



7. ábra: Növénymonitorizás, Indian River Lagoon, Florida. **(a)** UAV multispektrális rendszerrel és **(b)** Sentinel-2 multispektrális műhoddal készített NDVI térképek. Az UAV-felvételekből készített nagy térbeli felbontású térkép részletesebb információt nyújt a parti menti vegetációról (Yang et al. 2019).

A természet- és környezetvédelmi alkalmazásokhoz szorosan kapcsolódó környezet- és tájgazdálkodási alkalmazások köre sokrétű. Többek között magába foglalja a településfejlesztést, terület- és földhasználat tervezést, közlekedésfejlesztést, turizmusfejlesztést, az ezekhez kapcsolódó környezeti hatásvizsgálatok, energiahatékonyság vizsgálatok elvégzését, továbbá

árvízvédelmet, városökológiai kutatásokat, zöldinfrastruktúra fejlesztéseket (Szitár et al. 2021). Az Európai Unió országában egyaránt egyre inkább előtérbe kerül az UAV rendszerekkel készített nagy felbontású, részletgazdag felvételek elemzése a környezet- és tájgazdálkodásban. Zágrábban (Horvátország) városi zöldinfrastruktúra-fejlesztések során a GEMINI (*Geospatial monitoring of green infrastructure using terrestrial, airborne and satellite imagery*) program keretében használtak drónokat, hogy segítsék a zöld döntéshozatalt (Gasparovic et al. 2017).

A távérzékelést a precíziós mezőgazdaságban nemzetközi szinten is igen széleskörűen alkalmazzák. Már 1995-ben Clark et al. megállapították, hogy az egészséges és a beteg növényállományok távérzékeléssel elkülöníthetők, mivel az egészséges zöld növényzet vörös-él inflexiós pontja eltolódik az abiotikus vagy biotikus stressz alatt álló növényzethez képest. Patel et al. (2001) a Fatehwadi csatorna (India) mellett végzett esettanulmányban leírták, hogy a búza növekedési paramétereinek (LAI, klorofilltartalom, biomaszatömeg) kimutatására is alkalmasak a nagy spektrális felbontású felvételek. Európában, német és holland együttműködés során a legelőgazdálkodásban használt fűfajok morfológiai és biokémiai paramétereit becsülték, valamint különböző vegetációs indexeket (pl. Vörös-él klorofill index) határoztak meg nagyfelbontású hiperspektrális légifelvételek segítségével (Capolupo et al. 2015). Kínában, mezőgazdasági területeken sárga rozsda monitorozására használtak UAV-ra szerelhető multispektrális eszközöket. Su et al. (2018) egy alacsony költségvetésű multispektrális szenzort használt a célból. A sárga rozsda automatikus felismerő rendszerét Random Forest osztályozás segítségével sikerrel fejlesztették ki a teljes vizsgálati területre. A kutatók azt várták, hogy az alacsony költségvetésű multispektrális kamera, az alacsony magasságban repülő UAV platform és a gépi tanulási technikák együttes alkalmazása lehetővé teszi a kórokozóval szembeni hatékony előrejelzést és védekezést nagy mezőgazdasági területeken.

Németországban erdőmonitorozás során UAV-alapú fotogrammetriai famagasság-mérést alkalmaztak, aminek célja a fák növekedésének, térfogatának, biomaszatömegének megállapítása volt. Az alkalmazott UAV rendszer OctoXL 6S12 oktokofter volt, Sony A7r RGB kamerával felszerelve (Krause et al. 2019). Brazil erdőrestaurációs kísérletekben 54 ha-os területet érintő légifelvételeket készítettek Canon S1120 NIR kamerával, emellett LiDAR felvételeket alkalmaztak erdőmonitorozásnál (Reis et al. 2019ab).

A távérzékelés különösen sikeres a víztestek ellenőrzésénél, hiszen fő előnye, hogy helyettesítheti a hagyományos mintavételi eljárásokat a nehezen megközelíthető helyeken, valamint a térbeli és az időbeli lefedettséget gyorsan és pontosan biztosítja. Finnországban Koponen et al. (2002) a tavak vízminőségének és zavarosságának térbeli változását tanulmányozta távérzékeléssel azokon a területeken, ahol a terepi adatgyűjtések nehezen vagy egyáltalán nem kivitelezhetők. Angliában a Temze folyó geomorfológiáját és hidrológiáját vizsgálták DDM felvételeken, valamint digitális képfeldolgozással készült SfM (*Structure-from-Motion*) drónos légifelvételeken (Woodget et al. 2017). Chilében digitális fotogrammetriával monitorozták a San Pedro folyót, aminek célja a felszíni víz hidromorfológiájának meghatározása, és a folyóparti élőhelytípusok osztályozása volt (Woodget et al. 2017).

A távérzékelést alkalmas ásványtérképezésre, az egyes talajparaméterek és felszínalkotó kőzetek meghatározására, de mivel a talaj reflektanciáját számos környezeti tényező befolyásolja, ezért csak korlátozottan. Talajtérképezés során térben és időben elemezhetjük a szikesedési folyamatokat, mivel az eltérő ásványi jellemzők jelentősen hatnak a spektrális tulajdonságokra. Bányászathoz kapcsolódó kis- és nagyléptékű kutatásokkal számos országban foglalkoznak. Az Egyesült Királyságban felhagyott uránbánya környezetének sugárzási térképét KromekTM GR detektorral készítették. Kínában külszíni bányák 3D modellezésére, szénbányák repedéseinek és a keletkezett tüzeinek monitorozása digitális kamerákat alkalmaztak. Ausztráliában bányarekonstrukciós vizsgálatoknál fás szárú növényzet borításának változását Sony digitális kamerával és MicaSense RedEdge multispektrális szenzorral végezték (Ren et al. 2019).

4. ANYAG ÉS MÓDSZER

4.1 A vizsgált növények

A kutatásba két őszi búzafajtát és három alakor búzafajtát vontunk be. Minden vetőmag esetében több hónapos engedélyeztetési eljárást történt az adott kutatóintézettel együttműködve. A vizsgált fajták a következők voltak:

(1) Az *Mv Magdaléna* az országos fajtajegyzékben szereplő, Martonvásáron nemesített, termesztésben lévő modern magyar őszi búzafajta. Kemény endospermiummal rendelkezik, magas a glutén- és fehérjetartalma és kiváló malmi minőségű (MTA ATK 2015). A kísérletbe felhasznált vetőmagot az MTA Agrártudományi Kutatóközpont martonvásári Mezőgazdasági Intézete szolgáltatta.

(2) A *Bánkúti 1201* régi nemesítésű magyar őszi búzafajta (Juhász et al. 2003), átlagos, ill. az átlagosnál magasabb terméspotenciállal rendelkezik, endospermiuma kemény szerkezetű, sütőipari tulajdonságai jók. Az éghajlatra kevésbé érzékeny, ezen kívül rendkívül jó a szárazságtűrése. Napjainkban a modern búzafajták nemesítésénél használják fel kedvező genetikai álományának köszönhetően (Juhász et al. 2003, Balla et al. 2013). A kutatásra szánt vetőmagot az Ökológiai Mezőgazdasági Kutatóintézet (ÖMKi, Budapest) biztosította.

(3) Az *Mv Alkor* ökológiai gazdálkodásban termesztett, az országos fajtajegyzékben szereplő, Martonvásáron nemesített búzafajta. Termőképessége közepes, de magas a fehérje- és rosttartalma. Jó gyomelnyomó képességgel rendelkezik, emellett szárazságtűrő és ellenálló a gombás fertőzésekkel szemben (MTA ATK 2015). A vetőmagot az MTA Agrártudományi Kutatóközpont martonvásári Mezőgazdasági Intézete ajánlotta fel.

(4) A *Schiemann* alakor egy marokkói származású alakor tájfajta. A tápiószelei Növényi Diverzitás Központ génbanki tétele (NöDiK, jelenleg Nemzeti Biodiverzitás és Génmegőrzési Központ). Bejegyzett génbanki kódja: RCAT 074129.

(5) A *Bözödi* alakor egy a mai Románia területéről származó tájfajta. Az Erdélyi-középhegységben hagyományos gazdálkodásban termesztik, kiváló genetikai erőforrást képvisel (Szabó 1976, Péntek & Szabó, 1981, Hajnalová & Dreslerová, 2010, Gyulai 2019). Termesztésének újra bevezetését az ökológiai gazdálkodásban szorgalmazzák. Szelekciós munka eredményeképpen 2022-ben, a NÉBIH vizsgálatokat követően *Szarvasgedei alakor* néven az agrárminiszter állami

fajtaelismerésben részesítette. (A kísérletbe bevont őszi búzák és az alakor búzák jegyzékét lásd az 1. táblázatban.)

1. táblázat. A kutatásba bevont növényi anyag. Fotók: Mezőgazdasági Intézet, Agrártudományi Kutatóközpont (Mv Magdaléna), Magyar Mezőgazdasági Múzeum és Könyvtár (Bánkúti 1201), Csákvári E. (Mv Alkor, Schiemann és Bözödi).

Fajta	Típus	Jellemző kalász	Vetőmagforrás
<i>Triticum aestivum</i> 'Mv Magdaléna'	Modern nemesítésű őszi búza		Mezőgazdasági Intézet Agrártudományi Kutatóközpont Martonvásár
<i>Triticum aestivum</i> 'Bánkúti 1201'	Régi/hagyományos nemesítésű őszi búza		Ökológiai Mezőgazdasági Kutatóintézet Budapest
<i>Triticum monococcum</i> ssp. <i>monococcum</i> 'Mv Alkor'	Modern nemesítésű alakor búza		Mezőgazdasági Intézet Agrártudományi Kutatóközpont Martonvásár
<i>Triticum monococcum</i> ssp. <i>monococcum</i> 'Schiemann'	Ősi alakor búzafajta		Növényi Diverzitás Központ Tápiószele
<i>Triticum monococcum</i> ssp. <i>monococcum</i> 'Bözödi'	Ősi alakor búzafajta (2022-ben fajtává minősített)		Növényi Diverzitás Központ Tápiószele

4.2 Szántóföldi (nem kontrollált) terepi kísérlet

A vetéselőkészítés során a gödöllői Szent István Egyetem (ma Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem) Növénytermesztési Intézetében laboratóriumi számlálóval (8a. ábra) mértük az egyes fajták ezermagtömegét (g), majd meghatároztuk a vetésnormájukat (2. táblázat). A kísérleti területet a Növénytermesztési Intézet által bérelt Hatvan-Nagygyombos külterületén található talajtani szempontból homogén szántóföldeken jelöltük ki 4 gépaljnyi, 400 m² nagyságú területen (47°40'59.5"N 19°40'08.2"E). Vetés előtt talajelőkészítést végeztünk, majd kijelöltük az 1 m x 9 m-

es szántóföldi mikroparcellákat a kísérleti területen belül, véletlenszerű blokkelrendezésben, fajtánként négy ismételten (8b. ábra).



(a)



(b)

8. ábra: (a) Ezermagtömeg mérése laboratóriumi számlálóval, (b) a kísérleti terület kijelölése Hatvan-Nagygyomboson (Forrás: Saját felvételek).

2. táblázat: A vetéselőkészítéshez mért és származtatott adatok (500MT = 500 magra vonatkozó tömeg, EMT = ezermagtömeg).

Fajta	Csírászám	500MT1 (g)	500MT2 (g)	EMT (g)	Használati érték (%)	Vetésnorma (g/parcella)
Bánkúti 1201	5000000	22,3	22,4	44,7	98	228,1
Mv Alkor	3000000	23,0	24,1	47,1	98	144,2
Schiemann	2500000	15,7	16,2	31,9	90	88,60
Bözödi	2500000	31,2	30,6	61,8	90	171,7

2015. november 17-én kisparcellás mechanikus vetőgéppel vetettük el a három vizsgált alakor búzát (Mv Alkor, Schiemann és Bözödi), valamint a Bánkúti 1201 őszi búzát (9a. ábra). Az Mv Magdaléna őszi búza vetőmaghiány miatt nem került elvetésre a szántóföldön, így csak laboratóriumi körülmények között tudtuk vizsgálni. A kísérleti terület egységesen nem kapott kezelést (nem alkalmaztunk szerves- és műtrágyát, permet- és gyomirtószereket, nem öntöztünk). 2016. július 21-én, az érési szakaszban (9b. ábra) történt a fajták aratása egy 1980-as években gyártott németországi kisparcellás kombájnnal.



(a)



(b)

9. ábra: (a) Vetés kisparcellás mechanikus vetőgéppel Hatvan-Nagygyomboson, (b) aratás előtti állapot (Forrás: Saját felvételek).

4.2.1 A vetett fajták terméshozamának és szemminőségi paramétereinek mérése

A betakarítás után minden búzafajta termés mennyiségét még a szántóföldön, terepi körülmények között megmértük, majd a (1) termésátlag t/ha egységbe lett átszámítva. A mintákat laboratóriumi körülmények között készítettem elő a szemminőségi paraméterek méréséhez. A gabonaminták kézi tisztítása után a magról a pelyvaleveleket Santec SRO VKI11 napraforgó hántolóval távolítottam el (10a. ábra). A hántolás közben eltört szemeket kézzel távolítottam el a mintából. A (2) fehérje- és (3) sikértartalmat négy ismétlésben mértem Mininfra-Scan T Plus közeli infravörös optikai mérőműszerrel 790 nm és 1064 nm közötti hullámhossztartományban (10b. ábra). A búzaszemek (4) hektolitertömegét (g) laboratóriumi mérőedényben mértem négy ismétlésben.



(a)



(b)

10. ábra: (a) Santec SRO VKI11 napraforgó hántoló, (b) Mininfra-Scan T Plus közeli infravörös optikai mérőműszer (Forrás: A forgalmazó honlapja: <https://www.gabonanedvessegmero.hu/>).

4.2.2 Légi felvételezés drónra szerelt RGB kamerával

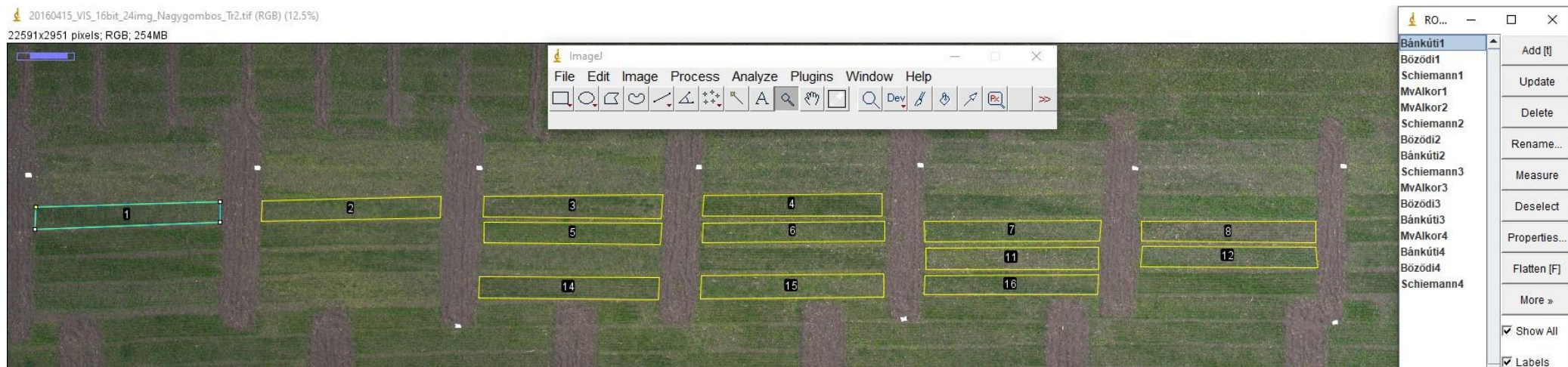
A légi felvételezést a Gábor Dénes Főiskola (GDF, ma Gábor Dénes Egyetem) munkatársaival és hallgatóival közösen végeztük. A kísérleti területet (47°40'59.5"N 19°40'08.2"E) 2016. március 04-én körbejártuk, GPS mérést végeztünk és légi felvételeket készítettünk egy DJI Phantom 3 Advanced drónra szerelt látható fénytartományban érzékelő tükörreflexes Canon EOS 30D (2009 Canon Inc., Tokió, Japán) RGB kamerával.

A repülés kezdő időpontja délelőtt 9:55, a repülés vége 10:05 volt. A repülési magasság 12 m volt. A felvételezést követően a drónfelvételeket a GDF-en illesztették össze, majd a nagyfelbontású TIFF ortofotót átadták további felhasználásra.

A 16 bit-es TIFF RGB felvételt ImageJ képelemző szoftverrel (Ferreira & Rasband 2012) elemeztem (11. ábra). Fajtánként négy ismétlésben manuálisan kijelöltem a vizsgált területeket (ROI 1–16), és mértem az RGB sávok adatait (3. táblázat), amikből a későbbi adatelemzésnél fajtánként és területenként kiszámoltam a vizsgált 16 RGB vegetációs indexet.

3. táblázat: A vetett fajták ImageJ képelemző szoftverrel mért RGB adatai.

ID/Region of Interest	Fajta	R	G	B
ROI1	Bánkúti12011	73.452	83.32	63.399
ROI2	Bánkúti12012	111.913	114.315	96.654
ROI3	Bánkúti12013	103.087	114.178	88.679
ROI4	Bánkúti12014	90.213	99.412	70.868
ROI5	Bözödi1	89.071	99.406	70.174
ROI6	Bözödi2	102.287	113.694	83.533
ROI7	Bözödi3	113.122	117.743	90.399
ROI8	Bözödi4	101.417	111.606	78.46
ROI9	MvAlkor1	85.448	98.592	65.257
ROI10	MvAlkor2	86.861	102.755	65.358
ROI11	MvAlkor3	66.747	72.566	57.566
ROI12	MvAlkor4	75.906	81.611	66.441
ROI13	Schiemann1	91.122	100.12	72.539
ROI14	Schiemann2	94.741	106.227	74.386
ROI15	Schiemann3	57.907	68.933	52.458
ROI16	Schiemann4	97.607	108.791	80.328



11. ábra: A szántóföldi kísérlet Hatvan-Nagyomboson és a vizsgálatba bevont fajták kijelölt területei (ROI 1–16) ImageJ képelemző szoftverben (Forrás: Saját adatbázis).

4.3 Fitotronban végzett (kontrollált) kísérlet

4.3.1 Kísérleti elrendezés

A gabonafajták stressztűrő képességét kontrollált körülmények között végeztem 2017-ben. A gödöllői Szent István Egyetem Mezőgazdaság- és Környezettudományi Karának Genetikai, Mikrobiológiai és Biotechnológiai Intézet, Genetikai és Növénynevelési Tanszékén előneveltem a növényeket. Majd a martonvásári MTA Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézetének Fitotron Osztályára helyeztem át. A kísérlet szabályozott fényviszonyok mellett zajlott, ezzel csökkentve a természetes fény általi zajt a felvételeken.

2017. szeptember 16-án a gabonaszemeket Jiffy tözegkorongokba vetettem (12a. ábra), ahol 14 napig csíráztak, majd 43 napig fűtetlen üvegházban, tápkockában előneveltem (12b. ábra). Ezután a palántákat 11,5 cm átmérőjű kerek pálmacserepekbe ültettem át, 2800 cm³ kertészeti talaj, komposzt és homok 3:2:1 arányú keverékébe (12c. ábra). Tischner et al. (1997) és Balla et al. (2013) módszere alapján állítottam össze a növénynevelési programot. A cserepeket Conviron PGR-15 tavasz-nyár növénynevelő klímaszekrénybe helyeztem (12a–b. ábra), ahol 1,4 m² területen és 145 cm növekedési magasságon neveltem a gabonákat (Conviron PGR15 2018). A növények 11 napig halogén megvilágítás mellett 10/15°C-on éjszakai/nappali hőmérsékleten fejlődtek. Ezután a cserepek fénycsőes klímakamrába kerültek át, ahol további 19 napig az éjszakai/nappali hőmérsékletet 13/17 °C-on tartva fejlődtek. A nappali megvilágítás és az éjszakai sötét mindkét esetben 12-12 óráig tartott. A fényerősséget 320 μmol·m⁻²·s⁻¹ értékre állítottam be. A levegő átlagos páratartalma éjszaka 75%-ra, nappal 65%-ra volt beállítva.



(a)

(b)



(c)

12. ábra: (a) Csíráztatás tőzegkorongban 14 napig, (b) előnevelés tápkockában, fűtetlen üvegházban 43 napig, (c) átültetés pálmacserepekbe (Forrás: Saját felvételek).



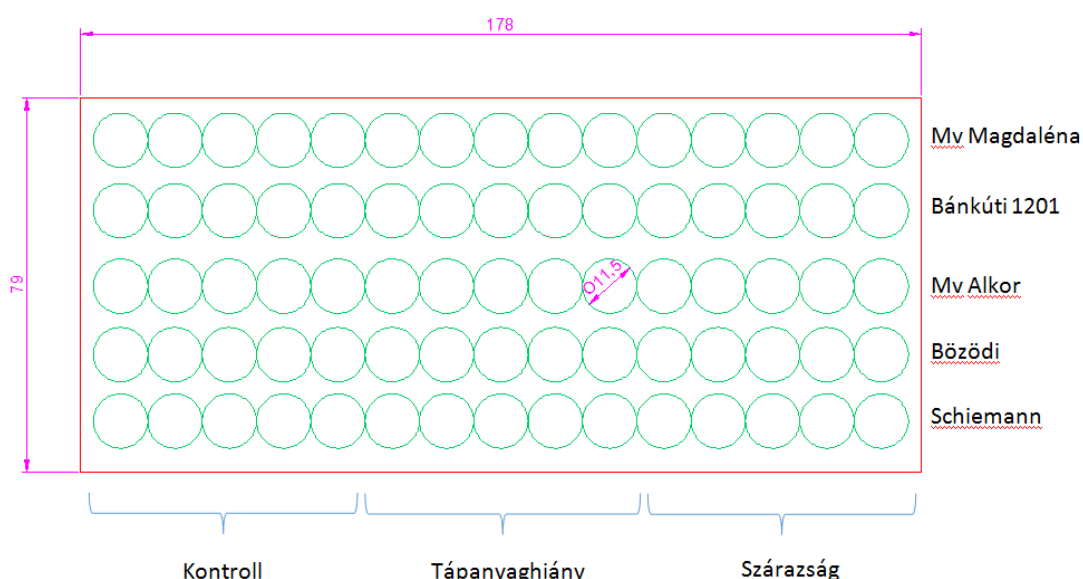
(a)



(b)

13. ábra: (a) A martonvásári MTA Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézetének Fitotron Osztálya, (b) Conviron PGR-15 tavasz/nyár növénynevelő klímakamrában nevelt egyedek mérésre előkészítve (Forrás: Saját felvételek).

A vizsgálatba három különböző kezelést alkalmaztam a gabonák bokrosodási fejlődési szakaszában: kontroll, tápanyaghiány és szárazság. A kontroll cserepek naponta csapvízzel voltak öntözve, ezt rendszeresen heti egyszer Wuxal Super nitrogén alapú tápoldattal egészítettem ki. A tápanyaghiányos cserepek szintén naponta csapvízzel voltak öntözve tápanyag hozzáadása nélkül. A szárazságstresszt vízmegvonással értem el. A szárazságkezelt cserepeket 13 napig hetente kétszer, 17 napig hetente egyszer a kontrollal azonos tápoldattal kiegészített csapvízzel öntöztem. Minden kezelés öt ismétlésben történt, fajtánként 15 cseréppel. Egyszerre 75 egyedet vizsgáltam, ezzel kihasználva a klímakamra maximális befogadó képességét (14. ábra). A kezeléseket 30 napig alkalmaztam.



14. ábra: Az MTA ATK Fitotron Osztályán üzemeltetett Conviron PGR-15 növénynevelő klímasekrény belső elrendezése a kísérleti cserepekkel (Forrás: Saját szerkesztés).

4.3.2 A laboratóriumi növények felvételezése RGB kamerával

Az őszi búzák és az alakor búzák föld feletti részét három időpontban fényképeztem le, ahhoz, hogy meghatározzam a növények geometriai paramétereit és RGB adatait a digitális fenotipizáláshoz. Fajtánként 45 képet készítettem és összesen 225 képet elemeztem. A felvételek 2017. november 9-én, 18-án és 26-án készültek, miután az egyes fajták a fejlődésük korai szakaszában a tápkockákból pálmacserepekbe kerültek át. A felvételek rögzítésekor a cserepeket homogén fehér háttér előtt helyeztem el. A digitális képek 8,2 megapixeles felbontással a lombkorona központi zónájáról, hasonlóan a szántóföldi kísérlethez, Canon EOS

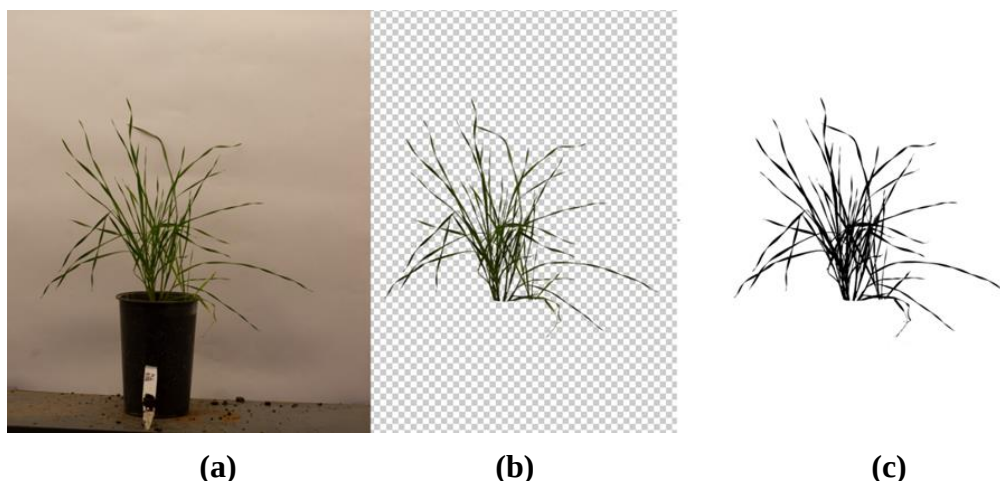
30D RGB digitális tükörreflexes fényképezőgéppel (2009 Canon Inc., Tokió, Japán) készültek. A 3:2 képarányú CMOS típusú érzékelő az így nyert digitális adatokat feldolgozatlan és veszteségmentes nyers raw formátumban rögzítette és az intenzitási adatokat 12 bitesre digitalizálta.

A fényképezőgépet háromszög állványra szereltük, a kameraállvány és az objektum közötti távolságot 3,2 m-re állítottuk be. A digitális fényképezőgép beállításai a következők voltak: expozíciós idő 1×10^{-2} , rekeszérték f/10, ISO 100, gyújtótávolság 50 mm, fehéregyensúly 4900 K, kikapcsolt vaku. A kísérletben rögzített összes felvételt CR2 (Canon RAW 2 verziójú képfájl) formátumban tároltuk. A CR2 fájlformátum csak kismértékben tartalmaz feldolgozott digitális adatokat, úm. a fehéregyensúly, a telítettség, a kontraszt és az élesség beállításait, de további digitális képfeldolgozási adatokat nem. Ennek köszönhetően a nyers fájl nem tartalmaz roncsoló módosítást, és alkalmas további mérések elvégzésére (Wang et al. 2014).

4.3.2.1 Az RGB felvételek digitális képfeldolgozása: a képek előfeldolgozása

Az előfeldolgozást a budapesti Gábor Dénes Főiskola munkatársaival közösen végeztük. Az elkészült RGB felvételeken előző kutatásokat adaptálva (Liu & Pattey 2010, Walter et al. 2019) küszöb- és szegmentációs módszereket alkalmaztunk a felvételeken található célobjektumok (növényi pixelek) és nem célobjektumok (pl. háttér, cserép, föld) elkülönítésére. A szegmentálási eljárás viszonylag könnyen kivitelezhető volt a növényi és nem növényi pixelek eltérő színárnyalata miatt.

Az RGB felvételek előfeldolgozását az Adobe Photoshop CC 20.04.4 szoftver (Adobe Systems Inc. 2019) beépülő moduljának, a Camera RAW 11.2 bővítmény képszegmentációs funkciójával hajtottuk végre. Az előfeldolgozás célja volt, hogy a mérésre szánt képekről törlésre kerüljön minden oda nem illő információ. Ezt a félmanuális feldolgozást további előzetes korrekciós műveletek előzték meg, amik magába foglalták a fehéregyensúly, a világosítás, a szaturáció és a vibráció, az árnyékok, a sötét és a világos árnyalatok beállításait. A paraméterezés után egy kijelölő maszkot hoztunk létre, aminek segítségével az eredeti nyers RAW képet körbevágtuk. A növények növekedésének és biomasszatömegük pontos becsléséhez a lombkoronát elválasztottuk a fehér háttértől, valamint a többi felülettől (pl. cserép, jelölőpálca, asztal), majd az előfeldolgozott képeket 16 bites TIFF tömörítetlen fájlformátumban mentettük (15. ábra).



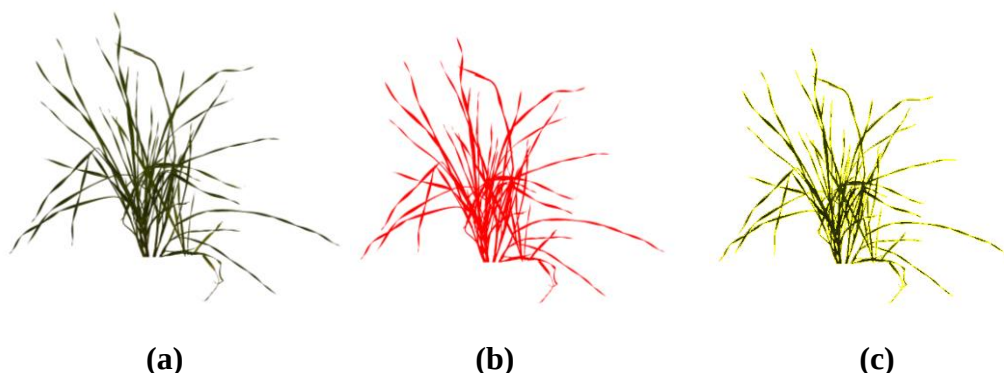
15. ábra: RGB digitális képek szegmentálásának folyamata az Adobe Photoshop CC 20.0.4 szoftver Camera RAW 11.2 bővítményének használatával: **(a)** eredeti CR2 fájlformátumú nyers kép, **(b)** leválogatott növényi részek, **(c)** 16 bites TIFF tömörítetlen előfeldolgozott kép.

4.3.2.2 Az RGB felvételek digitális képfeldolgozása: digitális információk kinyerése

Az ellenőrzött körülmények között rögzített felvételeken vizsgáltam az egyes objektumok projektált területének geometriai paramétereit és RGB adatait. A képi információkat az ImageJ nyílt forráskódú képelemző szoftverrel nyertem ki (Ferreira & Rasband 2012). Az RGB felvételeken a színküszöbértéket az intermodális küszöbérték módszernek (*intermodes thresholding method*) megfelelően állítottam be. A HSB színtérben a piros színt választottam küszöbszínként. Maga a módszer az adott objektum és a háttér megfelelő kontrasztján alapul. Ez alapján szegmentáltam a vizsgált növényegyed pixeleit a háttér pixeleitől (16. ábra).

A célobjektum pixelei alkalmasak a képi információk számszerűsítésére és elemzésére. A kép egészen megmértem a szegmentált objektum pixeleinek százalékos arányát a kép teljes területének képpontjaihoz viszonyítva. A geometriai paraméterek közül kiválasztottam azokat, amikből következtethetünk az egyes fajták morfológiai jellemzőire, egyúttal információt nyújtanak a gabonák növekedési erélyéről és környezeti stresszre adott válaszukról. A következő geometriai paramétereket mértem: (a) terület: megegyezik a kompozit kijelölés területével, figyelmen kívül hagyva az objektumon kívüli képpontokat, az értékek négyzetes pixelértékként vannak kifejezve; (b) kerület: a kompozit kijelölés külső határának hosszával egyezik meg; a kijelölést körülvevő legkisebb (c) szélesség és (d) magasság; (e) Feret átmáró: a kijelölt határ mentén található bármely két pont közötti

maximális távolság (Ferreira & Rasband 2012). A (b) – (d) paraméterek értékei pixelben vannak kifejezve. A geometriai paraméterek mellett mértem a felvételek RGB adatait (M5. melléklet), amikből a későbbi adatelemzésnél fajtánként és kezelésenként kiszámoltam a vizsgált 16 vegetációs indexet.



16. ábra: A projektált terület mérési folyamata a nyílt forráskódú ImageJ szoftverrel:

(a) RGB réteg, **(b)** intermodális küszöbérték beállítása HSB színtérben, **(c)** leválogatott objektum.

4.4 Adatfeldolgozás és statisztikai elemzés

A fajták közti különbségeket, a tápanyaghiány és a szárazság hatását a vetett gabonákra általános lineáris modellel, ún. egyutas ANOVA tesztel (varianciaanalízis, amit az adatcsoportok átlagai közötti szignifikáns különbségek vizsgálatára használnak) elemeztem. Az adatok minden esetben megfeleltek a teszt alkalmazhatóságához szükséges előfeltételeknek (szórás homogenitás, reziduálisok normális eloszlása). Minden elemzés során a teszt megbízhatóságát 95% konfidencia intervallumban határoztam meg. Az elemzés során a különbözően kezelt növények több geometriai paraméterét is vizsgáltam, ún. terület, kerület, szélesség, magasság, Feret átmérő. Az eltérően kezelt növények geometriai paramétereit egyesével, külön-külön modellekben elemeztem, ahol a függő változó a vizsgált geometriai tulajdonság volt, míg a magyarázó változó a kezelés típusa (kontroll, tápanyaghiány, szárazság) vagy a vizsgált búzafajták (Mv Magdaléna, Bánkúti 1201, Mv Alkor, Schiemann és Böződi) voltak. A modell struktúrája a következő:

- egyutas ANOVA teszt: $\text{aov}(\text{Geometriai_paraméter} \sim \text{Fajta})$
- egyutas ANOVA teszt: $\text{aov}(\text{Geometriai_paraméter} \sim \text{Kezelés})$

Részletesebb eredményekhez a Tukey féle post-hoc teszt (szignifikancia teszt, amit a csoportátlagok közötti páronkénti összehasonlításra használnak) segítségével, párosával összehasonlítottam a kezeléstípusok geometriai paraméterekre tett hatását.

A mért RGB adatokból 16 különböző vegetációs indexet számoltam. Ezek eltérését a három kezeléstípus és a vizsgált búzafajták között szintén egyutas ANOVA teszttel, és Tukey féle post-hoc teszttel elemeztem. Minden vegetációs indexet külön-külön modellben vizsgáltam, amikben a függő változó a vizsgált vegetációs index, a magyarázó változó a kezelés típusa vagy a különböző búzafajták voltak. A fajtákra vonatkozó elemzést mind a laboratóriumi, mind a szántóföldi kísérlet adataival elvégeztem. A modell struktúrája:

- egyutas ANOVA teszt: $\text{aov}(\text{Vegetációs_indexek} \sim \text{Fajta})$
- egyutas ANOVA teszt: $\text{aov}(\text{Vegetációs_indexek} \sim \text{Kezelés})$ * csak fitotronban

A modellekben használt vegetációs indexek képletei:

- $\text{BGI} = \text{B}/\text{G}$
- $\text{BI} = ((\text{R}^2 + \text{B}^2 + \text{G}^2)/3)^{1/2}$
- $\text{ExB} = 1.4 * \text{B}/(\text{R} + \text{G} + \text{B}) - \text{G}/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$
- $\text{GCC} = \text{G}/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$
- $\text{GLI} = (2 * \text{G} - \text{R} - \text{B})/(2 * \text{G} + \text{R} + \text{B})$
- $\text{GR} = \text{G}/\text{R}$
- $\text{HUE} = \text{atan}(2 * (\text{B} - \text{G} - \text{R})/30.5 * (\text{G} - \text{R}))$
- $\text{MGRVI} = (\text{G}^2 - \text{R}^2)/(\text{G}^2 + \text{R}^2)$
- $\text{MVARI} = (\text{G} - \text{B})/(\text{G} + \text{R} - \text{B})$
- $\text{RCC} = \text{R}/(\text{R} + \text{G} + \text{B})$
- $\text{RGBVI} = (\text{G}^2 - (\text{B} * \text{R})/\text{G}^2 + (\text{B} + \text{R}))$
- $\text{PRI} = \text{R}/\text{G}$
- $\text{TGI} = \text{G} - 0.39 * \text{R} - 0.61 * \text{B}$
- $\text{VEG} = \text{G}/(\text{R}^{0.667} * \text{B}^{0.334})$
- $\text{vNDVI} = 0.5268 * ((\text{R}/(\text{R} + \text{G} + \text{B}))^{0.1294} * (\text{G}/(\text{R} + \text{G} + \text{B}))^{0.3389} * (\text{B}/(\text{R} + \text{G} + \text{B}))^{-0.3118})$

- $WI = (G/(R+G+B)-B/(R+G+B))/(R/(R+G+B)-G/(R+G+B))$

A laboratóriumi kísérlet adataitból elemztem még a vNDVI vegetációs index és a terület paraméter értékek eltérését különböző búzafajták, eltérő kezeléstípusok és az idő múlásának függvényében. Az elemzéshez háromutas ANOVA tesztet alkalmaztam, ahol a függő változó a vNDVI, vagy területértékek voltak, míg a független változók a búzafajták, kezeléstípusok és az eltelt idő volt. A modellben a független változók hatását külön-külön és együttesen, interakcióban is vizsgáltam, úm. fajták*kezelés, fajták*felvételezés időpontja, kezelés*felvételezés időpontja, fajták*kezelés* felvételezés időpontja közötti kölcsönhatások. A modell struktúrája a következőképpen alakult:

- háromutas ANOVA teszt: aov (Terület~Fajta*Kezelés*Mérés_ideje)
- háromutas ANOVA teszt: aov (vNDVI~Fajta*Kezelés*Mérés_ideje)

Ebben az esetben is Tukey féle post-hoc elemzést alkalmaztam, hogy a független változók hatását részletesebben is vizsgáljam.

A szemminőségi és mennyiségi paraméterek (terméshozam, fehérje-, sikértartalom, hektoliterömeg) közötti szignifikáns összefüggések meghatározására a Pearson-féle korrelációs együtthatót alkalmaztam, ami két változó közötti lineáris kapcsolatot jellemzi. A laboratóriumi kísérletnél továbbá vizsgáltam a különböző búzafajták terület és vNDVI értékei közötti korrelációt szintén Pearson-féle korrelációs teszt segítségével. A két vizsgált változó korrelációját a három különböző mérési időpontban is vizsgáltam. A statisztikai teszteket $p < 0,05$ valószínűségi szinten tekintettem szignifikánsnak.

A vegetációs indexek kiszámolását, a statisztikai elemzést és az adatok ábrázolását RStudio statisztikai környezetében (Rstudio Team 2020), a program integrált csomagjai (stats, graphics; R Core Team 2021), a ggplot2 grafikai csomag (Wickham 2016) és a dplyr csomag (Wickham et al. 2023) segítségével végeztem. Továbbá elemzésre az IBM SPSS Statistics 17.0 (SPSS 2008) szoftvert is használtam.

5. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

5.1 A szántóföldi kísérlet eredményei

5.1.1 A búzafajták termés hozama és szemminőségi paraméterei

Az egyutas ANOVA modell eredménye szerint a gabonafajták erősen és szignifikáns hatással vannak a termés hozamra és a szemminőségi paraméterekre: a legerősebb kapcsolatot a fajták és a sikértartalom között találtam ($F = 205,978$), de a fehérjetartalom ($F = 142,210$), a termés hozam ($F = 127,961$) és a hektolitertömeg ($F = 81,179$) is szignifikáns összefüggést mutatott a fajtákkal (4. táblázat).

4. táblázat: A vizsgált gabonafajták termésátlagának és szemminőségi paramétereinek összehasonlítása egyutas ANOVA modellel.

		Eltérés- négyzetösszeg	df	Átlagos eltérés- négyzetösszeg	F	Sig.
Terméshozam	Csoportok között	180,522	4	45,131	127,961	0,000
	Csoportokon belül	77,592	220	0,353		
	Összesítve	258,115	224			
Fehérjetartalom	Csoportok között	460,974	4	115,243	142,210	0,000
	Csoportokon belül	178,282	220	0,810		
	Összesítve	639,256	224			
Sikértartalom	Csoportok között	6274,017	4	1568,504	205,978	0,000
	Csoportokon belül	1675,281	220	7,615		
	Összesítve	7949,298	224			
Hektolitertömeg	Csoportok között	908,565	4	227,141	81,179	0,000
	Csoportokon belül	615,568	220	2,798		
	Összesítve	1524,133	224			

A termés hozam esetében a Tukey post hoc teszt alapján a legtöbb fajta szignifikánsan $p < 0,001$ -es szinten különbözött (M6.1 táblázat). A vetett fajták közül a Bánkúti 1201 őszi búzának volt a legmagasabb termésátlaga (4,5 t/ha), míg a Böződi alakor valamivel alacsonyabb termésátlagot produkált (4,4 t/ha). A legalacsonyabb termés hozama az Mv Alkor (3,8 t/ha) és a Schiemann (3,5 t/ha) alakoroknak volt.

Legmagasabb fehérjetartalommal a Schiemann alakor (12,6 %) rendelkezett, ezt követte a Bánkúti 1201 (12,5 %), majd az Mv Alkor (11,7 %), míg végül a Böződi alakor (9,3 %) rendelkezett a legalacsonyabb fehérjetartalommal a vizsgált mintákban.

A Bánkúti 1201 (23,6 %), az Mv Alkor (22,5 %) és a Schiemann (25,8 %) sikértartalma szignifikáns különbséget nem mutatott, a Böződi alakor tartalmazta a legalacsonyabb sikermennyiséget (15,4 %).

A hektolitertömeg mérésénél valamennyi alakor pelyvátlanított volt. A Schiemann alakor (80,1 kg/hl) hektolitertömege volt a legnagyobb, amihez hasonló volt a Böződi alakor (79,1 kg/ha) és az MvAlkor (77,3 kg/hl). A Bánkúti 1201-nek (75,7 kg/hl) volt a legalacsonyabb a hektolitertömege (5. táblázat). A vetett fajták laboratóriumban mért alapadatait és a Mininfra-Scan T Plus közeli infravörös optikai műszer kalibrációs értékeit az M3. melléklet tartalmazza.

A Pearson-féle lineáris korreláció szerint a termés hozam és a szemminőség közti kapcsolatot közepes pozitív ($r = 0,410$ -ig) és szignifikáns ($p < 0,001$). A három gabonaminőségi paraméter közül a fehérje- és a sikértartalom között volt a legerősebb korreláció ($r = 0,935$, $p < 0,001$), míg a sikértartalom és a hektolitertömeg ($r = 0,244$, $p < 0,001$) gyengén korreláltak. A fehérjetartalom és a hektolitertömeg között összefüggés nem volt kimutatható (6. táblázat).

5. táblázat: A vetett gabonafajták mért termésátlagai és szemminőségi paraméterei.

A Tukey-féle post hoc teszt alapján a szignifikáns különbségek a fajták között oszloponként ($p < 0,001$) különböző betűkkel (a-c) vannak jelölve.

Fajta	Termésátlag [t/ha]	Fehérjetartalom [%]	Sikértartalom [%]	Hektolitertömeg [kg/hl]
Bánkúti 1201	4.5 ^a	12.5 ^a	23.6 ^a	75.7 ^c
Mv Alkor	3.8 ^b	11.7 ^b	22.5 ^a	77.3 ^b
Schiemann	3.5 ^b	12.6 ^a	25.8 ^a	80.1 ^{ab}
Böződi	4.4 ^a	9.3 ^c	15.4 ^b	79.1 ^a

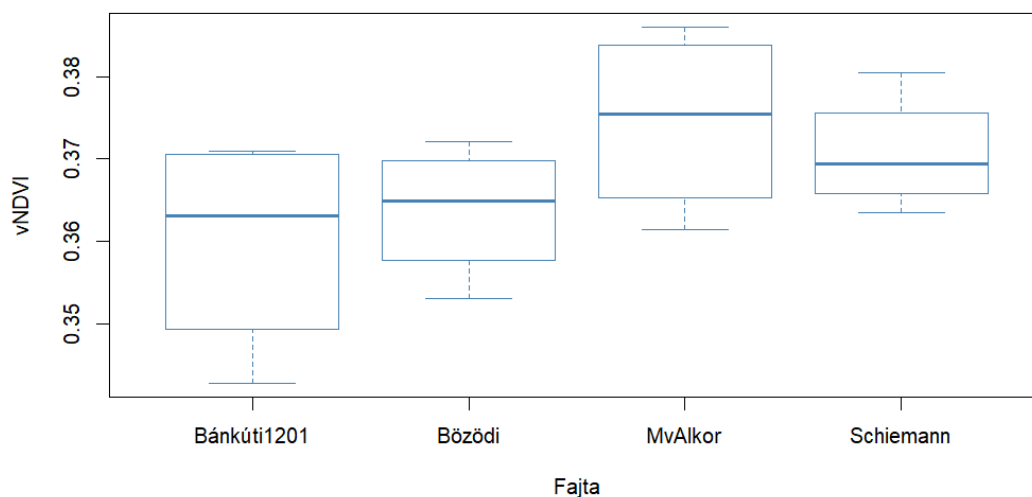
6. táblázat: Pearson-féle lineáris korreláció a terméshozam és a szemminőségi paraméterek között. $r = 1$: nagyon erős pozitív korreláció, $0.7 \leq r < 1$: erős pozitív korreláció, $0.2 \leq r < 0.7$: közepes pozitív korreláció, $0 < r < 0.2$: gyenge pozitív korreláció.

		Termés- hozam	Fehérje- tartalom	Sikértar- talom	Hektoliter- tömeg
Termés- hozam	Pearson r	1			
	Sig. (2-				
	N	225			
Fehérje- tartalom	Pearson r	0,246**	1		
	Sig. (2-	0,000			
	N	225	225		
Sikértar- talom	Pearson r	0,410**	0,935**	1	
	Sig. (2-	0,000	0,000		
	N	225	225	225	
Hektoliter- tömeg	Pearson r	0,305**	0,030	0,244**	1
	Sig. (2-	0,000	0,654	0,000	
	N	225	225	225	225
	N	225	225	225	225

5.1.2 A vetett búzafajták vizsgálata RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel

A légi felvétel RGB adataiból származtatott 16 vizsgált vegetációs indexszel nem volt szignifikánsan kimutatható a fajták közti eltérés (M6.1 melléklet, M6.1–2 ábra), illetve a vegetációs indexek és a termésátlag között sem találtam összefüggést.

Míg a vizsgált vegetációs indexek közül a vNDVI index alkalmas volt arra, hogy légifotó alapján kimutassam a vetett búzafajták korai fejlődési szakaszát, minden esetben az értékek 0,35 és 0,40 közé estek (17. ábra).

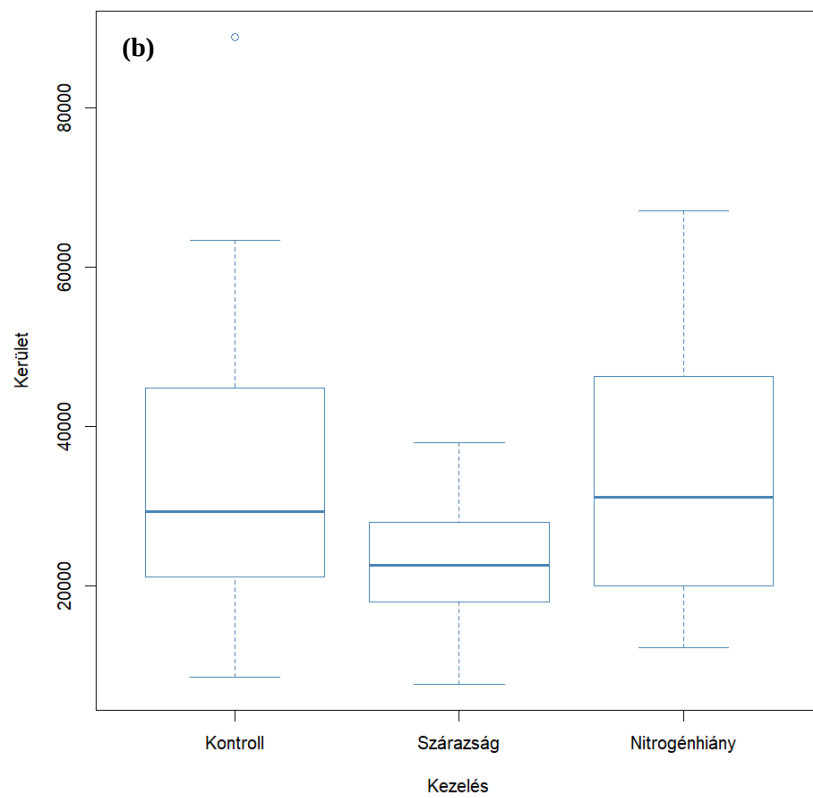
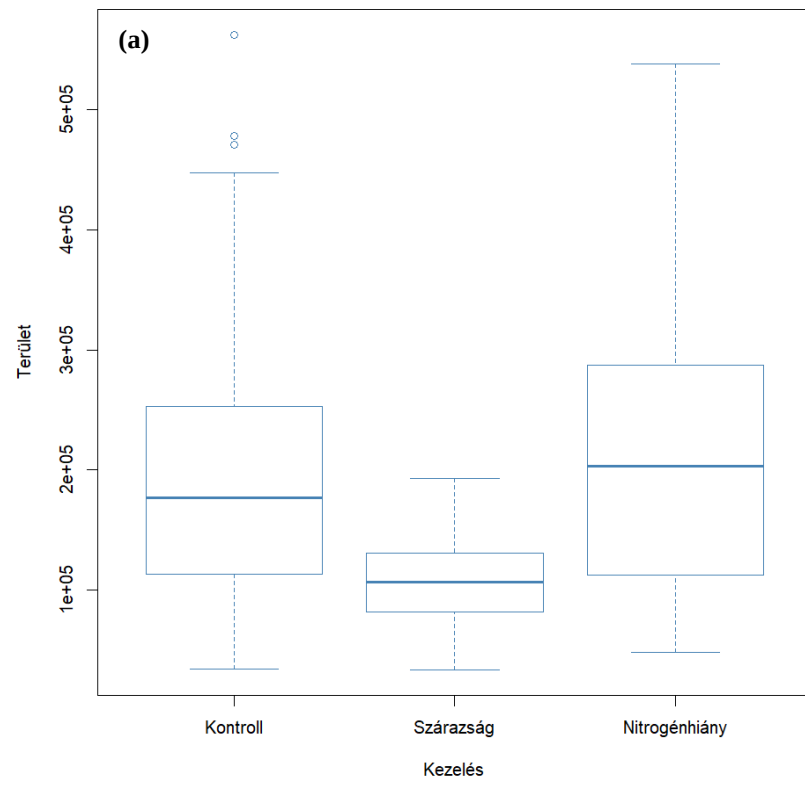


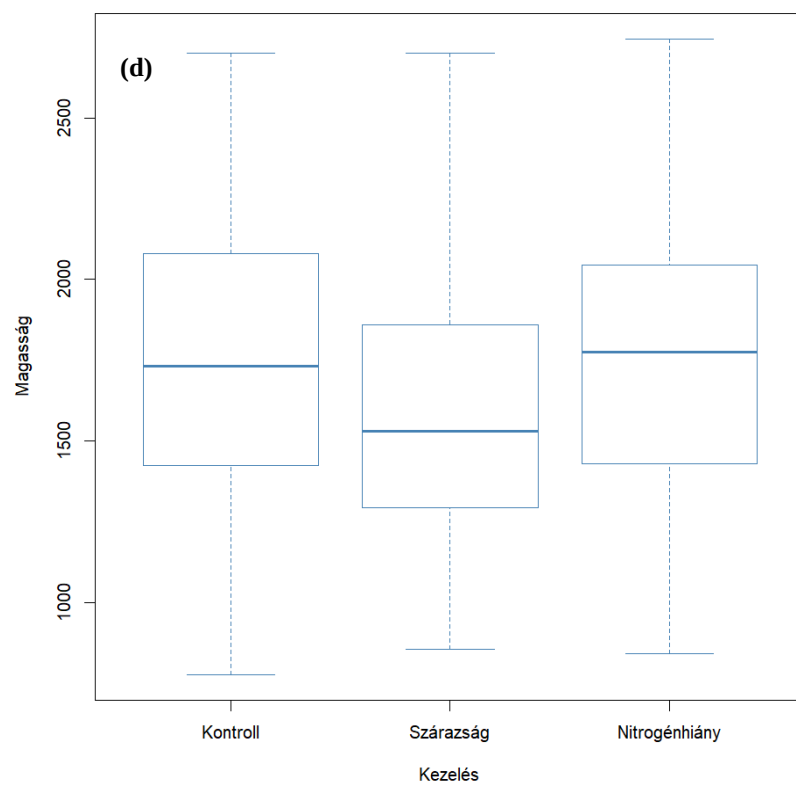
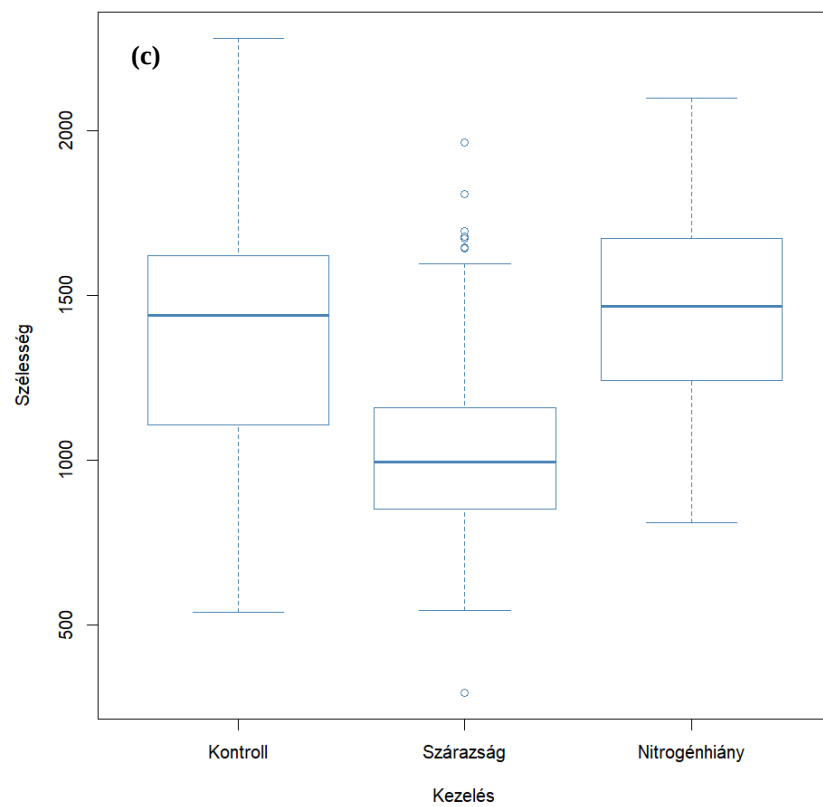
17. ábra: Az RGB adatokból származtatott vNDVI vegetációs index értékei fajtánként.

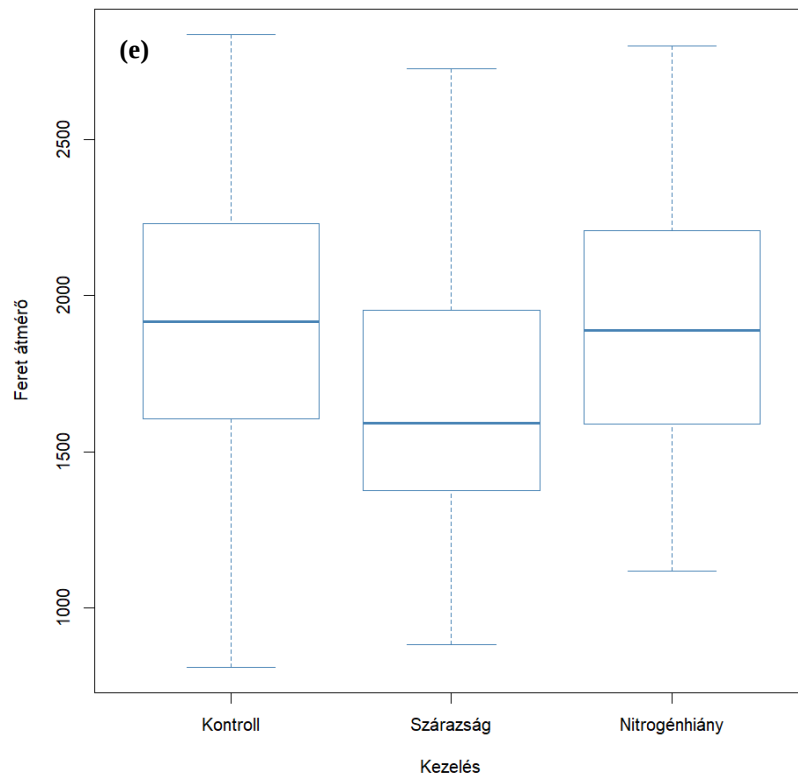
5.2 A laboratóriumi kísérlet eredményei

5.2.1 A kezelések (szárazság és tápanyaghiány) és a digitális geometriai paraméterek közti összefüggés

Az összes vizsgált geometriai paraméter (terület, kerület, szélesség, magasság, Feret átmérő) esetében a szárazság hatása szignifikánsan kimutatható volt a kontroll cserepekhez képest ($p < 0,05$). A legerősebb hatás a terület változónál állt fenn. Míg a tápanyaghiány egyik paraméternél sem volt kimutatható a kontrollhoz képest az adott kísérleti beállításban ($p < 0,05$) (18a-e. ábra).



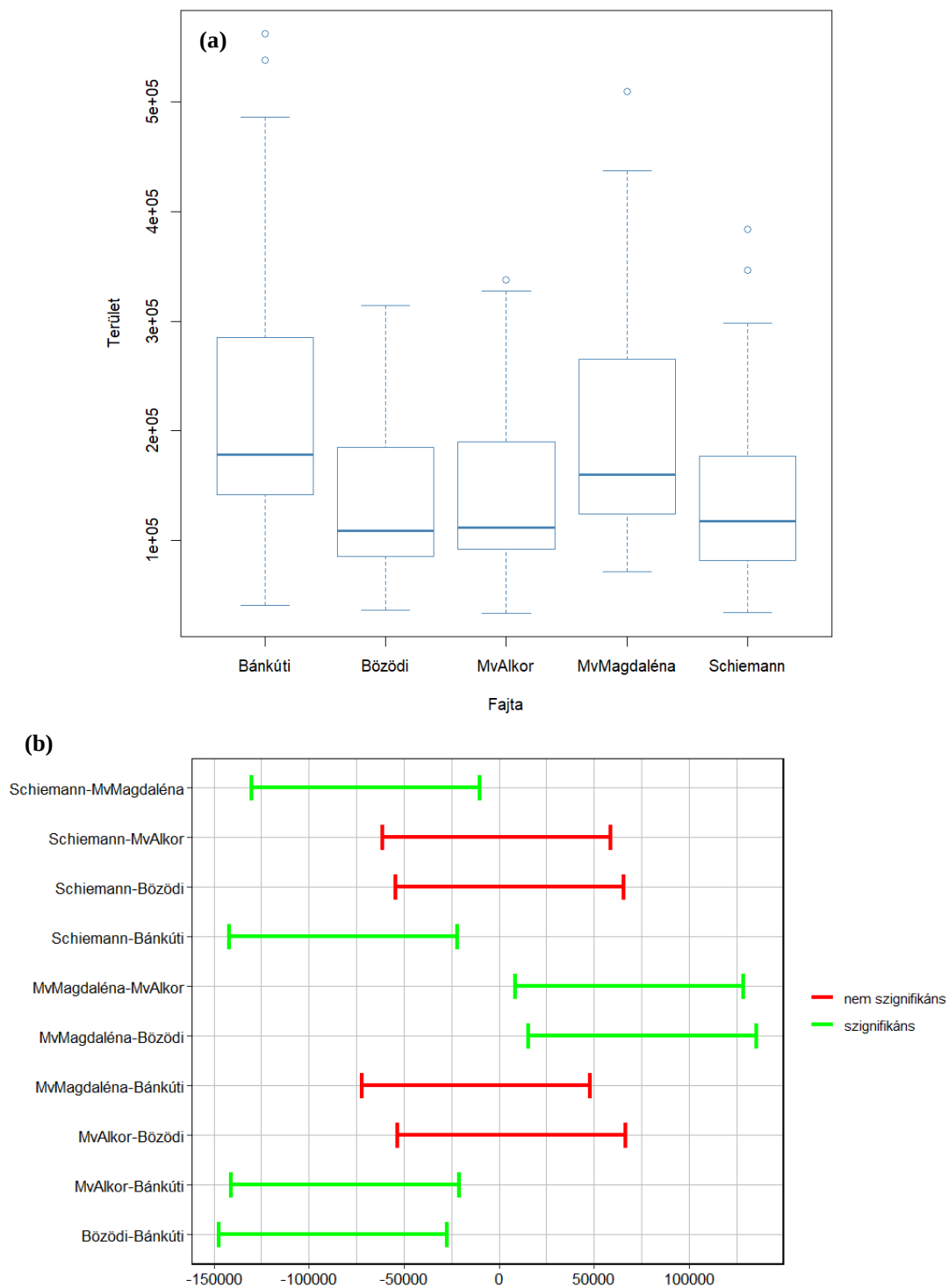




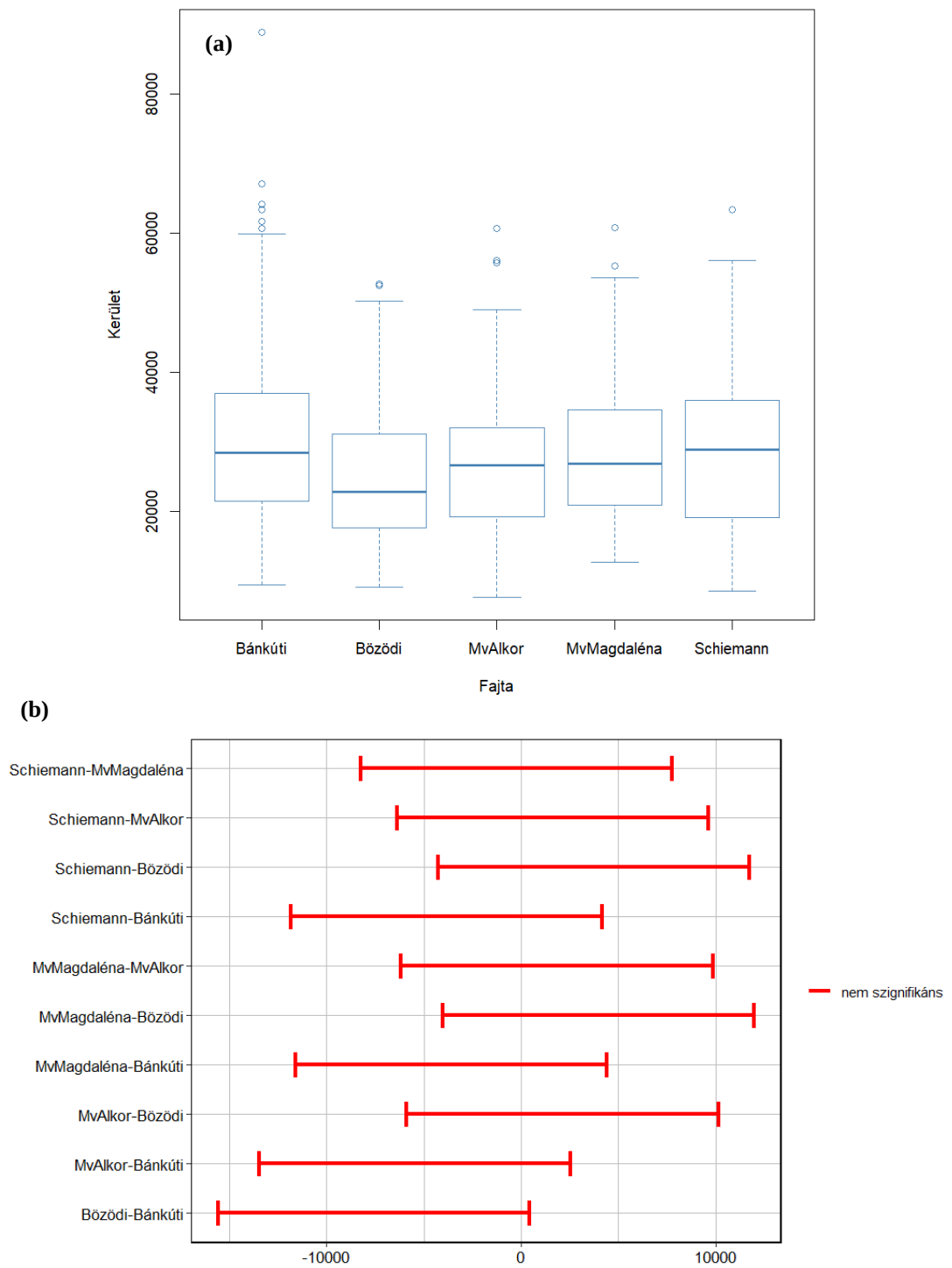
18. ábra: A szárazság és a tápanyaghiány detektálása a vizsgált geometriai paraméterekkel: **a)** terület, **b)** kerület, **c)** szélesség, **d)** magasság, **e)** Feret átmérő.

5.2.2 A fajták elkülönítése digitális geometriai paraméterekkel

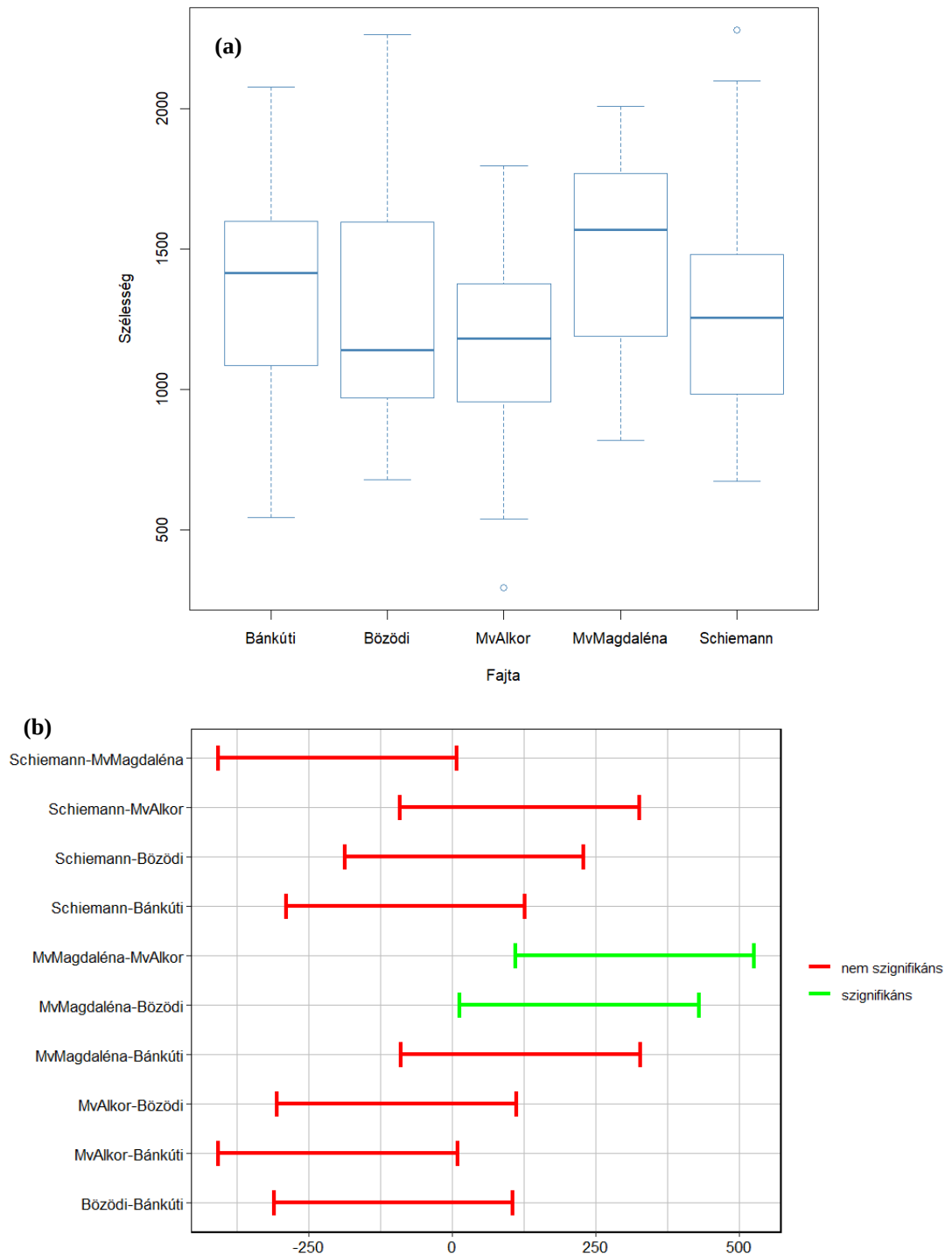
A kerület kivételével az összes geometriai változó alkalmas volt arra, hogy az őszi búzafajtákat elkülönítsem az alakor búzafajtáktól. A fajták közti eltérés a területnél: $p = 8,83e-06$, a szélességnél: $p = 0,00076$, a magasságnál: $p = 2e-16$ és a Feret átmérőnél: $p = 2e-16$ szignifikancia szinteken kimutatható volt (19-23. ábra). A terület geometriai változónál a Schiemann és az MvMagdaléna, a Schiemann és a Bánkúti 1201, az Mv Magdaléna és az MvAlkor, az MvMagdaléna és a Böződi, az MvAlkor és a Bánkúti 1201, valamint a Böződi és a Bánkúti 1201 szignifikánsan elkülöníthető volt (19. ábra). A kerület geometria változónál egyik búzafajta esetében sem találtam eltérést (20. ábra). A szélesség esetében az MvMagdaléna és az MvAlkor, valamint az MvMagdaléna és a Böződi fajták közt volt szignifikáns különbség (21. ábra). A magasság (22. ábra) és a Feret átmérő (23. ábra) esetén a legtöbb fajta szignifikánsan elkülönült: a Schiemann az MvMagdalénától, az MvAlkortól és a Bánkúti 1201-től, az MvMagdaléna az MvAlkortól és a Böződitől, valamint az MvAlkor a Bánkúti 1201-től és a Böződi a Bánkúti 1201-től.



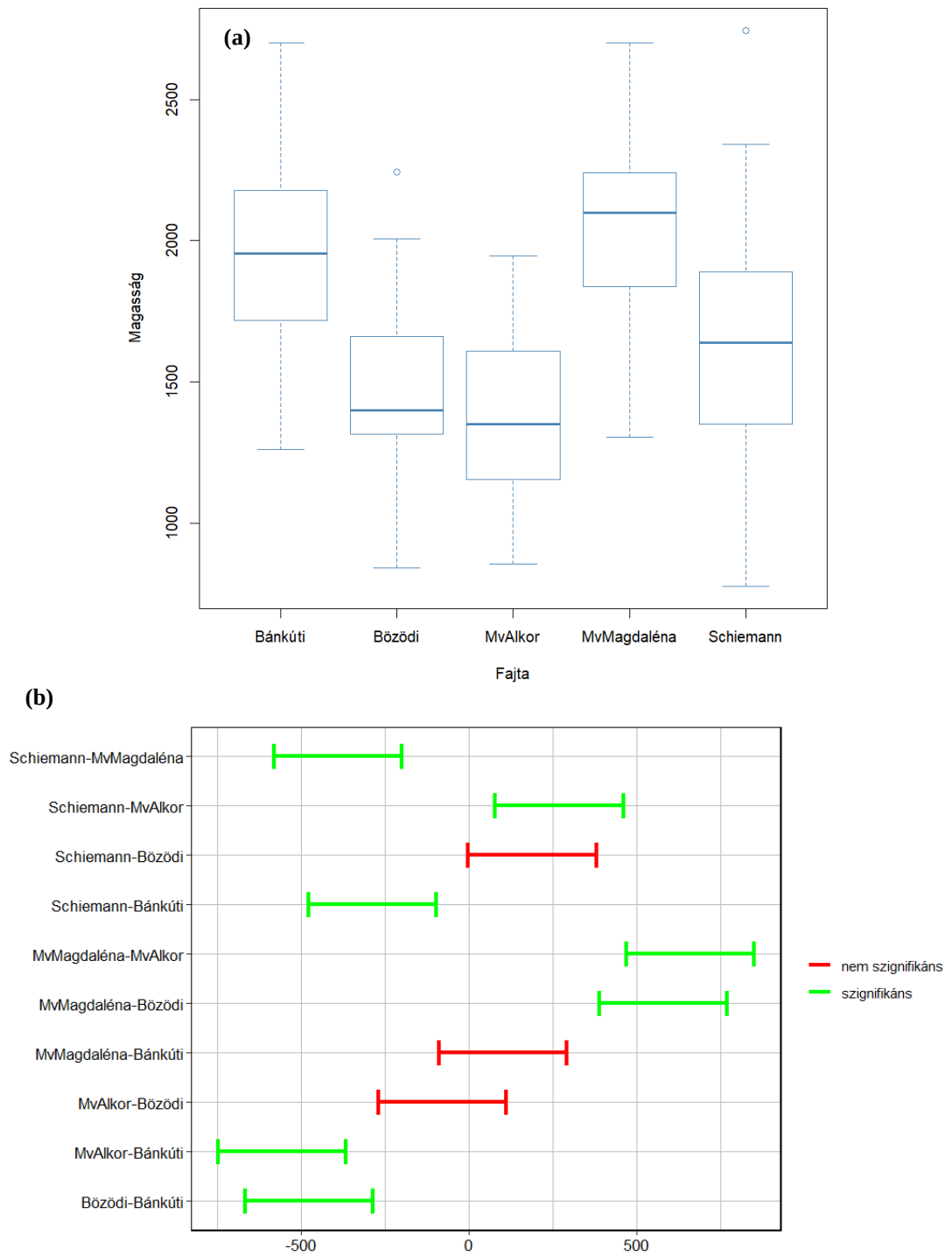
19. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása a terület változóval: **a)** a vizsgált búzafajták terület adatai, **b)** a búzafajták közti különbségek a Tukey-teszt alapján.



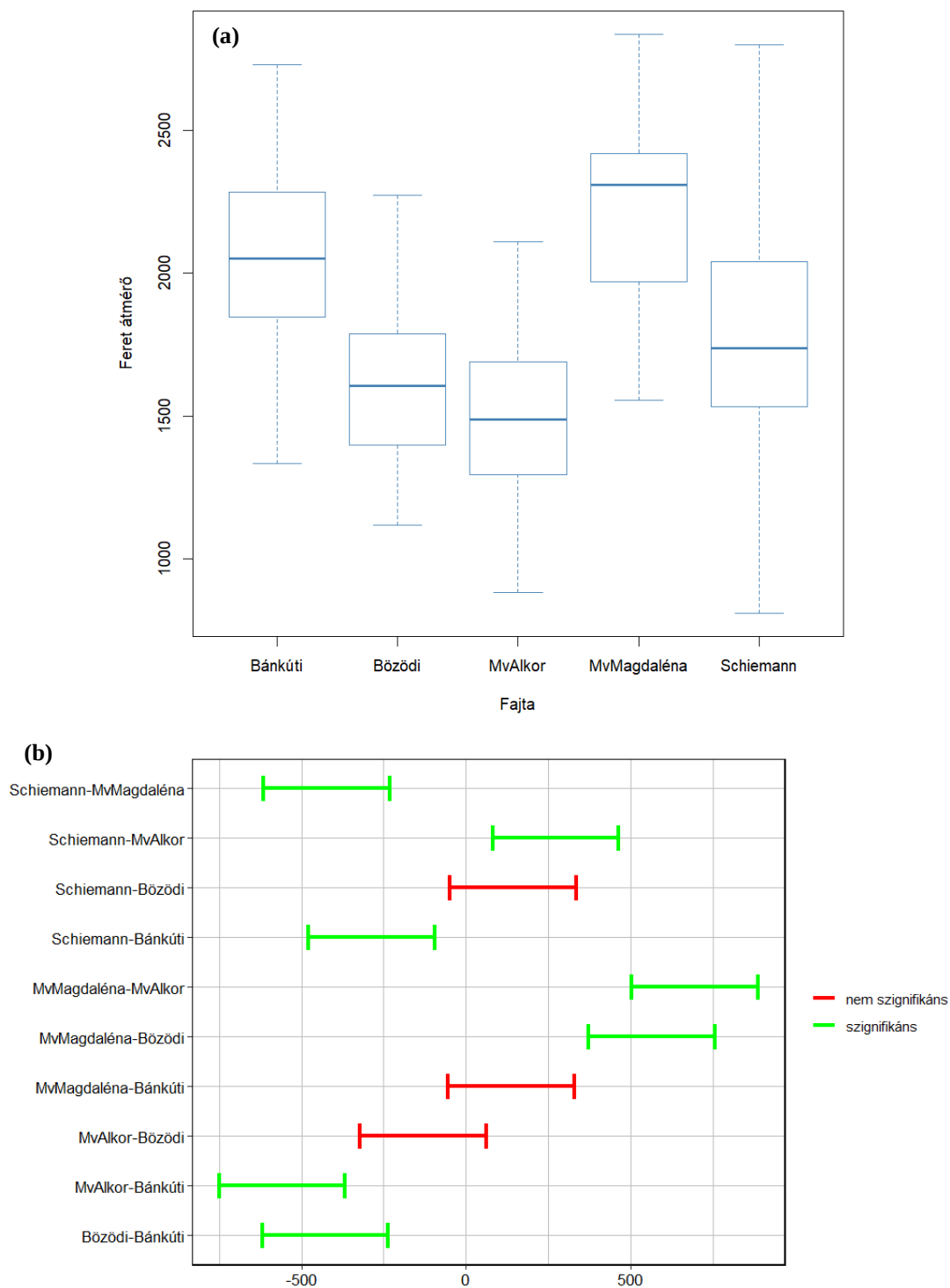
20. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása a kerület változóval: **a)** a vizsgált búzafajták kerület adatai, **b)** a búzafajták közti különbségek a Tukey-teszt alapján.



21. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása a szélesség változóval: **a)** a vizsgált búzafajták szélesség adatai, **b)** a búzafajták közti különbségek a Tukey-teszt alapján.



22. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása a magasság változóval: **a)** a vizsgált búzafajták magasság adatai, **b)** a búzafajták közti különbségek a Tukey-teszt alapján.



23. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása a Feret átmérő változóval: **a)** a vizsgált búzafajták Feret átmérő adatai, **b)** a búzafajták közti különbségek a Tukey-teszt alapján.

5.2.3 A digitális geometriai paraméterek és a fajták közötti összefüggés a kezelések és az idő függvényében

Az általános lineáris modell eredménye szerint az összes független változó (búzafajták, kezelések, felvételezések időpontjai) szignifikánsan befolyásolta a digitális paramétereket, $p < 0,05$ szignifikancia szinten (M6.2 táblázat). A szignifikáns kölcsönhatások száma – F érték és parciális η^2 – alapján a függő változók közül a területnél találtam a legerősebb kapcsolatot a független változókkal (24. ábra). Erős vagy mérsékelt erős kapcsolat volt megfigyelhető a terület és a felvételezés időpontja között ($F = 324,764$, részleges $\eta^2 = 0,783$), valamint a terület és a kezelések ($F = 76,335$, részleges $\eta^2 = 0,459$) között. Közepes szignifikáns összefüggést találtam a magasság és a felvételek időpontja ($F = 75,684$, részleges $\eta^2 = 0,419$), a magasság és a fajta ($F = 65,318$, részleges $\eta^2 = 0,592$), a Feret átmérő és a felvételek időpontja ($F = 65,001$, részleges $\eta^2 = 0$) között. Szintén közepesen erős kapcsolat állt fenn a Feret átmérő és a fajták ($F = 64,6$, részleges $\eta^2 = 0,589$) között. A vizsgált digitális paraméterek közül a szélesség mutatta a leggyengébb kapcsolatot az összes független változóval. (A fitotronban nevelt fajták digitális geometriai paramétereinek mérési adatait az M4. melléklet tartalmazza.)

5.2.3.1 A terület, mint legpontosabb indikátor és a fajták közötti összefüggés a kezelések és az idő függvényében

Az általános lineáris modell szerint az összes független változó (fajták, kezelések, idő) és a változók közti kölcsönhatások szignifikáns hatással voltak a területre ($p < 0,001$). A független változók a területváltozások 91,8%-át magyarázták (7. táblázat). A legerősebb kapcsolat az idő függvényében állt fenn, de a fajták és a kezelések is szignifikánsan befolyásolták a területváltozást (24. ábra). Minden fajta esetében folyamatosan nőtt a terület az idő függvényében ($F = 443,804$, $\eta^2 = 0,831$, $p < 0,05$). Szintén szignifikáns kapcsolat volt kimutatható a terület és a kezelések között ($F = 214,260$, $\eta^2 = 0,704$, $p < 0,05$). Közepesen erős volt a kapcsolat a terület és a fajták között ($F = 67,243$, $\eta^2 = 0,599$, $p < 0,05$), valamint a terület, az idő és a kezelések együttes hatása között ($F = 75,366$, $\eta^2 = 0,626$, $p < 0,05$) (7. táblázat).

A Tukey-teszt szerint szignifikáns ($p < 0,05$) különbséget találtam a felvételezések összes időpontja és az összes kezelés között. A gabonafajtáknál szignifikánsan nőtt a terület az idő függvényében (24. ábra, 8. táblázat).

A kontroll és a szárazságkezelt egyedek közti különbség szignifikáns eltérést mutatott: a szárazságkezelt egyedek szignifikánsan alacsonyabb értéket vettek fel, míg a kontroll és a tápanyaghiányos egyedek között szignifikáns különbség nem volt kimutatható (24. ábra, 9. táblázat).

Közepesen erős kapcsolat állt fenn a terület és a fajták között. A legnagyobb területet az őszi búzafajták érték el, mindhárom alakor fajta ennél alacsonyabb területtel rendelkezett: az Mv Magdaléna és a Bánkúti 1201 ősibúzákat szignifikánsan nagyobb területet értek el, mint az Mv Alkor, a Schiemann vagy a Böződi alakorok (24. ábra, 10. táblázat).

7. táblázat: Az általános lineáris modell (ANOVA) eredményei a terület paraméter, mint függő változó és a magyarázó változók (fajta, kezelés, idő) közötti összefüggések kimutatására.

A variancia eredete	Eltérés-négyzetösszeg	df	Átlagos-négyzetösszeg	F	Sig.	Parciális η^2
Korrigált modell	2,470E12	44	5,613E10	46,038	0,000	0,918
Meredekség	6,993E12	1	6,993E12	5736,118	0,000	0,970
Fajta	3,279E11	4	8,198E10	67,243	0,000	0,599
Kezelés	5,224E11	2	2,612E11	214,260	0,000	0,704
Idő	1,082E12	2	5,411E11	443,804	0,000	0,831
Fajta * Kezelés	6,007E10	8	7,508E9	6,159	0,000	0,215
Fajta * Idő	6,732E10	8	8,415E9	6,903	0,000	0,235
Kezelés * Idő	3,675E11	4	9,188E10	75,366	0,000	0,626
Fajta* Kezelés * Idő	4,219E10	16	2,637E9	2,163	0,008	0,161
Error	2,194E11	180	1,219E9			
Teljes variancia	9,682E12	225				
Korrigált teljes variancia	2,689E12	224				

a. R-négyzet = 0,918 (Korrigált R-négyzet = 0,898)

8. táblázat: A terület és az idő közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey-tesztel.

(I) Idő	(J) Idő	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Felső határ
2017/11/09	2017/11/18	-70029,76*	5701,750	0,000	-83504,50	-56555,02
	2017/11/26	-169044,55*	5701,750	0,000	-182519,29	-155569,81
2017/11/18	2017/11/9	70029,76*	5701,750	0,000	56555,02	83504,50
	2017/11/26	-99014,79*	5701,750	0,000	-112489,53	-85540,05
2017/11/26	2017/11/9	169044,55*	5701,750	0,000	155569,81	182519,29
	2017/11/18	99014,79*	5701,750	0,000	85540,05	112489,53

A megfigyelt átlagok alapján. Az átlagos négyzetes hiba = 1219123238,392.

*Az átlagos eltérés 0,05 szinten szignifikáns.

9. táblázat: A terület és a kezelések közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey-tesztel.

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Felső határ
Kontroll	Tápanyaghiány	-18906,19*	5701,750	0,003	-32380,93	-5431,45
	Szárazság	91444,40*	5701,750	0,000	77969,66	104919,14
Tápanyaghiány	Kontroll	18906,19*	5701,750	0,003	5431,45	32380,93
	Szárazság	110350,59*	5701,750	0,000	96875,85	123825,33
Szárazság	Kontroll	-91444,40*	5701,750	0,000	-104919,14	-77969,66
	Tápanyaghiány	-110350,59*	5701,750	0,000	-123825,33	-96875,85

A megfigyelt átlagok alapján. Az átlagos négyzetes hiba = 1219123238,392.

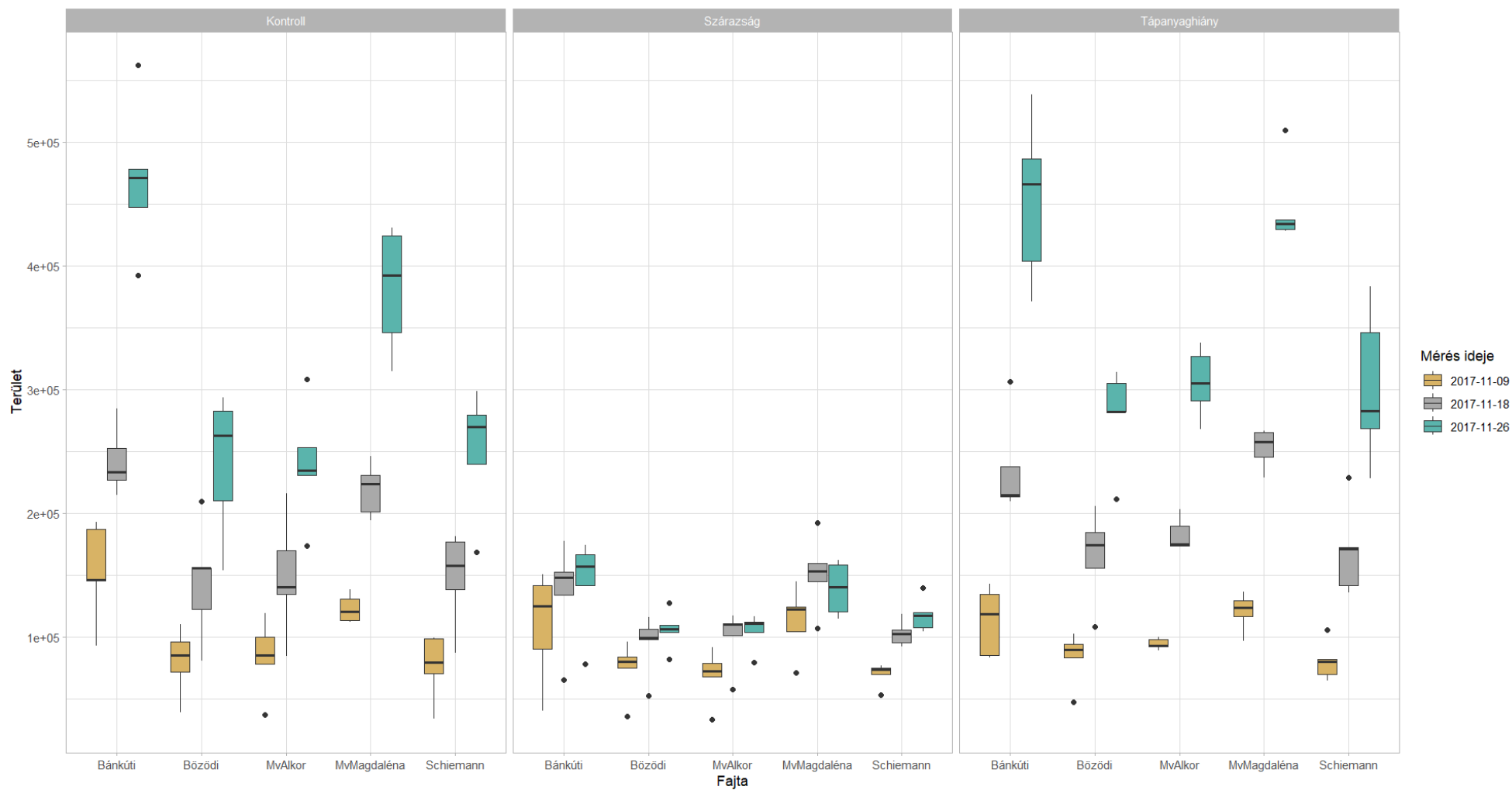
*Az átlagos eltérés 0,05 szinten szignifikáns.

10. táblázat: A terület és a fajták közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey-tesztel.

(I) Fajták	(J) Fajták	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Felső határ
1 (Mv Magdaléna)	2	-11993,33	7360,928	0,481	-32277,30	8290,64
	3	68775,51*	7360,928	0,000	48491,54	89059,48
	4	69944,98*	7360,928	0,000	49661,01	90228,95
	5	75494,38*	7360,928	0,000	55210,41	95778,35
2 (Bánkúti 1201)	1	11993,33	7360,928	0,481	-8290,64	32277,30
	3	80768,84*	7360,928	0,000	60484,87	101052,82
	4	81938,31*	7360,928	0,000	61654,34	102222,28
	5	87487,71*	7360,928	0,000	67203,74	107771,68
3 (Mv Alkor)	1	-68775,51*	7360,928	0,000	-89059,48	-48491,54
	2	-80768,84*	7360,928	0,000	-101052,82	-60484,87
	4	1169,47	7360,928	1,000	-19114,50	21453,44
	5	6718,87	7360,928	0,892	-13565,10	27002,84
4 (Schiemann)	1	-69944,98*	7360,928	0,000	-90228,95	-49661,01
	2	-81938,31*	7360,928	0,000	-102222,28	-61654,34
	3	-1169,47	7360,928	1,000	-21453,44	19114,50
	5	5549,40	7360,928	0,943	-14734,57	25833,37
5 (Bözödi)	1	-75494,38*	7360,928	0,000	-95778,35	-55210,41
	2	-87487,71*	7360,928	0,000	-107771,68	-67203,74
	3	-6718,87	7360,928	0,892	-27002,84	13565,10
	4	-5549,40	7360,928	0,943	-25833,37	14734,57

A megfigyelt átlagok alapján. Az átlagos négyzetes hiba = 1219123238,392.

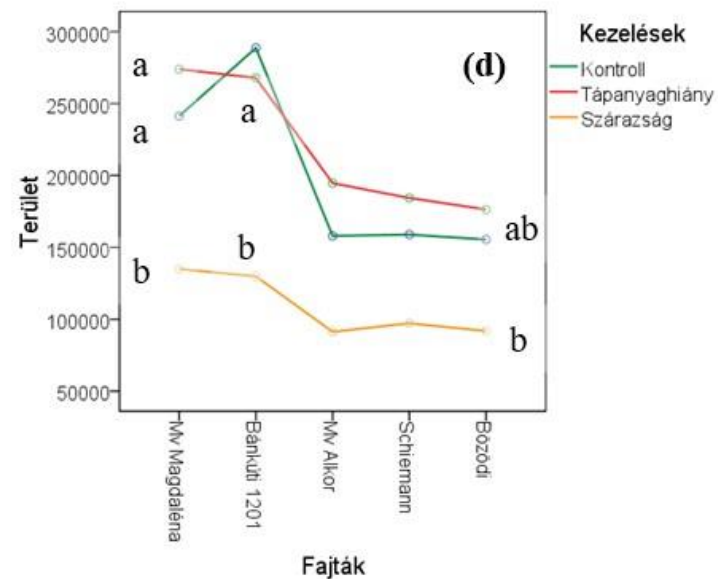
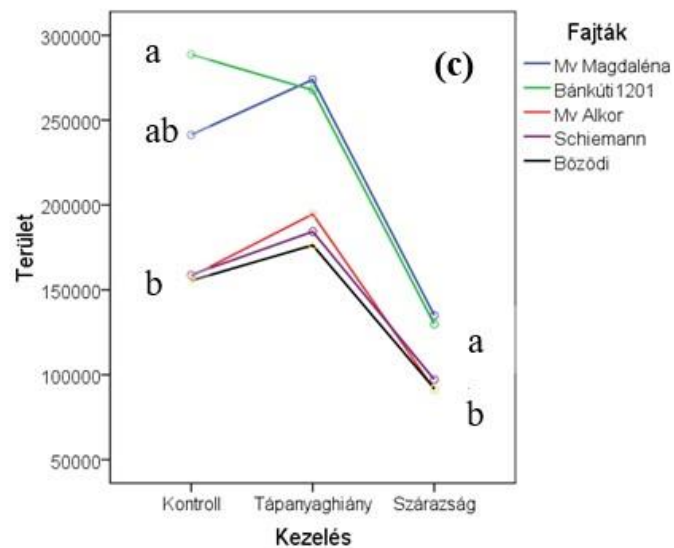
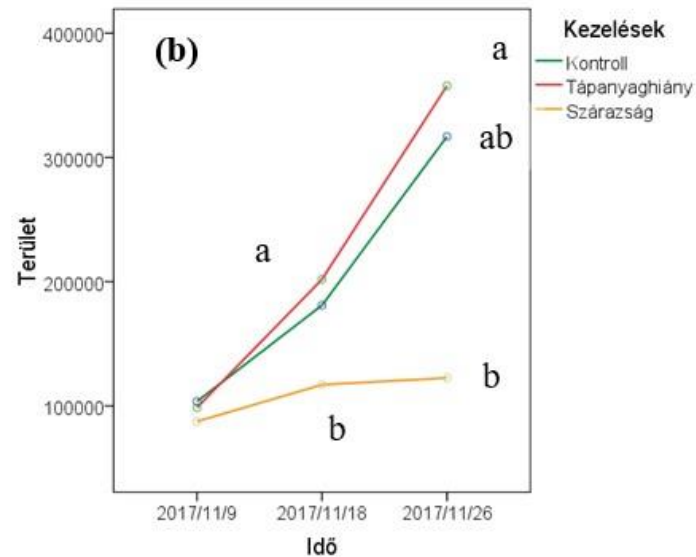
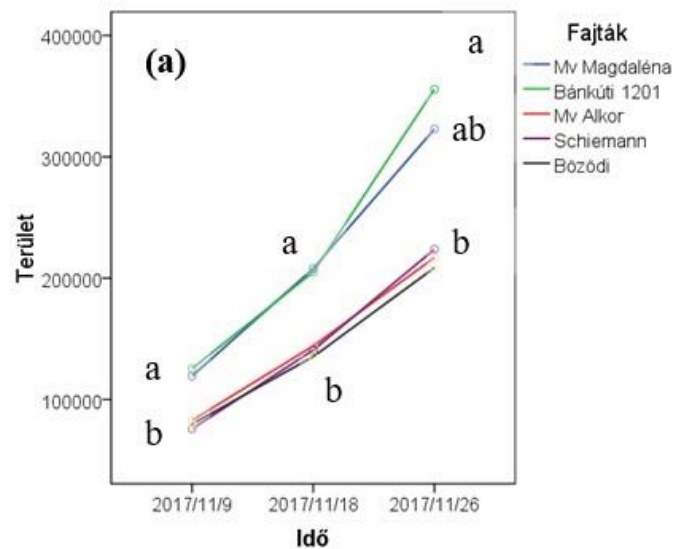
*Az átlagos eltérés 0,05 szinten szignifikáns.



24. ábra: A terület változása és a fajták közti összefüggés a kezelések és az idő függvényében. Az idő függvényében szignifikánsan ($p < 0,05$) nőtt a terület az összes fajtánál. A legnagyobb területet az őszi búzafajták érték el, az alakor fajták szignifikánsan alacsonyabb területtel rendelkeztek. A szárazságkezelt egyedek szignifikánsan elkülönültek a kontroll és a tápanyaghiányos egyedektől.

5.2.3.2 A fajták, a kezelések és az idő együttes hatása a területváltozásra

A terület, mint geometriai paraméter a várakozásoknak megfelelően idővel minden fajta esetében nőtt. Még kis időtávon belül is, a búzák korai fejlődési szakaszában kimutatható volt a változás. Az Mv Magdaléna és a Bánkúti 1201 őszi búzák a felvételezés első két időpontjában szignifikánsan különböztek a többi fajtától, de az Mv Magdaléna növekedése a harmadik mérési időpontra lelassult, és az Mv Alkorhoz, a Schiemannhoz és a Bözödi alakorokhoz hasonlított (25a. ábra, M6.3–5 táblázat). A szárazságkezelés negatív hatással volt a növekedésre, ami az idő múlásával jelentősen alacsonyabb területet eredményezett a kontrollcserepekhez és a tápanyaghiányos cserepekhez képest (25b. ábra). A fajták eltérő módon reagáltak a szárazságstresszre. Az Mv Magdaléna és a Bánkúti 1201 őszi búzákat szignifikánsan nagyobb területen sújtotta a szárazság, mint az alakor fajtákat (25c. ábra). A tápanyaghiány nem volt hatással a növekedésre az idő múlásával a kontrollcserepekhez képest, és a fajták sem reagáltak szignifikánsan a tápanyaghiányra (M6.6–8. táblázat). A kontroll és a tápanyagkezelt növényeknél a három felvételezési időpont terület szerint elkülönült, míg a szárazságkezelt egyedek esetén a felvételezés utolsó két időpontja nem tért el (25b. ábra). A fajták a tápanyaghiányra jól reagáltak, területük nem tért el a kontrollcserepekéhez képest, míg a szárazság hatása minden fajtánál kimutatható volt (25d. ábra).



25. ábra: A (a) fajta*idő, (b) kezelés*idő, (c) fajta*kezelés és (d) kezelés*fajta hatása a kontrollált körülmények között cserepekben termesztett búzafajták területére. A szignifikáns különbségeket az eltelt időre és a kezelésekre Tukey post hoc szignifikancia teszt mutatja $p < 0,05$ szinten. Az eltéréseket különböző betűk jelölik (a,ab,b).

5.2.4 A kezelések (szárazság és tápanyaghiány) és az RGB adatokból származtatott vegetációs indexek közti összefüggés

Az RGB adatokból származtatott 16 vizsgált vegetációs indexek közül 12 index $p < 0,001$ szignifikancia szinten alkalmas volt a kezelések közti eltérések kimutatására, ezek a következők voltak: BGI, BI, ExB, GCC, GLI, GR, HUE, MGRVI, MVARI, PRI, VEG és vNDVI. Míg a TGI $p < 0,01$ szignifikancia szinten, az RGBVI $p < 0,1$ szignifikancia szinten mutatta ki a kezelések közti eltéréseket. Két index, az RCC és a WI nem volt alkalmas a kezelések elkülönítésére (11. táblázat).

A szárazság hatásának kimutatására a fenti 12 index mind alkalmas volt. Az előző eredményektől eltérően a TGI már csak $p < 0,05$ szignifikancia szinten mutatta ki a szárazság hatását, az RGBVI pedig már nem volt alkalmas a szárazság hatásának kimutatására búzafajták esetében, hasonlóan az RCC-hez és a WI-hez (12. táblázat, 26–27. ábra). A tápanyaghiány egyik vegetációs indexszel sem volt kimutatható a kontrollhoz képest az adott kísérleti beállításban ($p < 0,05$). A M6.2 melléklet tartalmazza az összes változóra vonatkozó statisztikai elemzés részletes eredményeit.

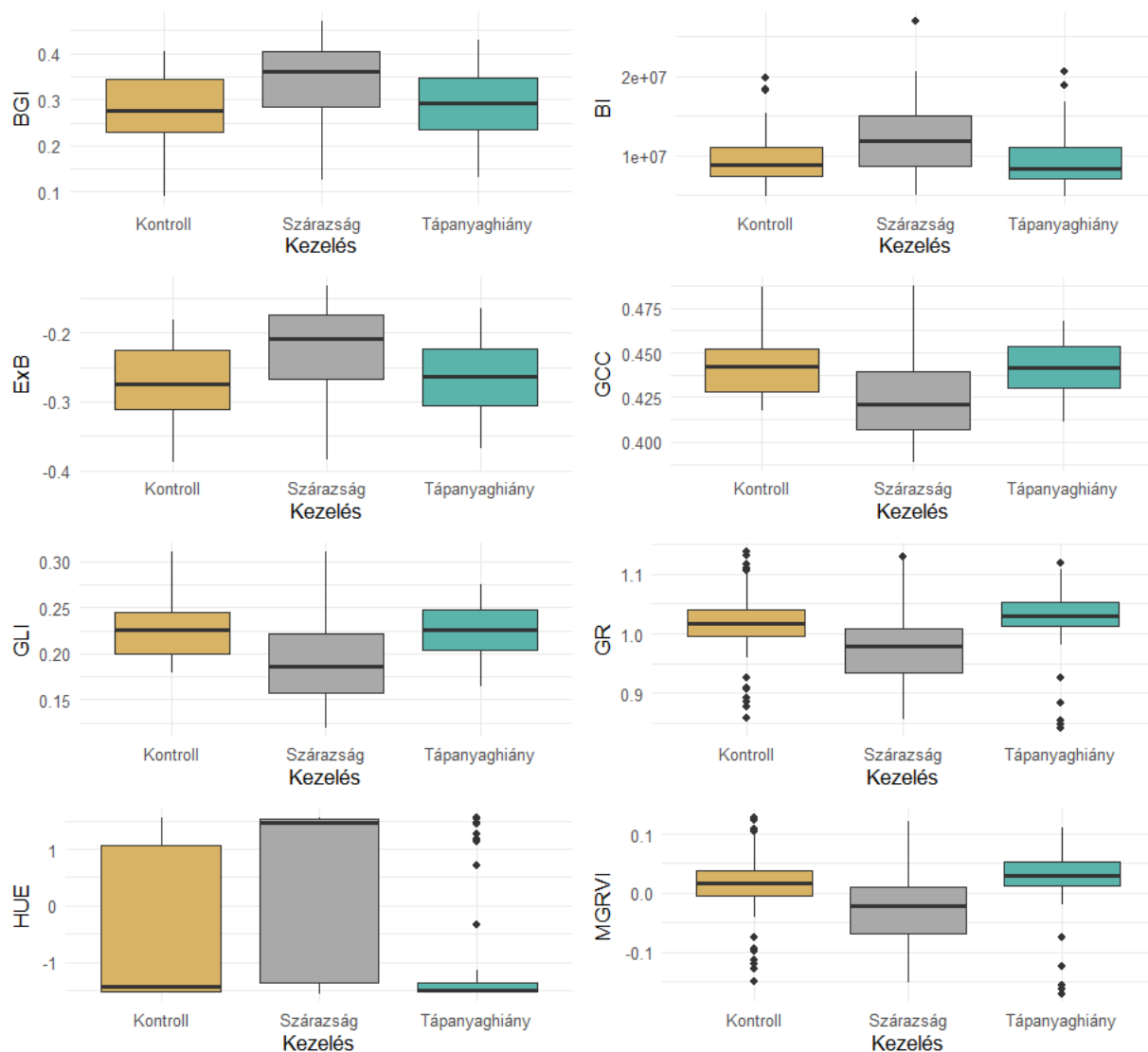
11. táblázat: A fitotronban nevelt fajták RGB adataiból származtatott vegetációs indexek ANOVA elemzése a kezelésekre. (Rövidítések: Veg. index = vegetációs index, Df = szabadságfok, Sum Sq = eltérés négyzetösszeg, Mean Sq = átlagos négyzetösszeg, F érték = próbastatisztika értéke, Pr(>F) = szignifikancia érték)

Veg.index	Df	Sum Sq	Mean Sq	F érték	Pr(>F)
BGI	2	0.1468	0.0734	11.88	1.25e-05 ***
BI	2	3.21E+14	1.61E+14	12.76	5.68e-06 ***
ExB	2	0.0842	0.04210	13.21	3.81e-06 ***
GCC	2	0.014	0.007	21.4	3.16e-09 ***
GLI	2	0.05446	0.02723	22.17	1.67e-09 ***
GR	2	0.0776	0.03879	11.44	1.87e-05 ***
HUE	2	96.8	48.41	30.95	1.4e-12 ***
MGRVI	2	0.0796	0.03982	11.6	1.61e-05 ***
TGI	2	266	133.08	4.764	0.00942 **
MVARI	2	0.04028	0.02014	22.24	1.57e-09 ***
RCC	2	0.00071	0.00035	0.746	0.476
RGBVI	2	4633493	2316747	2.956	0.0541 .
PRI	2	0.0824	0.04119	11.52	1.74e-05 ***
VEG	2	0.750	0.3751	14.89	8.54e-07 ***
vNDVI	2	0.0509	0.025463	10.24	5.58e-05 ***
WI	2	749208	374604	0.681	0.507

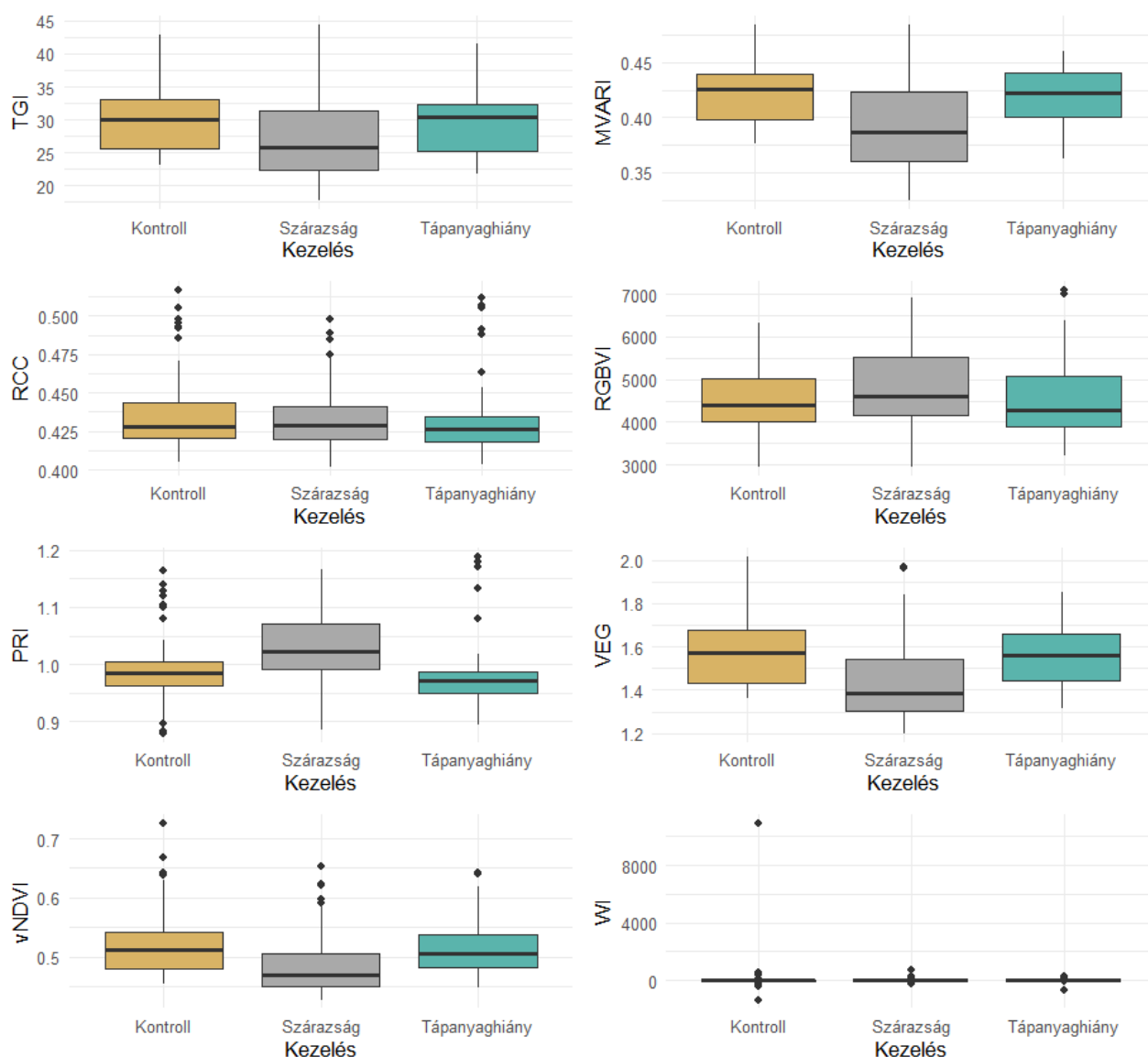
Szig. szintek: 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

12. táblázat: A fitotronban nevelt fajták RGB adataiból származtatott vegetációs indexek páronkénti eltérése a szárazságkezelés és a kontroll között. (Rövidítések: Veg. index = vegetációs index, diff = változók közti különbség, lwr = a konfidencia intervallum alsó határa, upr = konfidencia intervallum felső határa, p adj = szignifikancia érték)

Veg.index	diff	lwr	upr	p adj
BGI	0.05884631	0.02855988	0.08913275	0.0000226
BI	2466390.7	1099979	3832803	0.0000897
ExB	0.044214684	-0.02245994	0.06596942	0.0000089
GCC	-0.016995445	-0.023963691	-0.010027198	0.0000001
GLI	-0.033481725	-0.04698676	-0.01997669	0.0000001
GR	-0.03445805	-0.05689715	-0.01201895	0.0010468
HUE	1.137204	0.6552717	1.61913577	0.0000002
MGRVI	-0.034874045	-0.05744626	-0.01230183	0.0009663
TGI	-2.4111129	-4.4475926	-0.3746332	0.0155838
MVARI	-0.029095354	-0.04069015	-0.01750055	0.0000000
RCC	-0.002446869	-0.01084006	0.005946317	0.7708131
RGBVI	300.248753	-40.83958	641.33709	0.0969556
PRI	0.035538602	0.01249397	0.05858324	0.0009900
VEG	-0.13181806	-0.19297624	-0.07065988	0.0000023
vNDVI	-0.035416486	-0.054632413	-0.01620056	0.0000618
WI	-103.46955	-389.3033	182.3642	0.6697317



26. ábra: A szárazság és a tápanyaghiány detektálása az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel: BGI, BI, ExB, GCC, GLI, GR, HUE, MGRVI.



27. ábra: A szárazság és a tápanyaghiány detektálása az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel: TGI, MVARI, RCC, RGBVI, PRI, VEG, vNDVI, WI.

5.2.5 A fajták elkülönítése az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel

A vizsgálatba bevont legtöbb RGB adatokra épülő vegetációs index alkalmas volt a búzafajták elkülönítésére. 11 index $p < 0,001$ szignifikancia szinten mutatta ki a fajták közti eltéréseket, amik a következők voltak: BGI, BI, ExB, GCC, GLI, TGI, MVARI, RCC, RGBVI, VEG és vNDVI. Míg a GR, az MGRVI és a PRI indexek $p < 0,05$ szignifikancia szinten mutatták ki a fajták közti különbségeket. A HUE és a WI indexek nem voltak alkalmasak a fajták detektálására (13. táblázat).

A páronkénti eltérések kimutatásának száma a következőképpen alakult a vizsgált indexeknél: BGI: 6, ExB: 6, GCC: 6, GLI: 6, TGI: 6, VEG: 6; MVARI: 6, BI: 5, RGBVI: 5, vNDVI: 4, RCC: 2, GR: 1, MGRVI: 1, PRI: 1, HUE: 0, WI: 0.

A BGI, az ExB, a GCC, a GLI, a TGI, a VEG és az MVARI indexek hasonló módon kimutatták a Bánkúti 1201 őszi búza és a Bözödi, az MvAlkor és a Schiemann alakorok, valamint az MvMagdaléna őszi búza és a Bözödi, az MvAlkor és a Schiemann alakorok közti eltéréseket. A BI és az RGBVI alkalmasak voltak a Bánkúti 1201 őszi búza és a három alakor fajta, illetve az MvMagdaléna és a Bözödi elkülönítésére. Továbbá a BI indexnél elkülönült egymástól a két őszi búza, az RGBVI indexnél az MvMagdaléna és az MvAlkor. A vNDVI indexnél a Schiemann elkülönült az MvMagdalénától és a Bánkúti 1201-től, az MvMagdaléna a Bözöditől, és a Bözödi a Bánkúti 1201-től. Az RCC indexszel a Bánkúti 1201 elkülöníthető volt a Bözöditől és a Schiemanntól. Három index, a GR, az MGRVI és a PRI csak egy fajta elkülönítésére volt alkalmas, mindhárom index az MvAlkor és az MvMagdaléna között mutatott szignifikáns különbséget (14. táblázat, 28–29. ábra). A részletes statisztikai elemzés eredményeit lásd az M6.3 mellékletben.

13. táblázat: A fitotronban nevelt fajták RGB adataiból származtatott vegetációs indexek ANOVA elemzése a fajták közti különbségek detektálására. (Rövidítések: Veg. index = vegetációs index, Df = szabadságfok, Sum Sq = eltérés négyzetösszeg, Mean Sq = átlagos négyzetösszeg, F érték = próbastatisztika értéke, Pr(>F) = szignifikancia érték)

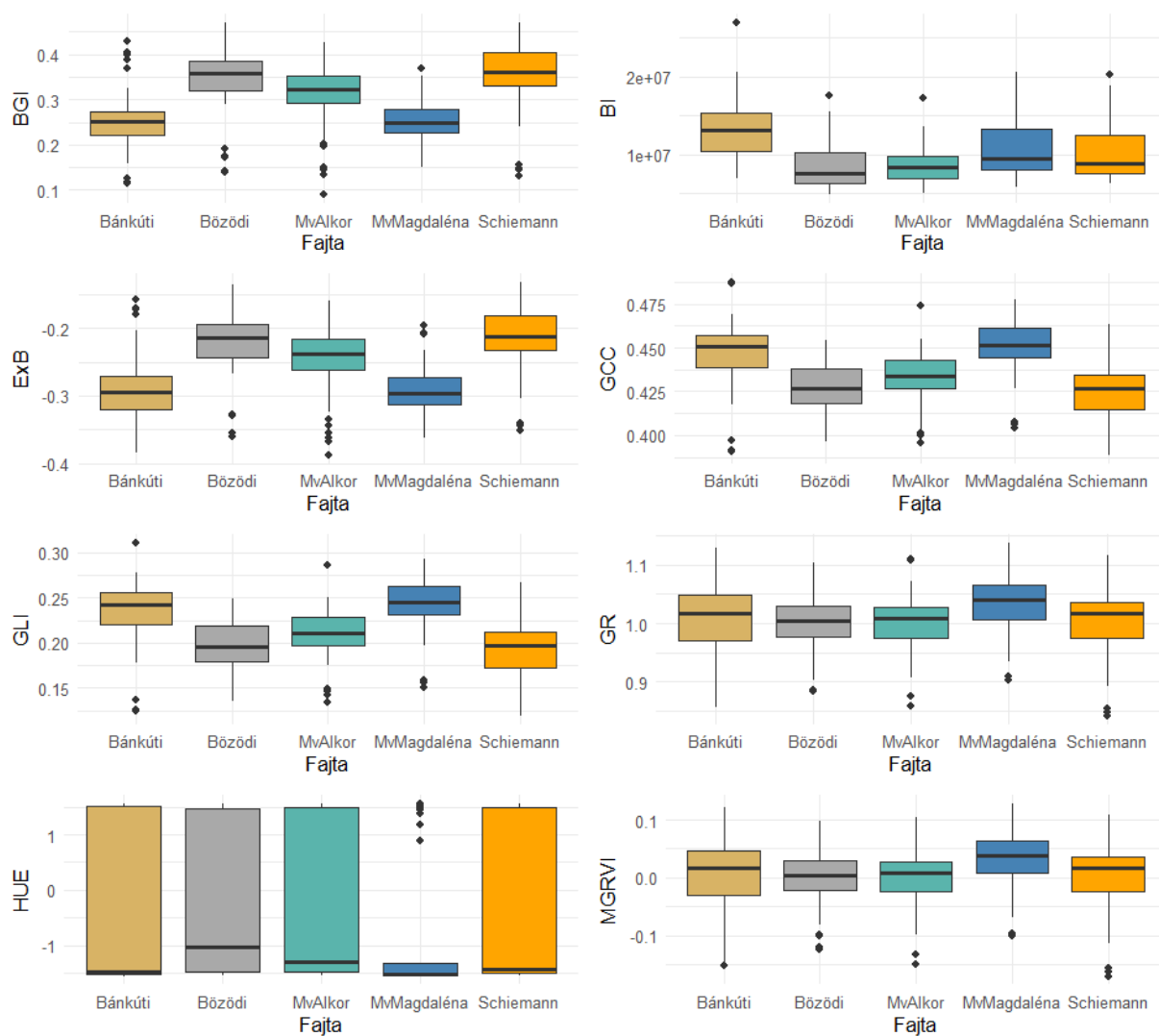
Veg.index	Df	Sum Sq	Mean Sq	F érték	Pr(>F)
BGI	4	0.3658	0.09144	17.52	1.73e-12 ***
BI	4	6.16E+14	1.54E+14	13.5	7.5e-10 ***
ExB	4	0.2086	0.05216	19.68	7.37e-14 ***
GCC	4	0.02037	0.005093	16.92	4.2e-12 ***
GLI	4	0.07562	0.018906	16.54	7.43e-12 ***
GR	4	0.0401	0.010014	2.775	0.028 *
HUE	4	11.5	2.879	1.458	0.216
MGRVI	4	0.0388	0.009692	2.644	0.0345 *
TGI	4	2100	525	26.44	<2e-16 ***
MVARI	4	0.06046	0.015114	18.41	4.72e-13 ***
RCC	4	0.00871	0.0021774	4.92	0.000811 ***
RGBVI	4	39022357	9755589	15.38	4.18e-11 ***
PRI	4	0.0384	0.00961	2.511	0.0427 *
VEG	4	1.335	0.3338	14.67	1.23e-10 ***
vNDVI	4	0.0859	0.021481	9.138	7.57e-07 ***
WI	4	1.93e+06	482508	0.877	0.478

Szig. szintek: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

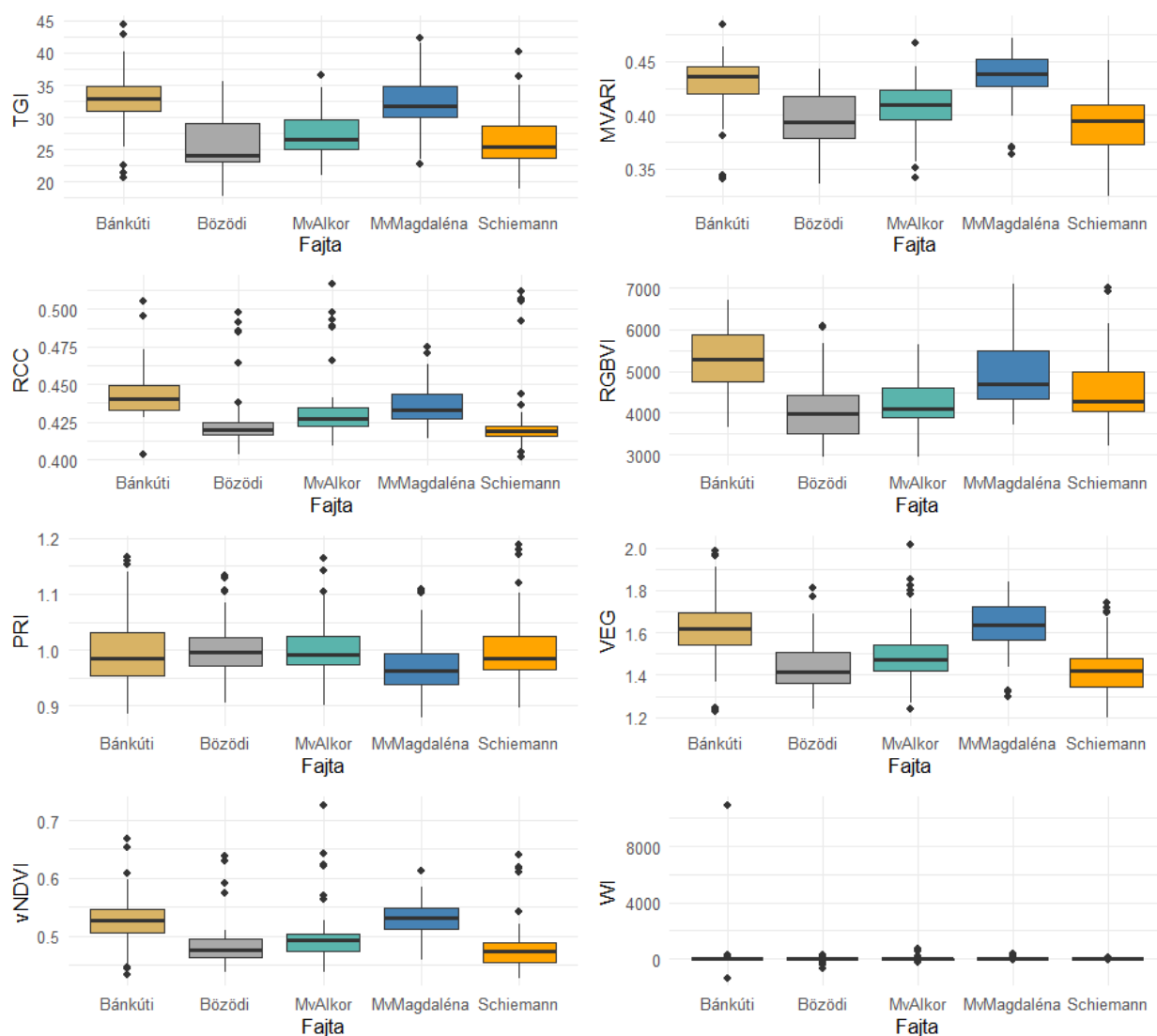
14. táblázat: A fitotronban nevelt fajták RGB adataiból származtatott vegetációs indexek szignifikáns páronkénti eltérése a fajták között. (Rövidítések: Veg. index = vegetációs index, diff = változók közti különbség, lwr = a konfidencia intervallum alsó határa, upr = konfidencia intervallum felső határa, p adj = szignifikancia érték)

Veg. index	diff	lwr	upr	p adj
BGI				
Bözödi-Bánkúti	0.086694327	0.044564074	0.12882458	0.0000005
MvAlkor-Bánkúti	0.051865477	0.009735223	0.09399573	0.0074272
Schiemann-Bánkúti	0.090722908	0.048592655	0.132853161	0.0000001
MvMagdaléna-Bözödi	-0.089372508	-0.131265406	-0.047479611	0.0000002
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.054543658	-0.096436556	-0.01265076	0.0038224
Schiemann-MvMagdaléna	0.09340109	0.051508192	0.135293987	0.0000000
ExB				
Bözödi-Bánkúti	0.064393753	0.034537394	0.094250111	0.0000001
MvAlkor-Bánkúti	0.040580089	0.010723730	0.070436447	0.0021797
Schiemann-Bánkúti	0.067067166	0.037210807	0.096923524	0.0000000
MvMagdaléna-Bözödi	-0.068082419	-0.097938777	-0.038226061	0.0000000
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.044268755	-0.074125113	-0.014412397	0.0006022
Schiemann-MvMagdaléna	0.070755832	0.040899474	0.100612190	0.0000000
GCC				
Bözödi-Bánkúti	-0.017134403	-0.02725254	-0.007016265	0.0000541
MvAlkor-Bánkúti	-0.012089111	-0.022207248	-0.001970974	0.0102900
Schiemann-Bánkúti	-0.017816044	-0.027934182	-0.007697907	0.0000237
MvMagdaléna-Bözödi	0.023061845	0.013000712	0.033122978	0.0000000
MvMagdaléna-MvAlkor	0.018016553	0.00795542	0.028077687	0.0000163
Schiemann-MvMagdaléna	-0.023743487	-0.03380462	-0.013682353	0.0000000
GLI				
Bözödi-Bánkúti	-0.032884835	-0.052603793	-0.013165878	0.0000736
MvAlkor-Bánkúti	-0.023018981	-0.042737939	-0.003300023	0.0130843
Schiemann-Bánkúti	-0.034288128	-0.054007085	-0.01456917	0.0000311
MvMagdaléna-Bözödi	0.044481861	0.024873997	0.064089725	0.0000000
MvMagdaléna-MvAlkor	0.034616007	0.015008142	0.054223871	0.0000224
Schiemann-MvMagdaléna	-0.045885153	-0.065493017	-0.026277289	0.0000000
TGI				
Bözödi-Bánkúti	-7.1283034	-9.726936	-4.529671	0.0000000
MvAlkor-Bánkúti	-5.6694032	-8.268035	-3.070771	0.0000001
Schiemann-Bánkúti	-6.0120248	-8.610657	-3.413393	0.0000000
MvMagdaléna-Bözödi	6.9457009	4.361709	9.529693	0.0000000
MvMagdaléna-MvAlkor	5.4868007	2.902809	8.070793	0.0000002
Schiemann-MvMagdaléna	-5.8294222	-8.413414	-3.245430	0.0000000
VEG				
Bözödi-Bánkúti	-0.160572637	-0.24805904	-0.07308623	0.0000092
MvAlkor-Bánkúti	-0.104882798	-0.19236920	-0.01739639	0.0099249
Schiemann-Bánkúti	-0.162707405	-0.25019381	-0.07522100	0.0000067
MvMagdaléna-Bözödi	0.177263225	0.08977682	0.26474963	0.0000007
MvMagdaléna-MvAlkor	0.121573387	0.03408698	0.20905979	0.0016022

Schiemann-MvMagdaléna	-0.179397993	-0.26688440	-0.09191159	0.0000005
MVARI				
Bözödi-Bánkúti	-0.030689621	-0.04740126	-0.013977982	0.0000091
MvAlkor-Bánkúti	-0.020204676	-0.036916314	-0.003493037	0.0090657
Schiemann-Bánkúti	-0.032264584	-0.048976223	-0.015552946	0.0000027
MvMagdaléna-Bözödi	0.039187478	0.02256999	0.055804966	0.0000000
MvMagdaléna-MvAlkor	0.028702532	0.012085044	0.045320020	0.0000358
Schiemann-MvMagdaléna	-0.040762441	-0.057379929	-0.024144953	0.0000000
BI				
Bözödi-Bánkúti	-4690779.9	-6659992.1	-2721567.6	0.0000000
MvAlkor-Bánkúti	-4350229.5	-6319441.8	-2381017.3	0.0000001
MvMagdaléna-Bánkúti	-2518864.7	-4488077	-549652.5	0.0047533
Schiemann-Bánkúti	-2847800.2	-4817012.4	-878587.9	0.0008909
MvMagdaléna-Bözödi	2171915.1	213797.1	4130033.1	0.0213705
RGBVI				
Bözödi-Bánkúti	-1120.1515	-1582.02237	-658.2806	0.0000000
MvAlkor-Bánkúti	-1019.6488	-1481.51973	-557.7779	0.0000001
Schiemann-Bánkúti	-695.5549	-1157.42583	-233.6840	0.0004677
MvMagdaléna-Bözödi	762.6558	300.78490	1224.5267	0.0000894
MvMagdaléna-MvAlkor	662.1532	200.28226	1124.0241	0.0010159
vNDVI				
Bözödi-Bánkúti	-0.04229453	-0.070408388	-0.014180672	0.0004757
Schiemann-Bánkúti	-0.045350137	-0.073463995	-0.017236279	0.0001397
MvMagdaléna-Bözödi	0.041901224	0.013787366	0.070015082	0.0005541
Schiemann-MvMagdaléna	-0.044956831	-0.073070689	-0.016842973	0.0001642
RCC				
Bözödi-Bánkúti	-0.016022496	-0.028290569	-0.003754424	0.003676
Schiemann-Bánkúti	-0.016763548	-0.029031621	-0.004495476	0.0020276
GR				
MvMagdaléna-MvAlkor	0.038592498	0.003756416	0.073428579	0.0216093
MGRVI				
MvMagdaléna-MvAlkor	0.03785769	0.002750669	0.072964712	0.0274286
PRI				
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.037524738	-0.073395844	-0.001653631	0.0353282



28. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel: BGI, BI, ExB, GCC, GLI, GR, HUE, MGRVI.



29. ábra: A fajták közti eltérések kimutatása az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel: TGI, MVARI, RCC, RGBVI, PRI, VEG, vNDVI, WI.

5.2.5.1 A vNDVI index és a fajták közti összefüggés a kezelések és az idő függvényében

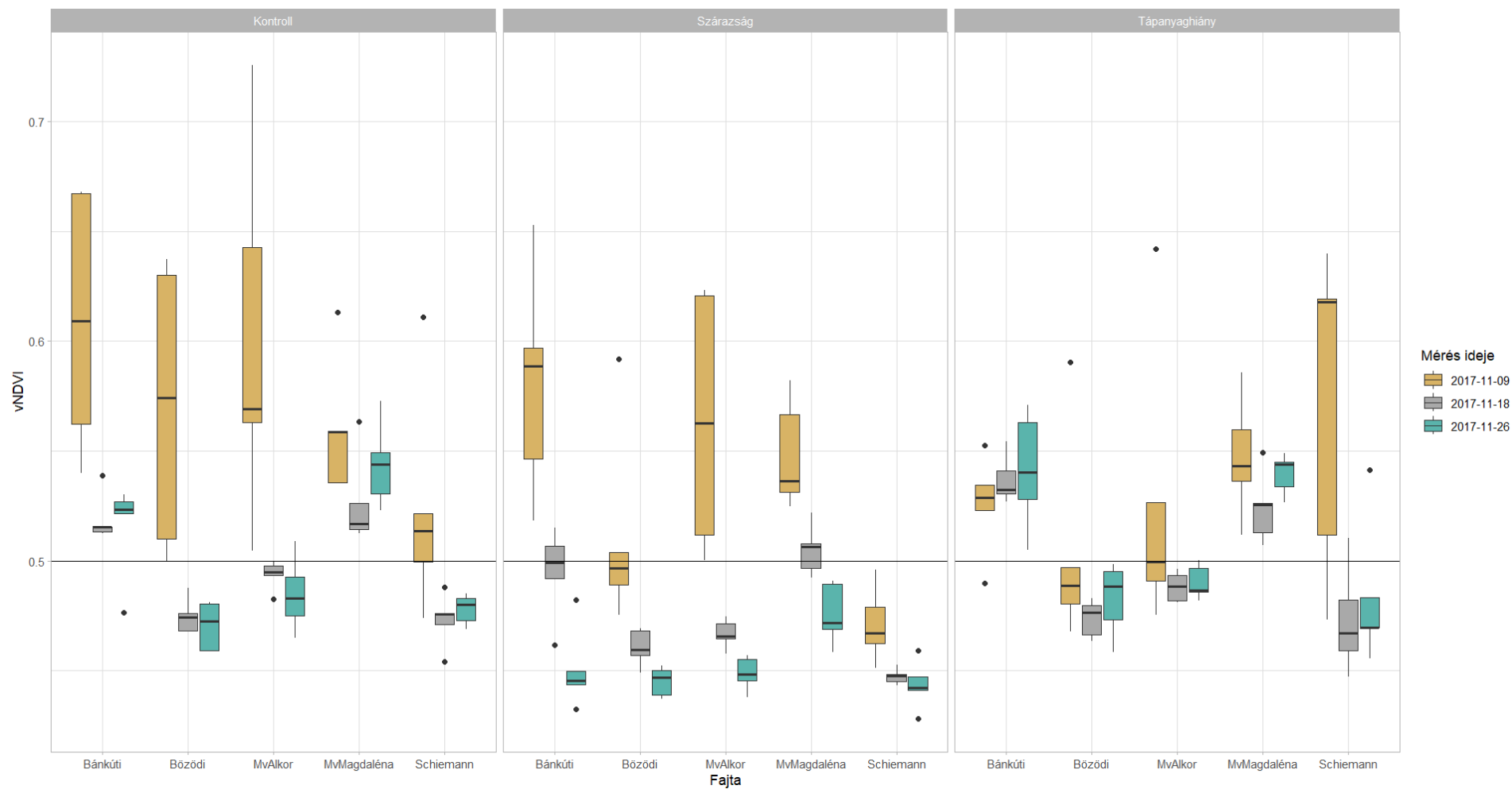
Az egyik legfontosabb mezőgazdaságban használatos vegetációs indexből (NDVI) származtatott index, a vNDVI index további statisztikai elemzésével kimutatható, hogy minden mérési időpontban fajtánként és kezelésként szignifikánsan különbözik a vNDVI érték a laboratóriumi vizsgálatban. Továbbá megbecsülhető vele a növényzet állapota, ami a következő kategóriákkal jellemezhető: 0–0,3: nincs vegetáció, 0,3–0,5: gyér vegetáció, 0,5–0,6: normál vegetáció, $0,6 \leq$: dús vegetáció (30. ábra).

Az interakciók közül a kezelés és a mérés idejének együttes hatása, valamint a fajták, kezelés és mérési idő együttes hatása volt szignifikánsan kimutatható a vNDVI értékre az ANOVA teszt szerint (15. táblázat).

15. táblázat: A vNDVI index és a fajták közti összefüggés a kezelések és az idő függvényében. (Rövidítések: Df = szabadságfok, Sum Sq = eltérés négyzetösszeg, Mean Sq = átlagos négyzetösszeg, F érték = próbastatisztika értéke, Pr(>F) = szignifikancia érték)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F érték	Pr(>F)
Fajták	4	0.08592	0.02148	20.006	1.21e-13***
Kezelés	2	0.05093	0.02546	23.715	7.22e-10***
Mérés ideje	2	0.17676	0.08838	82.311	<2e-16***
Fajták*Kezelés	8	0.01217	0.00152	1.417	0.191990
Fajták*Mérés ideje	8	0.01557	0.00195	1.813	0.077293.
Kezelés*Mérés ideje	4	0.02520	0.00630	5.867	0.000184***
Fajták*Kezelés*Mérés ideje	16	0.04325	0.00270	2.517	0.001655**
Reziduálisok	180	0.19327	0.00107		

Szig. szintek: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1



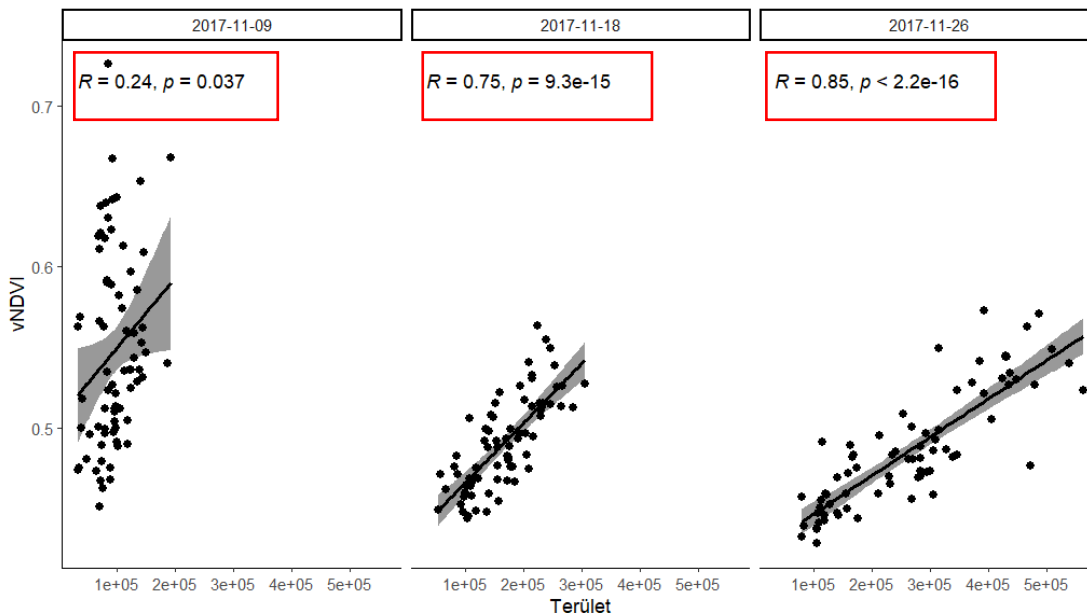
30. ábra: Az RGB adatokból származtatott vNDVI index és a fajták közti összefüggés a kezelések és az idő függvényében. A vNDVI index kategóriái: 0–0,3: nincs vegetáció, 0,3–0,5: gyér vegetáció, 0,5–0,6: normál vegetáció, $0,6 \leq$: dús vegetáció. A fekete vízszintes vonal jelzi a 0,5 vNDVI értéket, az alatta lévő növényzet gyér, míg a felette lévő növényzet normál vagy dús állapotú.

5.2.6 A digitális geometriai paraméterek és a vNDVI index közti kapcsolat

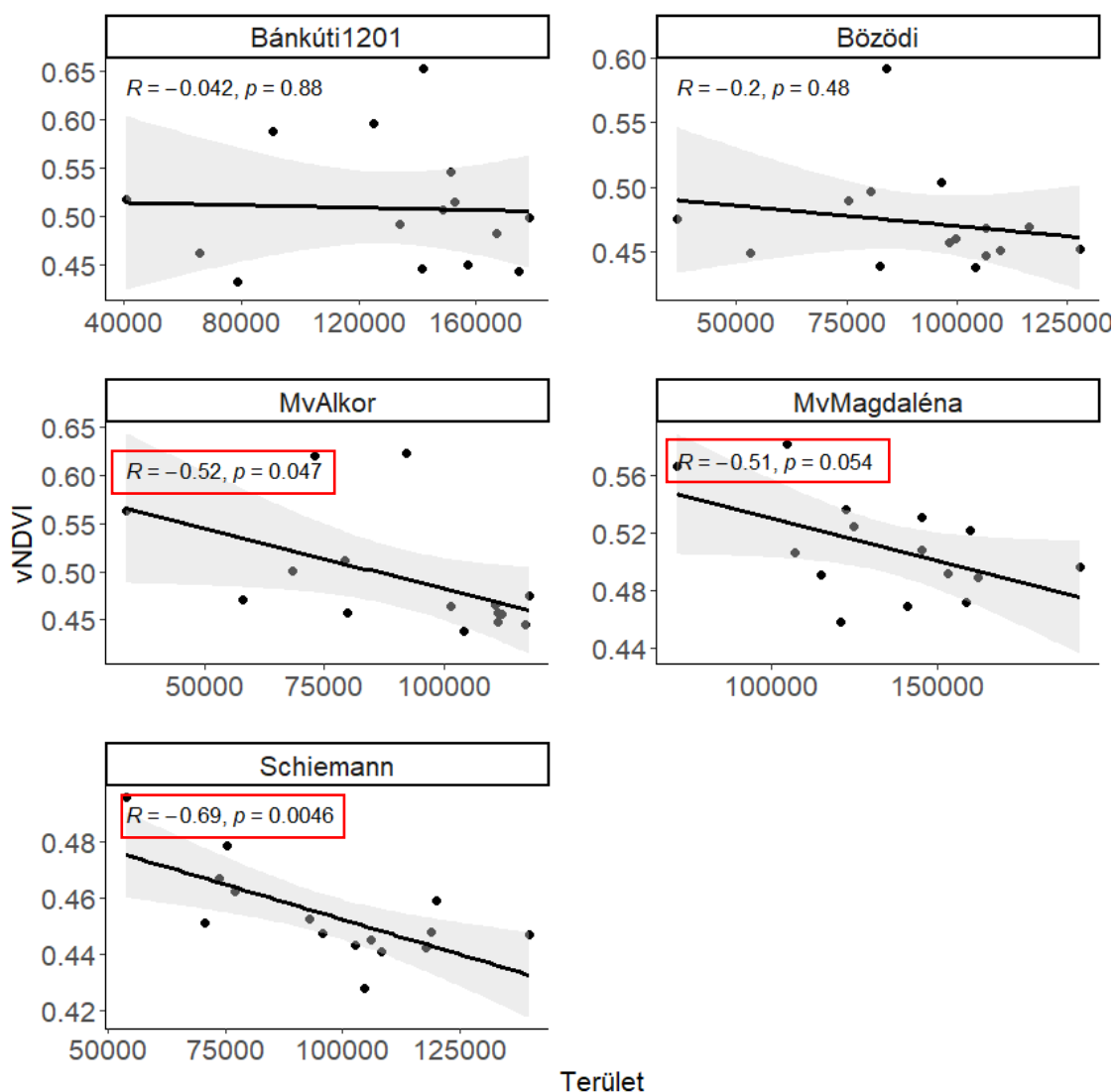
A Pearson-féle lineáris korrelációs számítás szerint az egyes geometriai paraméterek szorosan ($0,7 \leq r < 1$) és közepesen ($0,2 \leq r < 0,7$) korreláltak egymással, a kezelésekkel közepesen ($0,2 \leq r < 0,7$), a felvételek időpontjaival pedig erősen ($0,7 \leq r < 1$) és közepesen ($0,2 \leq r < 0,7$) $p < 0,001$ szignifikancia szint mellett. A vizsgálatba bevont összes digitális paraméter között erős (terület és kerület, magasság és Feret átmérője, $r = 0,918$ -ig) vagy közepesen erős szignifikáns ($p < 0,001$) pozitív korreláció állt fenn.

A terület paraméter és a vNDVI értékek között nem volt kapcsolatot, ha az összes mérési időpontot és kezelést együttesen vizsgáljuk ($R=0,049$, $p=0,47$), de pozitív kapcsolat áll fenn a különböző mérési időpontokban: gyenge pozitív az első, erős pozitív a második és harmadik mérésnél (31. ábra).

A szárazság hatása egyes esetekben kimutatható volt az RGB és a geometriai adatok együttes vizsgálatával, mivel szárazságkezelés esetén negatív szignifikáns kapcsolat állt fenn a vNDVI értékek és a terület paraméter között az MvMagdalénánál, az MvAlkornál és a Schiemannál (32. ábra).



31. ábra: A terület és a vNDVI értékek közti Pearson-féle lineáris korreláció a három mérési időpontban.



32. ábra: A terület és a vNDVI értékek közti Pearson-féle lineáris korreláció szárazságkezelés esetén a vizsgált búzafajtáknál.

5.3 Eredmények megbeszélése

5.3.1 Régi és új nemesítésű búzafajták termesztése alacsony ráfordítású, környezetkímélő extenzív gazdálkodásban

Bár a régi és új nemesítésű búzafajtákról szóló összehasonlító vizsgálatok száma egyre növekszik, még mindig viszonylag kevés agrárkutatócsoport dolgozik ezen a területen (Shewry 2018), így a különböző genotípusokról szóló vizsgálatok csak korlátozott számban elérhetőek. Ezért a doktori értekezésem egyik célja a hagyományos és modern nemesítésű őszi búzafajták és alakorfajták terméshozamának és szemminőségi paramétereinek vizsgálata volt. Morris & Sands (2006) szerint a modern kenyérbúza terméshozamában és beltartami értékeiben,

táplálkozási előnyeiben is különbözik a régi fajtáktól, de ezeket a különbségeket részletes elemzések még nem erősítették meg (Ribeiro et al. 2016, Dinu et al. 2018, Shewry 2018). Ruiz et al. (2019) kimutatták, hogy a régi búzafajták terméshozama túl alacsony ahhoz, hogy versenyképesek legyenek a modern fajtákkal szemben a produktivitás szempontjából. Hidalgo et al. (2009) tanulmányában az alakornál 0,75–2,5 t/ha, a kenyérbúzánál 3,5–6,7 t/ha termésátlagról számolt be. Bencze et al. (2020) kutatásában az alakor fajták átlagos hozama 3t/ha volt pelyvás állapotban. Más európai országokban, úm. Olaszországban 0,84-4,5 t/ha közti termésátlagot mértek az alakor esetében (Castagna et al. 1995). Szántóföldi kísérletben kimutattam, hogy a vizsgált alakor genotípusok az ökológiailag fenntartható, alacsony ráfordítású és költségigényű (extenzív) gazdálkodásban a szakirodalom alapján elfogadható termés mennyiséget biztosítanak (Bözödi 4,4 t/ha, Mv Alkor 3,8 t/ha, Schiemann 3,5 t/ha). A hagyományos nemesítésű Bánkúti 1201 őszi búza is elfogadható termést produkál (4,5 t/ha), ha a cél az alacsony ráfordítású gazdálkodásban való terméshozás.

Más kutatások szerint a régi búzafajták újra termesztésbe vonásának fontos indikátorai a tápérték és az egészségügyi előnyök a terméshozammal szemben (Morris & Sands 2006). Zaharieva et al. (2014) és Van Boxstael et al. (2020) tanulmányai szerint a pelyvás búzák tápértéke kiváló. Bencze et al. (2020) hazai körülmények között 15% alatti fehérjetartalmat mutatott ki az Mv Alkornál. Ezzel szemben Hidalgo et al. (2009) magasabb fehérjetartalmat (17,7–20,5%, átlagosan +59%) mutatott ki az alakor búzában, mint a kenyérbúzában konveccionális mezőgazdálkodási gyakorlat és ökológiai gazdálkodás mellett. Kutatásukban a genotípus választás és a környezeti tényezők jelentős hatással voltak a gabonák fehérjetartalmára. Hidalgo & Brandolini (2014) review tanulmányában az alakor szemek magasabb, átlagosan 18,2%-os fehérjetartalommal rendelkeztek, de más kutatók alacsonyabb fehérjetartalomról (10–17,4%) számoltak be (Hidalgo & Brandolini 2014). A nagygyombosi kísérletben a Schiemann 12,6%, az Mv Alkor 11,7% és a Bözödi alakor 9,3%, a Bánkúti 1201 őszi búza 12,5% fehérjetartalommal rendelkezett, ami a szakirodalomban fellelhető adatokkal összhangban van.

A gluténintolerancia napjainkban a társadalom széles körében elterjedt egészségügyi problémákat okoz (Charmet 2011, Zaharieva & Monneveux 2014). Ennek hatására az ősi búzákat, mint egészséges élelmiszert kezdik újra felfedezni a reformkonyhában. Ezzel összefüggésben azt találtam, hogy a vizsgált alakor mindegyikében alacsonyabb koncentrációban volt kimutatható a sikér, mint az őszi

búzában (Bözödi 15,4%, Mv Alkor 22,5%, Schiemann 25,8%, szemben a Bánkúti 1201-el 23,6%). Így, bár az alakorbúza kevésbé jó kényérgyártási tulajdonságokkal rendelkezik az őszi búzákkal szemben, mégis az alakor liszt ideálisabb egészségesebb pékáruk és jó minőségű tészták elkészítéséhez (Brandolini & Hidalgo 2011, Hidalgo & Brandolini 2014).

Az extenzív szántóföldi kísérletben a termésátlag, a fehérje- és sikértartalom a szakirodalom alapján megfelelő volt mind az őszi, mind az alakor búzában, ennek ellenére a genotípusokat, a környezeti tényezőket és a gazdálkodási módszerek közti különbségeket (konvencionális vs. ökológiai mezőgazdálkodás) tovább kell vizsgálni.

5.3.2 Digitális képfeldolgozás alkalmazása búzafajták fenotipizálására

A doktori kutatás másik célja az volt, hogy a multi- és hiperspektrális távérzékeléshez képest egy költséghatékonyabb és egyszerűbb mérési módszerrel fenotipizáljam és elkülönítsem a búzafajtákat, valamint detektáljam és monitorozzam a szárazság és tápanyaghiány tüneteit a növények korai fejlődési szakaszában. Ennek érdekében olyan képfeldolgozó technológiát adaptáltam először alakor búzákra, ahol valós idejű RGB felvételeket készítettem és digitális képelemzést alkalmaztam a kontroll, a tápanyaghiányos és a szárazságkezelt egyedekekről. Statisztikai módszerekkel kimutattam, hogy a vizsgált paraméterek közül a terület volt a legfontosabb geometriai változó a fajták közti eltérések és a szárazság kimutatására, valamint az RGB adatokból származtatott vegetációs indexek többsége is jól becsülte a fajták szárazságstresszre adott válaszait és a fajták közti eltéréseket.

A nem invazív, roncsolásmentes módon megvalósuló geometriai és spektrális paraméterek meghatározása, és ezáltal a növények állapot- és terméshozam-becslése fontos feladat mind a modern növénynevelés és fenotipizálás (Busemeyer et al. 2013, Pieruschka & Schurr 2019, Kim 2020, Omari et al. 2020, Brainard et al. 2021), mind a precíziós mezőgazdálkodás fejlesztésében (Lu et al. 2019). A föld feletti biomasszatömeg/zöldtömeg esetünkben a terület paraméterrel mutatható ki legpontosabban, ami széles körben elterjedt és használt agronómiai indikátor a terméshozam és a nitrogéntartalom jellemzésére, valamint a terméshozam becslésére (Acorsi et al. 2019, Lu et al. 2019). Korábbi tanulmányok kimutatták, hogy RGB képek alapján becsült borítás erősen korrelált a föld feletti biomasszatömeggel (Lee & Lee 2013, Bendig et al. 2015, Cen et al. 2019), és ez változatos környezeti viszonyok mellett is érvényes volt (Liu & Pattey 2010).

A laboratóriumi kísérletben a legerősebb kapcsolat az idő függvényében állt fenn, ami a fajták növekedési erélyét mutatja, és még kis időtávon belül is, a búzák korai fejlődési szakaszában kimutatható volt ez a változás. Így eredményeink összhangban vannak a fenti vizsgálatokkal, miszerint digitális képfeldolgozással és a megfelelő geometriai paraméterek és RGB adatok elemzésével mérhető a gabonák növekedése, ami erős összefüggést mutat a biomasszatermeléssel és az aszályos időszakokra adott stresszválással.

5.3.3 Búzafajták elkülönítése korai fejlődési szakaszban RGB kamerával és digitális képfeldolgozással

A növényi paraméterek (úm. növekedési ütem, levélfelület stb.) digitális adatainak elemzése fontos mutatókkal szolgálhat a genotípusok változékonyságára vonatkozóan (Fanourakis et al. 2014, Wang et al. 2014, Golbach et al. 2016, Zhang et al. 2018), és segít megérteni a különböző fajták és genotípusok közti eltéréseket (Kim 2020). Korábban számos növénykultúrát vizsgáltak RGB-alapú képfeldolgozással, ahol növényi biomassza alapján terméshozamot becsültek, pl. érdes zabnál (Acorsi et al. 2019), tavaszi árpánál (Bendig et al. 2014), kukoricánál (Li et al. 2015), máknál (Iqbal et al. 2017). Golbach et al. (2016), Bendig et al. (2014) és Iqbal et al. (2017) kimutatták, hogy a növénymagasság vagy a Feret átmérő felhasználható termésszerkezeti változók becslésére és föld feletti biomaszatömeg előrejelzésre. A szakirodalom alapján eddig egyetlen tanulmány sem foglalkozott a geometriai és az RGB adatok, valamint az őszi búza és az alakor búzafajták közti összefüggések együttes elemzésével.

A laboratóriumi vizsgálatban a kerület kivételével az összes geometriai változó (terület, szélesség, magasság és Feret átmérő) alkalmas volt arra, hogy az őszi búza fajtákat elkülönítsem az alakor búzafajtáktól. Továbbá 11 vegetációs index $p < 0,001$ pontossággal mutatta ki a fajták közti eltéréseket, amik a következők voltak: BGI, BI, ExB, GCC, GLI, TGI, MVARI, RCC, RGBVI, VEG és vNDVI. A kontrollált kísérletben a terület paraméter és a vNDVI értékek között pozitív kapcsolat állt fenn a különböző mérési időpontokban, míg a szántóföldi kísérletben a vNDVI index alkalmas volt a vetett búzafajták korai fejlődési szakaszának kimutatására. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a geometriai és az RGB adatokból származtatott vegetációs indexek alkalmasak a búzafajták közti eltérések és közvetetten a föld feletti biomaszatömeg kimutatására.

Az eredmények továbbá azt mutatják, hogy a búzák teljesítményének becsléséhez az együttes információk alkalmazása jobb és megbízhatóbb becslést nyújt, mint egyetlen használt indikátor. Reményeim szerint a kidolgozott mérési módszer és adatelemzés sikeresen alkalmazható a különböző növénynevelési programokban, különösen az őszi gabonafajtákhoz és más szántóföldi kultúrákhoz köthetően a fenotípusos információk gyors kinyerésére, valamint a fajták minőségi és mennyiségi előrejelzésére.

5.3.4 A tápanyaghiány és a szárazságstressz detektálása a búzafajták korai fejlődési szakaszában RGB kamerával és digitális képfeldolgozással

Az egyetlen kezelés, ami jelentős negatív hatással volt a fajtákra, az a szárazságstressz volt. Ellenőrzött körülmények között az összes vizsgált geometriai paraméterrel (terület, kerület, szélesség, magasság, Feret átmérő) kimutatható volt a szárazság hatása, a szárazságkezelte egyedek szignifikánsan alacsonyabb értéket vettek fel. A terület paraméter volt a legjobb növekedési indikátor a fajták aszályra adott válaszainak kimutatására. A szárazságkezelés az idő múlásával sokkal lassabb növekedést eredményezett a kontroll- és a tápanyaghiányos egyedekhez viszonyítva. A vizsgált fajták közül a két őszi búza teljesített legjobban mind a növekedésben, mind a kezdeti szárazságstresszel szembeni ellenállásban. De az idő múlásával az őszi búzákat jobban sújtotta a szárazság, mint az alacsony fajtákat. Számos tanulmány (Guzmán et al. 2009, Hajnalová & Dreslerová 2010, Zaharieva & Monneveux 2014) azt találta, hogy az alacsony búza rendkívül ellenálló a környezeti stresszel szemben. Laboratóriumi vizsgálatban kimutattam, hogy a vizsgált alacsony búzákat a kezdeti növekedési szakaszban rosszabbul reagáltak a vízhiányra, mint az őszi búzákat. Később, a bimbósodási szakaszban a vízhiány okozta környezeti stresszre adott válasz mérséklődött. Az Mv Magdaléna és a Bánkúti 1201 őszi búzákat kezdetben szignifikánsan magasabb növekedést mutattak a szárazság alatt, mint az Mv Alkor, Schiemann és Böződi alacsonyak. Ennek feltehetően az a magyarázata, hogy a vizsgált őszi búzákat klimatikus rezilienciájuk kielégítő és szárazságtűrésük rendkívül jó (Juhász et al. 2003, MTA ATK 2015, Sehgal et al. 2018).

A geometriai paraméterek mellett az RGB adatok alapján is kimutatható és nyomon követhető volt a szárazság hatása a gabonák korai fejlődési fázisában laboratóriumi körülmények között. Az RGB adatokból származtatott 16 vegetációs indexek közül 12 index (BGI, BI, ExB, GCC, GLI, GR, HUE, MGRVI, MVARI, PRI, VEG és vNDVI) alkalmas volt a szárazság tüneteinek detektálására még kis

időtávon belül (egy hónap) is. A szárazság hatása kimutatható volt az RGB és a geometriai adatok együttes vizsgálatával is, mivel szárazságkezelés esetén szignifikánsan csökkent a vNDVI értéke három fajtánál (MvMagdaléna, MvAlkor és Schiemann).

A fajták nem reagáltak szignifikánsan a tápanyaghiányra, és a tápanyaghiány egyetlen fajta esetében sem volt hatással a föld feletti biomasszatermelésre a kontroll cserepekhez képest. Ennek oka egyrészt azzal magyarázható, hogy a kontrollált kísérletet a növekedés kezdeti szakaszában, a csírázás, a kelés és a bokrosodási fázisban végeztem, míg egyes abiotikus stresszek a növekedés későbbi fenológiai fázisaiban (szárbaszökés, kalászhányás, virágzás, érés) kritikusabb jelentőségűek lehetnek. A reprodukciós szakaszban a tápanyag meghatározza a reprodukciós szervek fejlődését, a kalászkák, a kalászkánkénti virágok és a szemek mennyiségét is (Pepó & Pepó 1988, Kováts 1996, Kristó 2008, Sehgal et al. 2018). Másrészt viszont a hagyományos nemesítésű régi fajták alacsonyabb tápanyagszükséglettel rendelkeznek (Fatholahi et al. 2020), valamint a termesztő közegben található komposzt elegendő tápanyagot szolgáltatott a növények részére. Ez is hozzájárulhatott ahhoz, hogy a kontroll és a tápanyaghiányos egyedek között nem tudtam különbséget kimutatni. A fenti okok miatt a gabonák reprodukciós szakaszának további vizsgálata mindenképpen javasolt.

5.3.5 A kutatás ismert korlátai

Bár az RGB-alapú képalkotás egy jól működő és használható alternatív technológia a különböző *Triticum* fajok mennyiségi és minőségi teljesítményének értékelésére, a kutatásban néhány korlát mégis megmutatkozott. A legtöbb RGB-alapú módszernél jelenleg nem rendelkezünk olyan megbízható technikával, ami a felvételek minőségét különböző időpontokban teljesen egyenletesen biztosítaná, különösen változó fényviszonyok mellett (Kim 2020). A laboratóriumi kísérlet szabályozott fényviszonyok között zajlott, ezzel csökkentve a megvilágítás képre gyakorolt hatását és egyúttal megkönnyítve a képfeldolgozást, míg a terepi körülmények lényegesen nagyobb kihívást jelentenek. A nyers képfájlok nagy mérete sok esetben szintén nehézséget jelenthet a képfeldolgozásban, ha nem, vagy csak korlátozottan rendelkezünk megfelelő teljesítményű számítógéppel és tárhely kapacitással.

A növénynevelő klímakamrában/fitotronban végzett stresszkísérletek jellemzően kizárólag cserepekben nevelt egyedekre fókuszálnak, szigorúan ellenőrzött

körülmények között (Walter et al. 2019), ezért a kifejlesztett roncsolásmentes becslési technológia gyakorlati szántóföldi növénytermesztésben való alkalmazhatóságának jövőbeni validálása szükséges. A kutatás egy részét a növekedés kezdeti fenológiai fázisaiban végeztem (csírázás, kelés és bokrosodás), és a kontrollált kísérlet nem terjedt ki a reprodukciós fejlődési szakaszra. Ez korlátozta a vizsgálati adatokból levonható következtetések számát, ahogy az a tápanyaghiány jelentős hatásainak kimutatásában is megmutatkozik.

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

6.1 A régi gabonák szerepe az agrobiodiverzitás fenntartásában

A szántóföldi kísérlet és a szakirodalom alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az őszi búza és az alakor búza is sikeresen termesztethető alacsony ráfordítású környezetkímélő ökológiai gazdálkodásban, hiszen fenntartható körülmények között is megfelelő a termés hozamuk és a minőségük. Az ősi pelyvás búzák és a régi fajták nemcsak a genetikai sokféleség kulcsfontosságú tárházát jelentik a növény nemesítésben, de fontos szerepet is játszanak az agrár-ökoszisztémák biológiai sokféleségének fenntartásában. A különböző extenzív fajták termesztése sokszínű és fenntartható gazdálkodási formát biztosíthat, ami az agrobiodiverzitás megőrzése mellett hozzájárulhat az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodáshoz, mivel öntözést nem igényelnek, mégis biztonságos termést nyújtanak. Ezért javaslom további kutatások elvégzését, különösen a régi és modern nemesítésű búzafajták genotípusainak szélesebb körében, ezzel hozzájárulva az agrár-ökoszisztémák megőrzéséhez és védelméhez.

6.2 A képalkotó technológia a digitális fenotipizálásban

A légi és földfelszíni képalkotó technológai hozzájárulhat ahhoz, hogy az állami és magán növény nemesítési programok, valamint a kutatóintézetek, egyetemek a hagyományos fenotipizálás mellett új megközelítéseket, technológiákat alkalmazzanak. Ennek a szűk keresztmetszete egy olyan megbízható képalkotó technológia létrehozása, ami jól kezeli a környezeti bizonytalanság és a korlátozott számú elemzések miatti képi változékonyságot (Walter et al. 2019, Kim 2020). A doktori kutatásban ennek a megoldására RGB-alapú elemzési módszert adaptáltam őszi és alakor búzafajtákra, ami egyrészt költséghatékony és időtakarékos, másrészt roncsolásmentes és pontos mérési alternatívát kínál ellenőrzött körülmények között.

Kontrollált körülmények között digitális képelemzéssel, geometriai és RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel kimutatható és nyomon követhető volt a szárazság hatása a gabonák korai fejlődési fázisában. Még kis időtávon belül (egy hónap) is kimutatható volt a változás. A legalkalmasabb geometriai változó a szárazság és a fajták közti eltérések detektálására a terület, az RGB vegetációs indexek közül a BGI, BI, ExB, GCC, GLI, GR, HUE, MGRVI, MVARI, PRI, VEG és vNDVI indexek voltak. A vizsgált digitális paraméterek alapján elkülöníthetők

voltak az őszi búzafajták az alakorfajtától a növények korai fejlődési szakaszában. A vegetációs indexek közül a BGI, BI, ExB, GCC, GLI, TGI, VEG, MVARI, RGBVI és vNDVI index volt a legpontosabb a fajták közti eltérések kimutatásában. A szántóföldi kísérletnél a vNDVI index alkalmas volt arra, hogy távérzékeléssel nyert információk alapján kimutassam a vetett búzafajták korai fejlődési szakaszát.

Az eredmények alapján arra lehet következtetni, hogy az RGB-alapú képalkotó technológiák és a hagyományos szelekciós növénynevelés és manuális fenotipizálás kombinációja költséghatékonyan hozzájárul a reziliens genotípusok neveléséhez. Továbbá a digitális geometriai paraméterek és az RGB adatok elemzése egy életképes választás lehet gabonák esetében a föld feletti biomasszatermelés gyors előrejelzésére, és a szárazságstressz kimutatására korai fejlődési szakaszban. Ez javíthatja a gabonák teljesítményének előrejelzését is, ami a jelenlegi változó klímánál kulcsfontosságú a termésbiztonság fenntartásához.

A hagyományos növénynevelési eljárásokhoz képest roncsolásmentes és valós idejű módszert fejlesztettem ki a szárazságstressz detektálására és monitorozására, valamint az őszi búza és alakor búza közti eltérések kimutatására és a növekedésük becslésére ellenőrzött körülmények között korai fejlődési szakaszban. A kidolgozott technológia egy költséghatékony, szinte bárki számára elérhető rendszer: nyílt forráskódú szoftver (ImageJ) és kereskedelmi forgalomban kapható DSLR fényképezőgép (Canon RGB kamera). További előnye, hogy gyors, nem invazív és gazdaságos, könnyen használható eljárás, mivel az RGB tükörreflexes fényképezőgép könnyen kezelhető, a képfeldolgozás bármilyen időpontban tetszés szerint elvégezhető, míg a hagyományos laboratóriumi műszerek, valamint a távérzékelésben gyakran használt multi- és hiperspektrális szenzorok költségesek és üzemeltetésük is költség- és időigényesebb. Az eredményektől azt várom, hogy alkalmazhatóak legyenek a különböző növénynevelési programokban a gabonafajták fenotípusos információinak gyors kinyerésére.

6.3 Fejlesztési irányok

A kutatás egy részét a növekedés kezdeti fenológiai fázisaiban végeztem (csírázás, kelés és bokrosodás) ezért a gabonák reprodukciós szakaszának további vizsgálata mindenképpen javasolt. A kifejlesztett módszer jelentős része jelenleg cserepes kísérleti növényegyedek vizsgálatára korlátozódik ellenőrzött körülmények közötti klímakamrában, ezért a technológia szántóföldön való alkalmazhatóságának

teljeskörű több éves vizsgálata javasolt távérzékeléssel. Ennek érdekében szabványos és ellenőrzött folyamatokat kell kidolgozni, hogy azok a gyakorlati mezőgazdasági alkalmazásokban is elfogadhatók legyenek. További fejlesztési irányt jelöl az adatok feldolgozásának megkönnyítése és gyorsítása érdekében automatizált mesterséges intelligencia (MI) alapú rendszerek felhasználása. Az MI-alapú módszer kidolgozása lehetőséget biztosítana a nagy mintaszámú vizsgálatok képi és numerikus adatainak hatékonyabb feldolgozására.

7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Szántóföldi kísérlettel és szakirodalmi adatok alapján alátámasztottam, hogy extenzív körülmények között a vizsgált alakor genotípusok sikeresen termesztethetők, mivel elfogadható termést produkálnak, ha a cél a környezetkímélő, alacsony anyag- és energiaráfordítású ökológiai mezőgazdaságban való termesztés.
2. A gyakorlatban alkalmazott képfeldolgozó eljárásokat egyedileg kombinálva, RGB képek alapján meghatároztam az őszi búza és az alakor búzafajták digitális fenotípusára leginkább érzékeny paramétereket.
3. Új eljárást adaptáltam, ami alkalmas az őszi búza és az alakor búzafajták korai fejlődési szakaszában a növény geometriai és RGB jellemzőinek rögzítésére.
4. Igazoltam, hogy a kidolgozott eljárás alkalmas a gabonák növekedési dinamikájának dokumentálására még kis időtávon belül is.
5. Kísérletben igazoltam, hogy a kidolgozott eljárás alkalmas gabonanövényeknél a vízhiány tüneteinek detektálására korai fejlődési szakaszban.
6. A kísérleti körülmények között rögzített fajtákra jellemző egyedi fejlődési dinamikára alapozva digitális paraméterkönyvtárat hoztam létre. A digitális paraméterkönyvtár alapján a fejlődés korai szakaszában a fajták elkülöníthetők.
7. Kimutattam, hogy RGB adatokból származtatott vegetációs indexek alapján a fejlődés korai szakaszában elkülöníthetők az őszi búza és az alakor búzafajták.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A búza az egyik legelterjedtebb gabona Magyarországon és az Európai Unióban. Napjainkban a közönséges vagy vetési búza (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*) mellett egyre nagyobb szerepet játszik az ökológiai mezőgazdaságban az egyszemű búza, vagy más néven alakor (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*). Ennek ellenére a vad ősök és a régi fajták a modern búzanemesítési programokban még mindig alulhasznosított genetikai erőforrást jelentenek. Alacsonyabb terméshozamuk ellenére az ökológiai szemléletű gazdálkodásba jól beilleszthetők, és alacsony ráfordítás mellett a szakirodalom szerint elfogadható terméshozamot biztosítanak akár gyengébb talajokon is. Előnyük a jó ökológiai alkalmazkodásukban rejlik, mint például a biotikus és abiotikus stresszel szembeni ellenállóképesség és a betegségekkel szembeni rezisztencia. Emellett egészséges élelmiszerek alapanyagaként is kezdik újra felfedezni. Bár a modern és a régi búzafajtákról szóló összehasonlító tanulmányok száma egyre nő, még mindig találkozhatunk tudásbeli hiányosságokkal.

A doktori kutatás fő célja volt a hagyományos és a modern nemesítésű búzafajták összehasonlító vizsgálata, valamint az RGB-alapú képelemző technológiák alkalmazási lehetőségeinek felmérése. Ennek érdekében több megközelítést és módszert alkalmaztunk: szántóföldi terepi kisparcellás kísérletben és laboratóriumi környezetben, növénynevelő klímakamrában különböző búzafajtákat vetettünk el. A terméshozamot a gabonák betakarítása után a szántóföldön, a szemminőségi paramétereket laboratóriumban, közel-infravörös optikai analizátorral mértük a gyors és pontos értékelés érdekében. A kísérleti terület RGB kamerával felszerelt drónnal felvételeztük. A kontrolált kísérletben, növénynevelő klímakamrában kereskedelmi forgalomban kapható tükörreflexes RGB kamerával készült felvételeket digitális képelemzéssel, roncsolásmentesen vizsgáltam. Elemeztem a búzafajták növekedési képességét különböző stresszhatások következtében. Három kezelést alkalmaztam – kontroll, tápanyaghiány és szárazság – öt gabonafajta esetében: (i) Mv Magdaléna martonvásári nemesítésű őszi búza, (ii) Bánkúti 1201 hagyományos nemesítésű őszi búza, (iii) Mv Alkor martonvásári nemesítésű alakor, (iv) Schiemann alakor, a korábbi Nemzeti Biodiverzitás- és Génmegőrzési Központ génbanki tétele és (v) Bözödi erdélyi tájfajta alakor. A kutatási kérdések a következők voltak: (1) Sikerrel termesztethetők-e a régi és új nemesítésű búzafajták alacsony ráfordítású, környezetkímélő extenzív gazdálkodásban? (2) Alkalmas-e a kidolgozott technológia

búzafajták digitális fenotipizálására? (3) Elkülöníthetők-e a búzafajták korai fejlődési szakaszban kereskedelmi forgalomban kapható RGB DSLR kamerával és digitális képfeldolgozó eljárással? (4) Kimutatható-e búzafajták korai fejlődési szakaszában a tápanyaghiány és a szárazságstressz hatása kereskedelmi forgalomban kapható RGB DSLR kamerával és digitális képfeldolgozó eljárással?

A szántóföldi kísérlet eredményei azt mutatják, hogy mind az őszi búza, mind az alakor búza sikeresen termesztethető alacsony ráfordítású extenzív gazdálkodás keretében, és így is megőrzik termés hozamukat és minőségüket. Az ősi pelyvás búzák és régi fajták nemcsak a genetikai sokféleség kulcsfontosságú tárházát jelentik a növénytermesztésben, hanem fontos szerepet játszanak az agrár-ökoszisztémák biológiai sokféleségének fenntartásában is. A különböző fajták termesztése sokszínűbb és fenntarthatóbb mezőgazdaságot biztosíthat, ami hozzájárulhat az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodáshoz is.

A további eredmények szerint az RGB-alapú digitális képfeldolgozás alkalmas az őszi búza és az alakor búzafajták elkülönítésére és a növekedési erély kimutatására mind az alkalmazott kezelések esetében, mind az idő függvényében. Továbbá megállapítható, hogy a vizsgált digitális paraméterekkel és RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel kimutatható és nyomon követhető a szárazság hatása már a korai fejlődési szakaszban. Így az RGB-alapú digitális képelemzés életképes alternatív módszer lehet a fenotipizálásban.

A növényi paraméterek detektálása és monitorozása digitális eszközökkel sikeresen alkalmazható nemcsak a kontrollált mezőgazdasági kutatásokban, de további fejlesztés esetén a gyakorlati szántóföldi növénytermesztésben is. Ezzel egyidejűleg a nagy mintaszámú vizsgálatok képi és numerikus adatainak gyorsabb és automatizált feldolgozása fontos fejlesztési irányt jelöl. További kutatások javasoltak, különösen a régi és modern búzafajták genotípusainak szélesebb körében, amik hosszú távon hozzájárulhatnak az agrobiodiverzitás megőrzéséhez és védelméhez.

9. SUMMARY

Wheat is one of the most common crops in Hungary and in the European Union. In addition to common wheat (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*), einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) plays an increasingly important role in agriculture, promoted by organic farming today. Wild ancestors and old landraces represent an underexploited genetic resource in modern wheat breeding programs. Despite the lower yield of ancient wheats, they provide acceptable yield under low-input management according to literature. Their advantage also lies in their good ecological adaptation, such as tolerance to biotic and abiotic stress, and resistance to diseases. It has also been rediscovered as a healthy food. Although the number of comparative studies about modern and ancient types of wheats is increasing, there are still some knowledge gaps about the differences between ancient and modern bread wheats.

The aim of the present study was to compare traditional and modern wheat cultivars — including a field study and a laboratory stress experiment using vision-based digital image analysis — and to assess the feasibility of imaging techniques. Yield was measured in the field, grain quality parameters were measured after cultivation and harvest with a near infrared optical laboratory analyser for fast and precise assessment. The experimental area was recorded by a drone equipped with an RGB camera. In a controlled experiment, wheat seedlings were grown in a spring/summer growth chamber and recorded with an DSLR RGB camera. RGB-based digital analysis was used for undestructive image processing. We have analysed the growth potential of wheat varieties under different stress effects. Three treatments were applied: control, nutrient deficiency and drought stress. Five wheat varieties were studied: (i) Mv Magdaléna winter wheat variety from Martonvásár, (ii) Bánkúti 1201 traditional winter wheat variety, (iii) Mv Alkor einkorn variety from Martonvásár, (iv) Schiemann einkorn variety from a former National Biodiversity and Gene Conservation Centre and (v) Bözödi einkorn variety from Transylvania. Our questions are as follows: (1) Can old and new wheat varieties be successfully grown in low-input, environmentally friendly extensive farming? (2) Is the developed technology suitable for digital phenotyping of wheat varieties? (3) Is it possible to differentiate wheat varieties at an early stage of development using a commercially available RGB DSLR camera and digital image processing? (4) Can wheat varieties at early development stage be detected for nutrient deficiency and

drought stress using a commercially available RGB DSLR camera and digital image processing?

Based on our field study we conclude that both winter wheat and einkorn wheat can be grown successfully under low-input and environmentally sustainable organic farming and still maintain their yield and quality performance. Ancient wheats and old varieties represent not only a key reservoir of genetic diversity in crop breeding, but they also play an important role in maintaining the biodiversity of agroecosystems. The cultivation of various species could provide a more diverse and sustainable agriculture, instrumental in adapting to climate change.

The results show that RGB-based digital image processing can be used to differentiate winter wheat and einkorn varieties and detecting growth vigour both for the treatments applied and as a dependency of time. Furthermore, it can be concluded that using the studied geometrical parameters and vegetation indices derived from RGB data can be detected and monitoring the effect of drought stress already in the early developmental stages. We conclude that RGB-based digital image analysis could be a viable alternative method in phenotyping.

RGB-based image analysis methods have shown reliable and precise prediction under controlled conditions for detecting and monitoring cereals, but further validation is necessary to ensure their application in the field. At the same time, faster and automated processing of imagery and numerical data from large sample sizes is an important area for improvement. Further research is then recommended, particularly on a wider range of genotypes of old and modern wheat cultivars, helping to conserve and protect agroecosystems in the long run.

8. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

- [1] Abebe, A. M., Kim, Y., Kim, J., Kim, S. L., Baek, J. (2023): Image-Based High-Throughput Phenotyping in Horticultural Crops. *Plants*, 12(10):2061.
- [2] Abrams, M.J., Comer, D.C. (2013): Multispectral and Hyperspectral Technology and Archaeological Applications. In: *Mapping Archaeological Landscapes from Space*. SpringerBriefs in Archaeology, 5, Springer, New York.
- [3] Acorsi, M.G., das Fabiani, D.A.M., Maurício, M., Danrley, S.A., Laercio, S.R. (2019): Estimating Biomass of Black Oat Using UAV-Based RGB Imaging. *Agronomy*, 9(7), 344.
- [4] Adobe Systems Inc. (2019): Adobe Photoshop CC 2019 20. 0. 4., San Jose, CA, USA.
- [5] Adhikari, C., Bronson, K. F., Panullah, G. M., Regmi, A. P., Saha, P. K., Dobermann, A., Olk, D. C., Hobbs, P. R., Pasuquin E. (1999): On-farm N supply and N nutrition in the rice-wheat system of Nepal and Bangladesh. *Field Crops Research*, 64:273-286.
- [6] Agrárminisztérium (2019): Ökoszisztéma alaptérkép és adatmodell kialakítása. Agrárminisztérium, Budapest DOI: 10.34811/osz.alapterkep.dokumentum
- [7] Ahmad, I., Naeem, A.M., Islam, M. (2008): Real-time specific weed recognition system using histogram analysis. *Engineering and Technology International Journal of Biosystems Engineering*, 2(4).
- [8] Ángyán, J., Tardy, J., Vajnáné-Madarassy, A. (eds.) (2003): Védett és érzékeny természeti területek mezőgazdálkodásának alapjai. *Mezőgazda Kiadó*, Budapest. p.626.
- [9] Ansari, M.D., Ghrera, S.P., Tyagi, V. (2014): Pixel-Based Image Forgery Detection: A Review, *IETE Journal of Education*, 55:1, 40.
- [10] Babai, D., Tóth, A., Szentirmai, I., Biró, M., Máté, A., Demeter, L., Szépligeti, M., Varga, A., Molnár, Á., Kun, R., Molnár, Zs., (2015): Do conservation and agri-environmental regulations effectively support traditional small-scale farming in East-Central European cultural landscapes? *Biodiversity and Conservation*, 24, 3305–3327.
- [11] Bácsatyai, L., Márkus, I. (2001): Fotogrammetria és távérzékelés. *Egyetemi jegyzet*, Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Sopron, 189 p.
- [12] Bai, A., Kovách, I., Czibere, I., Megyesi, B., Balogh, P. (2022): Examining the Adoption of Drones and Categorisation of Precision Elements among Hungarian Precision Farmers Using a Trans-Theoretical Model. *Drones*, 6(8): 200.
- [13] Bakacsy, L., Szatmári, J., Biró, Cs., Tobak, Z., van Leeuwen, B., Szilassi, P. (2023a): Selyemkóró (*Asclepias syriaca* L.) UAV felvételekkel történő azonosítása és monitorozásának lehetőségei. *Tájökológiai Lapok*, 21(2), 6-28.
- [14] Bakacsy, L., Tobak, Z., van Leeuwen, B., Szilassi, P., Biró, C., Szatmári, J. (2023b): Drone-Based Identification and Monitoring of Two Invasive Alien Plant Species in Open Sand Grasslands by Six RGB Vegetation Indices. *Drones*, 7(3):207.
- [15] Baresel, J.P., Rischbeck, P., Hu, Y., Kipp, S., Hu, Y., Barmer, G., Miste, B., Schmidhalter, U. (2017): Use of a digital camera as alternative method for non-destructive detection of the leaf chlorophyll content and the nitrogen nutrition status in wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 140:25-33.

- [16] Balázsi, Á. (2018): Grassland management in protected areas – implementaton of the EU biodiversity strategy in certain post-communist countries. *Hacquetia*, 17(1).
- [17] Balázs, B., Vásárhelyi, G., Vicsek, T. (2020): Adaptive leadership overcomes persistence—responsivity trade-off in flocking. *Journal of The Royal Society Interface*, 17(167): 0190853.
- [18] Báldi, A., Batáry, P. (2011a): The past and future of farmland birds in Hungary. *Bird Study*, 58, 365–377.
- [19] Báldi, A., Batáry, P. (2011b): Spatial heterogeneity and farmland birds: different perspectives in Western and Eastern Europe. *Ibis*, 153, 875– 876.
- [20] Balla, K., Karsai, I., Bencze, S., Kiss, T., Veisz, O. (2013): Effect of heat stress on the physiological processes of wheat. *Acta Agronomica Hungarica*, 61(1):1–12.
- [21] Balogh, M.B., Kertész, M., Török, K., Vizsra, G.V., Szilassi, P. (2023): Changes in the occurrence of five invasive plant species in different ecosystem types between 2009–2018 in Hungary. *Land*, 12, 1784.
- [22] Batáry, P., Báldi, A., Kleijn, D., Tscharntke, T. (2011): Landscape-moderated biodiversity effects of agri-environmental management: a meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 22,278(1713):1894-902.
- [23] Bavec, F., Lisec, U., Bavec, M. (2017): Importance of underutilized field crops for increasing functional biodiversity. In: Şen, B., Grillo, O. (eds.) *Selected studies in biodiversity*, IntechOpen.
- [24] Belényesi, M., Kristóf, D., Skutai, J. (2008a): Térinformatika elméleti jegyzet. *Egyetemi jegyzet*, Szent István Egyetem, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet, Gödöllő, 93p.
- [25] Belényesi, M., Magyar J., Neidert, D. (2008b): Térinformatika gyakorlati jegyzet. *Egyetemi jegyzet*, Szent István Egyetem, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet, Gödöllő, 68p.
- [26] Bencze, S., Makádi, M., Aranyos, T.J., Földi, M., Hertelendy, P., Mikó, P., Bosi, S., Negri, L., Drexler, D. (2020): Re-Introduction of Ancient Wheat Cultivars into Organic Agriculture—Emmer and Einkorn Cultivation Experiences under Marginal Conditions. *Sustainability*, 12, 1584.
- [27] Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., Bareth, G. (2014): Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412.
- [28] Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M.L., Bareth, G. (2015): Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79-87.
- [29] Berger, B., Parent, B., Tester, M. (2010): High-throughput shoot imaging to study drought responses. *Journal of Experimental Botany*, 61, 3519–3528.
- [30] Berke, J. (2010a): Using Spectral Fractal Dimension in Image Classification. In: Sobh, T. (eds.) *Innovations and Advances in Computer Sciences and Engineering*. Konferencia közlemény, Springer, Dordrecht.
- [31] Berke, J. (2020): Képfeldolgozás alapjai. *Egyetemi jegyzet*. Széchenyi Egyetem, Győr.
- [32] Berke, J., Polgár, Zs., Horváth, Z., Nagy, T. (2006): Developing on Exact Quality and Classification System for Plant Improvement. *Journal of Universal Computer Science*, ISSN: 0948-695X, XII/9, 1154-1164.

- [33] Berke, J., Kelemen, D., Kozma-Bognár, V., Magyar, M., Nagy T., Szabó, J., Temesi, T. (2010b): Digitális képfeldolgozás és alkalmazásai, (v7.0, DVD melléklettel). Kvark, ISBN 978-963-06-7825-4.
- [34] Berki, B., Botta-Dukát, Z., Csákvári, E., Gyalus, A., Halassy, M., Mártonffy, A., Rédei, T., Csecserits, A. (2023): Short-term effects of the control of the invasive plant *Asclepias syriaca*: Secondary invasion of other neophytes instead of recovery of the native species. *Applied Vegetation Science*, 26, e12707.
- [35] Biró, L., Kozma-Bognár, V., Berke, J. (2024): Comparison of RGB Indices used for Vegetation Studies based on Structured Similarity Index (SSIM). *Journal of Plant Science and Phytopathology*, 8(1):7-12.
- [36] Bonman, J.M., Babiker, E.M., Cuesta-Marcos, A., Esvelt-Klos, K., Brown-Guedira, G., Chao, S., See, D., Chen, J., Akhunov, E., Zhang, J., Bockelman, H.E. and Gordon, T.C. (2015): Genetic Diversity among Wheat Accessions from the USDA National Small Grains Collection. *Crop Science*, 55:1243-1253.
- [37] Brainard, S.H., Bustamante, J.A., Dawson, J.C., Spalding, E.P., Goldman, I.L. (2021): A Digital Image-Based Phenotyping Platform for Analyzing Root Shape Attributes in Carrot. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1171.
- [38] Brandolini, A., Hidalgo, A. (2011): Einkorn (*Triticum monococcum*) flour and bread. In: *Flour and Breads and Their Fortification in Health and Disease Prevention*, Preedy, V.R., Watson, R.R., Patel, V.B., Eds., Academic Press, London, UK, pp. 79–88.
- [39] Buitrago, M.F., Groen, T.A., Hecker, C.A., Skidmore, A.K. (2016): Changes in thermal infrared spectra of plants caused by temperature and water stress. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 111, 22-31.
- [40] Burger, A. (2009): The situation of Hungarian agriculture. In: *Proceedings of the International Scientific Conference*, Vilnius, Lithuania, 27–29 May 2009.
- [41] Busemeyer, L., Mentrup, D., Möller, K., Wunder, E., Alheit, K., Hahn, V., Maurer, H.P., Reif, J.C., Würschum, T., Müller, J., Rahe, F., Ruckelshausen, A. (2013): BreedVision – A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding. *Sensors*, 13, 2830–2847.
- [42] Cen, H., Wan, L., Zhu, J., Li, Y., Li, X., Zhu, Y., Weng, H., Wu, W., Yin, W., Xu, C., Bao, Y., Feng, L., Shou, J., He, Y. (2019): Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using a lightweight UAV with dual image-frame snapshot cameras. *Plant Methods*, 15(1).
- [43] Congalton, R.G. (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1):35–46.
- [44] Capolupo, A., Kooistra, L., Berendonk, C., Lorenzo, B., Suomalainen, J. (2015): Estimating Plant Traits of Grasslands from UAV-Acquired Hyperspectral Images: A Comparison of Statistical Approaches. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4):2792-2820.
- [45] Castagna, R., Borghi, B., Di Fonzo, N., Heun, M., Salamini, F. (1995): Yield and related traits of einkorn (*T. monococcum* ssp. *monococcum*) in different environments. *European Journal of Agronomy*, 4, 371–378.
- [46] CBD (2014): Fifth National Report to the Convention on Biological Diversity – Hungary. <https://www.cbd.int/doc/world/hu/hu-nr-05-en.pdf>
- [47] Cegielska, K., Noszczyk, T., Kukulska, A., Szylar, M., Hernik, J., Dixon-Gough, R., Jombach, S., Valánszki, I., Filepné Kovács, K. (2018): Land use and land cover changes in post-socialist countries: Some observations from Hungary and Poland. *Land Use Policy*, 78, 1-18.
- [48] Charmet, G. (2011): Wheat domestication: Lessons for the future. *Comptes Rendus Biologies*, 334, 212–220.

- [49] Chaturverdi, S.K., Sekhar, R., Banerjee, S., Kamal, H. (2019): Comparative Review Study of Military and Civilian Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Incas Bulletin*, 11,183-198.
- [50] Clark, R.N., T.V.V. King, C. Ager, and G.A. Swayze. (1995): Initial vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Valley, Colorado using imaging spectrometer data. *Summitville Forum '95*. Denver, Colorado, pp. 64–69.
- [51] COM (2019): Communication from commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, The European Green Deal, COM/2019/640 final.
- [52] Conviron PGR15 (2018): Reach-In Plant Growth. In Management System Certified to ISO 9001, Controlled Environments Ltd.: Win-nipeg, Canada.
- [53] Costa, L., de Morais, N.L., Ampatzidis, Y. (2020): A new visible band index (vNDVI) for estimating NDVI values on RGB images utilizing genetic algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 172,105334.
- [54] Csákvári, E., Bede-Fazekas, Á., Horváth, F., Molnár, Zs., Halassy, M. (2021a): Do environmental predictors affect the regeneration capacity of sandy habitats? A country-wide survey from Hungary. *Global Ecology and Conservation*, 27, e01547.
- [55] Csákvári, E., Fabók, V., Bartha, S., Barta, Z., Batáry, P., Borics, G., Botta-Dukát, Z., Erős, T., Gáspár, J., Hideg, É., Kovács-Hostyánszki, A., Sramkó, G., Standovár, T., Lengyel, Sz., Liker, A., Magura, T., Márton, A., Molnár, V. A., Molnár, Zs., Oborny, B., Ódor, P., Tóthmérész, B., Török, K., Török, P., Valkó, O., Szép, T., Vörös, J., Báldi, A. (2021b): Conservation biology research priorities for 2050: A Central-Eastern European perspective. *Biological Conservation*, 264:109396.
- [56] Csákvári E., Halassy M., Enyedi A., Gyulai F., Berke J. (2021c): Is einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.) a better choice than winter wheat (*Triticum aestivum* L.)? Wheat quality estimation for sustainable agriculture using vision-based digital image analysis. *Sustainability*, 13(21):12005
- [57] Csákvári, E., Molnár Zs., Halassy, M. (2022): Estimates of regeneration potential in the Pannonian sand region help prioritize ecological restoration interventions. *Communications Biology*, 5, 1136.
- [58] Csákvári, E., Sáradi, N., Berki, B., Csecserits, A., Csonka, A.C., Bruna, P.R., Török, K., Valkó, O., Vörös, M., Halassy, M. (2023): Native species can reduce the establishment of invasive alien species if sown in high density and using competitive species. *Restoration Ecology*, 31(5):e13901.
- [59] Csecserits, A., Botta-Dukát, Z., Kröel-Dulay, Gy., Lhotsky, B., Ónodi, G., Rédei, T., Szitár, K., Halassy, M. (2016): Tree plantations are hot-spots of plant invasion in a landscape with heterogeneous land-use. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 226: 88–98.
- [60] Dana, W., Ivo, W. (2008): Computer image analysis of seed shape and seed color of flax cultivar description. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61, 126–135.
- [61] De Swaef, T., Maes, W.H., Aper, J., Baert, J., Cougnon, M., Reheul, D., Steppe, K., Roldán-Ruiz, I., Lootens, P. (2021): Applying RGB- and Thermal-Based Vegetation Indices from UAVs for HighThroughput Field Phenotyping of Drought Tolerance in Forage Grasses. *Remote Sensing*, 13(1):147.
- [62] Devictor, V., Meinard, Y. (2020): Empowering biodiversity knowledge. *Conservation Biology*, 34: 527-529.

- [63] Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S.H.M., Chan, K.M.A., Garibaldi, L.A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S.M., Midgley, G.F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R.J., Shin, Y.J., Visseren-Hamakers, I., Willis, K.J., Zayas, C.N. (2019): Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366, 6471.
- [64] Dinu, M., Whittaker, A., Pagliai, S., Sofi, F. (2018): Ancient wheat species and human health: Biochemical and clinical implications. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 52, 1-9.
- [65] Donald, P.F., Pisano, G., Rayment, M.D., Pain, D.J. (2002): The Common Agricultural Policy, EU enlargement and the conservation of Europe's farmland birds. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 89: 3, 167-182.
- [66] Dreisigacker, S., Zhang, P., Warburton, M.L., Skovmand, B., Hoisington, D. and Melchinger, A.E. (2005): Genetic Diversity among and within CIMMYT Wheat Landrace Accessions Investigated with SSRs and Implications for Plant Genetic Resources Management. *Crop Science*, 45:653-661.
- [67] Emeter, M.E. (2019): Image Re-processing of Satellite Imageries. In: *Environmental Modeling Using Satellite Imaging and Dataset Re-processing. Studies in Big Data*, 54. Springer, Cham, ISBN 978-3-030-13405-1.
- [68] Emmerson, M., Morales, M.B., Onate, J.J., Batáry, P., Berendse, F., Liira, J., Aavik, T., Guerrero, I., Bommarco, R., Eggers, S., Part, T., Tschantke, T., Weisser, W., Clement, L., Bengtsson, J. (2016): How agricultural intensification affects biodiversity and ecosystem services. *Advances in Ecological Research*, 55, 43–97.
- [69] Emődi, A., Gyulai, F., Mravcsik, Z., Gyulai, G., Sz, Vinogradov., Szabó, T.A., Rovner, I. (2014): Digitális magmorfometria I. A termesztett alakor fajták és tájfajták (*T. m. ssp. monococcum*) elemzése. *Növénytermelés* 63, 61-70.
- [70] Emődi, A., Gyulai, G., Vinogradov, S., Mravcsik Z., Gyulai, F., Rovner, I. (2015): Digitális magmorfometria II. – Az alakor (*Triticum monococcum* L.) két alfajának (*T. m. ssp. aegilopoides*, *T. m. ssp. monococcum*) magmorfometriai jellemzése. *Növénytermelés*, 64(4) 23-37.
- [71] Eurostat (2020): Online elérhető: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/tag00047> (2024. január 27.).
- [72] Fageria, N.K., Baligar, V.C., Jones, C.A. (2011): Growth and Mineral Nutrition of Field Crops, *CRC Press: Boca Raton*, 3rd ed., FL, USA.
- [73] Fahlgren, N., Gehan, M.A., Baxter, I. (2015): Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current Opinion in Plant Biology*, 24, 2015:93-99.
- [74] Fanourakis, D., Briese, C., Max, J.F., Kleinen, S., Putz, A., Fiorani, F., Ulbrich, A., Schurr, U. (2014): Rapid determination of leaf area and plant height by using light curtain arrays in four species with contrasting shoot architecture. *Plant Methods*, 10, 9.
- [75] Fatholahi, S., Ehsanzadeh, P., Karimmojeni, H. (2020): Ancient and improved wheats are discrepant in nitrogen uptake, remobilization, and use efficiency yet comparable in nitrogen assimilating enzymes capabilities. *Field Crops Research*, 249, 107761.
- [76] Feranec, J., Šúri M., Ot'ahel', J., Cebecauer, T., Kolář, J., Soukup, T., Dzeňková, D., Waszmuth, J., Vájdea, V., Vįjdea, A.M., Nitica, C. (2000): Inventory of major landscape changes in the Czech Republic, Hungary, Romania and Slovak Republic 1970s – 1990s. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(2): 129-139.

- [77] Ferreira, T., Rasband, W. (2012): ImageJ User Guide-IJ1.46r. <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide> (Online elérhető 2021. október 28-án)
- [78] Fischer, J., Riechers, N., Loos, J., Martin-Lopez, B., Temperton, M.V. (2021): Making the UN Decade on Ecosystem Restoration a Social-Ecological Endeavour. *Trends in Ecology & Evolution*, 36,1.
- [79] Fitzgerald, G.J. (2010): Characterizing vegetation indices derived from active and passive sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 31:16, 4335-4348.
- [80] Franklin, S. E., Wulder, M. A. (2002): Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 26(2), 173-205.
- [81] Gamon, J.A., Serrano, L., Surfus, J.S. (1997): The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency across Species, Functional Types, and Nutrient Levels. *Oecologia*, 112(4):492–501.
- [82] Gamon, J.A., Surfus, J.S. (1999): Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 143:105-117.
- [83] Gasparovic, M., Medak, D., Miler, M. (2017): Geospatial monitoring of green infrastructure – case study Zagreb, Croatia. *17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 8p.
- [84] Golbach, F., Kootstra, G., Damjanovic, S., Otten, G., van de Zedde, R. (2016): Validation of plant part measurements using a 3D reconstruction method suitable for high-throughput seedling phenotyping. *Machine Vision and Applications*, 27, 663–680.
- [85] Golzarian, M.R., Frick, R.A. (2011): Classification of images of wheat, ryegrass and brome grass species at early growth stages using principal component analysis. *Plant Methods* 7, 28.
- [86] Gonthier, D. J., Ennis, K.K., Farinas, S., Hsieh, H-Y., Iverson, A.L., Batáry, P., Rudolphi J., Tschardtke T., Cardinale, B.J., Perfecto, I. (2014): Biodiversity conservation in agriculture requires a multi-scale approach. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 281, 20141358.
- [87] Goriewa-Duba, K., Duba, A., Wachowska, U., Wiwart, M. (2018): An Evaluation of the Variation in the Morphometric Parameters of Grain of Six Triticum Species with the Use of Digital Image Analysis. *Agronomy*, 8, 296.
- [88] Granlund, L., Keski-Saari, S., Kumpula, T., Oksanen, E., Keinänen, M. (2018): Imaging lichen water content with visible to mid-wave infrared (400–5500 nm) spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 216, 301-310.
- [89] Gyulai, F. (2019): Alakor, a sokoldalú és sokakat foglalkoztató ősbúza. In: *Növényvédelem*, 55(7): 312-321.
- [90] Gyulai, G., Rovner, I., Vinogradov, S., Kerti, B., Emödi, A., Csákvári, E., Kerekes, A., Mravcsik, Z., Gyulai, F. (2015): Digital seed morphometry of dioecious wild and crop plants – development and usefulness of the seed diversity index. *Seed Science and Technology* 2015, 43(3):492-506.
- [91] Guzmán, C., Caballero, L., Alvarez, J.B. (2009): Variation in Spanish cultivated einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) as determined by morphological traits and waxy proteins. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 56, 601–604.
- [92] Hada, D.F.J, Assoni, C.E.E.F., Bustemante, F.R.M., Tonet, K.V.S. (2024): A paleta genética da linhaça: um mergulho na diversidade de cor auxiliado por métodos multivariados. *Conference: 68a Reunião Anual da RBras*, Piracicaba-SP.
- [93] Hagen, D., Svavarsdottir, K., Nilsson, C., Tolvanen, A.K., Raulund-Rasmussen, K., Aradóttir, Á.L., Fosaa, A., Halldorsson, G. (2013): Ecological and social

- dimensions of ecosystem restoration in the Nordic countries. *Ecology and Society*, 18(4): 34.
- [94] Hague, T., Tillett, N.D., Wheeler, H. (2006): Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals. *Precision Agriculture*, 7(1):21-32.
- [95] Hajnalová, M., Dreslerová, D. (2010): Ethnobotany of einkorn and emmer in Romania and Slovakia: Towards interpretation of archeological evidence. *Památky archeologické*, 101, 169–202.
- [96] Hatfield, J.L., Gitelson, A.A., Schepers, J.S., Walthall C.L. (2008): Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, 100:S-117-S-131.
- [97] Hatfield, J.L., Boote, K.J., Kimball, B.A., Ziska, L.H., Izaurralde, R.C., Ort, D., Thomson, A.M., Wolfe, D. (2011): Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*, 103: 351-370.
- [98] HC (2011): Hungary's Constitution of 2011. Article P. Protection of environment. https://www.constituteproject.org/constitution/Hungary_2011.pdf
- [99] Hemming, J., Rath, T. (2001): PA–Precision Agriculture: Computer-Vision-based Weed Identification under Field Conditions using Controlled Lighting. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(233–243).
- [100] Hickey, L.T., Hafeez, A.N., Robinson, H., Jackson, S.A., LealBertioli, S.C.M., Tester, M., Gao, C., Godwin, I.D., Hayes, B.J., Wulff, B.B.H. (2019): Breeding crops to feed 10 billion. *Nature Biotechnology*, 37, 744–754.
- [101] Hidalgo, A., Brandolini, A., Ratti, S. (2009): Influence of genetic and environmental factors on selected nutritional traits of *Triticum monococcum*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(14), 6342–6348.
- [102] Hidalgo, A., Brandolini, A. (2014): Nutritional properties of einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.). *Journal of Science Food and Agriculture*, 94(4):601–612.
- [103] Howden, S.M., Soussana, J.F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M., Meinke, H. (2007): Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50) 19691–19696.
- [104] 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, 1–6.
- [105] Hunt, E.R., Daughtry, C.S.T., Eitel, J.U.H., Long, D.S. (2011). Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. *Agronomy Journal*, 103:1090–1099.
- [106] Iqbal, F., Lucieer, A., Barry, K., Wells, R. (2017): Poppy crop height and capsule volume estimation from a single UAS flight. *Remote Sensing*, 9(7):647.
- [107] Jacomet, S. (2006): Identification of Cereal Remains from Archeological Sites. *Archaeobotany Lab*, IPAS, Basel University, Basel, Switzerland, 61p.
- [108] Jung, A., Vohland, M. (2022): Hyperspectral Remote Sensing and Field Spectroscopy: Applications in Agroecology and Organic Farming In: De Massimo, M. Alberto, D., Salvatore, A.P. (eds.) Drones and Geographical Information Technologies in Agroecology and Organic Farming Contributions to Technological Sovereignty. Boca Raton, USA, *CRC Press*, pp. 99-121, 23.
- [109] Jensen, J.R. (2005): Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 3. kiadás, Prentice Hall, Upper Saddle River, p. 316.
- [110] Juhász, A., Larroque, O.R., Tamás, L., Hsam, S.L., Zeller, F.J., Békés, F., Bedo, Z. (2003): Bánkúti 1201-an old Hungarian wheat variety with special storage protein composition. *Theoretical and Applied Genetics*, 107, 697–704.

- [111] Kan, M., Özdemir, H.Ö., Kan, A. (2022): Socioeconomic Evaluation of Einkorn Wheat Production. In: Zencirci, N., Ulukan, H., Baloch, F.S., Mansoor, S., Rasheed, A. (eds.) *Ancient Wheats*, Springer, Cham. ISBN 978-3-031-07285-7.
- [112] Kawashima, S., Nakatani, M. (1998): An algorithm for estimating chlorophyll content in leaves using a video camera. *Annals of Botany*, 81: 49-54.
- [113] Keyworth, S., Jarman, M., Medcalf, K. (2009): Assessing the Extent and Severity of Erosion on the Upland Organic Soils of Scotland using Earth Observation: A GIFTSS Implementation Test. *Final Report*, Scottish Government, Edinburgh. ISBN 978-0-7559-7709-3, 88 p.
- [114] Kerle, N., Nex, F., Gerke, M., Duarte, D., Vetrivel, A. (2019): UAV-Based Structural Damage Mapping: A Review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(14):14.
- [115] Kerr, J.T., Ostrovsky, M. (2003): From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(6):299-305.
- [116] Khorram, S., Koch, F.H., van der Wiele, C.F., Nelson, S.A.C. (2012): Remote Sensing. *Springer Science & Business Media*, ISBN 978-1-4614-3103-9, Springer, New York, 134 p.
- [117] Kim, J.Y. (2020): Roadmap to High Throughput Phenotyping for Plant Breeding. *Journal of Biosystems Engineering*, 45, 43–55.
- [118] Kleijn, D., Kohler, F., Báldi, A., Batáry, P., Concepción, E.D., Clough, Y., Díaz, M., Gabriel, D., Holzschuh, A., Knop, E., Kovács, A., Marshall, E.J., Tscharnkte, T., Verhulst, J. (2009): On the relationship between farmland biodiversity and land-use intensity in Europe. *Proceedings of the Royal Society Biological Sciences*, 7,276(1658):903-9. doi: 10.1098/rspb.2008.1509.
- [119] Koponen, S., Pulliainen, J., Kallio, K., Hallikainen, M. (2002): Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing of Environment*, 79(1):51–59.
- [120] Kotiaho, J.S., Kuusela S., Nieminen E., Päivinen J., Moilanen, A. (2016): Framework for assessing and reversing ecosystem degradation – Report of the Finnish restoration prioritization working group on the options and costs of meeting the Aichi biodiversity target of restoring at least 15 percent of degraded ecosystems in Finland. Ministry of Environment, Helsinki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4603-9>
- [121] Kozma-Bognár, V., Berke, J. (2020): Távérzékelés alapjai. *Egyetemi jegyzet*. Széchenyi Egyetem, Győr.
- [122] Kovács, A. (1996): A búza morfológiája, fejlődése. In: Bocz, E. (eds.): *Szántóföldi növénytermesztés*, Mezőgazda Kiadó, Budapest, pp. 224-238.
- [123] Krasznai, K.E. (ed.) (2021): Politics and the environment in Eastern Europe. Cambridge, UK: Open Book Publishers, ISBN 978-1-80064-132-7, 342 p.
- [124] Krause, S., Sanders, T.G.M., Jan-Peter, Mund, J.P., Greve, K. (2019): UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. *Remote Sensing*. 11(7):758.
- [125] Kristóf, D. (2005): Távérzékelési módszerek a környezetgazdálkodásban. *Doktori (PhD) értekezés*, Szent István Egyetem, Környezettudományi Doktori Iskola, Gödöllő, 146 p.
- [126] Kristó, I. (2008): Szegedi őszi búza fajták termőképesség vizsgálata eltérő terméshozzáadási körülmények között. *Doktori (PhD) értekezés*, Szent István Egyetem, Növénytudományi Doktori Iskola, Gödöllő, 115p.
- [127] Kristóf, D., Belényesi, M. (2016): Monitoring távérzékeléssel. *Egyetemi jegyzet*, Szent István Egyetem, Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet, Gödöllő.

- [128] Kuemmerle, T., Hostert, P., Radeloff, V.C., van der Linden, S., Pertanowski, K., Kruhlov, I. (2008): Cross-border Comparison of Post-socialist Farmland Abandonment in the Carpathians. *Ecosystems*, 11, 614.
- [129] Lassalle, G. (2021): Monitoring natural and anthropogenic plant stressors by hyperspectral remote sensing: Recommendations and guidelines based on a meta-review, *Science of The Total Environment*, 788, 147758.
- [130] László, I., Csornai, G., Fekete, I., Giachetta, R. (2014): Távérzékelt felvételek elemzése. *Egyetemi jegyzet*, ELTE-Informatikai Kar, Budapest, 130 p.
- [131] Lee, K.J., Lee, B.W. (2013): Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis. *European Journal of Agronomy*, 48, 57–65.
- [132] Leventon, J., Schaal, T., Velten, S., Dänhardt, J., Fischer, J., Abson, D.J., Newig, J. (2017): Collaboration or fragmentation? Biodiversity management through the common agricultural policy *Land Use Policy*, 64,1-12.
- [133] Lieskovský, J., Bezák, P., Špulerová, J., Lieskovský, T., Koleda, P., Dobrovodská, M., Bürgi, M., Gimmi, U. (2015): The abandonment of traditional agricultural landscape in Slovakia – Analysis of extent and driving forces. *Journal of Rural Studies*, 37, 75-84.
- [134] LIFE (2016): A tűzok határon átnyúló védelme Közép-Európában. LIFE15NAT/AT/000834, www.tuzok.hu
- [135] Liira, J., Aavik, T., Parrest, O., Zobel, M. (2008): Agricultural sector, rural environment and biodiversity in the Central and Eastern European EU member states. *AGD Landscape & Environment*, 2(1):46–64.
- [136] Li, F., Mistele, B., Hu, Y., Chen, X., Schmidhalter, U. (2014): Reflectance estimation of canopy nitrogen content in winter wheat using optimised hyperspectral spectral indices and partial least squares regression. *European Journal of Agronomy*, 52:198–209.
- [137] Li, W., Niu, Z., Huang, N., Wang, C., Gao, S., Wu, C. (2015): Airborne LiDAR technique for estimating biomass components of maize: A case study in Zhangye City, Northwest China. *Ecological Indicators*, 57:486–496.
- [138] Liu, Y., Bao Y. (2021): Review of electromagnetic waves-based distance measurement technologies for remote monitoring of civil engineering structures. *Measurement*, 176, 109193.
- [139] Liu, J., Pattey, E. (2010): Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1485–1490.
- [140] Lobell, D.B., Field, C.B. (2007): Global Scale Climate-Crop Yield Relationships and the Impacts of Recent Warming. *Environmental Resources Letter*, 2, Article ID: 014002.
- [141] Louhaichi, M., Borman, M.M., Johnson, D.E. (2001): Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International*, 16(1):65-70.
- [142] Lu, N., Zhou, J., Han, Z., Li, D., Cao, Q., Yao, X., Tian, Y., Zhu, Y., Cao, W., Cheng, T. (2019): Improved estimation of aboveground biomass in wheat from RGB imagery and point cloud data acquired with a low-cost unmanned aerial vehicle system. *Plant Methods*, 15, 17.
- [143] McRoberts, R.E., Cohen, W.B., Næsset, E., Stehman, S.V., Tomppo, E.O. (2010): Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(4): 340-367.
- [144] Mefleh, M., Conte, P., Fadda, C., Giunta, F., Piga, A., Hassoun, G., Motzo, R. (2019): From ancient to old and modern durum wheat varieties: Interaction

- among cultivar traits, management, and technological quality. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 99(5): 2059–2067.
- [145] Mihók B., Kovács, E., Balázs, B., Pataki, Gy., Ambrus, A., Bartha, D., Czirák, Z., Csányi, S., Csépanyi, P., Csősz, M., Dudás, Gy., Egri, Cs., Erős, T., Gőri, Sz., Halmos, G., Kopek, A., Margóczy, K., Miklay, G., Milon, L., Podmaniczky, L., Sárvári, J., Schmidt, A., Sipos, K., Sipos, V., Standovár, T., Szigetvári, Cs., Szemethy, Sz., Tóth, B., Tóth, L., Tóth, P., Török, K., Török, P., Vadász, Cs., Varga, I., Sutherland, W.J., Báldi, A. (2015): Bridging the research practice gap: conservation research priorities in a Central and Eastern European country. *Journal of Nature Conservation*, 28, 133–148.
- [146] Mihók, B., Biró, M., Molnár, Zs., Kovács, E., Bölöni, J., Erős, E., Standovár, T., Török, P., Csorba, G., Margóczy, K., Báldi, A. (2017): Biodiversity on the waves of history: Conservation in a changing social and institutional environment in Hungary, a post-soviet EU member state. *Biological Conservation*, 211(A):67–75.
- [147] Milics, G. (2018): Földközeli távérzékelési lehetőségek szerepe a helyspecifikus adatgyűjtés és elemzés során. In: *A jövő mezőgazdasága – fókuszban a hatékonyság*. NAIK MGI Konferencia, 2018. 11. 22., Gödöllő.
- [148] Molnár, Zs., Biró, M., Bartha, S., Fekete, G. (2012): Past Trends, Present State and Future Prospects of Hungarian Forest-Steppes. In: Werger, MJA, van Staaldunin, MA (eds.) *Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London, pp. 209–252.
- [149] Morris, C.E., Sands, D.C. (2006): The breeder's dilemma—yield or nutrition? *Nature Biotechnology*, 24:1078–1080.
- [150] Moss, B. (2008): Water pollution by agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences*, 363, 659–666.
- [151] MTA ATK (2015): Martonvásári fajtakatalógus 2014–2015. In: *Cultivar Catalogue of Martonvásár*, MTA ATK Mezőgazdasági Intézet, Martonvásár.
- [152] Navarro, L.M., Marques, A., Proenc, V., a, Ceașu, S., Gonc, B., alves, Capinha, C., Fernandez, M., Geldmann, J., Pereira, H.M. (2017): Restoring degraded land: contributing to Aichi Targets 14, 15, and beyond. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29, 207–214.
- [153] NKP (2020): 5. Nemzeti Környezetvédelmi Program 2021–2026 tervezete. Agrárminisztérium, Budapest.
http://www.hermanottointezet.hu/sites/default/files/nkp5_0430_tervezet.pdf
- [154] Niazian, M., Niedbała, G. (2020): Machine Learning for Plant Breeding and Biotechnology. *Agriculture*, 10(10), 436.
- [155] Niggli, U. (2015): Sustainability of organic food production: Challenges and innovations. *Proceedings of the Nutrition Society*, 74(1), 83–88.
- [156] Nipers, A., Pilvere, I., Upite, I., Krievina, A., Pilvere, A. (2024): When pesticide reduction objectives meet business as usual: Possible impacts on the crop sector in Latvia. *Resources, Environment and Sustainability*, 15, 100145.
- [157] Nowak, M.M., Dziób, K., Bogawski, P. (2019): Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in environmental biology: A review. *European Journal of Ecology*, 4(2):56–74.
- [158] Omari, M.K., Lee, J., Faqeerzada, M.A., Joshi, R., Park, E., Cho, B.K. (2020): Digital image-based plant phenotyping: A review. *Korean Journal of Agricultural Science*, 47, 119–130.
- [159] Pandžić, M., Tagarakis, A.C., Radonić, V., Marko, O., Kitić, G., Panić, M., Ljubičić, N., Crnojević, V. (2022): Potential of Sentinel-2 Satellite and Novel Proximal Sensor Data Fusion for Agricultural Applications. In: Bochtis, D.D.,

- Lampridi, M., Petropoulos, G.P., Ampatzidis, Y., Pardalos, P. (eds): Information and Communication Technologies for Agriculture—Theme I: Sensors. *Springer Optimization and Its Applications*, 182, Springer, Cham.
- [160] Pataki, Zs., Ruff, J. (2015): Drónok használata az erdészeti távérzékelésben II. *Erdészeti Lapok*, CL. évfolyam, 10. 2015. október.
- [161] Patel, N.K., Patnaik, C., Dutta, S., Shekh, A.M., Dave, A.J. (2001): Study of crop growth parameters using airborne imaging spectrometer data. *International Journal of Remote Sensing*, 22(12):2401–2411.
- [162] Pazúr, R., Lieskovský, J., Feranec, J., O’ahel’, J. (2014): Spatial determinants of abandonment of large-scale arable lands and managed grasslands in Slovakia during the periods of post-socialist transition and European Union accession. *Applied Geography*, 54,118-128.
- [163] Pe’er, G., Dicks, L.V., Visconti, P., Arlettaz, R., Báldi, A., Benton, T.G., Collins, S., Dieterich, M., Gregory, R.D., Hartig, F., Henle, K. (2014): EU agricultural reform fails on biodiversity. *Science*, 344, 1090–1092.
- [164] Pe’er, G., Bonn, A., Bruelheide, H., et al. (2020): Action needed for the EU Common Agricultural Policy to address sustainability challenges. *People and Nature*, 2(2): 305– 316.
- [165] Penksza, K., Pajor, F., Kevi, A., Wagenhoffer, Z., Sipos, L., Salata-Falusi, E., Penksza, P., Poti, P., Berke, J., Salata, D., Bajnok, M., Szentes, S. (2025): The Effect of Goat Grazing on the Biodiversity of Pannonian Dry Grassland. *Diversity*, 17(1):13.
- [166] Péntek, J., Szabó, T.A. (1981): Az alakor (*Triticum monococcum*) Erdélyben. *Ethnographia*, 92, 259–277.
- [167] Pepó, P., Pepó, P. (1988): Az időjárás és a tápanyagellátás hatása az őszi búzafajták kalászkedeményének korai fejlődésére. *Növénytermelés*, 37(2):105-114.
- [168] Pierce, F.J., Nowak, P. (1999): Aspects of Precision Agriculture. In: Sparks, D.L.(eds.). *Advances in Agronomy*, Academic Press, 67(1-85).
- [169] Pieruschka, R., Schurr, U. (2019): Plant phenotyping: Past, present, and future. *Plant Phenomics*, 2019:7507131.
- [170] Prasertsak, A., Fukai, S. (1997): Nitrogen availability and water stress interaction on rice growth and yield. *Field Crops Research*, 52:249-260.
- [171] R Core Team (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- [172] Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W., Hu, Z. (2019): A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6, 320–333 (2019).
- [173] Reis, B.P., Martins, S.V., Filho, E.I.F., Sarcinelli, T.S., Gleriani, J.M., Leite, H.G., Halassy, M. (2019a): Forest restoration monitoring through digital processing of high resolution images. *Ecological Engineering*, 127: 178-186.
- [174] Reis, B.P., Martins, S.V., Filho, E.I.F., Sarcinelli, T.S., Gleriani, J.M., Marcatti, G.E., Leite, H.G., Halassy, M. (2019b): Management recommendation generation for areas under forest restoration process through images obtained by UAV and LiDAR. *Remote Sensing*, 11(13):1508.
- [175] Restás, Á. (2013): Az UAV katonai alkalmazásának transzfere a polgári alkalmazás felé: katasztrófavédelmi alkalmazások. In: *Repüléstudományi Közlemények*, Repüléstudományi Konferencia Különszám. 25, 2.
- [176] Ribeiro, M., Rodriguez-Quijano, M., Nunes, F.M., Carillo, J.M., Branlard, G., Igrejas, G. (2016): New insights into wheat toxicity: Breeding does not seem to

- contribute to a prevalence of potential celiac disease's immunostimulatory epitopes. *Food Chemistry*, 213, 8e18.
- [177] Richardson, A.D., Jenkins, J.P., Braswell, B.H., Hollinger, D.Y., Ollinger, S.V., Smith, M.-L., (2007): Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*, 152:323-334.
- [178] Richardson, A. J., Wiegand, C. (1977): Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43:1541-1552.
- [179] RStudio Team (2020): Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>
- [180] Ruiz, M., Zambrana, E., Fite, R., Sole, A., Tenorio, J.L., Benavente, E. (2019): Yield and Quality Performance of Traditional and Improved Bread and Durum Wheat Varieties under Two Conservation Tillage Systems. *Sustainability*, 11, 4522.
- [181] Rustamov, R.B., Hasanova, S., Zeynalova, M.H. (2018): Multi-purposeful application of geospatial data. IntechOpen, ISBN 978-1-83881-410-6, p. 224.
- [182] Saad, A., Benyamina, A.E.H., Gamatié, A. (2020): Water Management in Agriculture: A Survey on Current Challenges and Technological Solutions. *IEEE Access*, 8:38082-38097.
- [183] Salisbury, J.W., D'Aria, D.M. (1994): Emissivity of terrestrial materials in the 3–5 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment*, 47(3):345-361.
- [184] Sabins, F.F., Ellis, J.M. (2020): Remote Sensing: Principles, Interpretation, and Applications. 4. kiadás, Remote Sensing Enterprises, Inc. and Ellis, J.M., USA, ISBN 1-4786-3710-3.
- [185] Scharr, H., Dee, H., French, A.P., Tsaftaris, S.A. (2016): Special issue on computer vision and image analysis in plant phenotyping. *Machine Vision and Applications*, 27, 607–609.
- [186] Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K.H.M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R.K., Hanumantha, R.B., Nair, R.M., Prasad, P.V.V., Nayyar, H. (2018): Drought or/and Heat-Stress Effects on Seed Filling in Food Crops: Impacts on Functional Biochemistry, Seed Yields, and Nutritional Quality. *Frontiers in Plant Science*, 27(9):1705.
- [187] Selvaraj, M.G., Valderrama, M., Guzman, D., Valencia, M., Ruiz, H., Acharjee, A. (2020): Machine learning for high-throughput field phenotyping and image processing provides insight into the association of above and below-ground traits in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Plant Methods*, 16, 87.
- [188] Shewry, P.R. (2018): Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? *Journal of Cereal Science*, 79, 469–476.
- [189] Short, N.M. (2010): The Remote Sensing Tutorial. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Goddard Space Flight Center, <http://rst.gsfc.nasa.gov/>
- [190] SPSS (2008): SPSS Statistics for Windows, Version 17.0. Chicago: SPSS Inc.
- [191] Su, J., Liu, C., Coombes, M., Hu, X., Wang, C., Xu, X., Li, Q., Guo, L., Chen, W.-H. (2018): Wheat yellow rust monitoring by learning from multispectral UAV aerial imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 157-166.
- [192] Sutcliffe, L.M.E., Batáry, P., Kormann, U., Báldi, A., Dicks, L.V., Herzon, I., Kleijn, D., Tryjanowski, P., Apostolova, I., Arlettaz, R., Aunins, A., Aviron, S., Baležentienė, L., Fischer, C., Halada, L., Hartel, T., Helm, A., Hristov, I., Jelaska, S.D., Kaligarič, M., Kamp, J., Klimek, S., Koorberg, P., Kostiuková, J., Kovács-Hostyánszki, A., Kuemmerle, T., Leuschner, C., Lindborg, R., Loos, J., Maccherini, S., Marja, R., Máthé, O., Paulini, I., Proença, V., Rey-Benayas, J., Sans, F.X., Seifert, C., Stalenga, J., Timaeus, J., Török, P., van Swaay, C., Viik,

- E., Tschardtke, T. (2015): Harnessing the biodiversity value of Central and Eastern European farmland. *Diversity and Distributions*, 21: 722-730.
- [193] Swain N., (1999): Agricultural Restitution and Co-operative Transformation in the Czech Republic, Hungary and Slovakia, *Europe-Asia Studies*, 51:7, 1199-1219.
- [194] Szabó, T.A. (1976): On the borderline of natural science and ethnology. *Ethnological Papers*, Kriterion Publ. House, Bukarest, Romania, pp. 36–40.
- [195] Szalay, D. K. (2009): Az 'Alföld 90' őszi búzafajta mennyiségi és minőségi paramétereinek vizsgálata az átállás során. *Diplomadolgozat*.
- [196] Szalay, D.K. (2014): Távérzékelésre és spektroszkópiára alapozott őszi búza fajtaazonosító eljárás. *Doktori (PhD) értekezés*, Szent István Egyetem, Műszaki Tudományi Doktori Iskola, Gödöllő, p. 192.
- [197] Szitár, K., Csősz, M., Vaszőcsik, V., Schneller, K., Csecserits, A., Kollányi, L., Teleki, M., Kiss, D., Bánhidai, A., Jáger, K., Petrik, O., Pataki, R., Lehoczki, R., Halassy, M., Tanács, E., Kertész, M., Csákvári, E., Somodi, I., Lengyel, A., Gallé, R., Weiperth, A., Konkoly-Gyuró, É., Máté, K., Keszthelyi, Á.B., Török, K. (2021): Az országos zöldinfrastruktúrahálózat kijelölésének módszertana többszemponú állapotértékelés alapján. *Természetvédelmi Közlemények*, 27:145–157.
- [198] Tamaki, Y., Mazza, G. (2011): Rapid determination of lignin content of straw using Fourier transform mid-infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(2):504-512.
- [199] Tanács, E., Vári, Á., Bede-Fazekas, Á., Báldi, A., Csákvári, E., Endrédi, A., Fabók, V., Kisné Fodor, L., Kiss, M., Koncz, P., Kovács-Hostyánszki, A., Mészáros, J., Pásztor, L., Rezneki, R., Standovár, T., Zsembery, Z., Török, K. (2023): Finding the Green Grass in the Haystack? Integrated National Assessment of Ecosystem Services and Condition in Hungary, in Support of Conservation and Planning. *Sustainability*, 15(11), 8489.
- [200] Tang, L., Shao, G. (2015): Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26, 791–797.
- [201] Tardieu, F., Cabrera-Bosquet, L., Pridmore, T., Bennett, M. (2017): Plant Phenomics, From Sensors to Knowledge. *Current Biology*, 27:15.
- [202] Tillet, N. P., Hague, T., Miles, S.J. (2001): A field assessment of a potential method for weed and crop mapping geometry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32:229-566.
- [203] Timár, G., Jakab, G., Székely, B. (2024): A Step from Vulnerability to Resilience: Restoring the Landscape Water-Storage Capacity of the Great Hungarian Plain—An Assessment and a Proposal. *Land*, 13(2):146.
- [204] Tischner, T., Rajkainé Végh, K., Kőszegi, B. (1997): Cereals in the phytotron. *Acta Agronomica Hungarica*, 45, 187-193.
- [205] Tobak, Z. (2020): Interaktív térkép és GeoApp fejlesztés a WATER@RISK projekt keretében. Mezőgazdasági drónok szerepe a digitális agráriumban, Gazdatalálkozó, 2020. 02. 07.
- [206] Tolvanen, A., Aronson, J. (2016): Ecological restoration, ecosystem services, and land use: a European perspective. *Ecology & Society*, 21, 47.
- [207] Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., di Gennaro, S.F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., Wallace L. (2017): Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10):2427-2447.
- [208] Toutin, T. (2011): State-of-the-art of geometric correction of remote sensing data: a data fusion perspective. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2:1, 3-35.

- [209] Török, K., Horváth, F., Kövendi-Jakó, A., Halassy, M., Bölöni, J., Szitár, K. (2019): Meeting Aichi Target 15: Efforts and further needs of ecological restoration in Hungary. *Biological Conservation*, 235, 128-135.
- [210] Trnka, M., Rötter, R., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Žalud, Z., Semenov, M.A. (2014): Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4, 637–643.
- [211] Tryjanowski, P., Hartel, T., Báldi, A., Szymański, P., Tobolka, M., Herzon, I., Goławski, A., Konvička, M., Hromada, M., Jerzak, L., Kujawa, K., Lenda, M., Orłowski, G., Panek, M., Skórka, P., Sparks, T.H., Tworek, S., Wuczyński, A., Żmihorski, M. (2011): Conservation of farmland birds faces different challenges in Western and Central-Eastern Europe. *Acta Ornithologica*, 46(1):1-12.
- [212] UNEP/FAO (2020): The UN Decade on Ecosystem Restoration 2021-2030 “Prevent, halt and reverse the degradation of ecosystems worldwide” 2020 January. <https://www.decadeonrestoration.org/>.
- [213] USGS (2022): Landsat 9 (ver. 1.3, August 2022): U.S. Geological Survey Fact Sheet 2019–3008, 2 p.
- [214] Uzal, L.C., Grinblat, G.L., Namías, R., Larese, M.G., Bianchi, J.S., Morandi, E.N., Granitto, P.M. (2018): Seed-per-pod estimation for plant breeding using deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 196–204.
- [215] Van Boxtael, F., Aerts, H., Linssen, S., Latré, J., Christiaens, A., Haesaert, G., Dierickx, I., Brusselle, J., De Keyser, W. (2020): A comparison of the nutritional value of Einkorn, Emmer, Khorasan and modern wheat: Whole grains, processed in bread, and population-level intake implications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(11):4108–4118.
- [216] Van Iersel, W., Menno, S., Middelkoop, H., Addink, E. (2018): Multitemporal Classification of River Floodplain Vegetation Using Time Series of UAV Images. *Remote Sensing*, 10(7):1144.
- [217] Vári, Á., Tanács, E., Tormáné Kovács, E., Kalóczkai, Á., Arany, I., Czúcz, B., Bereczki, K., Belényesi, M., Csákvári, E., Kiss, M., Fabók, V., Kisné Fodor, L., Koncz, P., Lehoczki, R., Pásztor, L., Pataki, R., Rezneki, R., Szerényi, Zs., Török, K., Zölei, A., Zsembery, Z., Kovács-Hostyánszki, A. (2022): National Ecosystem Services Assessment in Hungary: Framework, Process and Conceptual Questions. *Sustainability*, 14(19):12847.
- [218] Vastag, V., Enyedi, A., Berke, J. (2019): Hipertemporális drónfelvételek szerkezet és tartalom alapú elemzések eredményei. In: Molnár, V.É. (eds.) *Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában*, X. Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítása, Debreceni Egyetem. ISBN 978-963-318-054-9, pp. 377-386.
- [219] Vikram, P., Franco, J., Burgueño, J., et al. (2021): Strategic use of Iranian bread wheat landrace accessions for genetic improvement: Core set formulation and validation. *Plant Breed*, 140: 87– 99.
- [220] Vos, R., Martin, W., Resnick, D. (2022): Repurposing agricultural support: Creating food systems incentives to address climate change 2022 Global Food Policy Report: *Climate Change and Food Systems*, Chapter 2 16-27, International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington, DC.
- [221] Walter, J., Edwards, J., Cai, J., McDonald, G., Miklavcic, S.J., Kuchel, H. (2019): Throughput Field Imaging and Basic Image Analysis in a Wheat Breeding Programme. *Frontiers in Plant Science*, 10, 449.
- [222] Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., Simoncelli, E.P. (2004): Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4):600-612.

- [223] Wang, Y., Wang, D., Shi, P., Omasa, K. (2014): Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light. *Plant Methods*, 10, 36.
- [224] White, B. (2012): Agriculture and the Generation Problem: Rural Youth, Employment and the Future of Farming. *IDS Bulletin*, 43:9-19.
- [225] Wickham, H (2016): ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. *Springer-Verlag New York*. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>
- [226] Wickham, H., François R, Henry L, Müller K, Vaughan D (2023): dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4, <https://github.com/tidyverse/dplyr>, <https://dplyr.tidyverse.org>
- [227] Wiratmoko, D., Jatmiko, R.H., Yusuf, M.A., Farrasati, R., Prasetyo, A.E. (2020): *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 500,012067.
- [228] Withers, P.J.A., Neal, C., Jarvie, H.P., Doody, D.G. (2014): Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here? *Sustainability*, 6, 5853-5875.
- [229] Wingen, L.U., West, C., Leverington-Waite, M., Collier, S., Orford, S., Goram, R., Yang, C.-Y., King, J., Allen, A.M., Burrridge, A., Edwards, K.J., Griffiths, S. (2017): Wheat Landrace Genome Diversity, *Genetics*, 205(4):1657–1676.
- [230] Woebbecke, D.M., Meyer, G.E., Von Bargaen, K., Mortensen. D.A. (1995): Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. *Transactions of the ASAE*, 38(1):259–269.
- [231] Woodget, A.S., Austrums, R., Maddock, I.P., Habit, E. (2017): Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology. *WIREs Water*, 4:e1222.
- [232] Yadav, S.P., Ibaraki, Y., Dutta Gupta, S. (2010): Estimation of the chlorophyll content of micropropagated potato plants using RGB based image analysis. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 100, 183–188.
- [233] Yakusheva, B. (2019): Managing protected areas in Central Eastern Europe: Between pathd-ependence and Europeanisation. *Land Use Policy*, 87.
- [234] Yang, B., Hawthorne, T.L., Torres, H., Feinman, M. (2019): Using Object-Oriented Classification for Coastal Management in the East Central Coast of Florida: A Quantitative Comparison between UAV, Satellite, and Aerial Data. *Drones*, 3(3):60.
- [235] Zaharieva, M., Monneveux, P. (2014): Cultivated einkorn wheat (*Triticum monococcum* L. subsp. *monococcum*): The long life of a founder crop of agriculture. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 61, 677–706.
- [236] Zarco-Tejada, P.J., Berjón, A., López-Lozano, R., Miller, J.R., Martín, P., Cachorro, V., González, M.R., de Frutos, (2005): A. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a rowstructured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 99(3):271-287.
- [237] Zhang, C., Si, Y., Lamkey, J., Boydston, R.A., Garland-Campbell, K.A., Sankaran, S. (2018): High-Throughput Phenotyping of Seed/Seedling Evaluation Using Digital Image Analysis. *Agronomy*, 8(5):63.

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó tudományos publikációk

IF-es folyóiratcikk:

Csákvári, E., Sáradi, N., Berki, B., Csecserits, A., Csonka, A.Cs., Reis, B.P., Török, K., Valkó, O., Vörös, M., Halassy, M. (2023): Native species can reduce the establishment of invasive alien species if sown in high density and using competitive species. *Restoration Ecology*, 31(5):e13901, D1, IF=2,8.

Tanács, E., Vári, Á., Bede-Fazekas, Á., Báldi, A., **Csákvári, E.**, Endrédi, A., Fabók, V., Kisné Fodor, L., Kiss, M., Koncz, P., Kovács-Hostyánszki, A., Mészáros, J., Pásztor, L., Rezneki, R., Standovár, T., Zsembery, Z., Török, K. (2023): Finding the Green Grass in the Haystack? Integrated National Assessment of Ecosystem Services and Condition in Hungary, in Support of Conservation and Planning. *Sustainability*, 15(11), 8489, Q1, IF=3,251.

Csákvári, E., Molnár, Zs., Halassy, M. (2022): Estimates of regeneration potential in the Pannonian sand region help prioritize ecological restoration interventions. *Communications Biology* 5, 1136, D1, IF=5,2.

Vári, Á., Tanács, E., Tormáné Kovács, E., Kalóczkai, Á., Arany, I., Czucz, B., Bereczki, K., Belényesi, M., **Csákvári, E.**, Kiss, M., Fabók, V., Kisné Fodor, L., Koncz, P., Lehoczki, R., Pásztor, L., Pataki, R., Rezneki, R., Szerényi, Zs., Török, K., Zölei, A., Zsembery, Z., Kovács-Hostyánszki, A. (2022): National Ecosystem Services Assessment in Hungary: Framework, Process and Conceptual Questions. *Sustainability*, 14(19):12847, Q1, IF=3,251.

Csákvári, E., Bede-Fazekas, Á., Horváth, F., Molnár, Zs., Halassy, M. (2021): Do environmental predictors affect the regeneration capacity of sandy habitats? A country-wide survey from Hungary. *Global Ecology and Conservation*, 27(4):e01547, Q1, IF=3,380.

Csákvári, E., Fabók, V., Bartha, S., Barta, Z., Batáry, P., Borics, G., Botta-Dukát, Z., Erős, T., Gáspár, J., Hideg, É., Kovács-Hostyánszki, A., Sramkó, G., Standovár, T., Lengyel, Sz., Liker, A., Magura, T., Márton, A., Molnár, V.A., Molnár, Zs., Oborny, B., Ódor, P., Tóthmérész, B., Török, K., Török, P., Valkó, O., Szép, T., Vörös, J., Báldi, A. (2021): Conservation biology research priorities for 2050: A Central-Eastern European perspective. *Biological Conservation*, 264:109396, D1, IF=5,990.

Csákvári, E., Halassy, M., Enyedi, A., Gyulai, F., Berke, J. (2021): Is einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.) a better choice than winter wheat (*Triticum aestivum* L.)? Wheat quality estimation for sustainable agriculture using vision-based digital image analysis. *Sustainability*, 13(21):12005, Q1, IF=3,251.

Bánfalvi, Zs., **Csákvári, E.**, Villányi, V., Kondrák, M. (2020): Generation of transgene-free PDS mutants in potato by Agrobacterium-mediated transformation. *BMC Biotechnology* 20:25, Q1, IF=2,387.

Kondrák, M., Kopp, A., Uri, Cs., Sós-Hegedűs, A., **Csákvári, E.**, Schiller, M., Barta, E., Cernák, I., Polgár, Zs., Taller, J., Bánfalvi, Zs. (2020): Mapping and DNA

sequence characterisation of the Ry_{sto} locus conferring extreme virus resistance to potato cultivar ‘White Lady’. *PLOS ONE*, 15(3):e0224534, D1, IF=2,942.

Elhani, S., Haddadi, M., **Csákvári, E.**, Zantar, S., Hamim, A., Villányi, V., Douaik, A., Bánfalvi, Zs. (2019): Effects of partial root-zone drying and deficit irrigation on yield, irrigation water-use efficiency and some potato (*Solanum tuberosum* L.) quality traits under glasshouse conditions. *Agricultural Water Management*, 224:105745, D1, IF=4,601.

Gyulai, G., Rovner, I., Vinogradov, S., Kerti, B., Emődi, A., **Csákvári, E.**, Kerekes, A., Mravcsik, Z., Gyulai, F. (2015): Digital seed morphometry of dioecious wild and crop plants – development and usefulness of the seed diversity index. *Seed Science and Technology*, 43(3):492-506, Q3, IF=0,521.

Nem IF-es (lektorált) folyóiratcikk – Idegen nyelvű:

Csákvári, E., Gyulai, F., Baktay, B., Berke, J. (2017): The role of environmental research in education based on digital image and metadata. *Journal of Applied Multimedia*, 1,12.

Nem IF-es (lektorált) folyóiratcikk – Magyar nyelvű:

Szitár, K., Csősz, M., Vaszócsik, V., Schneller, K., Csecserits, A., Kollányi, L., Teleki, M., Kiss, D., Bánhidai, A., Jáger, K., Petrik, O., Pataki, R., Lehoczki, R., Halassy, M., Tanács, E., Kertész, M., **Csákvári, E.**, Somodi, I., Lengyel, A., Gallé, R., Weiperth, A., Konkoly-Gyuró, É., Máté, K., Keszthelyi, Á.B., Török, K. (2021): Az országos zöldinfrastruktúrahálózat kijelölésének módszertana többszempontú állapotértékelés alapján. *Természetvédelmi Közlemények*, 27:145–157.

Konferencia kiadványban megjelent teljes szövegű közlemény:

Csákvári, E., Enyedi, A., Gyulai, F., Berke, J. (2020): A digitális képfeldolgozás alkalmazási lehetőségei mezőgazdasági kutatásokban. In: Berke, J. (eds.) *26th Multimedia in Education Online Conference Proceedings*, pp. 104-107.

Csákvári, E., Berke, J., Gyulai, F. (2018): Növényi stressztényezők vizsgálata multispektrális eszközökkel. In: Berke, J. (szerk.): *XXIV. Multimédia az oktatásban nemzetközi konferencia*, Budapest, pp. 185–188.

Csákvári, E., Baktay, B., Gyulai, F., Berke, J. (2016): Képi adatokra épülő környezettudományi kutatómunka szerepe az oktatásban. In: Berke J. (szerk.): *XXII. Multimédia az oktatásban nemzetközi konferencia*, Keszthely, pp. 28–32.

M3. A vetett fajták szemminőségi paramétereinek laboratóriumi mérése és kalibrációs adatai

ID	Fajta	Kalibráció: Fehérje [%]			Kalibráció: Nedvesség [%]			Kalibráció: Sikér [%]			Zeleny szám [ml]	Hektoliter tömeg 1/4- es készülék [g]	Hektoliter -tömeg [kg/hl]	Termés- hozam 9m ² -en [kg]	Termés- átlag [t/ha]
		Búza	Tönköly	Durum	Búza	Tönköly	Durum	Búza	Tönköly	Durum					
1/3	Közönséges búza, <i>Triticum aestivum</i> L., Bánkúti 1201	13.40			12.70			26.20			36.60	187.70	74.85	4.19	4.65
2/8	Közönséges búza, <i>Triticum aestivum</i> L., Bánkúti 1201	11.30			12.40			19.60			20.90	193.40	77.35	4.12	4.58
3/8	Közönséges búza, <i>Triticum aestivum</i> L., Bánkúti 1201	12.30			12.50			22.90			28.50	194.50	77.90	4.24	4.71
4/5	Közönséges búza, <i>Triticum aestivum</i> L., Bánkúti 1201	13.10			12.70			25.40			34.20	192.30	72.75	3.65	4.06
1/4	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Böződi	11.30	10.90	11.00	8.55	8.78	8.75	19.10	19.60	19.90	10.30	198.00	79.45	4.18	4.65
2/7	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Böződi	8.21	7.62	7.91	7.25	7.41	7.46	11.10	11.20	11.60	-19.89	196.30	78.70	3.61	4.01
2/7	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Böződi	7.95			7.18			10.00							
3/7	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Böződi	10.20	10.10	10.00	7.48	7.74	7.65	16.40	17.40	17.40	-2.31	196.50	78.80	4.41	4.90
4/6	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Böződi	9.48	9.74	9.32	7.92	8.09	8.19	13.50	15.40	14.60	-6.54	198.10	79.46	3.94	4.38
1/5	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., coll. Schiemann	12.50	12.50	12.30	8.54	8.78	8.80	24.10	25.30	24.90	18.20	200.10	80.35	4.00	4.44
2/6	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., coll. Schiemann	12.60	12.20	12.20	7.39	7.64	7.59	24.20	24.90	24.80	15.80	198.30	79.60	3.59	3.98
3/1	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., coll. Schiemann	13.20	13.00	12.90	7.22	7.52	7.48	26.00	26.80	26.80	20.40	198.00	79.45	2.13	2.37
4/7	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., coll. Schiemann	12.80	12.60	12.60	7.31	7.46	7.52	25.00	26.30	26.00	18.20	201.00	80.80	2.71	3.01
1/6	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Mv Alkor	11.00	10.60	10.70	8.46	8.68	8.69	18.00	19.10	18.70	7.11	192.80	77.10	3.27	3.63
2/5	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Mv Alkor	11.50	11.40	11.40	7.78	7.96	8.02	19.80	21.00	21.00	10.50	192.20	76.90	3.82	4.24
3/2	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Mv Alkor	11.40	11.10	11.30	7.30	7.50	7.51	20.00	20.70	20.80	7.38	195.80	78.40	3.11	3.46
4/2	Alakor, <i>Triticum monococcum</i> L., Mv Alkor	14.20	13.90	13.90	7.05	7.32	7.30	28.60	29.60	29.10	23.60	192.20	76.80	3.36	3.73

M4. A fitotronban nevelt búzafajták digitális geometriai paraméterkönyvtára (online melléklet)

A laboratóriumi körülmények között (fitotronban) mért geometriai paraméterek a szerzőtől kérhetők el, vagy az alábbi linken érhetők el:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1UiLPBYaHm5-_AKoKkLn18b2ib6slzrVK/edit?usp=sharing&ouid=112316852324479934237&rtpof=true&sd=true

M5. A fitotronban nevelt búzafajták RGB adatai (online melléklet)

A laboratóriumi körülmények között (fitotronban) mért RGB adatok a szerzőtől kérhetők el, vagy az alábbi linken érhetők el:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1o62GuxwN9ao9Bm6ktbek_CDdV8zkOyXy/edit?gid=1555741872#gid=1555741872

M6. Statisztikai adatelemzés

M6.1 táblázat: A termés hozam, a szemminőségi paraméterek és a fajták összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia teszttel.

Függő változó	(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
						Alsó határ	Felső határ
Terméshozam	1 (Bánkúti 1201)	2	,742*	,125	,000	,25	1,24
		3	1,031*	,125	,000	,54	1,53
		4	,096	,125	,940	-,40	,59
	2 (Mv Alkor)	1	-,742*	,125	,000	-1,24	-,25
		3	,289	,125	,146	-,21	,78
		4	-,646*	,125	,000	-1,14	-,15
	3 (Schiemann)	1	-1,031*	,125	,000	-1,53	-,54
		2	-,289	,125	,146	-,78	,21
		4	-,935*	,125	,000	-1,43	-,44
	4 (Bözödi)	1	-,096	,125	,940	-,59	,40
		2	,646*	,125	,000	,15	1,14
		3	,935*	,125	,000	,44	1,43
Fehérjetartalom	1 (Bánkúti 1201)	2	,8022*	,1898	,000	,053	1,551
		3	-,0289	,1898	1,000	-,778	,720
		4	3,2824*	,1898	,000	2,533	4,032
	2 (Mv Alkor)	1	-,8022*	,1898	,000	-1,551	-,053
		3	-,8311*	,1898	,000	-1,580	-,082
		4	2,4802*	,1898	,000	1,731	3,229
	3 (Schiemann)	1	,0289	,1898	1,000	-,720	,778
		2	,8311*	,1898	,000	,082	1,580
		4	3,3113*	,1898	,000	2,562	4,060
	4 (Bözödi)	1	-3,2824*	,1898	,000	-4,032	-2,533
		2	-2,4802*	,1898	,000	-3,229	-1,731
		3	-3,3113*	,1898	,000	-4,060	-2,562

Sikértartalom							
1 (Bánkúti 1201)	2	1,062	,582	,361	-1,23	3,36	
	3	-2,229	,582	,002	-4,53	,07	
	4	8,164*	,582	,000	5,87	10,46	
2 (Mv Alkor)	1	-1,062	,582	,361	-3,36	1,23	
	3	-3,291*	,582	,000	-5,59	-,99	
	4	7,102*	,582	,000	4,81	9,40	
3 (Schiemann)	1	2,229	,582	,002	-,07	4,53	
	2	3,291*	,582	,000	,99	5,59	
	4	10,393*	,582	,000	8,10	12,69	
4 (Bözödi)	1	-8,164*	,582	,000	-10,46	-5,87	
	2	-7,102*	,582	,000	-9,40	-4,81	
	3	-10,393*	,582	,000	-12,69	-8,10	
Hektolitertömeg							
1 (Bánkúti 1201)	2	-1,6022*	,3526	,000	-2,994	-,210	
	3	-4,3633*	,3526	,000	-5,755	-2,971	
	4	-3,3687*	,3526	,000	-4,761	-1,977	
2 (Mv Alkor)	1	1,6022*	,3526	,000	,210	2,994	
	3	-2,7611*	,3526	,000	-4,153	-1,369	
	4	-1,7664*	,3526	,000	-3,158	-,374	
3 (Schiemann)	1	4,3633*	,3526	,000	2,971	5,755	
	2	2,7611*	,3526	,000	1,369	4,153	
	4	,9947	,3526	,041	-,397	2,387	
4 (Bözödi)	1	3,3687*	,3526	,000	1,977	4,761	
	2	1,7664*	,3526	,000	,374	3,158	
	3	-,9947	,3526	,041	-2,387	,397	

M6.2 táblázat: Az általános lineáris modell (ANOVA) eredményei a legfontosabb digitális képi paraméterek kiválasztásához a magyarázó változók (fajta, kezelés, időpont) alapján.

A variancia eredete	Függő változó	Eltérés négyzetösszeg	df	Átlagos négyzetösszeg	F	Sig.	Parciális η ²
Corrected Model	Terület	2,470E12	44	5,613E10	46,038	,000	,918
	Kerület	3,658E10	44	8,314E8	22,162	,000	,844
	Szélesség	1,557E7	44	353846,753	4,159	,000	,504
	Magasság	2,844E7	44	646432,278	11,256	,000	,733
	Feret átmérő	2,864E7	44	650947,551	11,081	,000	,730
Intercept	Terület	6,993E12	1	6,993E12	5736,118	,000	,970

	Kerület	2,002E11	1	2,002E11	5337,364	,000	,967
	Szélesség	3,851E8	1	3,851E8	4525,829	,000	,962
	Magasság	6,476E8	1	6,476E8	11276,795	,000	,984
	Feret átmérő	7,509E8	1	7,509E8	12782,955	,000	,986
Fajta	Terület	3,279E11	4	8,198E10	67,243	,000	,599
	Kerület	1,397E9	4	3,492E8	9,310	,000	,171
	Szélesség	2553885,573	4	638471,393	7,504	,000	,143
	Magasság	1,500E7	4	3751117,418	65,318	,000	,592
	Feret átmérő	1,518E7	4	3794821,386	64,600	,000	,589
Kezelés	Terület	5,224E11	2	2,612E11	214,260	,000	,704
	Kerület	5,727E9	2	2,864E9	76,335	,000	,459
	Szélesség	6681195,902	2	3340597,951	39,265	,000	,304
	Magasság	1258253,902	2	629126,951	10,955	,000	,109
	Feret átmérő	2199529,271	2	1099764,636	18,722	,000	,172
Idő	Terület	1,082E12	2	5,411E11	443,804	,000	,831
	Kerület	2,437E10	2	1,218E10	324,764	,000	,783
	Szélesség	2978010,302	2	1489005,151	17,502	,000	,163
	Magasság	8692833,076	2	4346416,538	75,684	,000	,457
	Feret átmérő	7636732,089	2	3818366,044	65,001	,000	,419
Fajta * Kezelés	Terület	6,007E10	8	7,508E9	6,159	,000	,215
	Kerület	8,050E8	8	1,006E8	2,682	,008	,107
	Szélesség	336763,653	8	42095,457	,495	,859	,022
	Magasság	798471,209	8	99808,901	1,738	,092	,072
	Feret átmérő	874826,657	8	109353,332	1,862	,069	,076
Fajta * Idő	Terület	6,732E10	8	8,415E9	6,903	,000	,235
	Kerület	3,507E8	8	4,384E7	1,169	,320	,049
	Szélesség	379819,920	8	47477,490	,558	,811	,024
	Magasság	605289,902	8	75661,238	1,317	,237	,055
	Feret átmérő	946070,758	8	118258,845	2,013	,047	,082
Kezelés * Idő	Terület	3,675E11	4	9,188E10	75,366	,000	,626
	Kerület	3,665E9	4	9,161E8	24,422	,000	,352
	Szélesség	1292665,564	4	323166,391	3,798	,005	,078
	Magasság	1350663,111	4	337665,778	5,880	,000	,116
	Feret átmérő	1183547,322	4	295886,831	5,037	,001	,101
Fajta * Kezelés * Idő	Terület	4,219E10	16	2,637E9	2,163	,008	,161
	Kerület	2,696E8	16	1,685E7	,449	,967	,038
	Szélesség	1346916,213	16	84182,263	,989	,470	,081
	Magasság	733039,378	16	45814,961	,798	,687	,066
	Feret's diameter	621700,588	16	38856,287	,661	,829	,056
Error	Terület	2,194E11	180	1,219E9			
	Kerület	6,752E9	180	3,751E7			
	Szélesség	1,531E7	180	85078,702			
	Magasság	1,034E7	180	57428,331			
	Feret átmérő	1,057E7	180	58743,118			
Total	Terület	9,682E12	225				
	Kerület	2,436E11	225				

	Szélesség	4,159E8	225				
	Magasság	6,864E8	225				
	Feret átmérő	7,901E8	225				
Corrected Total	Terület	2,689E12	224				
	Kerület	4,333E10	224				
	Szélesség	3,088E7	224				
	Magasság	3,878E7	224				
	Feret átmérő	3,922E7	224				

M6.3 táblázat: A terület és az első mérési időpontban végzett kezelések közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia tesztel.
(Kezelés: 1 – Kontroll, 2 – Tápanyaghiány, 3 – Szárazság; Fajta: 1 – MvMagdaléna, 2 – Bánkúti 1201, 3 – MvAlkor, 4 – Schiemann, 5 – Bözödi)

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Felső határ
1	2	4967,040	9277,948	,854	-17236,24	27170,32
	3	16132,160	9277,948	,198	-6071,12	38335,44
2	1	-4967,040	9277,948	,854	-27170,32	17236,24
	3	11165,120	9277,948	,455	-11038,16	33368,40
3	1	-16132,160	9277,948	,198	-38335,44	6071,12
	2	-11165,120	9277,948	,455	-33368,40	11038,16
(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Felső határ
1	2	-6177,867	9464,287	,966	-32679,32	20323,58
	3	36571,800*	9464,287	,002	10070,35	63073,25
	4	43443,267*	9464,287	,000	16941,82	69944,72
	5	39593,400*	9464,287	,001	13091,95	66094,85
2	1	6177,867	9464,287	,966	-20323,58	32679,32
	3	42749,667*	9464,287	,000	16248,22	69251,12
	4	49621,133*	9464,287	,000	23119,68	76122,58
	5	45771,267*	9464,287	,000	19269,82	72272,72
3	1	-36571,800*	9464,287	,002	-63073,25	-10070,35
	2	-42749,667*	9464,287	,000	-69251,12	-16248,22
	4	6871,467	9464,287	,950	-19629,98	33372,92
	5	3021,600	9464,287	,998	-23479,85	29523,05
4	1	-43443,267*	9464,287	,000	-69944,72	-16941,82
	2	-49621,133*	9464,287	,000	-76122,58	-23119,68
	3	-6871,467	9464,287	,950	-33372,92	19629,98
	5	-3849,867	9464,287	,994	-30351,32	22651,58
5	1	-39593,400*	9464,287	,001	-66094,85	-13091,95
	2	-45771,267*	9464,287	,000	-72272,72	-19269,82
	3	-3021,600	9464,287	,998	-29523,05	23479,85
	4	3849,867	9464,287	,994	-22651,58	30351,32

M6.4 táblázat: A terület és a második mérési időpontban végzett kezelések közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia teszttel.
(Kezelés: 1 – Kontroll, 2 – Tápanyaghiány, 3 – Szárazság; Fajta: 1 – MvMagdaléna, 2 – Bánkúti 1201, 3 – MvAlkor, 4 – Schiemann, 5 – Böződi)

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	-20917,200	13000,007	,248	-52027,83	10193,43
	3	63907,160*	13000,007	,000	32796,53	95017,79
2	1	20917,200	13000,007	,248	-10193,43	52027,83
	3	84824,360*	13000,007	,000	53713,73	115934,99
3	1	-63907,160*	13000,007	,000	-95017,79	-32796,53
	2	-84824,360*	13000,007	,000	-115934,99	-53713,73
(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	2970,400	17975,205	1,000	-47362,92	53303,72
	3	63818,067*	17975,205	,006	13484,74	114151,39
	4	67301,667*	17975,205	,003	16968,34	117634,99
	5	72646,333*	17975,205	,001	22313,01	122979,66
2	1	-2970,400	17975,205	1,000	-53303,72	47362,92
	3	60847,667*	17975,205	,010	10514,34	111180,99
	4	64331,267*	17975,205	,006	13997,94	114664,59
	5	69675,933*	17975,205	,002	19342,61	120009,26
3	1	-63818,067*	17975,205	,006	-114151,39	-13484,74
	2	-60847,667*	17975,205	,010	-111180,99	-10514,34
	4	3483,600	17975,205	1,000	-46849,72	53816,92
	5	8828,267	17975,205	,988	-41505,06	59161,59
4	1	-67301,667*	17975,205	,003	-117634,99	-16968,34
	2	-64331,267*	17975,205	,006	-114664,59	-13997,94
	3	-3483,600	17975,205	1,000	-53816,92	46849,72
	5	5344,667	17975,205	,998	-44988,66	55677,99
5	1	-72646,333*	17975,205	,001	-122979,66	-22313,01
	2	-69675,933*	17975,205	,002	-120009,26	-19342,61
	3	-8828,267	17975,205	,988	-59161,59	41505,06
	4	-5344,667	17975,205	,998	-55677,99	44988,66

M6.5 táblázat: A terület és a harmadik mérési időpontban végzett kezelések közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia teszttel.
(Kezelés: 1 – Kontroll, 2 – Tápanyaghiány, 3 – Szárazság; Fajta: 1 – MvMagdaléna, 2 – Bánkúti 1201, 3 – MvAlkor, 4 – Schiemann, 5 – Böződi)

(I) Kezelés	(J) Kezelés	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	-40768,400	23270,246	,193	-96456,98	14920,18
	3	194293,880*	23270,246	,000	138605,30	249982,46
2	1	40768,400	23270,246	,193	-14920,18	96456,98
	3	235062,280*	23270,246	,000	179373,70	290750,86
3	1	-194293,880*	23270,246	,000	-249982,46	-138605,30

	2	-235062,280*	23270,246	,000	-290750,86	-179373,70
(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	-32772,533	43533,862	,943	-154674,01	89128,94
	3	105936,667	43533,862	,119	-15964,81	227838,14
	4	99090,000	43533,862	,165	-22811,47	220991,47
	5	114243,400	43533,862	,077	-7658,07	236144,87
2	1	32772,533	43533,862	,943	-89128,94	154674,01
	3	138709,200*	43533,862	,018	16807,73	260610,67
	4	131862,533*	43533,862	,027	9961,06	253764,01
	5	147015,933*	43533,862	,010	25114,46	268917,41
3	1	-105936,667	43533,862	,119	-227838,14	15964,81
	2	-138709,200*	43533,862	,018	-260610,67	-16807,73
	4	-6846,667	43533,862	1,000	-128748,14	115054,81
	5	8306,733	43533,862	1,000	-113594,74	130208,21
4	1	-99090,000	43533,862	,165	-220991,47	22811,47
	2	-131862,533*	43533,862	,027	-253764,01	-9961,06
	3	6846,667	43533,862	1,000	-115054,81	128748,14
	5	15153,400	43533,862	,997	-106748,07	137054,87
5	1	-114243,400	43533,862	,077	-236144,87	7658,07
	2	-147015,933*	43533,862	,010	-268917,41	-25114,46
	3	-8306,733	43533,862	1,000	-130208,21	113594,74
	4	-15153,400	43533,862	,997	-137054,87	106748,07

M6.6 táblázat: A terület és a kontroll cserepek közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia teszttel. (Fajta: 1 – MvMagdaléna, 2 – Bánkúti 1201, 3 – MvAlkor, 4 – Schiemann, 5 – Bözödi)

(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	-47300,667	37662,563	,719	-152761,60	58160,27
	3	83408,933	37662,563	,186	-22052,00	188869,87
	4	82474,733	37662,563	,196	-22986,20	187935,67
	5	85896,400	37662,563	,163	-19564,54	191357,34
2	1	47300,667	37662,563	,719	-58160,27	152761,60
	3	130709,600*	37662,563	,008	25248,66	236170,54
	4	129775,400*	37662,563	,008	24314,46	235236,34
	5	133197,067*	37662,563	,006	27736,13	238658,00
3	1	-83408,933	37662,563	,186	-188869,87	22052,00
	2	-130709,600*	37662,563	,008	-236170,54	-25248,66
	4	-934,200	37662,563	1,000	-106395,14	104526,74
	5	2487,467	37662,563	1,000	-102973,47	107948,40
4	1	-82474,733	37662,563	,196	-187935,67	22986,20
	2	-129775,400*	37662,563	,008	-235236,34	-24314,46
	3	934,200	37662,563	1,000	-104526,74	106395,14
	5	3421,667	37662,563	1,000	-102039,27	108882,60

5	1	-85896,400	37662,563	,163	-191357,34	19564,54
	2	-133197,067*	37662,563	,006	-238658,00	-27736,13
	3	-2487,467	37662,563	1,000	-107948,40	102973,47
	4	-3421,667	37662,563	1,000	-108882,60	102039,27

M6.7 táblázat: A terület és a tápanyaghiányra kezelt cserepek közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia teszttel. (Fajta: 1 – MvMagdaléna, 2 – Bánkúti 1201, 3 – MvAlkor, 4 – Schiemann, 5 – Böződi)

(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	6175,933	43044,161	1,000	-114354,30	126706,17
	3	79270,400	43044,161	,358	-41259,83	199800,63
	4	89549,400	43044,161	,240	-30980,83	210079,63
	5	97547,067	43044,161	,168	-22983,17	218077,30
2	1	-6175,933	43044,161	1,000	-126706,17	114354,30
	3	73094,467	43044,161	,442	-47435,77	193624,70
	4	83373,467	43044,161	,308	-37156,77	203903,70
	5	91371,133	43044,161	,222	-29159,10	211901,37
3	1	-79270,400	43044,161	,358	-199800,63	41259,83
	2	-73094,467	43044,161	,442	-193624,70	47435,77
	4	10279,000	43044,161	,999	-110251,23	130809,23
	5	18276,667	43044,161	,993	-102253,57	138806,90
4	1	-89549,400	43044,161	,240	-210079,63	30980,83
	2	-83373,467	43044,161	,308	-203903,70	37156,77
	3	-10279,000	43044,161	,999	-130809,23	110251,23
	5	7997,667	43044,161	1,000	-112532,57	128527,90
5	1	-97547,067	43044,161	,168	-218077,30	22983,17
	2	-91371,133	43044,161	,222	-211901,37	29159,10
	3	-18276,667	43044,161	,993	-138806,90	102253,57
	4	-7997,667	43044,161	1,000	-128527,90	112532,57

M6.8 táblázat: A terület és a szárazságkezelt cserepek közti összefüggés többszörös összehasonlítása Tukey post hoc szignifikancia teszttel. (Fajta: 1 – MvMagdaléna, 2 – Bánkúti 1201, 3 – MvAlkor, 4 – Schiemann, 5 – Böződi)

(I) Fajta	(J) Fajta	Átlagos eltérés (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Konfidencia intervallum	
					Alsó határ	Alsó határ
1	2	5144,733	10793,270	,989	-25078,07	35367,54
	3	43647,200*	10793,270	,001	13424,39	73870,01
	4	37810,800*	10793,270	,007	7587,99	68033,61
	5	43039,667*	10793,270	,001	12816,86	73262,47
2	1	-5144,733	10793,270	,989	-35367,54	25078,07
	3	38502,467*	10793,270	,006	8279,66	68725,27
	4	32666,067*	10793,270	,028	2443,26	62888,87
	5	37894,933*	10793,270	,007	7672,13	68117,74

3	1	-43647,200*	10793,270	,001	-73870,01	-13424,39
	2	-38502,467*	10793,270	,006	-68725,27	-8279,66
	4	-5836,400	10793,270	,983	-36059,21	24386,41
	5	-607,533	10793,270	1,000	-30830,34	29615,27
4	1	-37810,800*	10793,270	,007	-68033,61	-7587,99
	2	-32666,067*	10793,270	,028	-62888,87	-2443,26
	3	5836,400	10793,270	,983	-24386,41	36059,21
	5	5228,867	10793,270	,989	-24993,94	35451,67
5	1	-43039,667*	10793,270	,001	-73262,47	-12816,86
	2	-37894,933*	10793,270	,007	-68117,74	-7672,13
	3	607,533	10793,270	1,000	-29615,27	30830,34
	4	-5228,867	10793,270	,989	-35451,67	24993,94

M6.1 melléklet: A nagygombosi légi felvétel RGB adataiból származtatott vegetációs indexek statisztikai elemzése. ANOVA teszt: a fajták vegetációs indexének eltérése egymáshoz képest, Tukey-teszt: a fajták vegetációs indexének páronkénti eltérése.

BGI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
nagygompos_legi\$Fajta	3	0.00628	0.002093	0.657	0.594
Residuals	12	0.03820	0.003183		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	-0.046133838	-0.1645804	0.07231272	0.6637356
MvAlkor-Bánkúti1201	-0.047651168	-0.1660977	0.07079539	0.6416097
Schiemann-Bánkúti1201	-0.042953783	-0.1614003	0.07549278	0.7095475
MvAlkor-Bözödi	-0.001517330	-0.1199639	0.11692923	0.9999790
Schiemann-Bözödi	0.003180055	-0.1152665	0.12162662	0.9998076
Schiemann-MvAlkor	0.004697385	-0.1137492	0.12314395	0.9993820

BI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
nagygompos_legi\$Fajta	3	7.971e+15	2.657e+15	2.293	0.13
Residuals	12	1.390e+16	1.159e+15		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	13183394	-58273729	84640517	0.9453917
MvAlkor-Bánkúti1201	-44613259	-116070382	26843864	0.2971481
Schiemann-Bánkúti1201	-24990159	-96447282	46466965	0.7311514
MvAlkor-Bözödi	-57796653	-129253776	13660470	0.1297108
Schiemann-Bözödi	-38173553	-109630676	33283570	0.4216633
Schiemann-MvAlkor	19623100	-51834023	91080223	0.8461344

ExB

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.001702	0.0005672	0.65	0.598
Residuals	12	0.010465	0.0008721		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	-0.023455974	-0.08545166	0.03853971	0.6828665

MvAlkor-Bánkúti1201	-0.025757935	-0.08775362	0.03623775	0.6187787
Schiemann-Bánkúti1201	-0.021446436	-0.08344212	0.04054925	0.7374130
MvAlkor-Bözödi	-0.002301961	-0.06429764	0.05969372	0.9994924
Schiemann-Bözödi	0.002009538	-0.05998615	0.06400522	0.9996618
Schiemann-MvAlkor	0.004311499	-0.05768419	0.06630718	0.9967117

GCC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.0003107	0.0001036	0.691	0.575
Residuals	12	0.0017982	0.0001499		

Bözödi-Bánkúti1201	0.0065002786	-0.01919814	0.03219870	0.8745365
MvAlkor-Bánkúti1201	0.0110396797	-0.01465874	0.03673810	0.5943525
Schiemann-Bánkúti1201	0.0104795071	-0.01521891	0.03617792	0.6321075
MvAlkor-Bözödi	0.0045394011	-0.02115902	0.03023782	0.9515348
Schiemann-Bözödi	0.0039792285	-0.02171919	0.02967764	0.9664062
Schiemann-MvAlkor	-0.0005601726	-0.02625859	0.02513824	0.9998969

GLI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.001374	0.0004581	0.689	0.576
Residuals	12	0.007978	0.0006649		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.0138536727	-0.04027716	0.06798451	0.8707799
MvAlkor-Bánkúti1201	0.0230367612	-0.03109407	0.07716760	0.6012901
Schiemann-Bánkúti1201	0.0222715900	-0.03185925	0.07640243	0.6257795
MvAlkor-Bözödi	0.0091830885	-0.04494775	0.06331392	0.9566552
Schiemann-Bözödi	0.0084179173	-0.04571292	0.06254875	0.9659981
Schiemann-MvAlkor	-0.0007651712	-0.05489601	0.05336566	0.9999719

GR

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.005337	0.001779	0.897	0.471
Residuals	12	0.023797	0.001983		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.0008747035	-0.09261249	0.09436190	0.9999918
MvAlkor-Bánkúti1201	0.0334443481	-0.06004285	0.12693154	0.7177829
Schiemann-Bánkúti1201	0.0399013428	-0.05358585	0.13338854	0.5991526
MvAlkor-Bözödi	0.0325696446	-0.06091755	0.12605684	0.7333643
Schiemann-Bözödi	0.0390266394	-0.05446056	0.13251384	0.6153562
Schiemann-MvAlkor	0.0064569948	-0.08703020	0.09994419	0.9967780

HUE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.000225	7.501e-05	0.565	0.649
Residuals	12	0.001594	1.328e-04		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	-0.0082454260	-0.03243951	0.01594866	0.7458355
MvAlkor-Bánkúti1201	-0.0028202512	-0.02701434	0.02137383	0.9850574

Schiemann-Bánkúti1201	-0.0089966076	-0.03319069	0.01519748	0.6939508
MvAlkor-Bözödi	0.0054251748	-0.01876891	0.02961926	0.9079347
Schiemann-Bözödi	-0.0007511816	-0.02494527	0.02344290	0.9997027
Schiemann-MvAlkor	-0.0061763564	-0.03037044	0.01801773	0.8715969

MGRVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.004216	0.001405	0.886	0.476
Residuals	12	0.019030	0.001586		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.001220517	-0.08238043	0.08482146	0.9999690
MvAlkor-Bánkúti1201	0.029767631	-0.05383332	0.11336858	0.7205858
Schiemann-Bánkúti1201	0.035795983	-0.04780496	0.11939693	0.5967895
MvAlkor-Bözödi	0.028547114	-0.05505383	0.11214806	0.7447472
Schiemann-Bözödi	0.034575466	-0.04902548	0.11817641	0.6220751
Schiemann-MvAlkor	0.006028352	-0.07757259	0.08962930	0.9963400

TGI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	45.4	15.14	0.482	0.701
Residuals	12	376.7	31.40		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	4.698565	-7.064360	16.461490	0.6465623
MvAlkor-Bánkúti1201	2.194937	-9.567988	13.957863	0.9436745
Schiemann-Bánkúti1201	2.930152	-8.832773	14.693078	0.8792983
MvAlkor-Bözödi	-2.503627	-14.266553	9.259298	0.9197481
Schiemann-Bözödi	-1.768412	-13.531338	9.994513	0.9690852
Schiemann-MvAlkor	0.735215	-11.027710	12.498140	0.9976038

MVARI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.003606	0.001202	0.658	0.593
Residuals	12	0.021923	0.001827		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.0318737370	-0.05785639	0.12160386	0.7220068
MvAlkor-Bánkúti1201	0.0358372329	-0.05389289	0.12556736	0.6466477
Schiemann-Bánkúti1201	0.0357130201	-0.05401711	0.12544315	0.6490413
MvAlkor-Bözödi	0.0039634959	-0.08576663	0.09369362	0.9991474
Schiemann-Bözödi	0.0038392831	-0.08589084	0.09356941	0.9992247
Schiemann-MvAlkor	-0.0001242128	-0.08985434	0.08960591	1.0000000

RCC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.0001491	4.970e-05	1.131	0.376
Residuals	12	0.0005273	4.394e-05		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.0056109326	-0.008305101	0.019526966	0.6400550
MvAlkor-Bánkúti1201	-0.0005266403	-0.014442673	0.013389393	0.9994627
Schiemann-Bánkúti1201	-0.0026459865	-0.016562020	0.011270047	0.9407165

MvAlkor-Bözödi	-0.0061375729	-0.020053606	0.007778460	0.5745862
Schiemann-Bözödi	-0.0082569192	-0.022172952	0.005659114	0.3368249
Schiemann-MvAlkor	-0.0021193463	-0.016035379	0.011796687	0.9679377

RGBVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	39749471	13249824	1.843	0.193
Residuals	12	86285519	7190460		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	1557.016	-4072.345	7186.376	0.8434205
MvAlkor-Bánkúti1201	-2713.196	-8342.556	2916.165	0.5052247
Schiemann-Bánkúti1201	-1277.747	-6907.108	4351.613	0.9049648
MvAlkor-Bözödi	-4270.212	-9899.572	1359.149	0.1644993
Schiemann-Bözödi	-2834.763	-8464.124	2794.598	0.4698569
Schiemann-MvAlkor	1435.449	-4193.912	7064.809	0.8719638

PRI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.003517	0.001172	0.88	0.479
Residuals	12	0.015991	0.001333		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	-0.001430045	-0.07806578	0.07520569	0.9999353
MvAlkor-Bánkúti1201	-0.027242651	-0.10387838	0.04939308	0.7215649
Schiemann-Bánkúti1201	-0.032908790	-0.10954452	0.04372694	0.5946423
MvAlkor-Bözödi	-0.025812605	-0.10244834	0.05082313	0.7523210
Schiemann-Bözödi	-0.031478745	-0.10811448	0.04515699	0.6269613
Schiemann-MvAlkor	-0.005666139	-0.08230187	0.07096959	0.9960589

VEG

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.00710	0.002366	0.739	0.549
Residuals	12	0.03843	0.003202		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.023600795	-0.09520110	0.1424027	0.9332550
MvAlkor-Bánkúti1201	0.051548804	-0.06725309	0.1703507	0.5868896
Schiemann-Bánkúti1201	0.049349372	-0.06945252	0.1681513	0.6189301
MvAlkor-Bözödi	0.027948009	-0.09085388	0.1467499	0.8957238
Schiemann-Bözödi	0.025748577	-0.09305332	0.1445505	0.9158056
Schiemann-MvAlkor	-0.002199432	-0.12100133	0.1166025	0.9999368

vNDVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	0.000225	7.501e-05	0.565	0.649
Residuals	12	0.001594	1.328e-04		

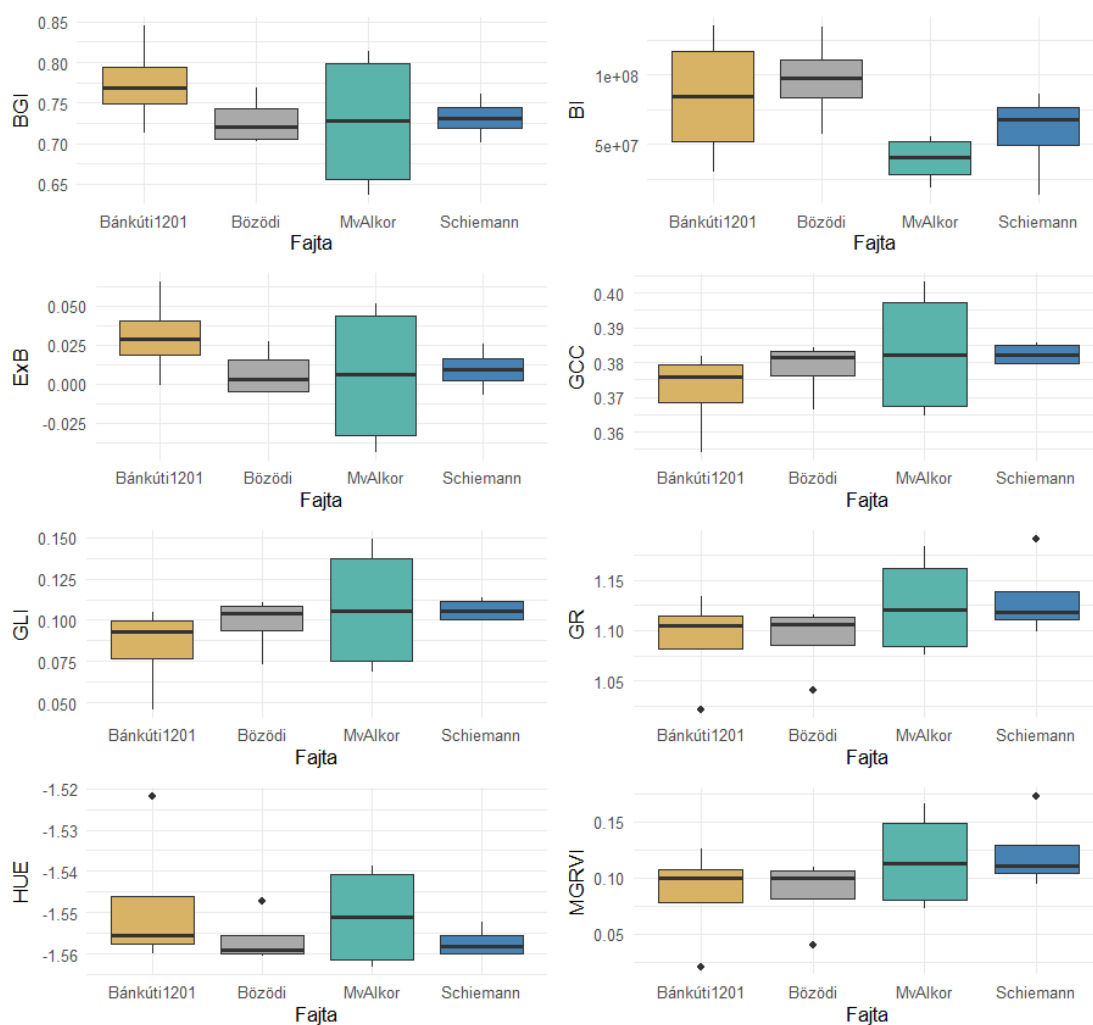
	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	-0.0082454260	-0.03243951	0.01594866	0.7458355
MvAlkor-Bánkúti1201	-0.0028202512	-0.02701434	0.02137383	0.9850574
Schiemann-Bánkúti1201	-0.0089966076	-0.03319069	0.01519748	0.6939508

MvAlkor-Bözödi	0.0054251748	-0.01876891	0.02961926	0.9079347
Schiemann-Bözödi	-0.0007511816	-0.02494527	0.02344290	0.9997027
Schiemann-MvAlkor	-0.0061763564	-0.03037044	0.01801773	0.8715969

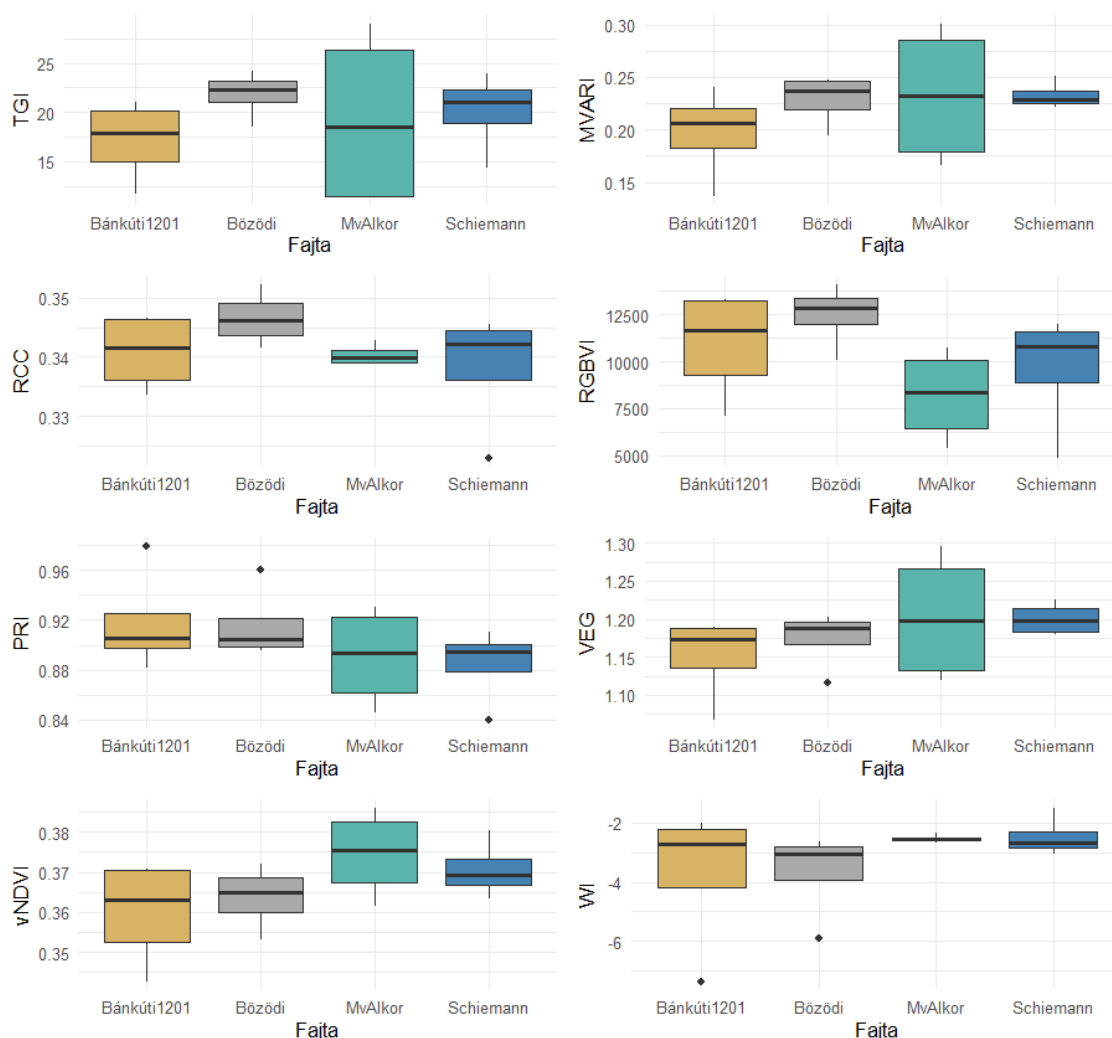
WI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	3	5.549	1.850	0.824	0.505
Residuals	12	26.926	2.244		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti1201	0.03260308	-3.112050	3.177257	0.9999889
MvAlkor-Bánkúti1201	1.16187886	-1.982775	4.306532	0.6979853
Schiemann-Bánkúti1201	1.22420574	-1.920448	4.368859	0.6640685
MvAlkor-Bözödi	1.12927578	-2.015378	4.273929	0.7154900
Schiemann-Bözödi	1.19160265	-1.953051	4.336256	0.6818721
Schiemann-MvAlkor	0.06232687	-3.082327	3.206980	0.9999225



M6.1 ábra: A fajták közti eltérések kimutatása az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel: BGI, BI, ExB, GCC, GLI, GR, HUE, MGRVI.



M6.2 ábra: A fajták közti eltérések kimutatása az RGB adatokból származtatott vegetációs indexekkel: TGI, MVARI, RCC, RGBVI, PRI, VEG, vNDVI, WI.

M6.2 melléklet: A fitotronban nevelt fajták RGB adataiból származtatott vegetációs indexek statisztikai elemzése a kezelésekre. ANOVA teszt: a fajták vegetációs indexének eltérése egymáshoz képest, Tukey-teszt: a fajták vegetációs indexének páronkénti eltérése.

BGI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$kezelés	2	0.1468	0.07340	11.88	1.25e-05 ***
Residuals	222	1.3716	0.00618		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	0.05884631	0.02855988	0.08913275	0.0000226
Tápanyaghiány-Kontroll	0.01102048	-0.01926595	0.04130691	0.6669463
Tápanyaghiány-Szárazság	-0.04782583	-0.07811226	-0.01753940	0.0007197

BI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$kezelés	2	3.209e+14	1.605e+14	12.76	5.68e-06 ***
Residuals	222	2.792e+15	1.258e+13		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	2466390.7	1099979	3832803	0.0000897
Tápanyaghiány-Kontroll	-129349.2	-1495761	1237063	0.9728748
Tápanyaghiány-Szárazság	-2595740.0	-3962152	-1229328	0.0000351

ExB

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
kezelés	2	0.0842	0.04210	13.21	3.81e-06 ***
Residuals	222	0.7077	0.00319		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	0.044214684	0.02245994	0.06596942	0.0000089
Tápanyaghiány-Kontroll	0.007352753	-0.01440199	0.02910749	0.7049586
Tápanyaghiány-Szárazság	-0.036861930	-0.05861667	-0.01510719	0.0002557

GCC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
kezelés	2	0.01400	0.007000	21.4	3.16e-09 ***
Residuals	222	0.07261	0.000327		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	-0.0169954446	-0.023963691	-0.010027198	0.0000001
Tápanyaghiány-Kontroll	-0.0005368148	-0.007505061	0.006431431	0.9819510
Tápanyaghiány-Szárazság	0.0164586297	0.009490383	0.023426876	0.0000002

GLI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
kezelés	2	0.05446	0.027230	22.17	1.67e-09 ***
Residuals	222	0.27272	0.001228		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	-0.0334817253	-0.04698676	-0.01997669	0.0000001
Tápanyaghiány-Kontroll	-0.0009791513	-0.01448419	0.01252589	0.9839964
Tápanyaghiány-Szárazság	0.0325025740	0.01899754	0.04600761	0.0000001

GR

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
kezelés	2	0.0776	0.03879	11.44	1.87e-05 ***
Residuals	222	0.7529	0.00339		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	-0.03445805	-0.05689715	-0.01201895	0.0010468
Tápanyaghiány-Kontroll	0.00848028	-0.01395882	0.03091938	0.6460932
Tápanyaghiány-Szárazság	0.04293833	0.02049923	0.06537743	0.0000305

HUE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
kezelés	2	96.8	48.41	30.95	1.4e-12 ***
Residuals	222	347.3	1.56		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	1.137204	0.6552717	1.61913577	0.0000002
Tápanyaghiány-Kontroll	-0.414512	-0.8964440	0.06742009	0.1075631
Tápanyaghiány-Szárazság	-1.551716	-2.0336477	-1.06978363	0.0000000

MGRVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
Kezelés	2	0.0796	0.03982	11.6	1.61e-05	***		
Residuals	222	0.7619	0.00343					
				diff	lwr	upr	p adj	
Szárazság-Kontroll			-0.034874045	-0.05744626	-0.01230183	0.0009663		
Tápanyaghiány-Kontroll			0.008652322	-0.01391990	0.03122454	0.6380615		
Tápanyaghiány-Szárazság			0.043526367	0.02095415	0.06609859	0.0000262		

TGI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
Kezelés	2	266	133.08	4.764	0.00942	**		
Residuals	222	6201	27.93					
				diff	lwr	upr	p adj	
Szárazság-Kontroll			-2.4111129	-4.4475926	-0.3746332	0.0155838		
Tápanyaghiány-Kontroll			-0.2242219	-2.2607016	1.8122578	0.9634848		
Tápanyaghiány-Szárazság			2.1868911	0.1504114	4.2233708	0.0319830		

MVARI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
Kezelés	2	0.04028	0.020139	22.24	1.57e-09	***		
Residuals	222	0.20103	0.000906					
				diff	lwr	upr	p adj	
Szárazság-Kontroll			-0.029095354	-0.04069015	-0.01750055	0.0000000		
Tápanyaghiány-Kontroll			-0.001483588	-0.01307839	0.01011121	0.9510084		
Tápanyaghiány-Szárazság			0.027611766	0.01601697	0.03920657	0.0000002		

RCC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
Kezelés	2	0.00071	0.0003538	0.746	0.476			
Residuals	222	0.10534	0.0004745					
				diff	lwr	upr	p adj	
Szárazság-Kontroll			-0.002446869	-0.01084006	0.005946317	0.7708131		
Tápanyaghiány-Kontroll			-0.004331713	-0.01272490	0.004061474	0.4439308		
Tápanyaghiány-Szárazság			-0.001884844	-0.01027803	0.006508343	0.8567602		

RGBVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
Kezelés	2	4633493	2316747	2.956	0.0541	.		
Residuals	222	173965265	783627					
				diff	lwr	upr	p adj	
Szárazság-Kontroll			300.248753	-40.83958	641.33709	0.0969556		
Tápanyaghiány-Kontroll			-8.172429	-349.26076	332.91590	0.9982395		
Tápanyaghiány-Szárazság			-308.421183	-649.50952	32.66715	0.0854531		

PRI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)			
Kezelés	2	0.0824	0.04119	11.52	1.74e-05	***		
Residuals	222	0.7941	0.00358					

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	0.035538602	0.01249397	0.05858324	0.0009900
Tápanyaghiány-Kontroll	-0.008696808	-0.03174145	0.01434783	0.6468886
Tápanyaghiány-Szárazság	-0.044235410	-0.06728005	-0.02119077	0.0000287

VEG

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Kezelés	2	0.750	0.3751	14.89	8.54e-07 ***
Residuals	222	5.593	0.0252		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	-0.13181806	-0.19297624	-0.07065988	0.0000023
Tápanyaghiány-Kontroll	-0.02148105	-0.08263923	0.03967714	0.6855831
Tápanyaghiány-Szárazság	0.11033701	0.04917883	0.17149519	0.0000905

vNDVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Kezelés	2	0.0509	0.025463	10.24	5.58e-05 ***
Residuals	222	0.5521	0.002487		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	-0.035416486	-0.054632413	-0.01620056	0.0000618
Tápanyaghiány-Kontroll	-0.008889363	-0.028105290	0.01032656	0.5203167
Tápanyaghiány-Szárazság	0.026527123	0.007311196	0.04574305	0.0037095

WI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Kezelés	2	749208	374604	0.681	0.507
Residuals	222	122167541	550304		

	diff	lwr	upr	p adj
Szárazság-Kontroll	-103.46955	-389.3033	182.3642	0.6697317
Tápanyaghiány-Kontroll	-135.12958	-420.9633	150.7042	0.5055319
Tápanyaghiány-Szárazság	-31.66003	-317.4938	254.1737	0.9630533

M6.3 melléklet: A fitotronban nevelt fajták RGB adataiból származtatott vegetációs indexek statisztikai elemzése a fajták detektálására. ANOVA teszt: a fajták vegetációs indexének eltérése egymáshoz képest, Tukey-teszt: a fajták vegetációs indexének páronkénti eltérése.

BGI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$Fajta	4	0.3658	0.09144	17.52	1.73e-12 ***
Residuals	219	1.1430	0.00522		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	0.086694327	0.044564074	0.128824580	0.0000005
MvAlkor-Bánkúti	0.051865477	0.009735223	0.093995730	0.0074272
MvMagdaléna-Bánkúti	-0.002678181	-0.044808435	0.039452072	0.9997894
Schiemann-Bánkúti	0.090722908	0.048592655	0.132853161	0.0000001
MvAlkor-Bözödi	-0.034828850	-0.076721748	0.007064047	0.1530689
MvMagdaléna-Bözödi	-0.089372508	-0.131265406	-0.047479611	0.0000002

Schiemann-Bözödi	0.004028582	-0.037864316	0.045921479	0.9989173
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.054543658	-0.096436556	-0.012650760	0.0038224
Schiemann-MvAlkor	0.038857432	-0.003035466	0.080750329	0.0833167
Schiemann-MvMagdaléna	0.093401090	0.051508192	0.135293987	0.0000000

BI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
data\$Fajta	4	6.156e+14	1.539e+14	13.5	7.5e-10 ***
Residuals	219	2.497e+15	1.140e+13		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-4690779.9	-6659992.1	-2721567.6	0.0000000
MvAlkor-Bánkúti	-4350229.5	-6319441.8	-2381017.3	0.0000001
MvMagdaléna-Bánkúti	-2518864.7	-4488077.0	-549652.5	0.0047533
Schiemann-Bánkúti	-2847800.2	-4817012.4	-878587.9	0.0008909
MvAlkor-Bözödi	340550.4	-1617567.6	2298668.4	0.9892492
MvMagdaléna-Bözödi	2171915.1	213797.1	4130033.1	0.0213705
Schiemann-Bözödi	1842979.7	-115138.3	3801097.7	0.0759270
MvMagdaléna-MvAlkor	1831364.8	-126753.2	3789482.8	0.0790678
Schiemann-MvAlkor	1502429.3	-455688.7	3460547.3	0.2192874
Schiemann-MvMagdaléna	-328935.4	-2287053.4	1629182.6	0.9905753

ExB

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.2086	0.05216	19.68	7.37e-14 ***
Residuals	219	0.5832	0.00265		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	0.064393753	0.034537394	0.094250111	0.0000001
MvAlkor-Bánkúti	0.040580089	0.010723730	0.070436447	0.0021797
MvMagdaléna-Bánkúti	-0.003688666	-0.033545024	0.026167692	0.9971133
Schiemann-Bánkúti	0.067067166	0.037210807	0.096923524	0.0000000
MvAlkor-Bözödi	-0.023813664	-0.053670022	0.006042694	0.1858710
MvMagdaléna-Bözödi	-0.068082419	-0.097938777	-0.038226061	0.0000000
Schiemann-Bözödi	0.002673413	-0.027182945	0.032529771	0.9991826
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.044268755	-0.074125113	-0.014412397	0.0006022
Schiemann-MvAlkor	0.026487077	-0.003369281	0.056343435	0.1086397
Schiemann-MvMagdaléna	0.070755832	0.040899474	0.100612190	0.0000000

GCC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.02037	0.005093	16.92	4.2e-12 ***
Residuals	219	0.06593	0.000301		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.0171344026	-0.027252540	-0.007016265	0.0000541
MvAlkor-Bánkúti	-0.0120891110	-0.022207248	-0.001970974	0.0102900
MvMagdaléna-Bánkúti	0.0059274423	-0.004190695	0.016045580	0.4917087
Schiemann-Bánkúti	-0.0178160443	-0.027934182	-0.007697907	0.0000237
MvAlkor-Bözödi	0.0050452916	-0.005015842	0.015106425	0.6415570
MvMagdaléna-Bözödi	0.0230618449	0.013000712	0.033122978	0.0000000
Schiemann-Bözödi	-0.0006816417	-0.010742775	0.009379492	0.9997288

MvMagdaléna-MvAlkor	0.0180165534	0.007955420	0.028077687	0.0000163
Schiemann-MvAlkor	-0.0057269332	-0.015788067	0.004334200	0.5210273
Schiemann-MvMagdaléna	-0.0237434866	-0.033804620	-0.013682353	0.0000000

GLI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.07562	0.018906	16.54	7.43e-12 ***
Residuals	219	0.25039	0.001143		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.032884835	-0.052603793	-0.013165878	0.0000736
MvAlkor-Bánkúti	-0.023018981	-0.042737939	-0.003300023	0.0130843
MvMagdaléna-Bánkúti	0.011597025	-0.008121932	0.031315983	0.4876906
Schiemann-Bánkúti	-0.034288128	-0.054007085	-0.014569170	0.0000311
MvAlkor-Bözödi	0.009865854	-0.009742010	0.029473718	0.6385773
MvMagdaléna-Bözödi	0.044481861	0.024873997	0.064089725	0.0000000
Schiemann-Bözödi	-0.001403292	-0.021011156	0.018204572	0.9996629
MvMagdaléna-MvAlkor	0.034616007	0.015008142	0.054223871	0.0000224
Schiemann-MvAlkor	-0.011269146	-0.030877010	0.008338718	0.5112626
Schiemann-MvMagdaléna	-0.045885153	-0.065493017	-0.026277289	0.0000000

GR

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.0401	0.010014	2.775	0.028 *
Residuals	219	0.7903	0.003609		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.0020372925	-0.037070747	0.032996162	0.9998521
MvAlkor-Bánkúti	-0.0093485760	-0.044382031	0.025684879	0.9483455
MvMagdaléna-Bánkúti	0.0292439216	-0.005789533	0.064277376	0.1500529
Schiemann-Bánkúti	-0.0009419305	-0.035975385	0.034091524	0.9999932
MvAlkor-Bözödi	-0.0073112835	-0.042147365	0.027524798	0.9782801
MvMagdaléna-Bözödi	0.0312812141	-0.003554867	0.066117296	0.1013310
Schiemann-Bözödi	0.0010953621	-0.033740719	0.035931443	0.9999873
MvMagdaléna-MvAlkor	0.0385924976	0.003756416	0.073428579	0.0216093
Schiemann-MvAlkor	0.0084066456	-0.026429436	0.043242727	0.9638672
Schiemann-MvMagdaléna	-0.0301858520	-0.065021933	0.004650229	0.1237282

HUE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	11.5	2.879	1.458	0.216
Residuals	219	432.4	1.975		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.070557457	-0.8900344	0.7489194	0.9992996
MvAlkor-Bánkúti	0.003067471	-0.8164094	0.8225444	1.0000000
MvMagdaléna-Bánkúti	-0.603425890	-1.4229028	0.2160510	0.2573075
Schiemann-Bánkúti	-0.168878788	-0.9883557	0.6505981	0.9796972
MvAlkor-Bözödi	0.073624928	-0.7412352	0.8884850	0.9991529
MvMagdaléna-Bözödi	-0.532868434	-1.3477285	0.2819917	0.3769237
Schiemann-Bözödi	-0.098321331	-0.9131814	0.7165388	0.9973667
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.606493361	-1.4213534	0.2083667	0.2471750
Schiemann-MvAlkor	-0.171946259	-0.9868063	0.6429138	0.9778429

Schiemann-MvMagdaléna 0.434547102 -0.3803130 1.2494072 0.5851099

MGRVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.0388	0.009692	2.644	0.0345 *
Residuals	219	0.8027	0.003665		
Bözödi-Bánkúti			-0.0013066990	-0.036612629	0.033999231 0.9999756
MvAlkor-Bánkúti			-0.0086678676	-0.043973797	0.026638062 0.9615659
MvMagdaléna-Bánkúti			0.0291898228	-0.006116107	0.064495752 0.1572745
Schiemann-Bánkúti			-0.0008159522	-0.036121882	0.034489977 0.9999963
MvAlkor-Bözödi			-0.0073611687	-0.042468190	0.027745853 0.9783560
MvMagdaléna-Bözödi			0.0304965217	-0.004610500	0.065603543 0.1220749
Schiemann-Bözödi			0.0004907467	-0.034616275	0.035597768 0.9999995
MvMagdaléna-MvAlkor			0.0378576904	0.002750669	0.072964712 0.0274286
Schiemann-MvAlkor			0.0078519154	-0.027255106	0.042958937 0.9725677
Schiemann-MvMagdaléna			-0.0300057750	-0.065112796	0.005101246 0.1330717

TGI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Fajta	4	2100	525.0	26.44	<2e-16 ***	
Residuals	219	4349	19.9			
			diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti			-7.1283034	-9.726936	-4.529671	0.0000000
MvAlkor-Bánkúti			-5.6694032	-8.268035	-3.070771	0.0000001
MvMagdaléna-Bánkúti			-0.1826025	-2.781235	2.416030	0.9996865
Schiemann-Bánkúti			-6.0120248	-8.610657	-3.413393	0.0000000
MvAlkor-Bözödi			1.4589002	-1.125092	4.042892	0.5292362
MvMagdaléna-Bözödi			6.9457009	4.361709	9.529693	0.0000000
Schiemann-Bözödi			1.1162787	-1.467713	3.700271	0.7581304
MvMagdaléna-MvAlkor			5.4868007	2.902809	8.070793	0.0000002
Schiemann-MvAlkor			-0.3426216	-2.926613	2.241370	0.9962011
Schiemann-MvMagdaléna			-5.8294222	-8.413414	-3.245430	0.0000000

MVARI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Fajta	4	0.06046	0.015114	18.41	4.72e-13 ***	
Residuals	219	0.17984	0.000821			
			diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti			-0.030689621	-0.047401260	-0.013977982	0.0000091
MvAlkor-Bánkúti			-0.020204676	-0.036916314	-0.003493037	0.0090657
MvMagdaléna-Bánkúti			0.008497857	-0.008213782	0.025209495	0.6291595
Schiemann-Bánkúti			-0.032264584	-0.048976223	-0.015552946	0.0000027
MvAlkor-Bözödi			0.010484946	-0.006132542	0.027102433	0.4143894
MvMagdaléna-Bözödi			0.039187478	0.022569990	0.055804966	0.0000000
Schiemann-Bözödi			-0.001574963	-0.018192451	0.015042525	0.9989774
MvMagdaléna-MvAlkor			0.028702532	0.012085044	0.045320020	0.0000358
Schiemann-MvAlkor			-0.012059909	-0.028677397	0.004557579	0.2712656
Schiemann-MvMagdaléna			-0.040762441	-0.057379929	-0.024144953	0.0000000

RCC

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.00871	0.0021774	4.92	0.000811 ***
Residuals	219	0.09692	0.0004425		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.0160224963	-0.028290569	-0.003754424	0.0036760
MvAlkor-Bánkúti	-0.0076618075	-0.019929880	0.004606265	0.4251253
MvMagdaléna-Bánkúti	-0.0069267885	-0.019194861	0.005341284	0.5291873
Schiemann-Bánkúti	-0.0167635484	-0.029031621	-0.004495476	0.0020276
MvAlkor-Bözödi	0.0083606888	-0.003838267	0.020559645	0.3283797
MvMagdaléna-Bözödi	0.0090957078	-0.003103248	0.021294664	0.2455120
Schiemann-Bözödi	-0.0007410521	-0.012940008	0.011457904	0.9998241
MvMagdaléna-MvAlkor	0.0007350190	-0.011463937	0.012933975	0.9998297
Schiemann-MvAlkor	-0.0091017409	-0.021300697	0.003097215	0.2448918
Schiemann-MvMagdaléna	-0.0098367599	-0.022035716	0.002362196	0.1769148

RGBVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	39302197	9825549	15.45	3.8e-11 ***
Residuals	219	139285447	636007		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-1120.1515	-1582.02237	-658.2806	0.0000000
MvAlkor-Bánkúti	-1019.6488	-1481.51973	-557.7779	0.0000001
MvMagdaléna-Bánkúti	-357.4956	-819.36656	104.3753	0.2115503
Schiemann-Bánkúti	-695.5549	-1157.42583	-233.6840	0.0004677
MvAlkor-Bözödi	100.5026	-361.36827	562.3736	0.9751948
MvMagdaléna-Bözödi	762.6558	300.78490	1224.5267	0.0000894
Schiemann-Bözödi	424.5965	-37.27437	886.4674	0.0880579
MvMagdaléna-MvAlkor	662.1532	200.28226	1124.0241	0.0010159
Schiemann-MvAlkor	324.0939	-137.77701	785.9648	0.3045416
Schiemann-MvMagdaléna	-338.0593	-799.93018	123.8116	0.2630828

PRI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.0384	0.009610	2.511	0.0427 *
Residuals	219	0.8380	0.003827		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	0.0004753514	-0.035598993	0.036549695	0.9999996
MvAlkor-Bánkúti	0.0079914367	-0.028082907	0.044065781	0.9735103
MvMagdaléna-Bánkúti	-0.0295333009	-0.065607645	0.006541043	0.1648590
Schiemann-Bánkúti	0.0007796272	-0.035294717	0.036853971	0.9999971
MvAlkor-Bözödi	0.0075160853	-0.028355021	0.043387192	0.9784122
MvMagdaléna-Bözödi	-0.0300086523	-0.065879759	0.005862454	0.1484344
Schiemann-Bözödi	0.0003042758	-0.035566831	0.036175383	0.9999999
MvMagdaléna-MvAlkor	-0.0375247376	-0.073395844	-0.001653631	0.0353282
Schiemann-MvAlkor	-0.0072118095	-0.043082916	0.028659297	0.9814766
Schiemann-MvMagdaléna	0.0303129281	-0.005558179	0.066184035	0.1410872

VEG

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	1.335	0.3338	14.67	1.23e-10 ***
Residuals	219	5.008	0.0228		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.160572637	-0.24805904	-0.07308623	0.0000092
MvAlkor-Bánkúti	-0.104882798	-0.19236920	-0.01739639	0.0099249
MvMagdaléna-Bánkúti	0.016690588	-0.07079582	0.10417699	0.9847697
Schiemann-Bánkúti	-0.162707405	-0.25019381	-0.07522100	0.0000067
MvAlkor-Bözödi	0.055689839	-0.03179657	0.14317625	0.4051577
MvMagdaléna-Bözödi	0.177263225	0.08977682	0.26474963	0.0000007
Schiemann-Bözödi	-0.002134768	-0.08962117	0.08535164	0.9999954
MvMagdaléna-MvAlkor	0.121573387	0.03408698	0.20905979	0.0016022
Schiemann-MvAlkor	-0.057824606	-0.14531101	0.02966180	0.3658259
Schiemann-MvMagdaléna	-0.179397993	-0.26688440	-0.09191159	0.0000005

vNDVI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	0.0859	0.021481	9.138	7.57e-07 ***
Residuals	220	0.5171	0.002351		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-0.0422945299	-0.070408388	-0.014180672	0.0004757
MvAlkor-Bánkúti	-0.0233741433	-0.051488001	0.004739715	0.1530508
MvMagdaléna-Bánkúti	-0.0003933062	-0.028507164	0.027720552	0.9999995
Schiemann-Bánkúti	-0.0453501373	-0.073463995	-0.017236279	0.0001397
MvAlkor-Bözödi	0.0189203866	-0.009193471	0.047034245	0.3471155
MvMagdaléna-Bözödi	0.0419012237	0.013787366	0.070015082	0.0005541
Schiemann-Bözödi	-0.0030556075	-0.031169466	0.025058251	0.9982497
MvMagdaléna-MvAlkor	0.0229808371	-0.005133021	0.051094695	0.1660742
Schiemann-MvAlkor	-0.0219759941	-0.050089852	0.006137864	0.2029573
Schiemann-MvMagdaléna	-0.0449568312	-0.073070689	-0.016842973	0.0001642

WI

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fajta	4	1.93e+06	482508	0.877	0.478
Residuals	219	1.21e+08	549940		

	diff	lwr	upr	p adj
Bözödi-Bánkúti	-262.548169	-692.5630	167.4667	0.4488477
MvAlkor-Bánkúti	-198.441934	-628.4568	231.5729	0.7103085
MvMagdaléna-Bánkúti	-217.703803	-647.7187	212.3111	0.6331250
Schiemann-Bánkúti	-223.759592	-653.7744	206.2553	0.6081762
MvAlkor-Bözödi	64.106235	-365.9086	494.1211	0.9940298
MvMagdaléna-Bözödi	44.844365	-385.1705	474.8592	0.9985115
Schiemann-Bözödi	38.788577	-391.2263	468.8034	0.9991586
MvMagdaléna-MvAlkor	-19.261869	-449.2767	410.7530	0.9999477
Schiemann-MvAlkor	-25.317657	-455.3325	404.6972	0.9998447
Schiemann-MvMagdaléna	-6.055788	-436.0706	423.9591	0.9999995

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani elsősorban témavezetőimnek **Dr. Gyulai Ferencnek** és **Dr. Berke Józsefnek** szakmai és baráti segítségükért.

Külön köszönet illeti Dr. Halassy Melindát az idegen nyelvű publikáció megírásában nyújtott segítségért, Enyedi Attilát az előfeldolgozásban és Gonda Szabolcs Gábort a terepi munkában nyújtott segítségért.

Szeretném megköszönni a SZIE Növénytermesztési Intézet és Kertészeti Tanüzem dolgozóinak a terepi és laboratóriumi munkákban nyújtott segítségüket. Külön köszönöm Dr. Tarnawa Ákos és Pósa Barnabás munkáját, akik nélkül a szántóföldi kísérlet nem valósulhatott volna meg.

Köszönet illeti az ATK Mezőgazdasági Intézet, az Ökológiai Mezőgazdasági Kutatóintézet és a Növényi Diverzitás Központ munkatársait, akik rendelkezésemre bocsátották a magtétételeket. Köszönöm a martonvásári fitotron dolgozóinak a növénynevelésben való részvételüket. Köszönöm a bírálók, Dr. Szalay Kornél és Dr. Kozma-Bognár Veronika alapos munkáját és tanácsait, akik hozzájárultak az értekezés fejlődéséhez.

Végül, de nem utolsósorban megköszönöm kollégáim, családtagjaim és barátaim biztatását, és a terepi munkában való részvételüket.

A laboratóriumi vizsgálat az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság programjának támogatásával készült.