



MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

**DIGITÁLIS KÉPFELDOLGOZÁS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEINEK
VIZSGÁLATA A BÚZATERMESZTÉSBEN**

DOI: 10.54598/006600

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

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

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

A hazai mezőgazdaság gazdasági és társadalmi, valamint környezet- és természetvédelmi területen is jelentős szerepet tölt be, ezért fontos fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok kialakítása. Az iparszerű, intenzív, nagy anyag- és energiafelhasználású mezőgazdaság homogén, monokulturális tájat eredményez, ami nem tölti be az ökológiai funkcióit, csökkenti a biodiverzitást, növeli a talajok és vizek szennyezettségét (Batáry et al. 2011, Sutcliffe et al. 2015, Emmerson et al. 2016). Emellett az élők munkát kiszorítva hozzájárulhat a vidéki munkanélküliséghez és az elvándorlás felgyorsulásához (White 2012).

A klímaváltozás és a szélsőséges időjárási viszonyok egyre gyakoribb előfordulása hatással van a mezőgazdaságra 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, és helyettük a kedvezőtlenebb adottságú területeken még több műtrágyát, növényvédőszer alkalmaznak a gazdálkodók. A túlzott vegyszerhasználat helyett a megfelelő fajtaválasztásra kell törekedni, legyen szó modern fajtahasználatról vagy régi fajták újra termesztésbe vonásáról (Szalay 2009).

Napjainkban egyre nagyobb az igény a fogyasztók és a gazdálkodók részéről is az egészséges alapanyagok és élelmiszerek előállítására, ennek köszönhetően az ökológiai gazdálkodás előtérbe került (Niggli 2015, Nipers et al. 2024). Különösen gabonaféléknél fontos a diverz genetikai állományú régi fajták újra termesztésbe vonása, mivel az egyik legmeghatározóbb élelmiszer alapanyag (Bonman et al. 2015, Wingen et al. 2017, Vikram et al. 2021). Ezért az Európai Unió és Magyarország agrár-környezetgazdálkodási támogatást nyújt többek között Bánkúti 1201 őszi búzát (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum* cv. 'Bánkúti 1201') és alakort (*Triticum monococcum* L. ssp. *monococcum*) termesztő gazdák számára, hogy a kultúrtörténeti és genetikai szempontból kiemelt jelentőségű, veszélyeztetett és ritka szántóföldi növényeket megőrizték.

A növénynemesítés fő célja olyan genotípusok létrehozása, amik jól alkalmazkodnak a környezeti változásokhoz, produktívak és ellenállóak. Emellett a költséghatékonyságra törekednek, ezért a kevésbé erőforrás-igényes fajták nemesítése a cél, amik jól beilleszthetők az alacsony ráfordítású extenzív gazdálkodásba (Pieruschka & Schurr 2019, Kim 2020). A kereskedelmi és tudományos célú növénynemesítő programok jellemzően hagyományos fenotipizálást használnak a fajták tulajdonságainak értékelésére, pl. terméshozamot, biomasszatömeget, növénymagasságot, vagy a stressztényezőkkel szembeni ellenállóképességet manuális eszközökkel mérik (Uzal et al. 2018, Kim 2020). Ezek a módszerek nagyon gyakran időigényesek és nagy munkaerőt követelnek, ill. a jellegek megállapításához 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). Ezért a hagyományos kézi nemesítés mellett és annak fejlesztése céljából szükséges újszerű technológiák kidolgozása. Ezzel lehetővé válik nagy populációk

gyors, precíz és megismételhető fenotipizálása, ami segíti a szelekciós folyamatokat és reziliens genotípusok megtalálását (Niazian & Niedbala 2020).

Napjainkban a kézi és légi távérzékeléses adatgyűjtő eszközök széles skálája ismert. A légi megfigyelés mellett a földi távérzékeléses adatgyűjtés is alkalmas lehet arra, hogy növényegyedeket és nagy populációkat pontosan, gyorsan és roncsolásmentesen megvizsgáljunk (Berke et al. 2006, 2010ab, Costa et al. 2020). A látható fénytartományban érzékelő RGB eszközök a fentiek mellett költséghatékonyságuk miatt váltak fontossá a mezőgazdasági adatgyűjtésben. A távérzékeléssel nyert adatokból, digitális képfeldolgozással pedig olyan információkat nyerhetünk, amik segítenek megtervezni a környezeti feltételekhez alkalmazkodó beavatkozások módját (Hatfield et al. 2008).

Bár a kutatások és az összehasonlító vizsgálatok száma egyre nő, még mindig sok a tudásbeli hiányosság a kenyérbúzák genotípusainak környezeti, táplálkozási és egészségügyi tulajdonságairól. Emellett a nemesítésben használt földi távérzékelésnél is hiányosak a tapasztalatok. A nagy mennyiségű nyers adat előállítása, tárolása és feldolgozása kihívások elé állítja a szakembereket, ezzel együtt életképes alternatívát jelent a hagyományos fenotipizálás mellett.

Az értekezés egyik fő célja a hagyományos és modern nemesítésű őszi búzafajták és alakorfajták terméshozamának és szemminőségi paramétereinek vizsgálata extenzív termesztési körülmények között. A disszertáció 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. Ennek érdekében szántóföldi kísérletben termésmennyiségi és –minőségi paramétereket mértem, valamint ortofotón elemeztem a vetett fajták RGB adatait, amikből 16 különböző vegetációs indexet számoltam. Továbbá laboratóriumi körülmények között 225 felvételen megmértem és elemeztem a vizsgált búzafajták digitális geometriai és RGB adatait.

Kutatási kérdéseim a következők voltak:

- 1) Sikerrel termesztethető-e a régi és új nemesítésű búzafajták alacsony ráfordítású, környezetkímélő extenzív gazdálkodásban?
- 2) Alkalmas-e a kidolgozott technológia búzafajták digitális fenotipizálására?
- 3) Elkülöníthető-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?

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1 A vizsgált búzafajták

A kutatásba két őszi búzafajtát és három alakor búzafajtát vontunk be. A vizsgált fajták a következők voltak: (1) *Mv Magdaléna* az országos fajtajegyzékben szereplő, Martonvásáron nemesített, termesztésben lévő őszi búzafajta. (2) *Bánkúti 1201* régi nemesítésű magyar őszi búzafajta. Napjainkban a modern búzafajták nemesítésénél használják fel kedvező genetikai álmányának köszönhetően (Juhász et al. 2003, Balla et al. 2013). (3) *Mv Alkor* ökológiai gazdálkodásban termesztett, az országos fajtajegyzékben szereplő, Martonvásáron nemesített búzafajta. (4) *Schiemann* alakor egy marokkói származású alakor tájfajta. A tápiószelei Nemzeti Biodiverzitás és Génmegőrzési Központ génbank tétele. (5) *Bözödi* alakor Erdélyből származó tájfajta. Az Erdélyi-középhegységben hagyományos gazdálkodásban termesztik, kiváló genetikai erőforrást képvisel (Szabó 1976, Péntek & Szabó, 1981, Hajnalová & Dreslerová, 2010, Gyulai 2019). Szelekciós munka eredményeképpen 2022-ben *Szarvasgedei alakor* néven az agrárminiszter állami fajtaelismerésben részesítette.

2.2 Szántóföldi (nem kontrollált) terepi kísérlet

A vetéselőkészítés során a gödöllői Szent István Egyetem (ma Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem) Növénytermesztési Intézetében laboratóriumi számlálóval mértük az egyes fajták ezermagtömegét (g), majd meghatároztuk a vetésnormájukat. A kísérleti területet a Növénytermesztési Intézet által bérelt Hatvan-Nagygombos 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 ismételtsben.

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. A kísérleti terület egységesen nem kapott kezelést (nem alkalmaztunk szerves- és műtrágyát, permet- és gyomirtószereket, nem öntöztünk). 2016. július 21-én, az érési szakaszban történt a fajták aratása egy 1980-as években gyártott németországi kisparcellás kombájnnal.

A betakarítás után minden búzafajta termés mennyiségét még a szántóföldön, terepi körülmények között megmértük, majd a (1) *termésátlagot* t/ha egységbe számítottam át. 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. A hántolás közben eltört szemeket kézzel távolítottam el a mintából. A (2) *fehérje*- és (3) *sikértartalmat* négy ismételtsben mértem Mininfra-Scan T Plus közeli infravörös optikai mérőműszerrel 790 nm és 1064 nm közötti hullámhossztartományban. A búzaszemek (4) *hektolitertömegét* (g) laboratóriumi mérőedényben mértem négy ismételtsben.

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) DJI Phantom 3 Advanced drónnal 2016. március 04-én repültük le látható fénytartományban érzékelő tükörreflexes Canon EOS 30D 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 és a nagyfelbontású TIFF ortofotót átadták.

A 16 bit-es TIFF RGB felvételt ImageJ képelemző szoftverrel elemeztem. Fajtanként négy ismétlésben manuálisan kijelöltem a vizsgált területeket (ROI 1–16), és mértem az RGB sávok adatait, amikből a későbbi adatelemzésnél fajtanként és területenként kiszámoltam a vizsgált 16 RGB vegetációs indexet.

2.3 Fitotronban végzett (kontrollált) kísérlet

2.3.1 Kísérleti elrendezés

2017. szeptember 16-án a gabonaszemeket Jiffy tőzegkorongokba vetettem, ahol 14 napig csíráztak, majd 43 napig fűtetlen üvegházban, tápkockában előneveltem. Ezután a palántákat 11,5 cm átmérőjű kerek pálmacserepekbe ültettem át, 2800 cm³ kertészeti talaj, komposzt és homok 3:2:1 arányú keverékébe. Tischner et al. (1997) és Balla et al. (2013) módszere alapján állítottam össze a növénynevelési programot. A cserepeket Conviron PGR-15 tavasz-nyár növénynevelő klímasekrénybe helyeztem, ahol 1,4 m² területen és 145 cm növekedési magasságon neveltem a gabonákat. A növények 11 napig halogén megvilágítás mellett 10/15°C-on éjszakai/nappali hőmérsékleten fejlődtek. Ezután a cserepek fénycsöves 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 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, fajtanként 15 cseréppel. Egyszerre 75 egyedet vizsgáltam, ezzel kihasználva a klímakamra maximális befogadó képességét. A kezeléseket 30 napig alkalmaztam.

2.3.2 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. Fajtanként 45 képet készítettem, 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 Canon EOS 30D RGB digitális tükörreflexes fényképezőgéppel 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).

2.3.3 Az RGB felvételek digitális képfeldolgozása

Az előfeldolgozást a budapesti Gábor Dénes Főiskola munkatársaival közösen végeztük. Az 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.

Az RGB felvételek előfeldolgozását az Adobe Photoshop CC 20.04.4 szoftver 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.

Az előfeldolgozott képeken vizsgáltam az egyes objektumok projektált területének geometriai paramétereit és RGB adatait. A képi információkat az ImageJ nyílt forráskódú képelemző szoftverrel nyertem ki. Az RGB felvételeken a színküszöbértéket az intermodális küszöbérték módszernek 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.

A célobjektum pixelei alkalmasak a képi információk számszerűsítésére és elemzésére. A kép egészén 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 átmérő*: 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, amikből a későbbi adatelemzésnél fajtánként és kezelésként kiszámoltam a vizsgált 16 vegetációs indexet.

2.4 Adatfeldolgozás és statisztikai elemzés

A fajták közti különbségeket, a tápanyaghiány és a szárazság hatását a vetett gabonákra általános lineáris modellel, ún. egyutas ANOVA teszttel 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.

Részletesebb eredményekhez, Tukey féle post-hoc teszt 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 modellekben használt 16 RGB vegetációs index képlete:

- $BGI = B/G$
- $BI = ((R^2 + B^2 + G^2)/3)^{1/2}$
- $ExB = 1.4 * B / (R + G + B) - G / (R + G + B)$
- $GCC = G / (R + G + B)$
- $GLI = (2 * G - R - B) / (2 * G + R + B)$
- $GR = G/R$

- $HUE = \arctan(2 \cdot (B - G - R) / 30.5 \cdot (G - R))$
- $MGRVI = (G^2 - R^2) / (G^2 + R^2)$
- $MVARI = (G - B) / (G + R - B)$
- $RCC = R / (R + G + B)$
- $RGBVI = (G^2 - (B \cdot R) / G^2 + (B + R))$
- $PRI = R / G$
- $TGI = G - 0.39 \cdot R - 0.61 \cdot B$
- $VEG = G / (R^{0.667} \cdot B^{0.334})$
- $vNDVI = 0.5268 \cdot ((R / (R + G + B))^{0.1294} \cdot (G / (R + G + B))^{0.3389} \cdot (B / (R + G + B))^{-0.3118})$
- $WI = (G / (R + G + B) - B / (R + G + B)) / (R / (R + G + B) - G / (R + G + B))$

A laboratóriumi kísérlet adataitóból elemeztem 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. 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. 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 vegetációs indexek kiszámolását, a statisztikai elemzést és az adatok ábrázolását RStudio statisztikai környezetében, 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 szoftvert is használtam.

3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

3.1 A szántóföldi kísérlet eredményei

A terméshozam esetében a legtöbb fajta szignifikánsan $p < 0,001$ -es szinten különbözött. 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 terméshozama 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 Bözödi alakor tartalmazta a legalacsonyabb sikermennyiséget (15,4 %). A Schiemann alakor (80,1 kg/hl) hektolitertömege volt a legnagyobb, amihez hasonló volt a Bözödi 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.

A légi felvétel RGB adataiból származtatott 16 vizsgált vegetációs index 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.

3.2 A laboratóriumi kísérlet eredményei

3.2.1 A kezelések és a digitális geometriai paraméterek, valamint az RGB vegetációs indexek 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 paraméterénél sem volt kimutatható a kontrollhoz képest az adott kísérleti beállításban ($p < 0,05$).

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.

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. A tápanyaghiány egyik vegetációs indexszel sem volt kimutatható a kontrollhoz képest az adott kísérleti beállításban ($p < 0,05$).

3.2.2 A fajták elkülönítése digitális geometriai paraméterekkel és RGB vegetációs indexekkel

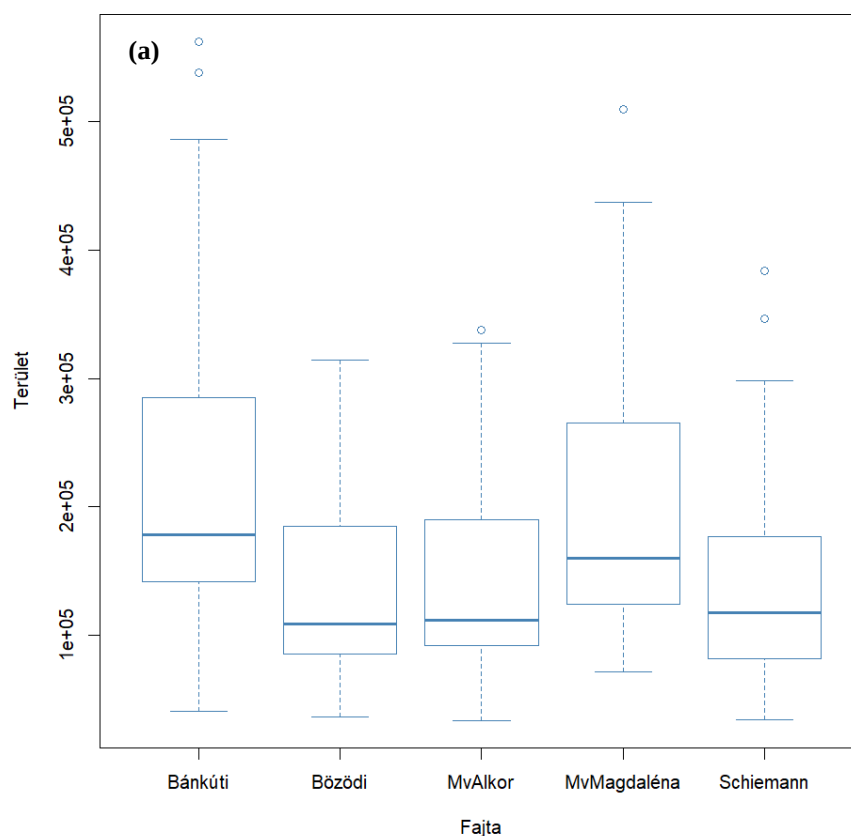
A kerület kivételével az összes geometriai változó alkalmas volt arra, hogy az őszi búzafajtákat szignifikánsan elkülönítsem az alakor búzafajtáktól. A terület geometriai változónál a Schiemann és az MvMagdaléna, a Schiemann és a Bánkúti 1201, az MvMagdaléna és az MvAlkor, az MvMagdaléna és a Bözödi, az MvAlkor és a Bánkúti 1201, valamint a Bözödi és a Bánkúti 1201 szignifikánsan elkülöníthető volt (1. ábra). A szélesség esetében az MvMagdaléna és az MvAlkor, valamint az MvMagdaléna és a Bözödi fajták közt volt szignifikáns különbség. A magasság és a Feret átmérő esetén a legtöbb fajta szignifikánsan elkülönült: a Schiemann az MvMagdalénától, az MvAlkortól és a Bánkúti 1201-től, az MvMagdaléna az

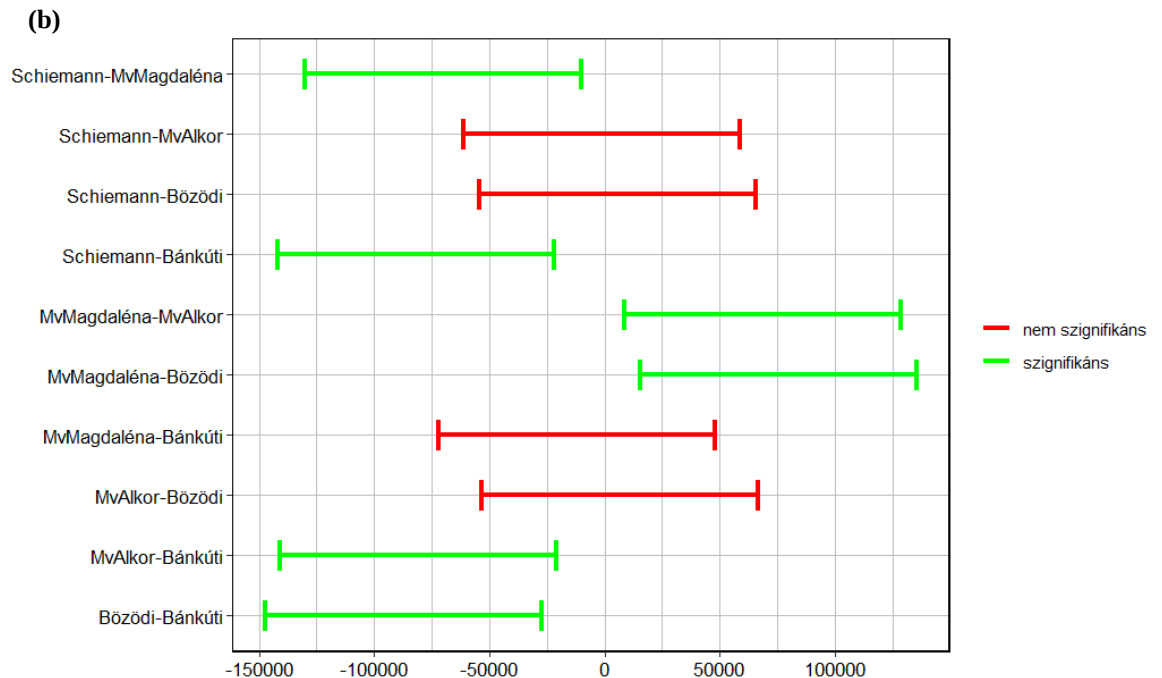
MvAlkortól és a Bözöditől, valamint az MvAlkor a Bánkúti 1201-től és a Bözödi a Bánkúti 1201-től.

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.

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 Schiemantól. Három index, a GR, az MGRVI és a PRI csak egy fajta elkülönítésére volt alkalmas, mindhárom index az MvAlkor és az MvMagdaléna közt mutatott szignifikáns különbséget.





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

3.2.3 A terület, mint legpontosabb indikátor 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. A szignifikáns kölcsönhatások száma – F érték és parciális η^2 – alapján a függő változók közül a területnél találtam a legerősebb kapcsolatot a független változókkal. A független változók a területváltozások 91,8%-át magyarázták. A legerősebb kapcsolat az idő függvényében állt fenn, de a fajták és a kezelések is szignifikánsan befolyásolták a területváltozást. 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 ($F = 75,366$, $\eta^2 = 0,626$, $p < 0,05$).

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. 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.

A kontroll és a szárazságkezelte egyedek közti különbség szignifikáns eltérést mutatott. Az aszálykezelés negatív hatással volt a növekedésre, ami az idő múlásával

jelentősen alacsonyabb területet eredményezett a kontrollcserepekhez és a tápanyaghiányos cserepekhez képest. 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. A tápanyaghiány nem volt hatással a növekedésre az idő múlásával a kontrollcserepekhez képest, és a fajták sem reagáltak szignifikánsan a tápanyaghiányra.

3.2.4 A vNDVI index vizsgálata

Az egyik legfontosabb mezőgazdaságban alkalmazott vegetációs indexből (NDVI) származtatott index, a vNDVI index (Costa et al. 2020) statisztikai elemzésével kimutatható, hogy minden mérési időpontban fajtánként és kezelésként szignifikánsan különbözik a vNDVI érték a laboratóriumi vizsgálatban. 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.

A terület paraméter és a vNDVI értékek között pozitív kapcsolat áll fenn a különböző mérési időpontokban: gyenge pozitív az első, erős pozitív a második és harmadik mérésnél. A szárazság hatása 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.

3.3 Eredmények megbeszélése

3.3.1 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. 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

termésmennyiséget 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 terméshozam.

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. A nagygyomosi 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.

Az őszi búzákat, mint egészséges élelmiszert kezdik újra felfedezni (Charmet 2011, Zaharieva & Monneveux 2014). Ezzel összefüggésben a szántóföldi kísérletben azt találtam, hogy a vizsgált alakor mindegyikében alacsonyabb koncentrációban volt kimutatható a siker, 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 kenyérgyártási tulajdonságokkal rendelkezik az őszi búzákkal szemben, mégis az alakor liszt ideálisabb egészségesebb pékáruk és jó minőségű tészták elkészítéséhez (Brandolini & Hidalgo 2011, Hidalgo & Brandolini 2014).

3.3.2 Digitális képfeldolgozás alkalmazása búzafajták fenotipizálására

A doktori kutatás másik célja az volt, hogy a multi- és hiperspektrális távérzékeléshez képest egy költségkímélőbb 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 búzára, ahol valós idejű RGB felvételeket készítettem és digitális képelemzést alkalmaztam a kontroll, a tápanyaghiányos és a szárazságkezelte 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-bebecslése fontos feladat mind a modern növény-nemesítés 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 biomaszatömeg/zöldtömeg esetünkben a terület paraméterrel mutatható ki

legpontosabban, ami széles körben elterjedt és használt agronómiai indikátor a termésnövekedés 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 stresszválasszal.

3.3.3 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 (Bendig et al. 2014, Li et al. 2015, Iqbal et al. 2017, Acorsi et al. 2019). 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 biomasszatömeg 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 terület kivételével az összes geometriai változó (terület, szélesség, magasság és Feret átmérő) alkalmas volt arra, hogy az őszi búza fajtaikat 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 biomasszatömeg 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.

3.3.4 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 alakor fajtákat. Számos tanulmány (Guzmán et al. 2009, Hajnalová & Dreslerová 2010, Zaharieva & Monneveux 2014) azt találta, hogy az alakor búza rendkívül ellenálló a környezeti stresszel szemben. Kutatásunkban kimutattuk, hogy a vizsgált alakor búzákat a kezdeti növekedési szakaszban rosszabbul reagáltak a vízhiányra, mint az őszi búzákat. Később, a bokrosodási 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 alakorok. 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).

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

4.1 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 búzákat és a régi fajtákat 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.

4.2 A képalkotó technológia a digitális fenotipizálásban

A légi és földfelszíni képalkotó technológai hozzájárulhat ahhoz, hogy az állami és magán növénynemesítési 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 és a fajták közti eltérések a gabonák korai fejlődési fázisában. Még kis időtávon belül (egy hónap) is kimutatható volt a változás. 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 növénynemesítés és manuális fenotipizálás kombinációja költséghatékonyan hozzájárul a reziliens genotípusok nemesítéséhez. 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 növénynemesítési 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 növénynemesítési programokban a gabonafajták fenotípusos információinak gyors kinyerésére.

4.3 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.

5. 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 energiárfordítású 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 paraméterkönyvtárt 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.

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ 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., 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, 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 többszemponú 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.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Batáry, P., Báldi, A., Kleijn, D., Tschardtke, 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.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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).
- [15] 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.
- [16] Charmet, G. (2011): Wheat domestication: Lessons for the future. *Comptes Rendus Biologies*, 334, 212–220.
- [17] Costa, L., de Moraes, 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.
- [18] 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.

- [19] Emmerson, M., Morales, M.B., Onate, J.J., Batáry, P., Berendse, F., Liira, J., Aavik, T., Guerrero, I., Bommarco, R., Eggers, S., Part, T., Tscharntke, T., Weisser, W., Clement, L., Bengtsson, J. (2016): How agricultural intensification affects biodiversity and ecosystem services. *Advances in Ecological Research*, 55, 43–97.
- [20] 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.
- [21] Ferreira, T., Rasband, W. (2012): ImageJ User Guide-IJ1.46r. <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide> (Online elérhető 2021. október 28-án)
- [22] 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.
- [23] Gyulai, F. (2019): Alakor, a sokoldalú és sokakat foglalkoztató ősbúza. In: *Növényvédelem*, 55(7): 312–321.
- [24] 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.
- [25] Hajnalová, M., Dreslerová, D. (2010): Ethnobotany of einkorn and emmer in Romania and Slovakia: Towards interpretation of archeological evidence. *Památky archeologické*, 101, 169–202.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Hidalgo, A., Brandolini, A. (2014): Nutritional properties of einkorn wheat (*Triticum monococcum* L.). *Journal of Science Food and Agriculture*, 94(4):601–612.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Kim, J.Y. (2020): Roadmap to High Throughput Phenotyping for Plant Breeding. *Journal of Biosystems Engineering*, 45, 43–55.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] Morris, C.E., Sands, D.C. (2006): The breeder's dilemma—yield or nutrition? *Nature Biotechnology*, 24:1078–1080.
- [38] MTA ATK (2015): Martonvásári fajtakatalógus 2014–2015. In: *Cultivar Catalogue of Martonvásár*, MTA ATK Mezőgazdasági Intézet, Martonvásár.
- [39] Niazian, M., Niedbała, G. (2020): Machine Learning for Plant Breeding and Biotechnology. *Agriculture*, 10(10), 436.
- [40] Niggli, U. (2015): Sustainability of organic food production: Challenges and innovations. *Proceedings of the Nutrition Society*, 74(1), 83-88.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Péntek, J., Szabó, T.A. (1981): Az alakor (*Triticum monococcum*) Erdélyben. *Ethnographia*, 92, 259–277.
- [44] Pieruschka, R., Schurr, U. (2019): Plant phenotyping: Past, present, and future. *Plant Phenomics*, 2019:7507131.
- [45] 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/>
- [46] Ribeiro, M., Rodrogez-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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Shewry, P.R. (2018): Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? *Journal of Cereal Science*, 79, 469–476.
- [51] 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.
- [52] Szabó, T.A. (1976): On the borderline of natural science and ethnology. *Ethnological Papers*, Kriterion Publ. House, Bukarest, Romania, pp. 36–40.
- [53] Szalay, D. K. (2009): Az 'Alföld 90' őszi búzafajta mennyiségi és minőségi paramétereinek vizsgálata az átállás során. *Diplomadolgozat*.
- [54] Tischner, T., Rajkainé Végh, K., Kőszegi, B. (1997): Cereals in the phytotron. *Acta Agronomica Hungarica*, 45, 187-193.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] White, B. (2012): Agriculture and the Generation Problem: Rural Youth, Employment and the Future of Farming. *IDS Bulletin*, 43:9-19.
- [62] Wickham, H (2016): ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. *Springer-Verlag New York*. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>
- [63] 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>
- [64] Wingen, L.U., West, C., Leverington-Waite, M., Collier, S., Orford, S., Goram, R., Yang, C.-Y., King, J., Allen, A.M., Burridge, A., Edwards, K.J., Griffiths, S. (2017): Wheat Landrace Genome Diversity, *Genetics*, 205(4):1657–1676.
- [65] 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.
- [66] 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.