



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem

Környezettudományi Doktori Iskola

Doktori (PhD) értekezés

**ÁTMENETI TALAJVÍZSZINTEMELÉS HATÁSA AZ ÓSZI
BÚZA TERMÉSÉRE**

DOI: 10.54598/007390

KEREZSI GYÖRGY

Gödöllő
2025

A doktori iskola

megnevezése: MATE Környezettudományi Doktori Iskola

tudományága: Környezettudományok

vezetője: Csákiné Prof. Dr. MICHÉLI Erika
intézetigazgató, egyetemi tanár, az MTA rendes tagja
MATE, Szent István Campus
MATE, Környezettudományi Intézet
Talajtani Tanszék Tanszék

Témavezető(k): Dr. habil. GÉCZI Gábor, PhD
egyetemi docens, tanszékvezető helyettes
MATE, Környezettudományi Intézet
Környezetanalitikai és Környezettechnológiai Tanszék

Dr. habil. WALTNER István, PhD
egyetemi docens, tanszékvezető
MATE, Környezettudományi Intézet
Vízgazdálkodási és Klímaadaptációs Tanszék

.....
Csákiné Prof. Dr. MICHÉLI Erika
iskolavezető jóváhagyása

.....
Dr. habil. GÉCZI Gábor, PhD
témavezető jóváhagyása

.....
Dr. habil. WALTNER István, PhD
témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	VIII
1. BEVEZETÉS	10
1.1. PROBLÉMAFELVETÉS.....	10
1.2. CÉLKITŰZÉSEK	11
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	12
2.1. AZ ŐSZI BÚZA JELENTŐSÉGE.....	12
2.1.1. Az őszi búza fejlődési szakaszai (fenofázisai).....	13
2.2. AZ ŐSZI BÚZA BELTARTALMI ÖSSZEFÜGGÉSEI	15
2.2.1. Az őszi búza szemtermés fehérjetartalma és a hozama közötti összefüggés	15
2.2.2. Az őszi búza szemtermés sikértartalma és hozama közötti összefüggés.....	16
2.2.3. Az őszi búza szemtermés Zeleny értéke és hozama közötti összefüggés.....	17
2.2.4. Az őszi búza szemtermés W értéke és hozama közötti összefüggés.....	17
2.2.5. Közeli infravörös spektroszkópia a fehérje-, a sikértartalom, a Zeleny-érték és a W érték meghatározásához	18
2.2.6. Az őszi búza szemtermés minőségi különbségei és az évjárathatás közötti összefüggések.....	19
2.3. AZ ŐSZI BÚZA VÍZIGÉNYE, VÍZFOGYASZTÁSA ÉS VÍZHASZNOSÍTÁSA	21
2.3.1. Vízigény.....	21
2.3.2. Vízfogyasztás	22
2.3.3. Vízhatszósítás.....	22
2.3.4. A telített talaj.....	22
2.3.5. A telített talaj közvetlen hatása az őszi búzára.....	23
2.4. A TÖBBLETVIZEK /BELVIZEK/ HAZAI HELYZETE.....	25
2.4.1. A növények vízigénye és víztűrő képessége.....	26
2.4.2. A telített talaj, a pangó víz és a belvíz fogalma	26
2.4.3. A különböző kísérletek során alkalmazott vízszintek	27
2.5. VEGETÁCIÓS INDEXEK ÉS RELATÍV KLOROFILLTARTALOM INDEX	28
2.5.1. A GNDVI és a BNDVI indexek használatának indoklása	29
2.5.2. Zöld Normalizált Differencia Vegetációs Index (Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI).....	29

2.5.3.	Kék Normalizált Differencia Vegetációs Index (Blue Normalized Difference Vegetation Index, BNDVI).....	29
2.5.4.	GNDVI és a BNDVI összehasonlítása a búza felmérésben.....	30
2.5.5.	Relatív klorofiltartalom index (RCI) az őszi búza felmérésben.....	31
2.6.	RELATÍV RADIOMETRIAI NORMALIZÁLÁS.....	31
2.6.1.	Abszolút- és relatív radiometriai normalizálás	32
2.7.	RELATÍV RADIOMETRIKUS NORMALIZÁLÁS (RRN) TÖBBIDŐPONTÚ (MULTITEMPORÁLIS) UAV-FELVÉTELEKEN	33
2.7.1.	Hagyományos relatív radiometriai normalizálási (RN) módszerek, modellek.	33
2.7.2.	Számítógépes látásalapú módszerek.....	35
2.7.3.	Mélytanuláson alapuló RN-módszerek távérzékelési képekre	36
3.	ANYAG ÉS MÓDSZER	38
3.1.	A VIZSGÁLT TENYÉSZÉVEK JELLEMZÉSE	38
3.1.1.	A 2018/2019. év időjárása	38
3.1.2.	A 2019/2020. év időjárása	38
3.1.3.	A 2020/2021. év időjárása	38
3.1.4.	Békés megye búzatermelésének változása 2000-2022 között	39
3.2.	KÍSÉRLETI ESZKÖZÖK ÉS BERENDEZÉSEK.....	41
3.2.1.	Kísérleti helyszín bemutatása.....	41
3.2.2.	Liziméter rendszer leírása.....	41
3.2.3.	Kísérleti növény és kezelések	42
3.2.4.	A levélminta relatív klorofillmérése Konica Minolta SPAD 502 Plus klorofillmérő készülékkel.....	43
3.2.5.	Liziméteres mérések	45
3.2.6.	Pilóta nélküli légifelvételzés	46
3.2.7.	A térinformatikai kiértékelés menete	46
3.2.8.	Skálatényezőn alapuló PIF-normalizáció kiugróérték-kezeléssel vagy Robusztus PIF-alapú normalizálás lineáris skálázással.....	47
3.2.9.	Őszi búza mag minőségi paramétereinek mérése	49
3.2.10.	A vegetációs modell index értékek és a SPAD relatív klorofill tartalom értékek görbeillesztése	50
3.2.11.	A modellek identifikációjának ellenőrzése mérésstartományra vetített relatív hiba százalékban kifejezve számolása	51

3.2.12.	Michaelis–Menten típusú görbék a vegetációs indexek és a levélklorofill-tartalom (SPAD-érték) közötti kapcsolat jellemzésére	52
3.3.	ALKALMAZOTT STATISZTIKAI MÓDSZEREK	52
3.3.1.	R programnyelv használata a statisztikai értékelésre	52
3.3.2.	Statisztikai elővizsgálat, feltételvizsgálat, függő változók közötti korreláció és a kiugró értékek meghatározására.....	53
3.3.3.	Hipotézisvizsgálat.....	56
4.	EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE	57
4.1.	AZ ŐSZI BÚZA TERMÉS EREDMÉNYEK STATISZTIKAI ELŐVIZSGÁLATA, A FÜGGŐ VÁLTOZÓK KÖZÖTTI KORRELÁCIÓ ÉS A KIUGRÓ ÉRTÉKEK MEGHATÁROZÁSÁRA.....	57
4.1.1.	Az őszi búza termésének kétutas (kétfaktoros) dobozdiagram (boxplot) elemzése	59
4.1.2.	Az őszi búza termésének kétutas (kétfaktoros) interakció diagram (two-way interaction plot) elemzése	63
4.1.3.	Feltételvizsgálat ellenőrzése az őszi búza termésének Bartlett-féle és Levene-féle varianciáhozomogenitás tesztje.....	73
4.1.4.	MANOVA átfogó teszt és utóelemzés Wilk-féle Lambda-próbával	74
4.1.5.	Különálló egyváltozós ANOVA-k ellenőrzése	75
4.1.6.	A modell-reziduálok normáloszlásának ellenőrzése grafikusan az őszi búza termésének páronkénti szórásdiagramjain	76
4.1.7.	A modell-reziduálok normáloszlásának ellenőrzése átfogó Shapiro-Wilk teszttel	79
4.1.8.	A modell-reziduálok multivariáns normáloszlás ellenőrzése Henze–Zirkler (HZ) teszttel és egyváltozós Shapiro–Wilk normalitás teszttel	79
4.1.9.	Outlierek azonosítása robusztus Mahalanobis-távolsággal	80
4.1.10.	A reziduális mátrix multivariáns normalitás tesztje	81
4.1.11.	Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normalitás teszt a modell reziduumokra	82
4.2.	AZ ŐSZI BÚZA FEHÉRJE TARTALMÁNAK VÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK HATÁSÁRA (2019-2021).....	82
4.2.1.	Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérje időtató szerinti összehasonlítások	83
4.2.2.	Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Fehérje %-a a kontrollhoz viszonyítva.....	85

4.2.3.	Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérje és vízmélység szerinti összehasonlítások	85
4.2.4.	A fehérje (%), vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram statisztikai elemzése	86
4.3.	AZ ŐSZI BÚZA ZELENY-ÉRTÉKÉNEK VÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK HATÁSÁRA (2019-2021).....	88
4.3.1.	Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére időtartam szerinti összehasonlítások	89
4.3.2.	Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza Zeleny-értékére a kontrollhoz viszonyítva	89
4.3.3.	Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére és vízmélység szerinti összehasonlítások	90
4.3.4.	A Zeleny-érték vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram statisztikai elemzése	91
4.4.	AZ ŐSZI BÚZA HOZAM VÁLTOZÁSA A KEZELÉSEK HATÁSÁRA (2019-2021) 93	
4.4.1.	Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozamának időtartam szerinti összehasonlítások	94
4.4.2.	Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza hozamának a kontrollhoz viszonyítva	96
4.4.3.	Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozam és vízmélység szerinti összehasonlítások	97
4.4.4.	A hozam vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram statisztikai elemzése.....	98
4.5.	A KEZELÉSEK KÖZTI KÜLÖNBSÉGEK VIZSGÁLATA A GNDVI, BNDVI INDEXEKSEL ÉS A SPAD RELATÍV KLOROFILL ÉRTÉKEKKEL.....	100
4.5.1.	A GNDVI és a BNDVI összefüggései SPAD relatív klorofilltartalom értékkel 102	
4.5.2.	Michaelis–Menten típusú görbék a vegetációs indexek és a levélklorofill-tartalom (SPAD-érték) közötti kapcsolat jellemzésére	103
5.	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK.....	106
6.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	108
7.	ÖSSZEFOGLALÁS	111
8.	SUMMARY	113
M1.:	IRODALOMJEGYZÉK.....	115

M2.: ÁBRAJEGYZÉK.....	139
M3:TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	142
M4. KÉPLETJEGYZÉK.....	143
M5.: KÍSÉRLETI TERÜLET, ESZKÖZÖK ÉS FELDOLGOZÁS.....	144
M6.: STATISZTIKAI ELŐVIZSGÁLAT MELLÉKLETEI.....	146
M7.: FEHÉRJE STATISZTIKA.....	148
M8.:ZELENY-ÉRTÉK STATISZTIKA.....	155
M9. HOZAM STATISZTIKA.....	162
M10. SPAD RELATÍV KLOROFILTARTALOM INDEX ÉS A VEGETÁSCIÓS INDEXEK	170
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	175

JELÖLÉSEK, RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

ANN	Mesterséges Neurális Hálózat	Artificial Neural Network
ANOVA	Varianciaanalízis	Analysis of Variance
APAR	Elnyelt fotoszintetikusán aktív sugárzás	Absorbed Photosynthetically Active Radiation
BNDVI	Kék Normalizált Differencia Vegetációs Index	Blue Normalized Difference Vegetation Index
CD	Változásdetekció	change detection
CI	Konfidenciaintervallum	confidence interval
CLD	Betűkódos csoportosítás	Compact Letter Display
CWS	A folyamatos vízstressz	Continuous Water Stress
DB	Sötét-Világos Halmaz	Dark Set-Bright Set
DC	fejlődési skála főbb kódjai	GS v. Decimal Code
DN	digitális rangszám	Digital Number
ELM	Empirikus Vonal Módszer	Empirical Line Method
EVI	kibővített vegetációs index	Enhanced Vegetation Index
EWS	Korai Vízstressz	Early Water Stress
FC	szántóföldi vízkapacitáshoz	field capacity
FÖMI	Földmérési és Távérzékelési Intézet	Lechner Knowledge Center (Institute for Land Survey and Remote Sensing)
GAN	Generatív Adverzális Hálózatok	Generative Adversarial Networks
GNDVI	Zöld Normalizált Differencia Vegetációs Index	Green Normalized Difference Vegetation Index
GPP	bruttó primer produkció	Gross Primary Productivity
GPT	glutaminsav-piruvát-transzamináz	
GS	fejlődési skála	Growth Stage
GS	glutamin-szintetáz	
HMW	emelkedett nagy molekulatömegű nagy molekulásúlyú glutenin alegységekből álló	high molecular weight High Molecular Weight- Glutenin Subunits
HMW-GS	Tukey-féle őszinte szignifikáns különbség	Tukey's Honestly Significant Difference
HSD	különbség	
HZ	Henze-Zirkler teszt	Henze-Zirkler test
IDB	Index Adatbázis (Vegetációs)	Index Database
IDE	integrált fejlesztői környezet	integrated development environment
IDT	iteratív eloszlás transzfer	iterative distribution transfer
IEW	belvíz	Inland Excess Water
IQR	Interkvartilis tartomány	interquartile range
KSH	Központis Statisztikai Hivatal	Hungarian Central Statistical Office
LAI	Levélfelület Index	Leaf Area Index
LMK	lineáris Monge-Kantorovitch	Linear Monge-Kantorovitch
LMS	legkisebb négyzetes átlag	least-mean-square
LMW	kis molekulatömegű	low molecular weight

LWS	Kései Vízzstress	Late Water Stress
MAE	Átlagos Abszolút Hiba	Mean Absolute Error
MANOVA	többváltozós varianciaanalízis	Multivariate analysis of variance
MATE	Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem	Hungarian University of Agriculture and Life Science University
MSAVI	Módosított talajjal korrigált vegetációs index	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MVN	Többváltozós normális eloszlás vizsgálatok R csomag	Multivariate Normality Tests
NA	adatminőségi problémák	
NC	No Change regressziós normalizáció	
NGB	közeli infravörös, zöld és kék sávok	NIR, Green és Blue
NIR	közeli infravörös	
NIRS	Közeli infravörös spektroszkópia	near-infrared spectroscopy
NIT	közeli infravörös transzmittancia	
NMAE	méréstartományra vetített relatív hiba	Normalized Mean Absolute Error
NR	nitrát-reduktáz	
NS	nem szignifikáns	not significant
OVF	Országos Vízügyi Főigazgatóság	General Directorate of Water Management
PAI	Pálfai-féle Aszály Index	Pálfai's Drought Index
PCA	főkomponens analízis	Principal component analysis
PIF	Kvázi-invariáns jellemzők	pseudo-invariant features
PIV	két vagy több időben állandó	pszeudoinvariáns
RBD	véletlen blokkos elrendezésű	randomized block design
RCI	Relatív klorofiltartalom index	Relative Chlorophyll Index
RDI	szabályozott deficit öntözés	regulated deficit irrigation
RMSE	Átlagos négyzetes hiba gyöke	root mean square error
RRN	Relatív radiometrikus normalizálás	Relative Radiometric Normalization
RS	gyökér/hajtás arány	root/shoot ratio
SARVI	légköri hatásokra korrigált vegetációs index	Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index
SAVI	A talajjal korrigált vegetációs index	Soil Adjusted Vegetation Index
SE/CI	szabványos hiba/konfidenciaintervallum	standard error/confidence interval
SGR	átlagos csírázási aránya	seed germination rate
SPAD	"Talaj-Növényelemzés Fejlesztése"	Soil Plant Analysis Development
SWIR	rövid hullámú infravörös	short wave infrared
TKW	Ezerszemtömeg	Thousand Kernel Weight
TSAVI	Átalakított talajhoz igazított vegetációs index	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
UAV	pilóta nélküli légi jármű	Unmanned Aerial Vehicle
ZSV	Zeleny ülepitési érték	Zeleny Sedimentation Value

1. BEVEZETÉS

1.1. Problémafelvetés

A globális éghajlatváltozás hatására az agrárgazdaságok egyre kiszolgáltatottabbá válnak az időjárási szélsőségeknek, különösen a vízháztartási problémáknak. Magyarország mezőgazdasági területein a belvíz és az aszály egyaránt jelentős kockázatot jelent, különösen az Alföld térségében, ahol a síkvidéki domborzat, a talajok vízmegtartó képessége és a csapadékeloszlás változékonysága együtt okozza a rendszeres vízfelesleget, illetve vízhiányokat. Az éghajlati előrejelzések szerint az ilyen jelenségek gyakorisága és intenzitása a jövőben tovább nőhet, ezért a fenntartható mezőgazdasági termelés egyik kulcskérdésévé válik a vízháztartás szabályozása.

A belvíz definíció szerint a talaj felső rétegeiben megjelenő víztöbbletet, illetve a terep alacsonyabban fekvő részein kialakuló lefolyás nélküli vízborítást jelenti. Ez a kétfázisú (víz és szilárd talajfázis, de oxigénhiányos közeg) állapot jelentősen gátolja a növények normális fejlődését. A belvíz súlyos morfológiai és élettani stresszhelyzetet teremt a növények számára, különösen az olyan kényes fejlődési szakaszokban, mint a bokrosodás vagy a kalászhányás ideje. Az őszi búza (*Triticum aestivum* L.) hazánkban kiemelt jelentőségű szántóföldi kultúra, amely ugyan viszonylag jól tűri a téli-tavaszi vízhatásokat, de szélsőséges körülmények között jelentős terméseszkökenés is bekövetkezhet.

A dolgozat témája az átmeneti belvízborítottság őszi búzára gyakorolt hatásának vizsgálata kontrollált, liziméteres körülmények között. A kutatás célja az volt, hogy különböző vízmélységek (0, -30, -60 cm) és tartósságok (3, 6, 9, 12 nap) mellett elemezzük a növény válaszreakcióit, mind mennyiségi (hozam), mind minőségi (pl. fehérje, sükér, Zeleny-érték) paraméterek szempontjából. Külön figyelmet kaptak a távérzékelés eszközeivel (UAV – drón) és kézi SPAD-méréssel nyert adatok is, amelyek a növény fiziológiai állapotának korai detektálását segítették.

A dolgozat gyakorlati relevanciája abban áll, hogy segít pontosítani azokat a kezelési küszöbértékeket, amelyek mentén a gazdálkodó döntéseket hozhat a víz visszatartásáról vagy elvezetéséről. A kutatás kiterjedt azokra az összefüggésekre is, amelyek a vízstressz, a vegetációs indexek (GNDVI, BNDVI) és a SPAD-érték között mutatkoznak, és ezeket regressziós modellek segítségével jellemezte.

Mindez új módszertani alapot teremthet a precíziós vízgazdálkodási gyakorlat számára, különösen a klímaváltozás hatásainak mérséklése érdekében. A vizsgálatok komplexitása lehetővé tette annak feltárását is, hogy az egyes évjáratok közötti időjárási különbségek hogyan befolyásolják a kezelések eredményességét.

A kutatás során alkalmazott statisztikai módszerek MANOVA, ANOVA, Welch-próba, Games-Howell post-hoc teszt, valamint többváltozós korreláció- és görbeillesztés biztosították az eredmények tudományos megalapozottságát és validálhatóságát

A dolgozat a termelésbiztonság, a fenntarthatóság és a precíziós mezőgazdaság metszéspontjában helyezkedik el. A dolgozat nem csupán egy adott kísérleti rendszer vizsgálata, hanem annak bemutatása is, hogy miként lehet a hagyományos agronómiai módszereket kombinálni korszerű távérzékelési és analitikai eljárásokkal. Az eredmények így nemcsak

tudományos, hanem gyakorlati szempontból is értékes információval szolgálhatnak a termelők, kutatók és döntéshozók számára.

1.2. Célkitűzések

A kutatás célja az volt, hogy feltárja, milyen hatással van a különböző ideig fennálló, eltérő vízmélységű vízborítás az őszi búza fejlődésére, hozamára és minőségére. A vizsgálat során nemcsak a hozammennyiség alakulását követtük nyomon, hanem a fehérje-, sikértartalom és Zeleny-érték, valamint a W érték változását is figyelembe vettük, mivel ezek a paraméterek alapvetően meghatározzák a betakarított termény értékét, különösen malmi búza esetében.

További célkitűzésként szerepelt a növény fiziológiai állapotának nyomon követése nem destruktív módon, kézi SPAD-mérések és drónnal történő távérzékelés (UAV) segítségével. A GNDVI és BNDVI vegetációs indexek, valamint a SPAD-értékek összehasonlítása lehetőséget adott arra, hogy felmérjem ezek korrelációját, illetve azt, hogy a vegetációs indexek alapján mennyire pontosan becsülhető a relatív klorofilltartalom.

Ezen összefüggések feltárása lehetőséget adhat a jövőben gyors, költséghatékony monitorozásra.

A kutatásban alkalmazott kísérleti rendszer liziméteres beállítás, kontrollált vízmélység és időtartam lehetővé tette a vízborítás okozta stressz pontosabb modellezését. Cél volt annak vizsgálata, hogy a különböző mélységű (felszíni, -30 cm és -60 cm) vízállások milyen mértékben befolyásolják a növények anyagcsere-folyamatait, a vízfelvételt, valamint a gyökérszóna levegőellátottságát, és ennek következtében a hozam és minőség változását.

A statisztikai célkitűzések közé tartozott annak meghatározása, hogy a vízszint, az időtartam és az évszám milyen szinten befolyásolja önállóan, illetve kölcsönhatásban a vizsgált paramétereket.

A MANOVA és ANOVA módszerek lehetővé tették ezek együttes elemzését, míg a post-hoc tesztek – különösen a Games-Howell eljárás – segítettek a szignifikáns különbségek feltérképezésében.

Kutatási célok

1. A belvív-szimuláció végrehajtása kompenzációs liziméterekkel különböző mélységű vízborítás (0;-30;-60 cm) és tartósság (3-6-9-12 nap) mellett.
2. A növények víztűrésének (őszi búza) milyen tolerancia értékei mutatkoznak?
3. Belvív-szimulációs kísérlet kiértékelése távérzékelési módszerekkel (drón) hogyan használható?
4. A különböző mélységű vízborítás (0-30-60 cm) és tartósság (3-6-9-12 nap) mellett a vizsgált növények tüneteinek mértéke hogyan határozható meg, hogyan detektálható?
5. A relatív klorofilltartalom mérés és a távérzékelte adatok hogyan viszonyulnak egymáshoz?
6. A különböző vízszintek és tartósságok hogyan befolyásolják a hozamot, malomipari mutatókat stb.?

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

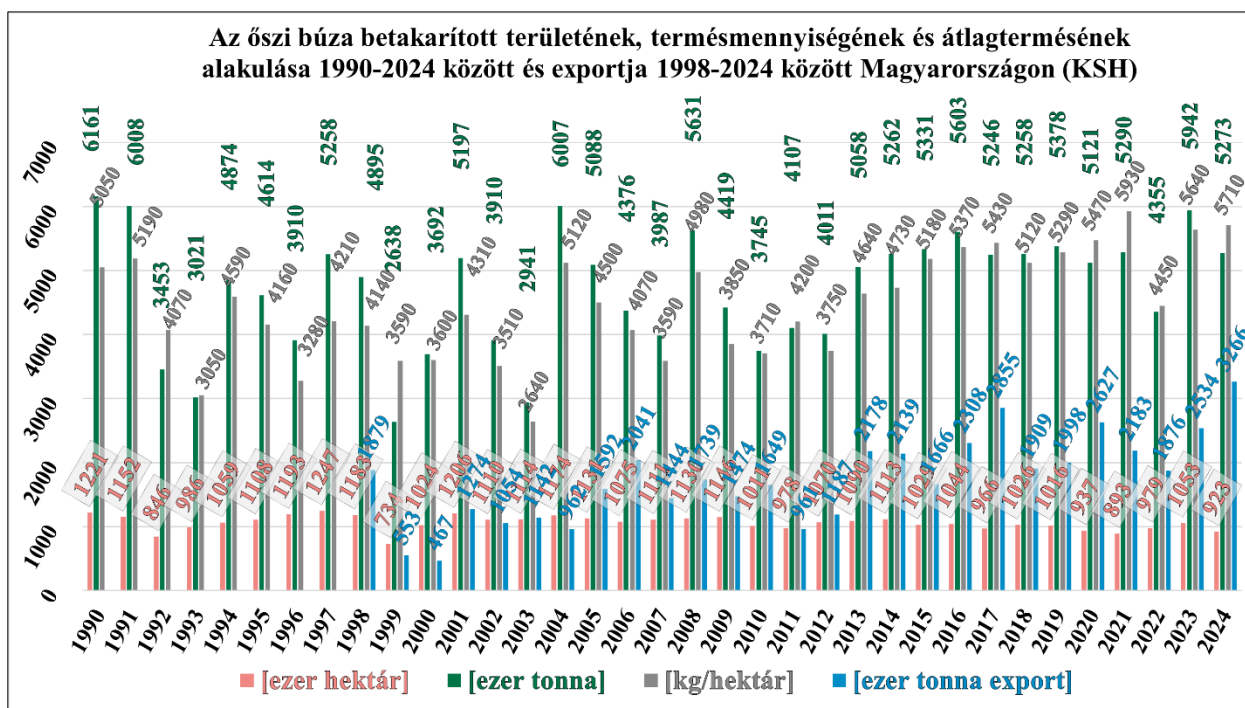
2.1. Az őszi búza jelentősége

A magyar paraszti nyelvben a búzát és a belőle készült kenyeret régen az „élet” szóval illették. A Kárpát-medencében a középkortól a 20. századig a búzakenyér volt a legfontosabb táplálék. Ebből származnak olyan mondásaink, mint, „Életet ad az Isten, csak legyen hozzá békesség.”. Ukrajnában a hidegebb időjárásnak jobban ellenálló rozs volt a fő kenyérgabona. Ezért hasonló összefüggésben a „жито” (zhyto) rozs szó és a „життя” (zhyttya) élet szoros nyelvi kapcsolata is innen ered. A rozs biztosította az *életet*, azaz a kenyér alapját. Betlehem (arabul: بيت لحم, héberül: בית לחם; *Beit Lechem*) város neve szó szerint „A kenyér háza” itt a *lechem* (kenyér) a gabona és az élet szimbolikus központja.

Az őszi búza (*Triticum aestivum* L.) világszerte fontos növény, amely jelentős szerepet játszik az élelmezésbiztonságban, a mezőgazdasági fenntarthatóságban és a gazdasági stabilitásban. A búza nagy népszerűségének oka, hogy szénhidrát- és fehérje makrotápanyag tartalma egyensúlyban van, teljes gépesítettséggel gazdaságosan termeszthető, akár öröletlen szemek, akár liszt formájában hosszú időn keresztül jól tárolható és a legkülönbözőbb éghajlaton termeszthető szerte a világon (Shaw, 1955). Történelmileg Magyarországot Európa gabonakamrájaként ismerték, mivel kiváló minőségű búzája népszerű árucikk volt a nyugat- és dél-európai piacokon (Tóth et al., 2006). A magyar búza minősége továbbra is kulcsfontosságú tényező a nemzetközi piacokon való versenyképesség szempontjából, mivel a kivitelnek döntő jelentőségűek az olyan specifikus minőségi paraméterek, mint a fehérjetartalom és a gluténszilárdság (Pepó, 2003; Tóth et al., 2006).

Magyarország őszi búzatermelése az elmúlt években jelentős ingadozásokat mutatott. 2024-ben Magyarország 5,3 millió tonna búzát termelt, ami csökkenést jelent az előző évi 5,9 millió tonnához képest (1.ábra). A búza hektáronkénti átlagos hozama Magyarországon 2021-ben érte el a csúcst 5930 kg/ha, de a 2024-es aszályos évben is körülbelül 5710 kg/ha termelt (1.ábra). Ebben lehet a 2020-as év júniusi és őszi-téli csapadékösszegének és annak lehetett szerepe, hogy 893 ezer hektárra csökkent 2021-ben a betakarított terület és talán ebben az évben a gyengébb területeken mást vetettek búza helyett.

Mindenesetre a búza döntő szerepet játszik Magyarország mezőgazdasági szektorában. 2023-ban a búza volt az országban a betakarított terület alapján a legfontosabb gabonafajta, több mint egymillió hektáron termesztették, ami növekedést jelentett az előző évhez képest (1.ábra). A gabonafélék termelési értéke Magyarországon 2019-ben 2,5 milliárd euró volt, 2024-ben a 2,25 milliárd eurót ért el (Eurostat, 2025). A búza jelentősen hozzájárul ehhez az értékhez, mivel még 2021-ben is az ország teljes gabonatermelésének 39%-át tette ki (KSH, 2025a). A gabonafélék, beleértve a búzát, Magyarország legfontosabb exporttermékei közé tartoznak. Hazánkban a gabonapiac exportértéke 2025-ben 1,89 milliárd dollárra fog emelkedni (Statista, 2025).



1. ábra Az őszi búza betakarított területének, termésmennyiségének és átlagtermésének alakulása 1990-2024 között és exportja 1998-2024 között Magyarországon (Forrás: Gabonaszövetség adatgyűjtése alapján saját szerkesztés, 2025 és a KSH adatbázis alapján saját szerkesztés (KSH, 2025b))

2.1.1. Az őszi búza fejlődési szakaszai (fenofázisai)

Ezek a szakaszok kulcsfontosságúak a búza fejlődésében és a végső termés mennyiségében (2. ábra).

Csírázás (Germination stage): A száraz szem tömegének kb. 50%-ának megfelelő vizet kell felvennie a csírázáshoz. A csírázás (*germination*) 0 °C körül indul, optimális 15–20 °C-on, amelyet a hőmérséklet, a magágy minősége és a talajnedvesség befolyásolja. Optimális körülmények között 12–14 nap, kedvező esetben 5 nap alatt kikel (Broeske et al., 2020).

Kelés (Seedling emergence stage): A csíranövény vagy magonc szakasz (*seedling stage*) az elsődleges lombszelekek megjelenéséig tart (Zadoks et al., 1974).

Bokrosodás (Tillering stage): Az első mellékhajtás (*tiller*) megjelenésétől a szárba indulásig tart (2. ábra). Már 2–4 °C-on is elkezdődhet, optimális 13–18 °C-on. Keléstől 15–25 nap, késő őszi vetésnél 4–5 hónap (Broeske et al., 2020). Ősszel indul, a szervdifferenciálódás tavasszal zajlik, ekkor dől el a kalásonkénti kalászkaszám. Fontos a tápanyagellátás, főleg nitrogén. A bokrosodást a hajtásszám, a produktívat a kalászs szám jelzi.

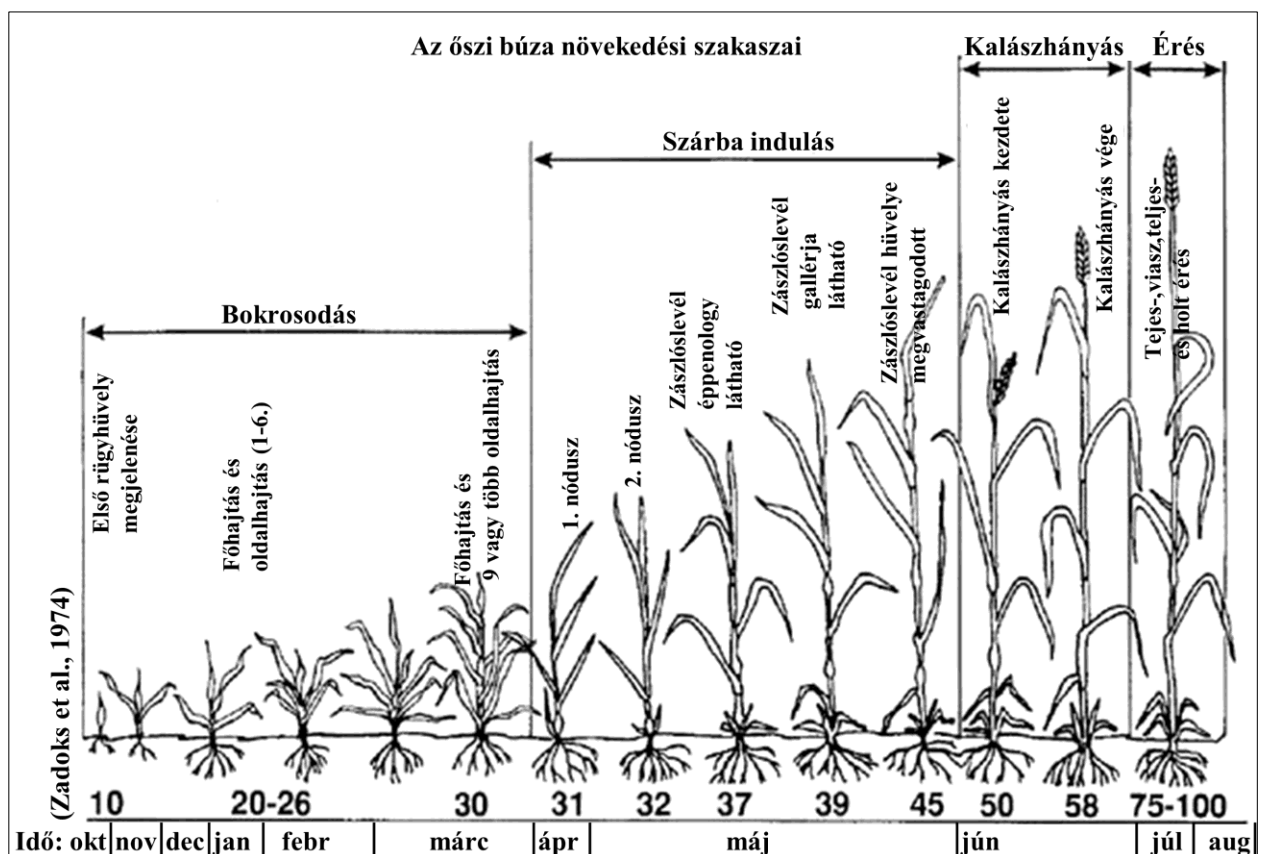
Szárbaszökés, szárbaindulás (Shooting-; Jointing- vagy Stem extension stage): Az első kitapintható nódusztól a kalászosítás kezdetéig tart (2. ábra). A vegetatív szervek gyors növekedése, a virágkezdemények kialakulása jellemzi. Őszi búza csak hideghatás (vernalizáció) (–1+1 °C, 40–60 nap) után indul szárba. A tavaszi időjárás befolyásolja a kezdetét és ütemét. Korán

beköszöntő meleg tavaszon a bokrosodás csak rövid ideig tart, a szárba szökés korán megindul. Ha a meleg szárazsággal párosul, a szár rövid lesz. A főhajtás megnyúlása a mellékajtások kialakulása után indul. A kalászkaszám felső határa genetikailag meghatározott. A fajták maximális magasságára a tenyészidő alatti csapadék mennyiségének döntő hatása van (Zadoks et al., 1974).

Kalászhányás, kalászolás (Heading stage): Az első kalász megjelenésétől (*ear formation; ear emergence*) a teljes kalászolásig (*full heading*) tart. Meghatározódik a termékeny virágok száma. A kalász teljesen kifejlődik, majd kitolódik a levélhüvelyből (*booting*). Május végén, 4–9 nap alatt zajlik. A megelőző 2 hétben a magas hőmérséklet kedvezőtlenül hat (Zadoks et al., 1974).

Virágzás (Flowering- vagy Anthesis stage): Az első portokok kilépésétől az összes kalászká elvirágzásáig tart (2. ábra). A virágzás előtti folyamatok a szemszámot, az utána következők a szemtömeget határozzák meg. Nyitva virágzás jellemző, főként öntermékenyülés történik. Egy kalászban 3–5 virág termékenyül, de 2–3 szem fejlődik ki (Zadoks et al., 1974).

Érés (Ripening- vagy Grain Filling stage): Négy fokozata van. *Tejes érés (milk stage):* a tábla zöld, a szem tejszerű, víztartalma ~50%. *Viaszerés (dough stage):* a szár és levelek sárgák, a szem viasszerű, víztartalma 20–25%. *Teljes érés (full ripening):* víztartalom 13–15%, táplálóanyag-bevándorlás megszűnt. *Holtérés (over-ripening vagy dead ripe stage):* a kalász törékeny, a szem kipereg, minősége romlik (Broeske et al., 2020).



2. ábra Az őszi búza növekedési szakaszai (Zadoks et al., 1974)

Zadoks-fejlődési skála főbb kódjai (Growth Stage, GS v. Decimal Code, DC) a búzára

GS00–GS09: Csírázás, Kelés; GS10–GS19: Levélfejlődés; GS20–GS29: Bokrosodás GS30–GS39: Szárba szökés; GS50–GS59: Kalász fejlődése; GS60–GS69: Virágzás; GS70–GS77: Tejesérés; GS78–GS90: Teljes érettség; GS91–GS100: Holtérés (Zadoks et al., 1974)

2.2. Az őszi búza beltartalmi összefüggései

A őszi búza magas fehérje- és keményítőtartalmával, kiegyensúlyozott ásványianyag-összetételével, valamint jelentős vitamin- és antioxidáns-tartalmával tűnik ki (1.táblázat). Más gabonafélék, mint például az árpa és a zab, azonban magasabb rosttartalommal és speciális aminosavakkal rendelkeznek, ami különböző táplálkozási igényeknek felel meg (Györi, 2015). Az árpa például magasabb cink- és vastartalommal rendelkezik, mint a búza (Bieńkowska et al., 2019). A rozs rendelkezik a legmagasabb fitázaktivitással, ami elősegíti az ásványi anyagok felszívódását (Rodehutschcord et al., 2016).

1 táblázat A gabonafélék átlagos kémiai összetétele (Lásztity Radomir, 1981)

Megnevezés	Búza	Rosz	Árpa	Zab	Kukorica	Rizs	Cirok
Víz-tartalom, %	13	13	13	13	13	13	13
Nyersfehérje, %	12,2	11,6	11	11,3	10,6	8,1	11
Nyersszír, %	1,9	1,7	2,3	5,8	4,6	1,2	3,5
Rost, %	1,9	1,9	4,3	10,9	2,3	0,5	4,9
N-mentes kivonat, %	69,3	69,8	67	55	68,5	75,8	65
Hamu, %	1,7	2	2,4	3,2	1,2	1,4	2,6
Keményítő, %	71,9	71,9	73,4	55,5	79,7	81,6	70,1
Tiamin, mg/kg	4,6	4	3,4	3,4	5,8	3,8	3,6
Niacin, mg/kg	50,2	14,2	19,6	48,2	16,4	44	26,2
Riboflavin, mg/kg	1	1,8	1	1,6	0,8	0,6	0,8
Pantoténsav, mg/kg	12,8	11	5,2	7,4	13,6	9,4	10

2.2.1. Az őszi búza szemtermés fehérjetartalma és a hozama közötti összefüggés

A őszi búza hozama és fehérjetartalma közötti kapcsolat összetett, és gyakran negatív korreláció jellemzi. Ez azt jelenti, hogy a hozam növekedésével a fehérjetartalom csökken, és fordítva (Kadar et al., 2018; Kondić-Špika et al., 2019). Gorinoiu és munkatársai (2025), az előzők kutatási eredményeit megerősítve, a fehérjetartalom és a hozam között fordított arányosságot mutattak ki, valamint bizonyították, hogy a keményítőtartalom pozitív arányosságot mutat a hozammal az öt évig elemzett 25 búzafajták esetében (Gorinoiu et al., 2025). Iwabuchi és munkatársai (2011) is megállapították, hogy a fehérjetartalom negatív korrelációban áll a hozammal és az ezerszemtömegeggyel, valamint pozitív korrelációban áll az érés időszakában a napsütéses órák számával (Iwabuchi et al., 2011). A fehérjék aminosavakból épülnek fel. Minden aminosav tartalmaz egy aminocsoportot ($-NH_2$), amely nitrogént tartalmaz. A fehérjék összetétele változó (különböző aminosavak arányától függ), de átlagosan kb. 16% nitrogént tartalmaznak. A fehérjetartalomra több becslő képlet van. Egy általánosan használt képlet, ahol a (pl. Kjeldahl-módszerrel) mért nyers nitrogéntartalmat szorozzák a búzafehérjékre vonatkozó ún. „Jones-féle

faktor"-ral (5,71) (vagyis fehérjetartalom=nitrogéntartalom*5,71) (FAO, 2013). Így nem meglepő, hogy a nitrogén (N) műtrágyázás jelentős hatással van mind a hozamra, mind a fehérjetartalomra. Pepó Péter és mtsai. (1986) a legmagasabb N- és fehérjetartalmat a hat beállított műtrágyaadagok közül a legnagyobb (N300 P225 K265) műtrágyaadag kezelésben kapták mind öntözetlen, mind öntözött körülmények között (Pepó et al., 1986). A N-adag növelése általában mindkét tulajdonságot javítja egy bizonyos küszöbértékig, amelyen túl a hozam tovább növekedhet, míg a fehérjetartalom stagnál vagy csökken (Xue et al., 2007; Árendás et al., 2008; Skudra and Ruza, 2016; Feng et al., 2022). Az optimális N- és foszfor (P) adagok szinergikus növekedést eredményezhetnek mind a hozam, mind a fehérjetartalom tekintetében (Feng et al., 2022). Ezekre közvetve és/vagy közvetlenül ill. interakciókban hatással lehetnek időjárási- és éghajlati-; genetikai-; termőhelyi-; művelési és technológiai-;biológiai-; vízgazdálkodási- stb. tényezők (2. táblázat).

2 táblázat Példák az őszi búza fehérjetartalmára és hozamára ható tényezőkről

Az őszi búza fehérjetartalmára és hozamára ható tényezők		
Tényező	Kategória	Alkategória, példa
időjárás	hőmérséklet	vernalizáció, légköri aszály
	csapadék, csapadékeloszlás	relatív páratartalom
	szél	párolgás;szélbeporzású (anemofil) növények
talajtényezők	talaj vízgazdálkodási tulajdonságai	nedvességforgalma;hasznosítható vízkészlet
	talaj tápanyagtartalma	tápanyagszolgáltató-képesség
	a talaj kémiai és fizikai tulajdonságai	talaj pH és szerkezet
termőhely	földrajzi elhelyezkedés	domborzat, tengerszint feletti magasság; mikroklíma
	napsütéses órák száma	bokrosodás, kalászolás, fotoszintézis
	vízellátás	talajvízmélység;vízminőség
művelési és technológiai tényezők	vetésidő	gyenge bokrosodás vagy megdőlés
	tőszám, sortávolság	befolyásolja a fényhasznosítást és a bokrosodást, a tápelem és tápanyag dinamikát.
	agrotechnika	talaj-előkészítés, gyomirtás, agrokémia, növényvédelem, földhasználat
kórokozók és kártevők	fauna, flóra	vetésfehérítő, gyomtársulások, tápanyagkonkurencia
talajbiológia	mikorrhiza, baktériumok	pentozánhatás, élővetemény C/N arány, hummát effektus,Fuzárium fajok
vízgazdálkodás	vízkészlet-gazdálkodás	öntözés, elvezetés; többletvíz- és só stressz, denitrifikáció
toxikológia	nehézfémek, légszennyezés	tápanyagfelvétel zavara, oxidatív stressz
genetikai tulajdonságok	fajta (genotípus)	kalászonzkenti szemszám, szemek ezerszemtömege, bokrosodási képesség, érésidő, betegségekkel szembeni ellenállóság, aszály-, hő- és hidegtűrés, fotoszintézis hatékonysága

2.2.2. Az őszi búza szemtermés sikértartalma és hozama közötti összefüggés

A őszi búza sikerfehérjéit elsősorban a gluteninek és a gliadinok alkotják, amelyek hozzájárulnak a tészta rugalmasságához és nyújthatóságához. A sikért képlékeny, rugalmas, víz és só által oldhatatlan anyag csak búzalisztből lehet nyerni, más gabona lisztjéből nem (Kurt Polat and Yagdi, 2017). A gliadinok és a gluteninek aránya (Gli/Glu) döntő fontosságú a tészta tulajdonságainak meghatározásában. A magasabb, különösen a nagy molekulásúlyú glutenin alegységekből álló (HMW-GS,High Molecular Weight- Glutenin Subunits), sikértartalom jobb tésztaaszilárdsággal és kenyérsütési minőséggel jár együtt (Horvat et al., 2006, 2013; Marti et al., 2015). A nitrogénműtrágyák bizonyos szintig (225 kg/ha) történő alkalmazása növeli mind a hozamot, mind a sikértartalmat, de a túlzott nitrogén adag a gabonamagok szemtelítődését és a

hozamát csökkenti (Liu and Shi, 2013). A környezeti feltételek és az agronómiai gyakorlatok, mint például a vetésforgó és a műtrágyázás, hatással vannak a sikértartalomra (4.táblázat). Például az ökológiai gazdálkodási gyakorlatok a hagyományos módszerekhez képest magasabb sikerindexet eredményezhetnek (Szalay et al., 2009; Teinb et al., 2010).

2.2.3. Az őszi búza szemtermés Zeleny értéke és hozama közötti összefüggés

A Zeleny-féle szedimentációs index meghatározása a sikerfehérjék savas közegben történő megduzzadásán alapszik (Zeleny, 1947). A szedimentációs térfogatból a liszt minőségére lehet következtetni (Zeleny, 1947). A szedimentációs index (Zeleny teszt) mérésnél, a mintát tejsavoldatban szuszpendálják, meghatározott ideig állni hagyják, majd megméri a fehérje- és keményítőrészecskék ülepitési magasságát (Zeleny, 1947). Az így nyert üledék összefüggésben áll a glutenin duzzadásával, ami korrelál a lisztek sütőipari minőségével (Eckert et al., 1993). A lisztek szedimentációs értéke függ a búza fehérje összetételétől, ami általában jól korrelál a siker- és fehérjetartalommal, a búza szemkeménységével és a kisült kenyér térfogatával (3. táblázat) (Pongráczné Barancsi et al., 2008). Hrusková és Famera (2003) a búza és a liszt fehérjetartalma és Zeleny szedimentációs értéke között pozitív és erős korrelációt igazoltak ($p < 0,01$) (Hruskova and Famera, 2003). A Zeleny értékek jobban korreláltak a búza fehérjetartalmával ($r=0,8748$), mint a liszt fehérjetartalmával ($r=0,8407$) (Hruskova and Famera, 2003).

3 táblázat Különböző búzafajták sikértartalma és Zeleny száma (Győri Zoltán és Mile Irma, 2011)

Fajta	Sikértartalom (%)	Zeleny-szám (ml)
GK Öthalom	32,49	42,5
Lupus	37,4	47
Saturnus	39,44	51
Sixtus	31,88	46,25
GK Kapos	30,96	54,5
GK Békés	34,59	50
MV Suba	29,91	48,75
MV Mazurka	37,87	57,75

2.2.4. Az őszi búza szemtermés W értéke és hozama közötti összefüggés

Az alveográfiai mérésekben a deformációs energia (jele:W;mértékegysége:Joule) a tészta reológiai (anyag „folyási”) tulajdonságainak értékeléséhez használt kritikus paraméter. A búzaminták alveográfus minőségének megállapítása kizárólag nemzetközi szabványok előírásai alapján történik. A lapos, pogácsa alakú tésztából kialakított próbatestet a műszer gömbbé fújja, miközben a tészta ellenállását a „buborék” kiszakadásáig diagrammal ábrázolja. Az alveográf egyebek mellett méri a tészta deformációval szembeni ellenálló képességét vagyis a W értékét, ami a tészta általános szilárdságának és rugalmasságának átfogó mérőszáma, amely ötvözi a deformációval szembeni ellenállást és a nyújthatóságot (Pojić et al., 2009; Pongráczné Barancsi, 2009). A búza esetében gyakran kompromisszumot kell kötni a hozam és a minőségi tulajdonságok között. Például a magasabb hozamok néha alacsonyabb fehérje- és gluténtartalommal járhatnak,

amelyek fontosak a tészta minőségének szempontjából (Gaj et al., 2012; Ma et al., 2021). Az alveográfiai W-értékhez hasonló minőségi paraméterek döntő fontosságúak a sütési tulajdonságok szempontjából, de nem feltétlenül járnak együtt a magasabb hozammal (Marcheva, 2021).

2.2.5. Közeli infravörös spektroszkópia a fehérje-, a sikértartalom, a Zeleny-érték és a W érték meghatározásához

A közeli infravörös spektroszkópia (near-infrared spectroscopy, NIRS) technológia széles körben használt a búza minőségi paramétereinek, például a fehérjetartalom, nedvesség, a Zeleny-szedimentációs érték és W érték meghatározására (Gaile et al., 2023). A hagyományos módszerek, mint a Zeleny-teszt, alveográfiai mérések idő- és munkaigényesek, míg a NIRS gyors, roncsolásmentes alternatívát kínál. A módszer pontossága nagymértékben függ a kalibrációs modellektől, melyeket változatos mintakészlettel fejlesztenek és validálnak (FOSS, 2014). A kalibrált modellek esetén magas R^2 értékek és alacsony előrejelzési hibák érhetők el. Ugyanakkor a környezeti tényezők, fajtabeli különbségek és egyéb változók hatással lehetnek a mérési eredményekre. A minták tisztasága és előkészítése szintén befolyásolja a pontosságot, ezért ezekre külön figyelmet kell fordítani. A gabonák közeli infravörös (NIR) mérései kiemelkedő teljesítményt nyújtanak, ha transzmittancia módban történnek, a reflektancia mód helyett. A transzmittancia módú mérések alacsonyabb hullámhossz-tartományban, 400–1050 nm között zajlanak, míg a reflektancia mérések elsődleges információi 1100–2500 nm között kerülnek begyűjtésre (FOSS, 2014). Az alacsonyabb tartományban a fény magasabb energiaszintje lehetővé teszi, hogy mélyebben behatoljon a gabonaszemekbe, így nemcsak a felület, hanem a szemek belső része is megmérhető. Mindez nagyobb mintatérfigat elemzését teszi lehetővé transzmittancia használatakor, ami jobb reprezentációt biztosít az analizált mintáról. A Foss Infratec™ NOVA közeli infravörös spektroszkópia (NIRS) az agrárminőség-értékelésben, így az őszi búza vizsgálatában is, széles körben alkalmazott eljárás, amelynek pontosságát több tanulmány is igazolja. A műszer az őszi búza fehérjetartalmát százalékban (% m/m, szárazanyag százalékos arányában) adja meg, a standardizált NIR (közel-infravörös) spektroszkópiai módszerrel mért értéként, amely a 12%-os nedvességtartalomra normalizált alapra épül (Foss Analytical, 2023). A mérés a WBPR0028-0 predikciós modellt használja, amely globális kalibrációval (több mint 30 000 mintán alapulva) biztosítja a pontosságot 0,1%-os hibahatáron belül, akár -4°C -tól $+40^{\circ}\text{C}$ -ig (Z. Yang et al., 2021). A fehérjetartalom előrejelzésében a NIRS nagyon jó teljesítményt mutat: a determinációs együttható (R^2) akár 0,989 is lehet, a keresztvalidációs négyzetes közép-hibája (RMSECV) pedig 0,263, ami a gyakorlati alkalmazhatóságát támasztja alá (Zhang et al., 2018; Anne Frank Joe et al., 2020). Egy másik vizsgálat szintén nagyfokú egyezést mutatott a hagyományos fiziko-kémiai meghatározással, $r=0,92$ korrelációs együtthatóval (Hao and Shi, 2023). A nedvességtartalom becslésére is hatékony a módszer: az R^2 értékek rendszerint 0,97 fölött vannak, ami alkalmassá teszi technológiai folyamatirányításra, ugyanakkor a pontosság függ a használt kalibrációs modellektől (Dowell et al., 2006). Egyes egyéb minőségi paraméterek – például lisztszín, hektolitertömeg és lisztszemcse-méret – előrejelzése is megfelelő ($R^2>0,70$) (Dowell et al., 2006). A keményítő- és hamutartalom becslésére különösen magas pontosságot írtak le, $R^2=0,998$, illetve $R^2=0,976$ értékekkel (Anne Frank Joe et al., 2020). A NIRS teljesítményét ugyanakkor jelentősen befolyásolja a kalibráció és az előfeldolgozás módja; például a Savitzky–Golay simítás és az standard normál változó (standard normal variate, SNV)

transzformáció érzékelhetően javíthatja a predikció pontosságát (Zhang et al., 2018; Rasooli Sharabiani et al., 2023). Néhány reológiai tulajdonság – így a tészta nyújthatósága és dagasztási optimuma– előrejelzésében alacsonyabb korrelációkat tapasztaltak, ezért ezeknél a paramétereknél a NIRS nem minden esetben helyettesíti teljes mértékben a hagyományos méréseket (Hao and Shi, 2023).

2.2.6. Az őszi búza szemtermés minőségi különbségei és az évjárathatás közötti összefüggések

Az emelkedő hőmérséklet negatív hatással van a kalászkok számára és a gabona minőségére. Az 1 °C-os emelkedés 14,7%-kal csökkentheti a kalászkok számát, és jelentősen csökkentheti a fehérje- és zsírtartalmat (Song et al., 2023). A magas éjszakai hőmérséklet (High Nighttime Temperatures HNTs) szintén csökkenti a gabonatermést, mivel növeli a légzés sebességét, ami akadályozza a beporzást és a gabona érését (Song et al., 2023).

A virágzás utáni magas hőmérséklet csökkentheti olyan kulcsfontosságú szabályozó enzimek aktivitását, mint a nitrát-reduktáz (NR), a glutamin-szintetáz (GS) és a glutaminsav-piruvát-transzamináz (GPT), amelyek elengedhetetlenek a fehérje képződéséhez (Zhao et al., 2008; Wu et al., 2013). Pepó Péter (1990) kandidátusi értekezésében konkrét adatokat szolgáltat az 1980-89-es évek kísérletei alapján: a vizsgált 10 évből a leggyengébb években 25-30%-os, a legjobb években 30-37%-os növekedést okozott az évjárat a sikértartalom alakulásában (Pepó, 1990). Ez az eredmény valamelyest ellent mond a 2.2.1,2.2.2 fejezetek hivatkozásaival, ugyanakkor rávilágít az őszi búza fehérjeszintézisére ható összetett folyamatokra. Az 1. ábrán láthatóak az őszi búza országos átlageredményei, amelyeket összevetve a 4. táblázat sikértartalmával, akár megerősítheti a sikértartalom és a hozam közötti negatív korrelációt (pl. 1996-2004 között a legkisebb hozam 2003-ban 2640 kg/ha→35,41;35,65; az időszak legnagyobb hozama 2004-ben 5120 kg/ha→31,29;31,73, megj. az országos átlageredmények egy kisparcellás kísérletről származó méréssel nem feltétlenül függnek össze).

4 táblázat Az évjárat hatása a búza sikértartalmára (Győri Zoltán. and Mile Irma, 2011)

Fajta	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
GK Öthalom	36,2	32,5	37,19	32,21	34,2	31,01	29,93	35,41	31,29
Fatima	33,2	32,83	32,17	35,83	35,54	34,15	31,52	35,65	31,73

A vízhez való hozzáférés, a vízzel telítettség, víznyomás, vízborítás és az aszály stressz megváltoztathatja a fehérje összetételét és tartalmát. A víz stressz hajlamos növelni a fehérjekoncentrációt, ugyanakkor csökkenti az egy szemre jutó fehérjetartalmat, míg az aszály stressz befolyásolja a nitrogén anyagcserét és a szemek számát csökkenti a nitrogén-újraelosztás és a poliamin-anyagcsere szabályozásán keresztül (Zhao et al., 2008; A.-C. Wollmer et al., 2018; Li et al., 2024).

A gabonák növekedése során a napsütéses órák száma és a csapadékmennyiség jelentősen befolyásolja a fehérjetartalmat (Pan et al., 2006). A magas napsütéses órák száma és a mérsékelt csapadékmennyiség kedvező hatással van a magasabb fehérjetartalomra (Zhao and Li, 2005).

A tenyészidőszak alatti csapadék, különösen a kritikus fázisokban, mint a szárba szökés és a szemtelítődés, jelentős hatással van a hozamra. Az aszályos körülmények, számottevő termésveszteséghez vezethetnek (Zhu et al., 2003). Ezzel szemben a megfelelő csapadék kedvezően befolyásolja a szemek nitrogén-felhalmozódását (Grabowski et al., 2014).

Az évjárat hatása a fehérjetartalomra

Az őszi búza virágzási és szemtelítődési szakaszában fellépő aszály csökkenti a terméshozamot, ugyanakkor növeli a szemek fehérjetartalmát (Zörb et al., 2017). A vizsgálat kimutatta, hogy az aszály következtében a fehérjetartalom növekedett, és a fehérjefrakciókban emelkedett a nagy molekulatömegű (high molecular weight, HMW) és bizonyos kis molekulatömegű (low molecular weight, LMW) glutenin al-frakciók aránya (Zörb et al., 2017). A nitrogéntrágyázási rendszerek hatását is vizsgálták a fehérjetartalomra; magasabb fehérjetartalmat figyeltek meg a hő- és aszálystressz kombinációja alatt, mint enyhébb aszály esetén (Statkevičiūtė et al., 2022). Emellett a klímaváltozás miatti késleltetett vetési időpontok szintén növelték a szemek fehérjetartalmát (Kaur et al., 2010; Bagherikia et al., 2025).

Az évjárat hatása a sikértartalomra

A vizsgálat szerint az őszi búza sikerminőségét a mérsékelt aszály- és hőstressz események önmagukban nem veszélyeztetik, de a nemesítési törekvéseknek a jobb szárazság- és hőtűrésre kell irányulniuk a stabil termelékenység biztosítása érdekében (Statkevičiūtė et al., 2022). A vetési idő hatása a sikértartalomra azt mutatta, hogy a szemtelítődés időszakában bekövetkező hőmérséklet-emelkedés – amelyet a késleltetett vetés idézett elő – növelte a szemek fehérjetartalmát és a nedves siker mennyiségét, ugyanakkor csökkentette az SDS (nátrium-dodecil-szulfát)- és a Zeleny-üledési értékeket, ami a sikererősség gyengülésére utalt (Bagherikia et al., 2025).

Az évjárat hatása a Zeleny-értékre és a W-értékre

A Zeleny-értéket és a W-értéket egyaránt befolyásolta a hő- és aszálystressz együttes jelenléte; ezekben az esetekben a fehérjetartalom és az üledési térfogat magasabb volt, ugyanakkor a hozam és az ezermagtömeg alacsonyabb (Statkevičiūtė et al., 2022). A szemtelítődés idején bekövetkező hőmérséklet-emelkedés növelte a szemek fehérjetartalmát és a nedves siker mennyiségét, de ezzel egyidejűleg csökkentette az SDS és a Zeleny-üledési értékeket, ami a sikererő gyengülésére utalt (Bagherikia et al., 2025).

Az évjárat és a hozam összefüggése

Litvániában a hivatkozott kutatásban a hozamot és a szemminőségi paramétereket sokkal súlyosabban érintette a hő- és aszálystressz együttes hatása 2019-ben, mint a 2018-as aszály; ugyanakkor magasabb hozamot értek el a nagyobb nitrogénbevitelű kísérletekben (Statkevičiūtė et al., 2022). A vetési idő hatását a hozamra szintén kimutatták: a késleltetett vetés jelentős terméseszkendést okozott, miközben növelte a fehérjetartalmát és a nedves sikert (Kaur et al., 2010). A globális felmelegedés hatásait vizsgálva kimutatták, hogy az őszi búza hozama a hőmérséklet emelkedésével csökkent, miközben a szemek fehérjetartalma számottevően nőtt (G. Yang et al., 2022; Song et al., 2023).

2.3. Az őszi búza vízigénye, vízfogyasztása és vízhasznosítása

A búza (*Triticum aestivum* L.) C3-as növény, vízhasznosítása közepes. A C3-as növények a Calvin-cikluson keresztül rögzítik a CO₂-t, első stabil termékük egy 3 szénatomos vegyület (3-foszfoglicerát) (Talukder et al., 2024). Ez a típus hűvösebb, mérsékelt éghajlaton előnyös, de meleg, száraz körülmények között kevésbé hatékony, mert fokozott a fotorespiráció. A búza transzspirációs koeficiense, a vízfogyasztási együtthatója (transpiration coefficient) kb. 300–600 liter víz szükséges 1 kg szárazanyag előállításához (Zhao et al., 2022).

Ez az érték a körülményektől függ. Kedvező hőmérséklet és jó talajnedvesség mellett kb. 300–400 l/kg. Száraz, meleg körülmények között: akár 500–600 l/kg (Zhao et al., 2022). A legkorábbi és a legkésőbbi érésű búzafajták között nagyjából 10–15 nap eltérés szokott lenni, de ez évjárártól és termesztési körülményektől is függhet. Viszont a búzánál ez a két hét különbség 50-70 mm vízigény-növekedéssel párosulhat, aminek a természetes kielégítése az Alföldön még jó vízgazdálkodású talajon sem mindig lehetséges, így a nagyobb termőképesség sem mindig realizálódik (Szalai, 1989).

2.3.1. Vízigény

A búzaállományok összes vízigényét az időjárási viszonyok és a termesztés színvonala nagymértékben befolyásolja. Hazánkban átlagos időjárású években, megfelelő agrotechnika mellett és a jelenleg termesztett fajták esetén ez mintegy 350-410 mm-re tehető. Ezt a vízmennyiséget a természetes csapadék legtöbbször nem fedezi. A vetéstől az érésig lehulló 390-480 mm (50 éves átlag) csapadéknak ugyanis csak 40-60%-a hasznosul, talajaink vízgazdálkodási tulajdonságaitól függően (Barabás, 1987). A vízhiány átlagos időjárású tenyészidőben a Dunántúlon 0-80 mm, az Alföldön 50-120 mm. Aszályos években a vízhiány ennél nagyobb is lehet. Mivel a tenyészidőnek március végétől július elejéig tartó szakaszában a búzának átlagosan 280-340 mm vízre van szüksége, amit az ez idő alatt lehulló csapadék legtöbbször megközelítően sem fedez, ezért a talajok tél végi hasznosítható (diszponíbilis) vízkészletének is alapvető jelentősége van a búza vízellátásában. Ennek ismeretében következtetni lehet a vízellátottság várható alakulására (Barabás, 1987). A búza legvízigényesebb időszaka a szárba szökéstől a szemképződésig tart. Ha ilyenkor vízhiány van, akkor fejlődése lelassul, a megtermékenyülés romlik, ami terméseszkökenést okoz. Hátrányos a szárazság kora tavasszal is, mert ez akadályozza a másodlagos gyökérszét kellő kifejlődését, és ezzel egy időben a bokrosodást. A vízigény (Vi) számítása legegyszerűbb módon a párolgási lehetőség (lehetséges vagy potenciális párolgás) vagy az azt reprezentáló valamilyen számított vagy mért klímajellemző (pl. a napi átlaghőmérséklet (t)) és egy -kísérleti mérések alapján megállapított- növényi szorzótényező (k, növényi szorzó tényező) figyelembevételével lehetséges ($V_i = k \cdot t$) (Petrasovits, 1988; Szalai, 1989). Az őszi búzának „k” növényi szorzó tényezője dekádonként változik (pl. IV.1.:0,2 és VI. 3.:0,13 értékek között) (Szalai, 1989). Az őszi búza FAO-s növényi tényező Kc, (Crop Coefficient) átlagos értéke 0,92 és a minimum értéke 0,42, a kezdeti fejlődési szakaszban, amikor még kevés a lombfelület. A maximum kb. 1,33 a bokrosodás–virágzás idején, amikor a lombfelület teljes, és a növény vízigénye a legnagyobb (Kang et al., 2003; Niaghi et al., 2015). Az őszi búza napi vízigénye május végén, június első felében éri el a maximumot, a napi 4-5 mm-t. Halmozott vízigényük kb. 270-350 mm, vagyis lényegesen kevesebb, mint a többi szántóföldi növényé (Szalai, 1989).

Tenyészidejük ugyanis nem nyúlik bele az év legmelegebb időszakába, ezért a kevés vizet jól hasznosítják. Az őszi búza ennyi vízből 8-10 t/ha szemtermést adhatnak, vagyis ez esetben a felhasznált víz 1-1 mm-ére 25 -30 kg szemtermés jut (Szalai, 1989).

2.3.2. Vízfogyasztás

A párolgás mértéke függ a hőmérséklettől, a párologtató felület nagyságától, a relatív páratartalomtól, a szélétől, a talaj nedvességtartalmától, a talaj kapilláris vízvezető képességétől, a talaj színétől és a talaj növényi fedettségétől. A vetéstől áprilisig 0,3-1,5 mm-re tehető a napi párolgás. Áprilisban, a szárra szökéstől kezdve, a levélfelület növekedésével párhuzamosan, gyorsan nő a napi vízfogyasztás 2-3 mm-re. Ez májusban 3-4 mm-re nő, majd május végén, június első felében éri el a maximális értéket, a 4-5 mm-t. (Kánikulai meleg és szeles napokon 6-8 mm vízfogyasztás is előfordulhat.) A levelek sárgulásával, majd elszáradásával együtt gyorsan csökken a vízfogyasztás 2, 1, majd 0 mm-re (Titz et al., 1973).

2.3.3. Vízhatalosítás

A termésátlagok növekedésével párhuzamosan a természetes csapadék egyre jobban hasznosul, azaz egységnyi szemtermés előállításához egyre kevesebb vízmennyiség szükséges. Az őszi búza egy kg szárazanyag előállításához 338-513 liter víz szükséges (Hellriegel, 1883; Briggs és Schantz, 1913). Az 1961-1965. évek átlagában elért 1,86 t/ha szemtermés 1 kg-jához még kb. 1770 t víz fogyott el, az 1976-1980. évek közötti 4,04 t/ha átlagterméshez már csak kb. 870 l/kg (Barabás, 1987). Ennek további javítására még mindig jó lehetőségeink vannak, mivel 500-600 l/kg átlagértékeket is el lehet érni ma már. A csökkenési folyamat azonban egyre lassúbb. A nemesítőknek nagyobb termőképességű, de kisebb fajlagos vízfogyasztású fajták előállítására, a növénytermesztőknek jobb vízhasznosulást lehetővé tevő technológiák alkalmazására, a talaj vízgazdálkodásának javítására kell törekedniük (Jolánkai, 1982). Mindent el kell követni a természetes csapadék hasznosulásának fokozására, mivel a vízhiány egyre jobban nehezíti, sőt gátolja a termésátlagok további növelését. Az általánosságban megállapítható, hogy bármely tápelemnek a pótlása, mely adott talajon a növények optimális ellátásához szükséges, jobb vízhasznosulást eredményez (Loch and Kiss, 2000). Optimális tápanyagellátás mellett legkisebb a transzspiráció (Loch and Kiss, 2000). A fajlagos vízfogyasztás a talaj vízellátottságától is függ. Általában a vízkapacitás 70–80 %-ának megfelelő víztelítettség esetén legkisebb a transzspirációs együttható. Ennél nagyobb víztelítettségénél a transzspirációs együttható ismét nő, vagyis a túl bő vízellátás is kedvezőtlenül hat a vízhasznosulásra (Loch and Kiss, 2000).

2.3.4. A telített talaj

Mezőgazdaság (Agriculture)

A telített talaj vagy víznyomás (waterlogging) a mezőgazdaságban azt az állapotot jelenti, amikor a talajt túlzott vízmennyiség telíti, ami oxigénhiányt idéz elő a gyökérzónában, és ez kedvezőtlenül befolyásolja a növények növekedését és termőképességét (Den Besten et al., 2021; Ploschuk et al., 2021; Majeed et al., 2023; Zhang et al., 2025). Ez a stressz származhat túlzott csapadékból vagy nem megfelelő öntözési gyakorlatból, amely anaerob körülményeket teremt, gátolva a növény élettani funkcióit, például a tápanyagfelvételt és a hormonok szintézisét (Majeed et al., 2023; Zhang et al., 2025). A víznyomás jelentős terméscsökkenést okozhat, amely a

növényfajtól és a fejlődési szakasztól függően változik (Liu et al., 2013; Ploschuk et al., 2021; Majeed et al., 2023).

Talajtudomány (Soil Science):

A talajtudományban a talajtelítettséget, a víznyomást az anaerob talajrétegek kialakulása jellemzi, amely periodikus vagy tartós víztelítettség következtében jön létre (Hollis and Lilly, 2023). Ez az állapot származhat a talajvízszint emelkedéséből, a vízelvezetés akadályozottságából vagy a felszíni víz felhalmozódásából, ami változásokat okoz a talaj morfológiájában és osztályozásában (Hollis and Lilly, 2023). A víznyomásos talajokra gyakran az oxigénszint csökkenése jellemző, ami befolyásolja a gyökérlégzést és a tápanyagfelvételt, továbbá előidézheti specifikus növényi szövettípusok, például az átszellőtető alapszövet (aerenchima) kialakulását (Elzenga and Van Veen, 2010, 2010; Liu et al., 2013).

Vízgazdálkodás (Water Management):

A vízgazdálkodás a telített talajt, vagy víznyomás kezelését különféle stratégiákkal végzi annak érdekében, hogy mérsékelje hatását a mezőgazdasági termelékenységre és a talaj egészségére. A hatékony vízgazdálkodás magában foglalja a vízelvezető rendszereket, az öntözési ütemezést és a távérzékelést a víznyomás monitorozására és megelőzésére (Den Besten et al., 2021; Ghosh and Mistri, 2020; Vlotman, 2023).

2.3.5. A telített talaj közvetlen hatása az őszi búzára

A telített talaj jelentősen befolyásolja az őszi búza növekedését és terméshozamát, és a hatások attól függően változnak, hogy milyen növekedési szakaszban következik be a pangó víz. Az alábbiakban a különböző tanulmányok (az őszi búza többletvízhatásáról, vízszinteken beállított kezelésekről, liziméteres kísérletekről szóló szakirodalmak) legfontosabb megállapításait ismertetem.

Csírázás (Germination stage):

A csírázáskor a magok rothadása és az alacsonyabb kelési arány jellemző (Ding et al., 2020; Pang et al., 2022). Ez elsősorban a telített talajban lévő oxigénhiánynak köszönhető, amely megzavarja a csírázáshoz nélkülözhetetlen anyagcsere-folyamatokat (Pan et al., 2021; Pang et al., 2022). A tanulmány kimutatta, hogy a különböző búzafajták (432 fajta) átlagos csírázási aránya (seed germination rate, SGR) az 5 napos vízzel való elárasztás szimuláció után 55,5%-ra csökkent, a csökkenés a fajták között széles tartományba (2,0–96,0%) esett, ami jelentős különbségeket jelez a búzafajták többlet vízstressz-toleranciájában (Pang et al., 2022).

Kelés (Seedling emergence stage):

Az őszi búza kelés során fellépő telített talaj jelentősen csökkenti az SPAD-értékeket, a hajtások számát, az egy növényre jutó kalászkok számát és a száraanyag-felhalmozódást (Y.-Q. Wu et al., 2015). Ebben a szakaszban a terméshozam 10–15%-kal csökken a telített talaj miatt (X. Wu et al., 2015).

Bokrosodás (Tillering stage):

A telített talaj a bokrosodási szakaszban a kalászok és a szemek m²-enkénti számának csökkenésével eredményezi a legjelentősebb termés kiesést (Shao et al., 2013; X. Wu et al., 2015). Ez a szakasz a klorofilltartalom és a fotoszintézis csökkenése miatt rendkívül érzékeny, ami a gyökér/hajtás arány (root/shoot ratio, RS) és az elektrontranszport sebesség csökkenéséhez vezet.

Szárbaszökés, szárbaindulás (Shooting-; Jointing- vagy Stem extension stage):

A szárbaszökéskor fellépő telített talaj csökkenti a fotoszintézis sebességét, a transzspirációt és a vízfelhasználás hatékonyságát, ami a gyökér- és hajtásnövekedés csökkenéséhez vezet (Shao et al., 2013; Wu et al., 2018; Chen et al., 2024). A előzőek befolyásolják a tápanyagfelvételt, ami átmeneti tápanyaghiányhoz vezet, a hozamcsökkenést elsősorban az ezer szemtömeg és a kalászok számának csökkenésének tulajdonították (A. -C. Wollmer et al., 2018, 2018).

Kalászhányás, kalászolás (Heading stage):

Ding et al. (2018) és Jin Tao et al (2020) szerint, a kalászképződési szakaszban a telített talaj jelentősen csökkentheti a növény magasságát, a gyökér- és hajtástömeget, valamint a szemtermést (Ding et al., 2018; Jin-tao et al., 2020). A terméshozam 3,8%-13,1%-kal csökkent a vízszinttartás időtartamától és súlyosságától függően (Ding et al., 2018; Jin-tao et al., 2020).

Virágzás (Flowering stage):

A virágzási szakaszban fellépő telített talaj csökkenti a fotoszintézis sebességét, a sztomatikus vezetőképesség és a transzspiráció sebességét, ami alacsonyabb szemszámot és szemtömeget eredményez (Wu et al., 2013, 2021). A termés csökkenés mértéke 8,07% és 47,84% között mozog, az érzékeny genotípusok esetében jelentősebb veszteségek tapasztalhatók (Wu et al., 2013, 2021). A nitrogén permetezés enyhítheti a virágzás utáni telített talaj néhány negatív hatását (Wu et al., 2013).

Érés (Ripening- vagy Grain Filling stage):

A telített talaj a szemtelítődés időszakában korai levélöregedést okozhat, ami negatívan befolyásolja a szemtelítődést és a terméshozamot (Araki et al., 2012). Ez különösen akkor nyilvánvaló, ha a telített talaj a szemkötődéskor jelentkezik és a szemtelítődés 3. szakaszáig folytatódik (Araki et al., 2012).

Őszi búza vízfelesleg stressze különböző vízmélységeknél

A vízfelesleg, különösen a vízborítás jelentős hatással van a őszi búza növekedésére és terméshozamára. Különböző vízmélységek vizsgálata alapján megállapították, hogy az optimális vízgazdálkodás kulcsfontosságú a káros hatások mérséklésében. Ha a talajvízszint sekély (20 cm) és az elöntés öt napig tart, akkor erőteljesen csökken a fotoszintézis, a növény magassága, valamint a gyökér- és szártömeg – ez jelentős termés kieséshez vezet (Jin-tao et al., 2020). Ezzel szemben a -40 cm-es mélységen történő, három napos vízborítás mérsékeltebb hatású (Jin-tao et al., 2020). Az optimális talajvízmélység 0,8–1,2 m közötti, ami megfelelő vízellátást biztosít túllöntözés nélkül (She et al., 2022). A korai stádiumban alkalmazott szabályozott deficit öntözés (regulated

deficit irrigation, RDI) elősegíti a stressztűrést a későbbi szakaszokban, és javítja a termésstabilitást (Sheng et al., 2022).

Többletvízstressz kísérletek őszi búzával

A vízstressz, függetlenül attól, hogy korai, késői vagy folyamatos, nagymértékben befolyásolja a őszi búza fejlődését, terméshozamát és minőségét (Ozturk and Aydin, 2004). A folyamatos vízstressz (CWS) akár 65,5%-kal is csökkentheti a szemtermést, míg a korai (EWS) és késői (LWS) vízstressz 40,6%-os, illetve 24%-os termésnövekedéssel jár a teljes öntözéses kontrollhoz képest (Ozturk and Aydin, 2004). A súlyos, ciklikus vízborítás és szárazság még nagyobb, 71–73%-os veszteséget is okozhat (Ding et al., 2018). Érdekes, hogy a vízstressz pozitívan is befolyásolhatja a szemek minőségi jellemzőit: növelheti a fehérjetartalmat (pl. +18,1% CWS esetén), a szedimentációs értéket és a nedves gluténtartalmat is miközben csökkenti az ezermagtömeget (Ozturk and Aydin, 2004). A növényélettani jellemzők, például a növénymagasság, levélfelület, klorofilltartalom és fotoszintézis, szintén érzékenyen reagálnak a vízstresszre (Herzog et al., 2016). A fotoszintézisért felelős sztómák működése különösen kritikus (Li et al., 2014). A bokrosodás és szármegnyúlás idején alkalmazott enyhe vízstressz, majd a nóduszosodás fázisban biztosított elegendő vízellátás jó kompromisszum lehet. A kombinált stresszhatások, például vízhiány, vízborítás és alacsony hőmérséklet, együtt még súlyosabb következményekkel járnak, jelentősen rontva a fotoszintézist és a hozamot (Li et al., 2014).

Vízborításos kísérletek őszi búzával

A vízborítás hatása a növekedés különböző fázisaiban eltérő. A bokrosodás idején a legsúlyosabbak a következmények: csökken a kalászsorszám és a természsúly, mivel a klorofilltartalom és fotoszintetikus teljesítmény is visszaesik (Malik et al., 2002; Herzog et al., 2016). A gyökérnövekedés jelentősen lelassul, csökken a gyökértömeg és a gyökér/szár arány. A szármegnyúlás és zászlóslevél fázisában történő vízborítás csökkenti a szemek súlyát, mivel romlik a szárazanyag-átalakulás (Malik et al., 2002). A talaj enzimeinek aktivitása – például az ureáz – nő a vízszint növekedésével, ami a tápanyag-hasznosítást is befolyásolja (Herzog et al., 2016). A szemképzés szakaszában a vízborítás kevésbé káros, sőt, rövid ideig javíthatja a levélfotoszintézist és hozamot is. Ugyanakkor a túl hosszú vízborítás ekkor is csökkentheti a kalászsorszámát és a szemek számát. A vízborítás erőteljesen csökkenti a fotoszintézist, különösen a korai fázisokban (X. Wu et al., 2015). A sztómák bezáródása és az elektrontranszport károsodása kulcsszerepet játszanak ebben. A gyökérnövekedés visszaesése miatt romlik a növény stabilitása és tápanyagfelvétele (Arduini et al., 2019). A vízborítás során csökken a növénymagasság és levélfelület, ami a biomassza mennyiségét is csökkenti. A vízborítás okozta hozamcsökkenés a kalászsűrűség, szemszám és ezermagtömeg csökkenésére vezethető vissza (Robertson et al., 2009). A megfelelő műtrágyázás – különösen a nitrogén pótlása virágzás után – javíthatja a gyökérlégzést, fotoszintézist és terméshozamot.

2.4. A többletvizek /belvizek/ hazai helyzete

Hazánk mintegy 5,5 millió hektárnyi szántóterületének optimális mezőgazdasági hasznosítása - egyéb tényezőket is figyelembe véve - csak megfelelő és okszerű vízgazdálkodás biztosításával valósítható meg (Vajda, 1975; Pálfai, 2004; Tamás, 2013).

Szántóterületünk tetemes részét - mintegy 10-15%-át - gyakran évenként is, időszakosan többlet felszíni víz borítja és emiatt ezeken a területeken teljes termésre sokszor egyáltalán nem, vagy csak kisebb terméshozamokkal lehet számolni (Vajda, 1975). Ez a mezőgazdaságilag hasznosított terület nemzetgazdasági szinten nagy jelentőségű, éppen ezért nem közönbös, hogy az őszi szántások és az elvetett növények mennyi ideig maradnak víz alatt, és a hosszantartó vízborítások milyen hatással vannak ezekre a területekre, illetve a növényekre.

A térben és időben is nagyon változó vízmélység átlagos viszonyok között 10-20 cm-re becsülhető, esetenként azonban elérheti a 50-60 cm-t, sőt többet is (Pálfai, 2004; OVF, 2018; Körösparti et al., 2019).

2.4.1. A növények vízigénye és víztűrő képessége

A növények vízigénye alapvetően két megközelítés szerint írható le: statikus és dinamikus oldalról (Szalai, 1989; Tamás, 2013). A statikus vízigény a talaj és a levegő vízzel való telítettségének kívánatos állapotát jelenti, vagyis azt a fizikai környezetet, amely a növények egészséges növekedéséhez szükséges (Stefanovits et al., 2005). Ezzel szemben a dinamikus vízigény azt a vízmennyiséget fejezi ki, amely a megfelelő vízállapot fenntartásához folyamatosan szükséges a bioszférában (Stefanovits et al., 2005). A statikus vízigény mértéke növényfajtól függően változik, de általában a pórustérfogat 65–85%-ának megfelelő vízmennyiség jelenti az optimális állapotot, miközben a levegőarány 15–35% között alakul (Stefanovits et al., 2005).

A növények egyaránt érzékenyek lehetnek a vízhiányra és a túlzott nedvességre. A vízrendezési beavatkozások során a növények víztűrő képessége az egyik legfontosabb jellemző. A vízborításos időszakok két szempont szerint értékelhetők. Az egyik az a tűrés idő, amely alatt a vízborításból eredő növénykárosodás gazdaságilag még elfogadható, vagyis a megelőzés költsége meghaladná a keletkező veszteség értékét (Sziebert et al., 2016). Ez az időtartam évszaktól is függ: a tél végi vagy kora tavaszi időszakban a növények többsége akár 5–10 napos belvízborítást is károsodás nélkül elviselhet, míg a nyári vegetációs időszakban – különösen virágzáskor – már 1-3 napos vízbőség is súlyos károkat okozhat több tényező fennállásakor (Sziebert et al., 2016). A másik szempont az agrotechnikai tűrés idő, amely a növénytermesztési munkák technológiai ütemtervétől való, még elfogadható mértékű eltérést jelenti.

2.4.2. A telített talaj, a pangó víz és a belvíz fogalma

Telített talaj (saturated soil)

A talaj telítődése akkor következik be, amikor a talaj összes pórusait kitölti a víz, és nem marad hely a levegőnek. Ez az állapot általában hosszan tartó esőzések vagy öntözés következtében alakul ki (Md Noor et al., 2011). A telített talaj a talaj szilárdságának csökkenéséhez és a talajerózió kockázatának növekedéséhez vezethet. Emellett a hipoxiás körülmények miatt, amikor a gyökerek nem jutnak elegendő oxigénhez, a növények növekedését is befolyásolja (Bedard-Haughn, 2009; Md Noor et al., 2011).

Pangó víz (waterlogging)

A növénytermesztésben a pangó víz a talaj vízzel való telítettségét jelenti, amely gyakran a rossz vízelvezetés miatt alakul ki, és a talaj hosszabb ideig tartó elárasztásához vezet (Hassan et al.,

2023). A pangó víz jelentős növénytermesztési károkat okozhat, beleértve a terméshozam csökkenését, a sótartalom növekedését és a növények fizikai károsodását. Ezenkívül csökkentheti a tápanyagok rendelkezésre állását és növelheti a kártevők és betegségek előfordulását (Bedard-Haughn, 2009; Md Noor et al., 2011; Harper et al., 2021).

Belvíz (Inland Excess Water, IEW; belvízelöntés: excess water inundation)

A belvíz egy tézisértékű fogalmát idézem: „A belvíz, a talaj olyan víztöbblete, mely egyrészt a talaj felső rétegeit – a levegő kiszorításával – kétfázisúvá teszi, másrészt nagy tömegben a terep lokális mélyedéseiben összefüggő, lefolyás nélküli szabad vízfelszínű elöntéseket eredményez” (Kozák, 2006). A belvíz egy speciális típusú pangó víz, amely nagy sík területek helyi mélyedéseiben jelentkezik, függetlenül a folyók áradásaitól. Hosszú ideig tartó elöntéssel jár (több nap vagy több hét, akár 2-3 hónap) és gyakori olyan régiókban, mint pl. a Kárpát-medence (Gál et al., 2017; Bozán et al., 2018).

2.4.3. A különböző kísérletek során alkalmazott vízszintek

A kezelések átlagos vízmélysége az egyes vizsgálatok és a vizsgált vízstressz típusai szerint változik:

A nyílt felszíni elöntés „belvizes”-kezeléseknél (víz a talajfelszín felett, vízzel borított terület)

Egyes tanulmányok 1–2 cm mélységű sekély vízzel borított területet tartottak fenn a szántóföld felszínén a vizsgált időszakokban (X. Wu et al., 2015). Más kísérletekben következetesen 2 cm vízmélységet alkalmaztak a talajfelszín felett (Ding et al., 2020). A csíranövény stádiumú értékeléseknél sekélyebb, 0,1–0,5 cm vízréteget tartottak fenn a talajfelszín felett (X. Jiang et al., 2022). Egy másik tanulmányban a vízborítást úgy idézték elő, hogy az edények felszíne felett 1 cm mélységű vízszintet tartottak fenn (De San Celedonio et al., 2014). A búzán végzett különböző elöntésű kísérletek meta-analízise szerint a vízszint -5 cm és +8 cm között változott a talajfelszínhez képest (Herzog et al., 2016). Vajda Imre szántóföldi körülmények között végzet 5, 10 és 20 napos vízborítások magasságát 40-60 cm körül, és 20-30 cm-rel a növénymagasságon felül állította be (Vajda, 1975). Egy üvegházi kísérletben és egy szántóföldi kísérletben a vízszintet egyszerűen a „talajfelszín felett” tartották fenn illetve a megadott mélység nélkül közölték (Shao et al., 2013; Fehér et al., 1986). Vajda Imre kandidátusi értekezésében a 29. oldalon bemutat Cziráky József által készített tapasztalati táblázatot, aki 3, 7, 11 és 15 napos elöntéseknél állapította meg a termés kiesési százalékokat őszi kalászosokra, viszont a táblázat nem tartalmaz vízszint jelölést és az értekezés forrásjelölést (Vajda, 1975).

A pangó vizes (waterlogging) kísérletekben

Egy kísérletben a sekély talajvízmélység hatásait vizsgálták őszi búzán, négy szinten beállítva a talajvízszintet: 60 cm, 90 cm, 120 cm és 150 cm (She et al., 2022). Más kutatások eltérő vízszinteket említettek a talajfelszín alatt, például 0, 10 és 20 cm-t, ami befolyásolta a bokrosodást és a járulékos (adventív) gyökérhosszúságot (Herzog et al., 2016). Liziméteres kísérletek kontroll kezeléseinél a vízmélységet (talajvízszint a felszín alatt) tipikusan 50 mm-re (5 cm-re) a talajfelszíntől a bokrosodási szakaszban, és 100 mm-re (10 cm-re) más szakaszokban tartották (Shao et al., 2013).

A vízstressz-kezeléseknél a vízkapacitás alapján és telített talajnál (saturated soil)

Egy szántóföldi kísérletben öt vízstressz-állapotot vizsgáltak őszi búzánál a talaj nedvességtartalma alapján a szántóföldi vízkapacitáshoz (field capacity, FC) viszonyítva: erős aszálystressz (FC 30–45%-a), mérsékelt aszálystressz (FC 45–65%-a), enyhe aszálystressz (FC 65–85%-a), elegendő vízellátás (FC 85–95%-a) és enyhe vízbőség (FC 95–105%-a) (Liu et al., 2020). Ezek a kezelések nem foglaltak magukban specifikus felszíni vízmélységet.

2.5. Vegetációs indexek és relatív klorofilltartalom index

A vegetációs indexek, mint talán a legismertebb normalizált differenciális vegetációs index, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vagy a kibővített vegetációs index (Enhanced Vegetation Index, EVI), stb. a növényi lombkoronák, zöld növényi részek, algák és egyéb objektumok által visszavert fényből származó információkat kvantitatív mutatókká alakítják, amelyeket a fotoszintetikus aktivitás és az ökológiai állapot megfigyelésére is alkalmaznak. Az NDVI nem azonos a biomasszával, bár a kettővel erősen korrelálhat. Az NDVI a 2.1. egyenleten alapul, ahol a közeli infravörös (Near-Infrared, NIR) és a vörös (Red) sávok visszaverődését hasznosítják a vegetáció jelenlétének, aktivitásának becslésére (Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - Vörös}{NIR + Vörös} \quad 2.1$$

A történelmi fejlődés során az első vegetációs indexek már az 1960-as években megjelentek. Birth és McVey a gyep reflektancia mérésével kísérleteztek (Birth and McVey, 1968), majd Jordan 1969-ben megalkotta a levél felület indexből (Leaf Area Index, LAI-ból) kiinduló megközelítést (Jordan, 1969). Birth és McVey 1968-ban az elsők közé tartoznak, akik a vegetáció termelését távérzékeléssel becsülték (Birth and McVey, 1968). Az NDVI mint kifejezett index Tucker munkájával vált elismert standardd (Tucker, 1979). Az ötlet Tucker 1977-es tanulmányából ered, ahol repülőgépes szenzorokkal végeztek vegetációs méréseket (Tucker, 1977).

Az Egyszerű Arány (Simple Ratio; NIR/Red) indexet már Pearson is alkalmazta a vegetáció lefedettségének becslésére (Pearson and Miller, 1972). A talajjal korrigált vegetációs index (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI) Huete et al. (1988) által került bevezetésre, ahol a talajhatást egy L faktoral kompenzálják (Huete, 1988). Ezt továbbfejlesztette a Modified SAVI (MSAVI) Qi et al. munkája (Qi et al., 1994), ahol az L faktort adaptívan állítják be. A Transformed SAVI (TSAVI) a talajvonallajtóját (a) és metszéspontját (b) veszi figyelembe (Baret and Guyot, 1991). Végül a talaj- és légköri hatásokra korrigált vegetációs indexszel (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index, SARVI) a felszínfényesség hatásait is csökkenti (Huete, 1997).

Az EVI-t Huete et al. (1997) fejlesztette ki (Huete, 1997), mely az NDVI korlátait, mint a szenzortelítődést vagy a talajhatást, igyekszik kiküszöbölni. Az NDVI értékeinek időbeli összegzése szorosan korrelál az összes fotoszintetikusan aktív sugárzással vagy elnyelt fotoszintetikusan aktív sugárzással (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR-ral), ami a bruttó primer produkció (Gross Primary Productivity, GPP) becslésére használható (Tucker et al., 2005). A vegetációs indexek alkalmazása rendkívül sokrétű. Felhasználják a mezőgazdasági

hozamok előrejelzésére, az erdők állapotának és biomasszájának monitorozására, valamint a klímaváltozás hosszú távú hatásainak nyomon követésére.

A módszerek folyamatos fejlődésen mennek keresztül. Ma már nemcsak az NDVI-t, hanem kombinált indexeket (pl. NIRv, VCI, TCI) is alkalmaznak. Emellett a 3D LIDAR térképezés, újabb műholdak és a hiperspektrális szenzorok megjelenése további értelmezési lehetőségeket nyit meg. A vegetációs indexek praktikus adatbázisa, leírásokkal elérhető szenzorokkal és azok képleteivel, stb. az „Index DataBase (IDB), A database for remote sensing indices” (Egy adatbázis a távérzékelési indexre) nevű oldalon érhető el (Henrich et al., 2009).

2.5.1. A GNDVI és a BNDVI indexek használatának indoklása

A kísérlet idején rendelkezésre álló drón NGB (NIR, Green és Blue) kamerával rendelkezik, melyben eltérő lencsetag és speciális szűrő található, mely a 390-570 nm, valamint a 680-790 nm közötti tartományban ereszt át a fényt, vagyis a kék (B:Blue) (kb. 450-495 nm), a zöld (G:Green) (kb. 495-570 nm) (Moradi et al., 2024) és a közeli infravörös tartomány (N:NIR) egy részében. A látható spektrum kb. 380-700 nm (Freebody, 2024), a közel infravörös tartomány kb. 700-2500 nm között van (Yamamoto, 2005; Dakin and Brown, 2017). Így a 680-790 nm-es tartomány a látható és a közeli infravörös spektrum közötti átmeneti tartományként írható le. A kamera szenzorának nincs tipikus vörös sávja (kb. 620-750 nm) (Qian et al., 2021). Így az NDVI-hoz szükséges vörös sáv nem áll rendelkezésre, ezért alternatívaként a szakirodalmakból a GNDVI és BNDVI indexeket választottam.

2.5.2. Zöld Normalizált Differencia Vegetációs Index (Green Normalized Difference Vegetation Index, GNDVI)

A GNDVI-t az NDVI néhány korlátjának, különösen a klorofillszintre való érzékenységének kiküszöbölésére fejlesztették ki. Ez teszi a GNDVI-t hatékonyabbá a sűrű lombkoronával rendelkező vagy előrehaladott növényfejlődési stádiumban lévő környezetekben (Daliman et al., 2024a). A GNDVI a 2.2-es egyenletben az NDVI 2.1. egyenletben lévő a vörös színt, zöld színnel helyettesíti, így kiválóan alkalmas a vörös sáv érzékenységgel nem rendelkező kamerák számára. A képlet a zöld és NIR sávokat használja ki, amelyek az érzékelőnk érzékenységi tartományán belül vannak (Marcial-Pablo et al., 2019; Singh et al., 2021). A GNDVI-ről kimutatták, hogy jobb előrejelzője a szemtermés hozamának olyan növények esetében, mint a durumbúza, ha a korai reprodukzív fejlődési szakaszokban mérik, összehasonlítva az NDVI-jal és más indexekkel, például az Simple Ratio (SR) indexszel (Kyratzis et al., 2017). A GNDVI korrelál a klorofillkoncentrációval és a vegetáció vitalitással.

$$GNDVI = \frac{NIR - Zöld}{NIR + Zöld} \quad 2.2$$

2.5.3. Kék Normalizált Differencia Vegetációs Index (Blue Normalized Difference Vegetation Index, BNDVI)

A BNDVI egy kevésbé elterjedt, de speciális célokra annál hasznosabb vegetációs index, amely a kék és NIR sávokat alkalmazza a vegetáció állapotának becslésére (2.3. egyenlet). A BNDVI alkalmazása különösen hasznos lehet olyan multispektrális rendszerek esetében, ahol a vörös sáv

nem áll rendelkezésre, vagy a szenzor konfigurációja másként van kialakítva (pl. NGB-kamerák esetén).

$$BNDVI = \frac{NIR - Kék}{NIR + Kék} \quad 2.3$$

A BNDVI érzékeny a levélklorofill koncentrációjára és a lombkorona szerkezetére, de a kék sáv légköri szóródásra való érzékenysége miatt általában kisebb megbízhatósággal alkalmazható erősen párás vagy szennyezett levegőjű környezetekben. Ennek ellenére, drónos távérzékelés során, kis magasságból végzett felmérések esetén a BNDVI stabil teljesítményt mutatott a vegetációs borítottság és az egészségi állapot feltérképezésében. A BNDVI-t kombinálva különböző modellekkel és indexszekkel terménytípusok, például búza, mustár és cukornád azonosítására alkalmazták, és a terménytől és az elemzéshez használt modelltől függően eltérő pontosságot mutatott (Pargaien et al., 2024). A kutatások alapján a BNDVI hatékony és gyors lehet vegetáció-felderítési feladatokban, valamint az NDVI és GNDVI alternatívájaként, amikor a vörös sáv mérése hiányzik vagy zajos (Sims and Gamon, 2002). A BNDVI hasznos olyan környezetben is, ahol a kék sáv további információkat szolgáltat a növényzet egészségéről és biomasszájáról. Magas korrelációt mutatott ki a föld feletti biomasszával az őszi búza növekedési szakaszaiban (Gordillo-Salinas et al., 2021). A BNDVI ugyanazokra a tényezőkre érzékeny, mint az NDVI, de a kék sáv használata miatt bizonyos körülmények között jobb észlelést biztosíthat. Hatékony a biomassza és a nitrogéntartalom becslésére, különösen a búza legfelső levélhüvely fejlődése és a tejesérés közötti (Zadoks növekedési redszere szerint a GS41-GS69 kód közötti) szakaszban (Gordillo-Salinas et al., 2021).

2.5.4. GNDVI és a BNDVI összehasonlítása a búza felmérésben

Az őszi búza vízstresszes környezetben a GNDVI és BNDVI indexek különböző vonatkozásban erősíthetik egymást a növényállapot felmérésében. Kimutatták, hogy a GNDVI korrelációja az őszi búza hozamával magasabb, ha a mérés a korai generatív szakaszban történik (Liu et al., 2020). Ezen túlmenően a GNDVI jól reagál a hő- és vízhiányos környezetre, valamint jobban magyarázza a növény állapotának időbeli változását ezekben a körülményekben (Kyratzis et al., 2017; Liu et al., 2020).

A BNDVI a kék és közeli infravörös sávokra épül, ezért kiemelkedően érzékeny a víztartalomra és a stressz korai tüneteire is. A BNDVI segítségével az elsődleges tünetek, a levél vízpotenciáljának csökkenése már korai vízhiány esetén is érzékelhető (Zhao et al., 2024). Vízstresszes környezetben mindkét index használható a stressz felismerésére, de eltérő szempontokra fókuszálnak. A GNDVI inkább a klorofill szint és a teljes vegetációs egészség indikátora, míg a BNDVI a növényi víztartalomra és szabad vízhiányra adott spektrális válaszokat tükrözi (Zhao et al., 2024). A vízzel korlátozott körülmények között a GNDVI megbízhatóbb lehet a hozam előrejelzésére a klorofill-tartalom stabilitása miatt (Liu et al., 2020). Eközben a BNDVI alkalmasabb ugyanazon időszakban a vízhiány korai detektálására, mivel a kék sáv hamarabb reagál a vízfeszültség változásaira (Zhao et al., 2024). A két index kombinált használata – például UAV-alapú távérzékelésben – lehetővé teszi a vegetáció egészségének és vízellátási státuszának egyidejű, komplex monitorozását egyetlen repülés során (Zhao et al., 2024). Ily módon a GNDVI

és BNDVI együtt alkalmazva átfogóbb képhez vezet a növényállapot-felmérésben vízstresszes kultúrákban, különösen az őszi búza esetében.

2.5.5. Relatív klorofiltartalom index (RCI) az őszi búza felmérésben

A Konica Minolta SPAD (Soil Plant Analysis Development)-502 Plus relatív klorofillmérő egy széles körben alkalmazott eszköz a növények, így az őszi búza klorofilltartalmának becslésére (T.G. Shibaeva et al., 2020). Jelentősége abban rejlik, hogy gyors, roncsolásmentes módon ad tájékoztatást a klorofilltartalomról, amely szorosan összefügg a növény nitrogén (N) állapotával és általános egészségével (Ling et al., 2011). A SPAD 502 Plus a levelek abszorbanciáját méri két specifikus hullámhosszon: 650 nm (vörös) és 940 nm (közeli infravörös) (Pinkard et al., 2006; T.G. Shibaeva et al., 2020). A készülék által szolgáltatott értékek relatívák, de kalibrációs egyenletek segítségével korrelálhatók a tényleges klorofilltartalommal (Ling et al., 2011). Ez a roncsolásmentes mérési módszer lehetővé teszi a növény egészségének és tápanyag-ellátottságának gyors és hatékony nyomon követését, anélkül, hogy károsítaná a növényt. Az őszi búzában a SPAD értékek és a tényleges klorofilltartalom között erős korrelációt mutattak ki (Bannari et al., 2006). Ez a relatív klorofillindex (RCI) számos növényfaj, köztük a búza levél nitrogénkoncentrációjával is összefüggésbe hozható, így a növény nitrogénstátuszának közvetett mérőszámaként szolgál (Hunt Jr. and Daughtry, 2014; C. Yang et al., 2021). Kutatások szerint az őszi búzában a SPAD értékek és a klorofilltartalom közötti korrelációs együttható (R^2) 0,66 és 0,79 között mozgott, a teljes klorofill (Chl-ab) esetében 0,72, a klorofill-a (Chl-a) esetében pedig 0,69 volt (Martínez and Guiamet, 2004; Bannari et al., 2006; T.G. Shibaeva et al., 2020). A SPAD leolvasások különösen hasznosak az őszi búza nitrogénellátásának és a növényi igények szinkronizálásában (Parvizi et al., 2004; Spaner et al., 2005; Monostori et al., 2016). Kimutatták, hogy erős pozitív korreláció van a SPAD értékek és az őszi búza szemtermése között, ami lehetővé teszi a nitrogén műtrágyázás optimalizálását, ezzel növelve a terméshozamot és csökkentve a környezeti terhelést (Monostori et al., 2016). A kalászhányás (GS 59) idején mért fajtaspecifikus SPAD érték pontosabb becslést adhat a búza végső termésére (Kitonga-Mwanza et al., 2011; Monostori et al., 2016). A SPAD mérő hozzájárul a műtrágyák hatékonyabb felhasználásához is (Bannari et al., 2006; Uddling et al., 2007; Schlichting et al., 2015).

Fontos azonban figyelembe venni, hogy a SPAD értékek és a klorofilltartalom közötti korrelációt befolyásolhatják genetikai és környezeti tényezők (Martínez and Guiamet, 2004). Különböző búzafajták eltérő SPAD-termés összefüggéseket mutathatnak, ami fajtaspecifikus kalibrációt tesz szükségessé a pontos termésbecsléshez és a nitrogén-gazdálkodási javaslatokhoz (Monostori et al., 2016). Továbbá, a pontos nitrogénigény-monitorozáshoz figyelembe kell venni olyan tényezőket, mint a mérés ideje, a besugárzás és a növény vízellátottsága, mivel ezek befolyásolhatják a SPAD értékeket (Martínez and Guiamet, 2004). A nem-lineáris regressziós modellek, például a polinom regressziók, jobb illeszkedést biztosíthatnak a SPAD értékek és a klorofilltartalom közötti kapcsolatra (Pinkard et al., 2006; Hunt Jr. and Daughtry, 2014).

2.6. Relatív radiometriai normalizálás

A radiometrikus normalizáció és radiometrikus korrekció alapvető eljárások a távérzékelésben, melyek célja a spektrális információ torzításmentesítése és összehasonlíthatóságának biztosítása

különböző időpontokban vagy helyszíneken készített műholdfelvételek esetén (Song et al., 2001). Bár e két fogalmat gyakran szinonimákként használják, valójában lényegi különbségek figyelhetők meg közöttük mind módszertani, mind célkitűzési szempontból (Canty et al., 2004; Du et al., 2002). A radiometrikus korrekció alapvetően a műhold által rögzített adatok abszolút radiometrikus kalibrálására vonatkozik, vagyis a nyers műholdas méréseket tényleges fizikai egységekre, például reflektanciára vagy radianciára alakítja át, figyelembe véve a légköri hatásokat és a szenzor kalibrációs hibáit (Pat S. ., 1996; Vermote et al., 1997). Ez a folyamat elengedhetetlen ahhoz, hogy a távérzékelési adatokból egzakt, fizikailag értelmezhető következtetések levonhatók legyenek (Moran et al., 1992; Schott, 2007). Ezzel szemben a radiometrikus normalizáció célja inkább a relatív összehasonlíthatóság biztosítása, nem feltétlenül abszolút értékek megadásával, hanem egy kiválasztott referenciaképhez viszonyítva a képek közös radiometriai tartományba igazítása által (Du et al., 2002; Yang and C.P., 2000). A radiometrikus normalizáció különösen fontos idősor-elemzésekben, ahol különböző időpontokban készült felvételeket kell összevetni egymással, például vegetációdinamika, környezetváltozás vagy városfejlődés vizsgálata során (Yang and C.P., 2000). Az eljárás során egy képet referenciaként kezelnek, és minden további képet ennek megfelelően korrigálnak, minimalizálva az eltérő légköri, fényviszonybeli vagy műholdbeállításbeli különbségeket (Canty et al., 2004; Du et al., 2002). A normalizáció tehát nem szükségszerűen ad abszolút értékeket, hanem relatív, viszonylagos helyességre törekszik (Elvidge et al., 1995). A radiometrikus korrekció ezzel ellentétben pontos fizikai értékeket biztosít, melyek például precíz kvantitatív elemzésekhez vagy földi validációkhoz szükségesek (Moran et al., 1992). Gyakran a radiometrikus korrekció egy előkészítő lépés, amely után további elemzések következhetnek, míg a normalizáció inkább a feldolgozás későbbi fázisaiban alkalmazható, amikor időbeli vagy térbeli összevetések történnek (Du et al., 2002; Canty et al., 2004). Így tehát a radiometrikus korrekció inkább technikai, fizikai alapokra építő eljárás, míg a normalizáció elemzésorientált és összehasonlító jellegű (Teillet et al., 1982; Yang and C.P., 2000). Mindkét folyamat kulcsfontosságú a pontos, megbízható és egymással összevethető távérzékelési adatok előállításában (Schott, 2007). Az alkalmazott módszerek és eljárások kiválasztása mindig konkrét körülményektől, a kutatási céltól és az elérhető adatok típusától függ (Schott, 2007; Song et al., 2001).

2.6.1. Abszolút- és relatív radiometriai normalizálás

A hibák csökkentése és a felületi reflektancia visszanyerése érdekében kétféle radiometrikus korrekciós megközelítés érhető el: abszolút és relatív korrekció (Zhang et al., 2017). Az abszolút korrekció elsősorban fizikai alapú sugárzási átviteli modelleket használ, mint például a MODTRAN (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) szoftver (Berk et al., 2015) és a Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) kód (radiative transfer code). Ezek végrehajtása kiegészítő terepi méréseket igényel a sugárzásról és más atmoszférikus feltételekről a képalkotás időpontjában, valamint számos bonyolult lépést és manuális műveletet tartalmaz, ami miatt általában csak műholdképek feldolgozására használják. Az abszolút korrekció az érzékelő kalibrálására is használható, ha a terepi mérés tartalmazza a felületi reflektancia mérését (Teillet et al., 1982; Thome, 2001).

Amikor az atmoszférikus feltételek és a felületi reflektancia egyidejű mérései nem állnak rendelkezésre, szükségessé válik a relatív korrekciós megközelítések alkalmazása. Ezek a megközelítések azt célozzák, hogy DN értékeket reflektanciává alakítsák, lehetővé téve a különböző feltételek között készült képek kalibrációját és összehasonlítását. Ez gyakran olyan pixelek azonosítását foglalja magában, amelyek abszolút reflektanciája idővel nem változik, és ezeket referenciaként használják az összes képhez (Hall et al., 1991; Schott et al., 1988). Ideális esetben ezek a pixelek az abszolút reflektancia széles tartományából kerülnek ki, hogy lineáris regressziót lehessen végezni.

A relatív korrekciós megközelítések feltételezik, hogy az érzékelőnél mért sugárzási értékek (DN-ek) arányosak a felületi reflektanciával a látható és rövidhullámú infravörös tartományban, ha a napállás szöge minimális és az égbolt besugárzása egyenletes, így egységes lefele irányuló sugárzást biztosítanak az egész jelenetben. Ha két vagy több időben állandó (pszeudo-invariáns, PIV) jellemző elérhető, amelyek spektrális változása minimális, lineáris regresszió hozható létre a DN értékek vagy az érzékelő sugárzási adatok felületi reflektanciává történő átalakítására (Canty et al., 2004; Schott et al., 1988; Yang et al., 2003).

2.7. Relatív radiometrikus normalizálás (RRN) többidőpontú (multitemporális) UAV-felvételeken

A többidőpontú pilóta nélküli légitárművekkel (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) készített képek relatív radiometrikus normalizálása számos kihívással jár, azonban elengedhetetlen lépés a pontos változásérzékelés és időbeli összehasonlíthatóság érdekében.

Főbb kihívások az UAV-felvételek többidőpontú radiometrikus normalizálásában

Komplex variációk: A többidőpontú távérzékelte képek közötti különbségek nemcsak valós felszínborítás-változásokat, hanem megfigyelési körülményekből eredő ál-változásokat is tartalmazhatnak, ami komoly nehézséget jelent a változásérzékelés szempontjából (Miao et al., 2025).

Nemlineáris spektrális jellemzők: A legtöbb radiometrikus normalizálási eljárás lineáris összefüggéssel számol, figyelmen kívül hagyva a fenológiai különbségek okozta nemlineáris hatásokat (Seo Dae Kyo and Eo Yang Dam, 2019).

2.7.1. Hagyományos relatív radiometriai normalizálási (RN) módszerek, modellek

A hagyományos RN módszerek többnyire statisztikai alapon működnek, és három fő csoportba sorolhatók: globális modellek, lokális modellek és kombinált modellek (Li et al., 2019).

A globális modellek egyetlen lineáris vagy nemlineáris transzformációs függvényt használnak a radiometriai eltérések korrekciójára. Például (Liangpei Zhang et al., 2014) legkisebb négyzetes (least-mean-square, LMS) transzformációt javasolt minden pixelpárra. (Xie et al., 2018)) irányított kezdeti megoldást adott a globális konzisztencia optimalizálásához. (Kim and Pollefeys, 2008) dinamikus programozással becsülte a fényerőtávíteli függvényt. További klasszikus algoritmusok: "dark element", hisztogram illesztés (Sun et al., 2013), színtranszfer módszerek, mint a Wallis szűrő (Li et al., 2006), lineáris Monge-Kantorovitch (LMK) (Pitie and Kokaram, 2007), és az iteratív eloszlás transzfer (IDT) (Pitie et al., 2005).

A lokális modellek régióspecifikus transzformációkat alkalmaznak. (Yu-Wing Tai et al., 2005) valószínűségi szegmentálást és Gauss-keverék modellt használt. (Xiang et al., 2009) tökéletesítette ezt, amikor több forráskép áll rendelkezésre. (Oliveira et al., 2015) lokális színpaletta-illesztési függvényeket illesztett trunkált Gauss-eloszlásokkal. (Li et al., 2015) lokális momentumillesztést és gamma-korrekciós modellt használt.

Kombinált modellek esetében a globális konzisztencia és lokális eltérések egyidejű figyelembevétele történik. Jia és Tang et al. (Jia and Chi-Keung Tang, 2005; Jiaya Jia and Chi-Keung Tang, 2003) mód nélküli csere függvényt (modeless replacement function) és tenzoros szavazást alkalmazott. (Jun Pan et al., 2010) hálózatalapú radiometriai kiegyenlítő eljárást fejlesztett. Yu et al., (2017), (Zhang et al., 2022) és (J. Jiang et al., 2022) kombinált globális-lokális stratégiákat vezettek be, többek között drónos felvételek spektrális illesztésére Sentinel-2 adatokkal.

A kvázi-invariáns jellemzők (pseudo-invariant features, PIF) elemzése is kulcsszerepet játszik az RN-ben. (Philpot and Ansty, 2013) iteratív újraszűzést javasolt a többváltozós változásdetekciós MAD (Multivariate Alteration Detection) transzformációhoz. (Yu et al., 2017) a MAD transzformációt és főkomponens-analízist használt. (Syariz et al., 2019) kötött ortogonális regresszióval kezelte a sávokon belüli spektrális inkonzisztenciát.

Az egyik legalapvetőbb módszer a pszeudo-invariáns jellemzők (PIF-ek) kiválasztása, amelyek olyan felszíni objektumokat jelentenek, amelyek reflektanciája az idő előrehaladtával változatlan marad. Ezek lehetnek épületek, burkolt utak, sziklás felszínek. A PIF-ek meghatározása történhet manuálisan vagy automatikusan, például főkomponens-elemzés vagy regressziós módszerek segítségével.

A PIF-alapú megközelítések egyik formája az egyszerű lineáris regresszió, ahol a célkép DN értékeit igazítják a referenciaértékekhez egy lineáris modell alapján. Ez a megközelítés jól alkalmazható homogén, kevésbé változó környezetben. A robusztus regresszió, mint például a RLR (Robust Linear Regression) vagy CRLR (Clustered RLR), továbbfejlesztett technikák, amelyek jobban kezelik az eltérő földhasználati típusokból eredő változatosságot, valamint ellenállóbbak a kiugró értékekkel szemben (Wang et al., 2024).

A No-Change regressziós normalizáció (NC) a változatlan pixelek iteratív azonosítását és újraszűzését alkalmazza. Ez a megközelítés különösen hasznos olyan UAV képek esetében, ahol a felvételek fényviszonyai és a geometriai torzulások is jelentősek lehetnek (Elvidge et al., 1995).

További megközelítés az Empirikus Vonal Módszer (ELM), amely ismert reflektanciaértékekkel rendelkező referencia panelek segítségével hoz létre lineáris kapcsolatot a DN és a valódi felszíni reflektancia között (Markelin et al., 2017). E módszer nagy előnye, hogy egyszerűen kivitelezhető és jól alkalmazható korlátozott terepi hozzáférhetőség esetén is.

Az MM (Minimum-Maximum) és MS (Mean-Standard Deviation) normalizálás statisztikai alapú eljárások, amelyek a célkép kontrasztját és fényességét állítják be a referenciaértékekhez képest. Bár egyszerűek, nem kezelik megfelelően a nemlineáris radiometriai különbségeket (Elvidge et al., 1995).

A Sötét-Világos Halmaz (Dark Set-Bright Set, DB) módszer egy másik hasznos technika, amely a képek legsötétebb és legvilágosabb régióinak átlagos értékein alapuló regresszióval végzi a normalizálást (Broncano-Mateos et al., 2010). Ez különösen hatékony lehet városi környezetek vagy változatos felszínborítottságú területek esetén.

A kereszt-érzékelő kalibrációs technikák (Cross-Sensor Spectral Fitting) a műholdas és drónfelvételek kombinálását teszik lehetővé (Coppin et al., 2004). Ezen technikák célja a spektrális konzisztencia elérése eltérő érzékelőkkel készített képek között. A módszer csökkenti a PIF-kiválasztás szubjektivitását és javítja az UAV és műhold adatok közötti kapcsolatot (Coppin et al., 2004).

A radiometrikus blokkbeállítás (Radiometric Block Adjustment) a képek geometriai és radiometrikus jellemzőinek egyidejű korrekcióját végzi, figyelembe véve a kétirányú reflexiós eloszlásfüggvény BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) hatásokat. Ez lehetővé teszi a homogén és pontos ortomozaikok előállítását több időpontból származó képek esetén is (Markelin et al., 2017).

Bár a hagyományos módszerek képesek a relatív radiometriai normalizálás (RN) megvalósítására, többségük elsősorban képmozaikolásra lett kialakítva, amelyhez átfedő területek megléte és az időben közeli képpárok elérhetősége szükséges, így alkalmazhatóságuk korlátozott. Emellett, noha mind a globális, mind a lokális jellemzőket figyelembe veszik, egyes módszerek csak olyan képpárok esetében hatékonyak, amelyek nem tartalmaznak jelentős évszakos eltéréseket. Ráadásul bizonyos eljárások (pl. hisztogram-alapú illesztés; színtranszfer algoritmusok, egyszerű statisztikai modellek) elkerülhetetlenül zajt vezetnek be a képekbe, ami a képminőség romlásához vezet.

2.7.2. Számítógépes látásalapú módszerek

A stílustranszfer és doméntranszfer módszerek új lehetőségeket nyitnak. A VGG-alapú (Visual Geometry Group, VGG neurális hálózatra épülő) kódoló (Gatys et al., 2016), lokálisan affin transzformált modellek (Luan et al., 2017) és fehéritő és színező transzformációk (Whitening and Coloring Transforms, WTC) (Chiu, 2019; Yoo et al., 2019) többnyire képszintű megközelítéseket alkalmaznak.

A modelliterációs módszerek pl. AdaIN, StyleGAN (GAN, Generative Adversarial Networks, Generatív Adverzális Hálózatok) (Johnson et al., 2016; Huang and Belongie, 2017; Karras et al., 2021) teljesen tanított modelleken alapulnak. További új ötletek közé tartoznak a transzformer-alapú stílusinjektálás (Park and Kim, 2022) és a difúzzóval támogatott PatchMatch (Hamazaspyan and Navasardyan, 2023).

A doménadaptációhoz tartozik a CycleGAN (Zhu et al., 2017), PatchGAN (Isola et al., 2017), StarGAN (Choi et al., 2018) és NiceGAN (Chen et al., 2020), valamint az újabb domain generalizációs modellek (Zhu et al., 2017).

Ezek a képszintű iterációs módszerek nehezen alkalmazhatók nagy területű távérzékelési képeken, míg a modelliterációs megközelítések a blokk szintű bemenetek miatt nem képesek átfogóan kezelni az összetett jellemzőket (Miao et al., 2025). Emellett az ilyen módszerekkel

generált képek gyakran térbeli torzulásokat tartalmaznak, és radiometriai jellemzőik sem kielégítőek.

2.7.3. Mélytanuláson alapuló RN-módszerek távérzékelési képekre

A mélytanulás-alapú relatív radiometrikus normalizálási (RRN) módszerek a távérzékelési képek esetén jelentős eredményeket mutattak. Ezeket a technikákat gyakran kombinált alkalmazásokhoz kötik, például változásdetekcióhoz (change detection, CD), többidős szemantikai szegmentációhoz és képmozaikoláshoz, és az RN valóban javítja az alkalmazások teljesítményét. A változásdetekcióban például a domén-adaptáció szerves része a többidős vagy több szenzoros képpárok homogenitásának erősítésére (Du et al., 2024). A szemantikai szegmentáció és képfeldolgozás területén a címkézett adatok hiánya korlátozza a módszerek hatékonyságát. Mivel a manuális annotálás időigényes, a domén-adaptációt alkalmazzák a többidős képek előnyeinek kihasználására és a teljesítmény növelésére. Hasonlóképp, objektum detektálásban vannak normalizáló eljárások, amelyek hatékonyan csökkentik a doméneltolódást (Liu et al., 2023; Ma et al., 2024). A képmozaikolásnál a MOSTGAN (Mosaicking Images With Generative Adversarial Networks, képek mozaikosítása GAN) (Ma et al., 2022) alacsony felbontású referencia képet használ az átfedés nélküli területek színegyeztetésének kiegyenlítésére.

A jellemzőszintű adaptáció során a bemeneti (source) és a cél (target) domainok (tartománynevek) közötti jellemzőeloszlások igazításra kerülnek. Például jelenet-osztályozásban a CS-DDA (correlation subspace dynamic distribution alignment) elkerüli a domain független altérbe történő átvitelek problémáját, és korreláció maximalizálással, valamint dinamikus statisztikai eloszlásillesztéssel csökkenti a súlyok torzulását (Zhang et al., 2020). (Xu et al., 2023) egy mély szemantikai-vizuális igazítási modellt és figyelmi modult javasolt a zero-shot jelenet-osztályozás kezelésére, míg az SR-RSKG (semantic representation remote sensing knowledge graph) módszer (Li et al., 2021) egy új mély összehangoló hálózattal valósít meg generalizált zero-shot osztályozást. Az ADA-DDA (Attention-Based Dynamic Alignment and Dynamic Distribution Adaptation, figyelemvezérelt dinamikus illesztésű és dinamikus eloszlás-adaptáció) dinamikus súlyozást vezet be, kiegyensúlyozva a marginális és kondicionális eloszlások szerepét (C. Yang et al., 2022).

A szemantikai szegmentációban a DACCN (deep adaptation crop classification network, adaptív mélytanulási hálózat mezőgazdasági kultúrák osztályozására) mély hálózatokkal integrálja a képi és osztályozási szinteket (Wang et al., 2023), az SSWADA (spatial-spectral-weighted adversarial domain adaptation network) spektrális tér-súlyozott adverszális domain adaptációs hálózat alkalmazásával segíti a hiperspektrális képek igazítását (Huang et al., 2023), a HighDAN (high-resolution domain adaptation network) pedig városok közötti benchmark-adatokon javítja a domain-adaptációt (Hong et al., 2023). (Luo and Ji, 2022) kétfázisú domain-adaptációs keretrendszert mutatott be DACST (Domain Adaptation method for Cross-Spatio-Temporal, tér- és időbeli kereszt-domain adaptációs módszer) néven - először képszinten, majd jellemzőszinten.

A kép-szintű adaptáció közvetlenül generál normalizált képeket származtatott feladatokra, bár ezek minősége gyakran alacsonyabb. (Li et al., 2023) SPGAN-DA (Semantic-Preserved Generative Adversarial Network for Domain Adaptive Remote Sensing Image Semantic Segmentation Szemantikusan Megőrzött GAN-DA RS szemantikus képszegmentációs) modellt

javasoltak a reprezentáció-invariancia, szemantikai megőrzés és osztályeloszlás-illesztés együttes alkalmazásával; figyelem-vezérelt ACGAN-t (attention-guided color-consistency GAN) használt globális-lokális hálózattal a normalizáció eléréséhez (Xie et al., 2023).

Noha számos mélytanulás-alapú RN-módszer született, ezek többsége feladatorientált, azaz alkalmazásfüggő optimalizációt és jellemzőszintű igazitást alkalmaz. Emellett a képszintű domain-adaptációk gyakran alacsony képminőséggel generálnak képeket, és nehézséget okoz számukra a valódi változások és képhamisítások megkülönböztetése (Miao et al., 2025).

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A vizsgált tényészek jellemzése

3.1.1. A 2018/2019. év időjárása

2019 márciusában Békés megyében csapadékszegény időjárás uralkodott, ami hátráltatta az őszi búza fejlődését. A szokatlanul meleg idő miatt a növények korán indultak fejlődésnek, miközben a talajnedvesség kritikus szint alá csökkent, főként az alföldi, gyenge vízmegtartó területeken. Áprilisban némi csapadék enyhítette a vízhiányt, de a hideg éjszakák és alacsony nappali hőmérsékletek további stresszt okoztak (Erdődiné Molnár and Kovács, 2020). A hónap végén érkező jelentősebb esőzések javították a helyzetet. Májusban tartós és bőséges csapadék hullott (103 mm), ami feltöltötte a talaj nedvességtartalmát, így a kalászás és virágzás kedvező körülmények között zajlott. A hideg idő ugyan lassította a növekedést, de a csapadék ellensúlyozta ezt. Június elején melegedett az idő, felgyorsult az érés a Liziméter Telepen a havi középhőmérséklet 24.68 °C volt (3. ábra). A hónap közepén zivatarok és esőzések váltakoztak, a talaj 1 méter mélységig átnedvesedett, ami kedvezett a hozamnak. A májusi eső jelentette a fordulópontot a búza fejlődésében. 2019-ben a Liziméter Telepen az éves csapadékösszeg 554,2 mm volt.

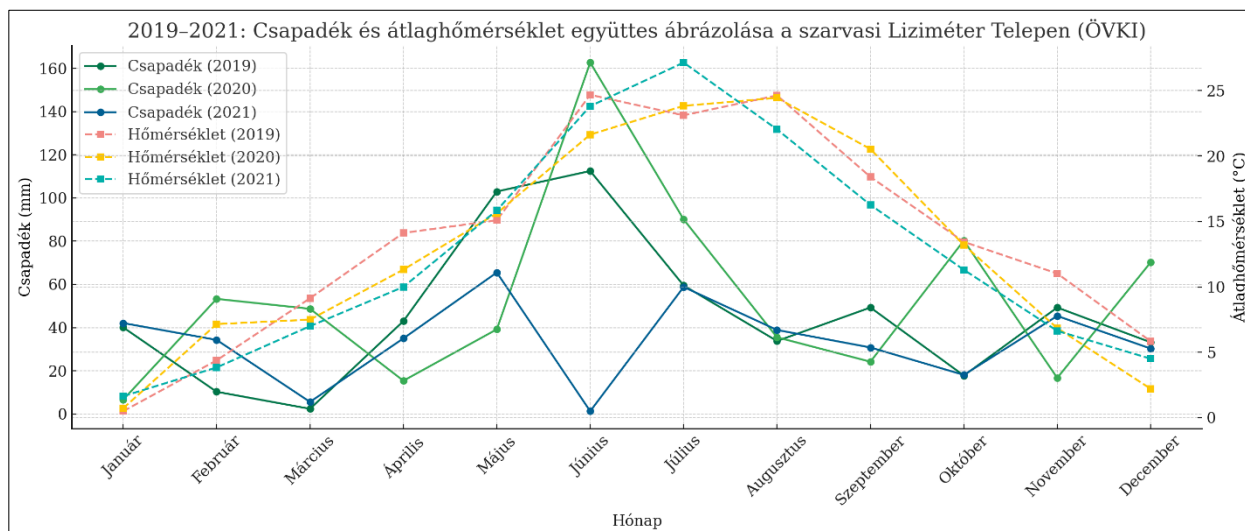
3.1.2. A 2019/2020. év időjárása

2020 elején, februárban és márciusban viszonylag sok csapadék hullott (50–45 mm), amely előnyös volt a téli-tavaszi talajnedvesség feltöltődéséhez. Áprilisban azonban szárazabb idő következett, ami visszavetette a tavaszi vetések fejlődését, de Szarvason nem okozott aszályt (Bíróné Dr. Kircsi, 2020). Májusban a hőmérséklet elég szeszélyesen ingadozott a hónap során, így összességében az átlagosnál 2-3 fokkal hűvösebb volt (3. ábra). A csapadék mennyisége továbbra is alacsony maradt (kb. 40 mm), a hőmérséklet viszont a hónap közepétől emelkedett, ami gyors fejlődést, de vízhiányos körülményeket eredményezett (Erdődiné Molnár and Kovács, 2021). Júniusban hirtelen kiugró csapadékösszeg volt megfigyelhető (160 mm) (3. ábra), ami időszakos belvizeket és helyenként károkat is okozhatott, ugyanakkor helyreállította a mélyebb talajrétegek nedvességtartalmát. A nyár hátralévő része mérsékelt csapadékos, hőmérsékletileg stabil volt. Az ősz szárazabbá vált, különösen szeptemberben és októberben. A november–decemberi hónapok csapadéka átlag körüli maradt (Erdődiné Molnár and Kovács, 2021). 2020-ban a Liziméter Telepen az éves csapadékösszeg 642,9 mm volt.

3.1.3. A 2020/2021. év időjárása

2021 első negyedéve kiegyensúlyozottabb volt: január–április között mérsékelt csapadék (20–40 mm/hó) és fokozatosan emelkedő hőmérséklet jellemezte. Májusban 60 mm eső hullott, és kedvező, 15–17 °C körüli hőmérséklet támogatta a növények fejlődését. A szokásosnál sokkal hűvösebb és kissé csapadékosabb május után 2021 júniusa rendkívül csapadékszegény volt. A június második felének időjárását meghatározó, ritkán előforduló tartósan extrém meleg, hőhullámos időszak tovább fokozta a szárazságot (Szentés, 2021). Dobogós helyre került 2021 júniusa, mert országos átlagban, 1901 óta a legszárazabb és a harmadik legmelegebb volt (Szentés, 2021). Júniusban a Liziméter Telepen is rendkívül alacsony csapadékot mértek a munkatársak (5 mm), miközben országos átlagban a napi középhőmérsékleti rekord június 24-én megdőlt (28,6

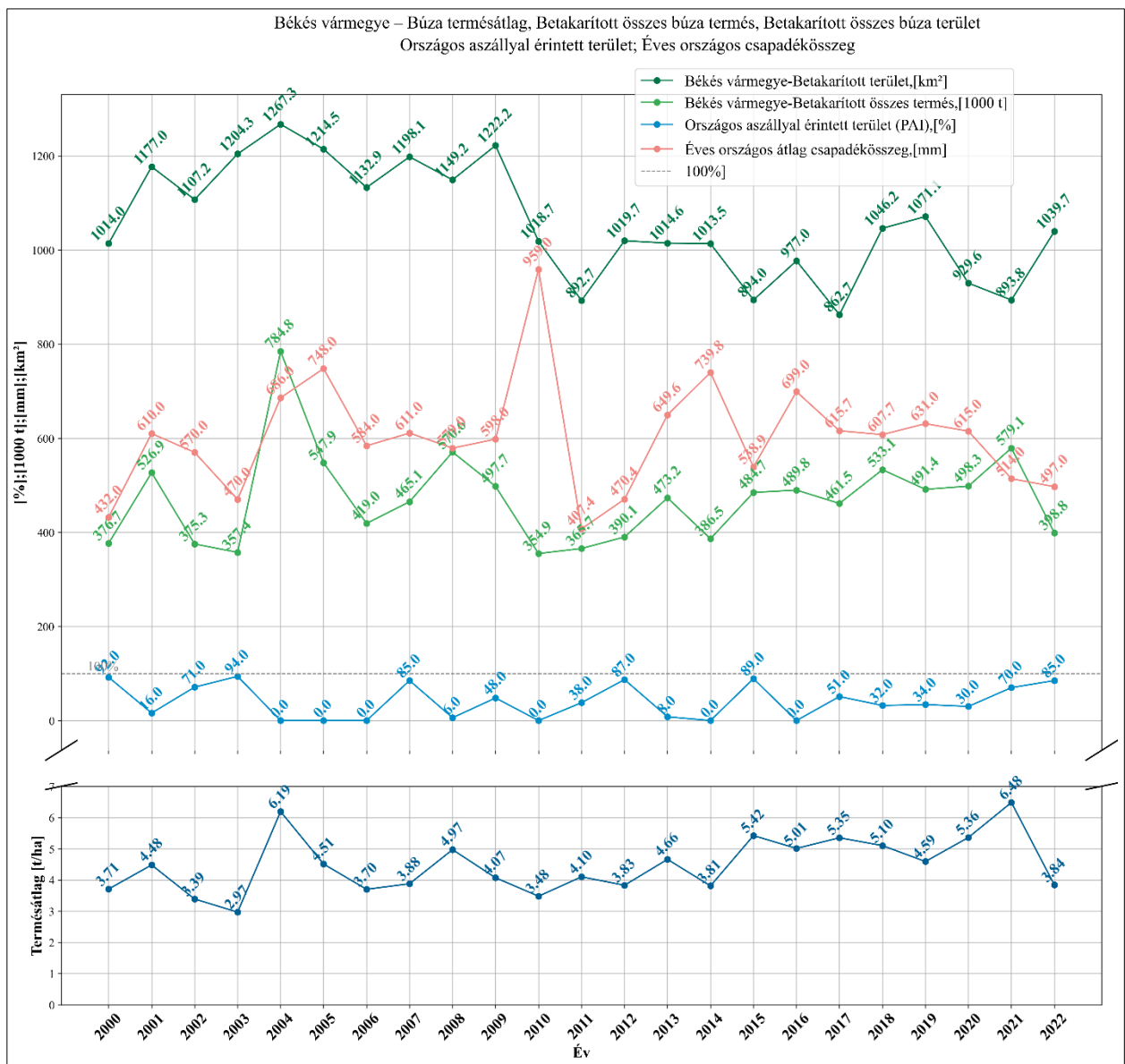
°C) (Szentés, 2021), a havi országos középhőmérséklet 21,9 °C volt. Szarvason a Liziméter Telepen 23,82 °C -ot mértek, ami komoly vízhiányhoz és stresszhez vezetett a virágzás/érés idején. Júliusban újabb jelentős csapadék érkezett (60 mm), részben enyhítve a szárazságot. Augusztus–szeptemberben csökkent a csapadék, októberre viszont újra nőtt (~35 mm). Az év utolsó hónapjai hűvösek és enyhén csapadékosak voltak. A 2021-es évben a vízellátottság ingadozó volt, de nyáron különösen súlyos száraz periódus jelentkezett (3. ábra). 2021-ben a Liziméter Telepen az éves csapadékösszeg 406,1 mm volt.



3. ábra 2019-2021: Csapadékösszeg és átlaghőmérséklet együttes ábrázolása a szarvasi Liziméter Telepen (ÖVKI), (adatforrás:a Telepen mért adat)

3.1.4. Békés megye búzatermelésének változása 2000-2022 között

Azért nem csak a 2019, 2020 és 2021-es éveket mutatom a 4. ábrán, mert szeretném felhívni a figyelmet arra, hogy az előző évek befolyásolhatják a rákövetkező évet vagy éveket. Ezért is van értelme a liziméteres tenyészedény kísérleteknek, mert még ott is nehéz az évjáráthatást teljesen kiiktatni, nemhogy a szabadföldi kísérleteknél. Az országos aszályal érintett területek meghatározásánál a Pálfai-féle Aszály Indexre (PAI) alapozva határozták meg az aszályal érintett területet százalékban megadva. Ez az index „később” egy évre rá hathat a búza termésátlagára, mivel a kukoricára „találták ki”. A legalacsonyabb termésátlag Békés megyében 2003-ban volt (2,97 t/ha), amelyhez 94%-os országos aszály. Ezzel szemben a legmagasabb termésátlagot 2021-ben érték el (6,48 t/ha), annak ellenére, hogy ez évben az Ország területének 70%-át aszály sújtotta és június a harmadik legmelegebb rekord átlaghőmérséklettel (21,9 °C), 16,1 mm országos átlag júniusi csapadékkal (amivel a legszárazabb júniusnak tekinthető 1901 óta) párosult (Szentés, 2021).



4. ábra 2000-2022: Békés vármegye búzatermelésének alakulása összevetve az éves országos aszályal érintett terület százalékanak alakulásával és az éves országos csapadék összeggel

(Adatforrás: 19.1.2.4. A búza termelése vármegye és régió szerint*

https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0071.html; HungaroMet Zrt.: ÉGHAJLAT >

Magyarország éghajlata > Éghajlati visszatekintő > Elmúlt évek időjárása; Elmúlt évek időjárása

https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_visszatekinto/elmult_evek_idoja_rasa/; Meteorológiai Adattár: <https://odp.met.hu/>; Fenntartható fejlődési célok; Aszályal érintett területek: https://ksh.hu/s/kiadvanyok/fenntarthato-fejlodes-indikatorai-2023/3-16-sdg-13?utm_source elérés, 2025. 09. 14.)

Ezt a két kiragadott évet (2003-at és 2021-et) tovább elemezve láthatjuk, hogy a 2003-mas év termésátlagát különösen a 2000-es és 2002-es évek és az átlagos 2001-es év hatása halmozottan negatívan terhelhette. A 2021-es évet pedig a 2020-as év támogatta meg a júniusi és júliusi és az

október és decemberi csapadékokkal (1. és 3. ábra). Az évek előrehaladtával a termésátlagok összességében javuló tendenciát mutatnak, a technológiai fejlődés jeleként, de az éghajlati szélsőségek továbbra is komoly kihívást jelentenek. Az adatok szerint a 2010-es évtized közepétől a hozamok tartósan 5 tonna/ha fölé emelkedtek, kivéve az aszályos 2022-es évet. 2022-ben ismét jelentős aszály (85%) és alacsony csapadék (497 mm) párosult, ami az országos átlagban rekord 5,31 t/ha-t 4,4 t/ha-ra csökkentette országosan és megye szinten az előző évi 6,48 t/ha-t 3,84 t/ha-ra csökkentette a termésátlagot (ennek ágyazott meg a 2021-es év júniustól egészen az év végéig) (1., 3. és 4. ábrák). A betakarított terület viszonylag stabilan 900–1200 km² között mozgott, de nem mindig járt együtt a magas összterméssel, amit az éghajlati hatások jelentősen módosítottak. Az adatok világosan mutatják az időjárási tényezők kritikus szerepét a búzatermesztés eredményességében Békés vármegyében.

3.2. Kísérleti eszközök és berendezések

3.2.1. Kísérleti helyszín bemutatása

A vizsgálat helyszíne Szarvason, található. A kísérleti terület a Békési-síkon helyezkedik el. A kistáj 82,6 és 92,1 m közötti tszf-i magasságú, jelenleg magasártéri szintben elhelyezkedő marosi hordalékkúpsíkság peremi része. A Békési-sík a mérsékelt meleg és a meleg éghajlati öv határán terül el, az északnyugati része a legszárazabb. A napsütéses órák évi összege 2000 körüli, az évi középhőmérséklet 10,2-10,4 °C, míg a vegetációs időszaké 17,1-17,3 °C –ról 17,3-17,5 °C –ra növekedett 2020-ra (Gombos et al., 2022). A kistáj éghajlata szerint öntözés nélkül a szárazságtűrő növényeknek felel meg. A kistáj területén számos csatorna és holtág található, amelyek a vizüket a Fehér-Körösbe, a Kettős-Körösbe és a Hármaskörösbe vezetik (Dövényi, 2010; Csorba, 2021). A kistáj száraz, gyér lefolyású, erősen vízhiányos terület, amelynek 95%-át szántóföldek és lakott területek borítják (Csorba, 2021). A természetes vegetáció megszűnte előtt erdőssztyep-lősztyep jellemezte (Dövényi, 2010).

3.2.2. Liziméter rendszer leírása

A vizsgálat helyszínéhez szükséges kísérleteket a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem (korábbi Szent István Egyetem) Környezettudományi Intézet (KÖTI), Öntözési és Vízgazdálkodási Kutatóközpont (ÖVKI) Liziméter Telepén végeztem (5. ábra). A Liziméter Telep 1971-ben kezdte meg működését, és legutóbb 2018-ban esett át jelentős, a műszereket is érintő felújításon, amit 2020-ban a pince épületek felújítása, stb. követett (Jancsó, 2019). Az egy hektáron elterülő telepen 320 darab, nagyméretű gravitációs/kompenzációs liziméter található, amelyek 5 mérőpincéhez csatlakoznak, így ez Európa legnagyobb ilyen jellegű kutatási infrastruktúrája ("Lysimeter Research Group," 2025). Egy-egy gravitációs liziméter térfogata 1 m³, amelynek 80%-át a vizsgált az edényekben lévő duzzadóagyagos talajtípusú talajoszlop tölti ki, ami egy 10 cm-es kavicsrétegen pihen a rendszeren esetlegesen átfolyó víz precíz összegyűjtéséhez (Ibadzade, 2021; Kolozsvári, 2023; Kun, 2018; Székely, 2023). A gravitációs/kompenzációs liziméterek segítségével a szántóföldi körülményekhez hasonlóan, de részben zárt – így pontosan nyomon követhető módon – lehet vízszintet tartani az edényekben. A liziméterek egyedi mérő edényekhez csatlakoznak a mérőpincékben, amelyek segítségével a közlekedő edények elvén vízszintet lehet beállítani. A talajnedvesség nyomonkövetésével korlátozott módon, de ezek a rendszerek is alkalmasak az evapotranspirációs vizsgálatokhoz, amely mérések pontosságát modern

szenzorokkal és a liziméterek kompenzációs rendszerben való használatával javíthatunk. A kompenzációs liziméterek a legmegbízhatóbbak (ha jól csinálják), vagyis nincs felszíni hozzá/elfolyás mérni lehet velük a talajon átszivárgó-, kifolyó víz mennyiségét és minőségét. Minden típusú liziméternél, így a kompenzációsnál is vigyázni kell a szegélyhatásból, oázishatásból és a vízadagolás pontosságából eredő hibalehetőségekre.

3.2.3. Kísérleti növény és kezelések

A 'GK Déva' őszi búza fajtát használtam a kísérlet mindhárom évében. A búzafajta használatát maguk a nemesítőik engedélyezték, még mielőtt elismerésre került volna.

2019 decemberében, 'GK Déva' fajtanévvel, szálkás, középérésű, DH módszer segítségével létrehozott búzafajtát ismert el a Fajtaminősítő Tanács. A fajtát, Basilica és Izidor szülőfajták keresztezéséből (szlovák-magyar bilaterális kutatás kooperáció során), korai generációban, DH törzsek közül szelektálták (5. táblázat). A három éves Nemzeti Élelmiszerbiztonsági Hivatal (NÉBIH) vizsgálatok alatt 1,3 %-kal múlta felül a középérésű standard fajtákat. A 'GK Déva' malmi hasznosítási célú (jellemzően A1 farinográfus értékű), az egész országban biztonsággal természetű őszi búzafajta. A három éves NÉBIH növénykórtani vizsgálatok során, mindegyik gombabetegséggel szemben a követelményeket jól teljesítette. A nemesítőik vizsgálatai alapján a fajta, sárga- és szárrozsdá, valamint fuzárium rezisztenciája emelkedik ki.

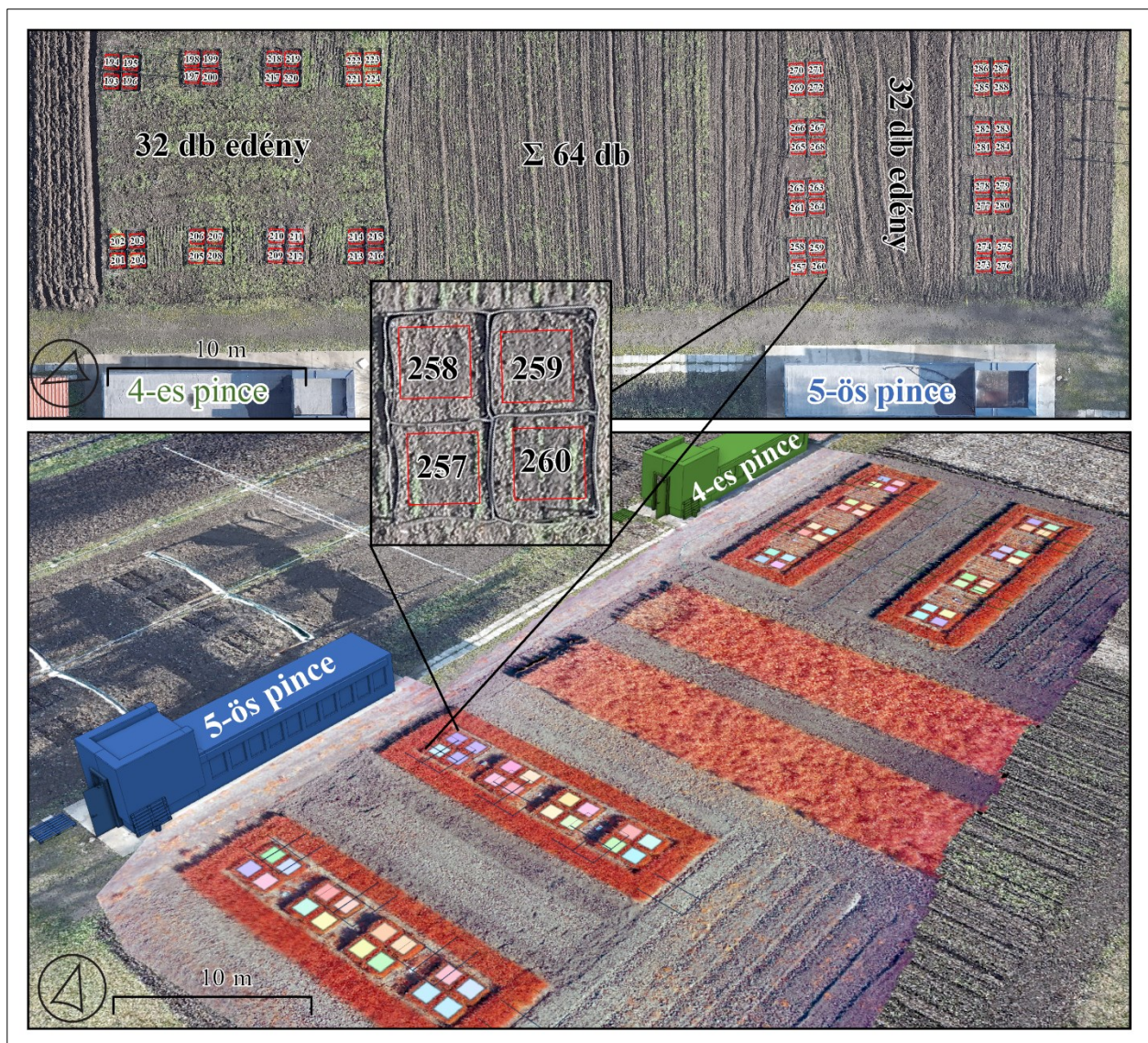
5. táblázat A GK Déva őszi búza fajta tulajdonságai

Fajta	Eredet	Fajtacsoport	Hidegtűrés	Szár- és Sárgarozsda	Felhasználás	Megjegyzés
GK Déva	Magyarország (Basilica × Izidor)	Őszi búza (szálkás, középérésű, DH-vonal)	Toleráns	Kiemelkedő ellenállóság	Malmi, sütőipari (A1–A2)	Kiváló alkalmazkodóképesség, magas terméshozam

A beállított kezelések:

A belvív-szimulációs kísérletet az ÖVKI Liziméter Telepén állítom be, a 5. ábra elrendezési terve szerint. 64 db liziméter edényben lett beállítva a kísérlet a liziméter pincék (5-ös és 4-es pincékben) bejáratával szemben állva a jobb oldalon, két pincében 32-32 edényben (38. ábra, 144. old.).

Minden egyes edénynek egyedi számozása van (5. ábra). Minden kezelést négy ismétlésben végeztem. A kezelések száma: 0: felszíntől mért 0 cm-es vízszint, kétfázisú talajállapot; -30 cm: a felszín alatt 30 cm-re és a -60 cm: a felszín alatt tartott vízszint 60 cm-es mélységben (39. ábra, 145. old.).



5. ábra A kísérleti elrendezés

Összesen három vízszinten állítottam be a kísérletet. Az időtartamot 3, 6, 9 és 12 napra és egy folyamatosan -60 cm-en tartott vízszintre állítottam be. A kontroll öntözés nélküli termesztésnek megfelelően lett beállítva, vagyis nem kapott vízszint és időtartam (tartósság) kezelést. Így összesen 13 kezelést és a kontrollt vizsgáltam.

3.2.4. A levélminta relatív klorofillmérése Konica Minolta SPAD 502 Plus klorofillmérő készülékkel

A japán gyártmányú Konica Minolta SPAD 502 Plus egy kifejezetten növényi levelek vizsgálatára tervezett klorofillmérő (6. ábra.). A mérés egy 2 mm × 3 mm-es területen történik, két különböző hullámhosszú fény optikai sűrűségkülönbségének mérésével. A készülék legfeljebb 1.2 mm vastagságú mintákat képes kezelni, 12 mm-es behelyezési mélységgel, ami egy állítható ütközővel 0 és 6 mm között szabályozható. A fényforrásként két LED elem, érzékelőként pedig egy szilícium fotodióda (SPD) szolgál. Az eredményeket egy LCD panel jeleníti meg, amely -9.9-től 199.9 SPAD egységig terjedő tartományban, egy tizedesjegy pontossággal mutatja a négy

számjegyű mérési értéket, valamint a mérések kétszámjegyű darabszámát. A készülék memóriája akár 30 érték tárolására is képes, melyek átlagát ki tudja számolni, és a tárolt adatokról trendgrafikont is képes kirajzolni.

A műszer energiaellátását két AA méretű alkáli elem biztosítja, amelyekkel a Konica Minolta tesztkörülmenyei között több mint 20 000 mérés végezhető. Az egyes mérések között pedig legalább 2 másodpercrek kell eltelnie. A pontossága 0,0 és 50,0 SPAD érték között $\pm 1,0$ SPAD egységen belüli; 50,0 feletti mérés esetén a kijelzőn egy csillag jelenik meg. Az ismételhetősége $\pm 0,3$ SPAD, a reprodukálhatósága pedig $\pm 0,5$ SPAD egységen belüli. A készülék $78 \times 164 \times 49$ mm méretű, tömege elemek nélkül 200 g. Az üzemi hőmérsékleti tartománya 0 és 50°C között van, legfeljebb 85%-os relatív páratartalom mellett. További funkciói közé tartozik a figyelmeztető hangjelzés és a felhasználói kompenzációs faktor beállítása, a standard tartozékok pedig a mélységütköző, a szíj, az elemek, egy puha tok és egy leolvasás-ellenőrző. A SPAD-502Plus cseppálló (IPX-4 besorolású), így a szabadban, akár esőben is használható, (de nem mérhető vízbe).



6. ábra Mérés a SPAD Konica Minolta 502 Plus klorofill-mérő készüléssel

A mérőműszert a levélre csíptetem, és meghatároztam vele a levélen a korábban is részletezett áthaladó fény átérésztését 650 és 940 nm-es hullámhosszon. A 650 nm-es hullámhossz egybeesik azzal a spektrális tartománnyal, amely a maximális klorofill (Chl) aktivitáshoz köthető, míg a 940 nm-en mért átérésztés referenciaként szolgál az olyan tényezők kompenzálására, mint a levél nedvességtartalma és vastagsága (T. G. Shibaeva et al., 2020).

A mérés menete:

A készüléket bekapcsoltam, majd a kalibrálását végeztem el rajta. Ez annyit jelent, hogy enyhén össze kell csíptetni a készüléket addig amíg nem jelzi a kalibrálás végét. A csíptetőjén alul felül egy puha rugalmas gumipersely van és e közé csípjük a levelet és itt található a fentebb részletezett fényforrása. Mérésnél arra figyelni kell, hogy ne koszolódjon az érzékelő, de ezt egy puha szemüveg nedves törlővel lehet tisztítani. A készülék előnye, hogy nem kell eltávolítani a levelet a növényről (non-invazív módszer). Az őszi búzán, több növényen és mindig a fotoszintetikusan legaktívabb levelén végeztem a mérést. Egy liziméter edényben 15-20 ismétlésben végeztem a mérést. A mérések a készüléken lapozhatóak és ha olyan eredményt látunk, ami egy rosszul csíptetés eredménye (pl. rosszul zártuk össze, vagy a levél mellé csíptünk) és nagyon nagy eltérést mutat a többitől, akkor lehet törölni a rész mérést és utána átlagolni lehet az eredményt. Ezt a részérések átlagát jegyezzük fel a mérési jegyzőkönyvbe.

3.2.5. Liziméteres mérések

Vetés ideje és mennyisége

2018.10.21-én (2019-es); 2019.10.29-én (2020-as), 2020.10.20-án (2021-es) vetettük el a búzát. Minden liziméter edénybe (1 m²) 17,5 g őszi búzát vetettünk el (ezermagtömege 37,7 g).

Kezelések kezdete

2019.05.07-én, 2020.01.27-én és 2021.04.29-én kezdődött a kísérlet. A 2020-as évet szándékosan korábban kezdtük, mert a régióban ez az „igazi” időszaka a télvégi-tavaszi belvizeknek.

Alaptrágya

Minden évben minden edény azonos mennyiségű kézi kijuttatással komplex NPK (15-15-15 %) alaptrágyát kapott és egységesen lett növényápolva.

Vízszintek beállítása

A liziméter pincékben az edények állványzatát a munkatársak tervezték meg (39. ábra, 145. old.). A 15 literes vödrök aljának közepére lettek a liziméter edényekből vezető csövek szigetelten felerősítve, majd az edények sorszámaival láttuk el a vödröket és az elrendezésnek megfelelően az állványzatra kerültek (39. ábra). A vizsgálat ideje alatt a vízszinteket napi rendszerességgel ellenőriztem és a fogyásnak megfelelően pótoltam.

Meteorológiai állomás

A liziméter telepen meteorológiai állomás található, melynek mérési adatai a kísérlet során rendelkezésünkre állt. A meteorológiai méréseket napi szinten regisztrálták és ellenőrizték a telepen dolgozó munkatársak. Ezeknek az adatait összesítettem (lásd. 3. ábra).

Biometria mérések

Növény magasság mérést végeztem aratás előtt edényenként 8 ismétlésben.

Aratás, cséplés

Az aratás idején kézzel arattunk. Azonos magasságban vágjuk le a búzát (mint ahogyan a kombájnnal) majd a föld feletti kévetőmeget mértük. Ebben segítségemre voltak a Liziméter Telep munkatársai, ezt egyedül nem tudtam volna megfelelő gyorsaságban és minőségben elvégezni. pl. növénymagasság, levélterület, terméshozam stb.

Aratás után a kékvetőket egységesen a MATE ÖVKI szarvasi Galambosi Rizskísérleti Telepen lévő kisparcellás cséplőgéppel csépléjük ki. Ez egy páros munkafolyamat (kétemberes). A három év alatt több munkatárs segített a cséplésben. Maga a cséplés legalább két napos folyamat volt.

3.2.6. Pilóta nélküli légifelvételezés

DJI Phantom 4 „agro” drón, a liziméter edények légi felvételezéséhez

Az Agro változat egy átalakított NGB kamerával rendelkezik, melyben eltérő lencsetag és speciális szűrő található, mely a 390-570 nm, valamint a 680-790 nm közötti tartományban ereszti át fényt, vagyis a kék (kb. 450-495 nm), a zöld (kb. 495-570 nm) és a közeli infravörös tartományt (40. ábra, 145. old.).

2019-ben 25 légifelvételezés volt 2019.04.15-06.18 között, amelyből 13 felvételezést választottam ki a dolgozathoz.

2020-ban szintén 25 légifelvételezés volt 2020.02.25-06.24 között., amelyből 10 felvételezést értékeltem ki a dolgozathoz.

2021-ben 10 repülés történt 2021.03.31-06.24 között, amelyből 6 felvételezést értékeltem ki.

A szelektálás a felvételezés minősége miatt történt, illetve azokat az időpontokat sajnos ki kellett hagynom, ahol történt repülés, de SPAD mérést nem végeztem párhuzamosan.

2019-ben repülési útvonal tervezésre még nem volt lehetőségünk, ezért manuálisan történt a légifelvételezés. 2020-2021-ben lett Pix4D Capture repüléstervező előfizetésünk és így repülési terv alapján automatikusan történt a felvételezés.

3.2.7. A térinformatikai kiértékelés menete

A 2019-es légifelvételek azok egyenként, manuálisan készültek 20-25 méter magasságból és egy képen 32 vagy 16 liziméter edény látható. Ezeknek a térbeli pontossága kb. 5 méter körül alakul, így amikor a raszter.tif fájlokat behívjuk egy térinformatikai szoftverbe (QGIS vagy ArcGIS Pro, stb.) akkor nem „egymáson” helyezkedik el az azonos területről különböző időpontban készült képek, hanem pontatlanul össze-vissza. 2020-ban, 2021-ben, részben repülésiterv alapján készültek ugyan a képek, de ezeknek az ortomozajuk is hasonló térbeli pontatlansággal rendelkezik, így az első feladat a feldolgozásban, hogy minden képet georeferálni kellett. A MATE Rektori Kabinet kezelésében lévő DJI Matrice 300 RTK drónt használtam Gödöllőn, amihez előfizettem a Lechner Nonprofit Kft. Lechner Tudásközpont percdíjas GNSS szolgáltatására. Így megtanultam, hogyan repüljek RTK pontosan. 2025-ben a szarvasi kollégámat megkértem, hogy a helyi DJI Matrice 300-as drónnal repülje le a Liziméter Telepet az RTK előfizetéssel, így már volt értelme georeferáljam a képeket. A georeferálást az ott készült RTK pontos ortomozajon végeztem. A képeket harmadrendű polinomiális transzformációval

georeferáltam, amihez legalább 10 kötőpontot illesztettem. A 2019, 2020, 2021-es gereferálást a 2025-ben készült abszolút pontos ortomozaikon végeztem.

3.2.8. Skálatényezőn alapuló PIF-normalizáció kiugróérték-kezeléssel vagy Robusztus PIF-alapú normalizálás lineáris skálázással

A kiértékelés menete a következő volt:

Kiválasztottam egy képet, és annak a NGB értékeit vettem alapul. A referencia kép kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy ne legyen árnyékos, felhős, kedvező napállású (nyári, déli, órákban készült), stabil vegetációs állapotú és átlagos kép legyen. A DJI_0093.tif képre esett a választásom, mert ez statisztikailag egy stabil kép, amelynek a pixel statisztikáját a 6. táblázatban tartalmazza (7. ábra).

6. táblázat DJI_0093.tif kép pixel statisztikája

Band Name	Min	Max	Mean	Std. Deviation
Band_1	24	255	172	25,16977712
Band_2	0	255	96	29,11473538
Band_3	0	255	110	35,51298887

A kvázi-invariáns jellemzők kiválasztása:

A képeken a beton járólapok jelentették a közös pontot, mert ezek változtak időben a legkevésbé. Azt kellett figyeljem, hogy száraz legyen és ne legyen egyéb objektum (pl, rög, sár, víz, por, öntözőcső, stb.) rajta. Ezután minden képen a beton járólapokra 10 darab vector shape-et helyeztem, ami hivatalosan a képeken kvázi-invariáns jellemzők PIF-ek (*Pseudo-Invariant Features*) kiválasztását jelentette. Ezt 10 ismétlésben végeztem minden képen (7. ábra).

Ezeknek a kivágataira kiszámoltam minden sávjukra az átlag pixel értékeit és minden ehhez kapcsolódó statisztikát (NIR-, Green-, Blue – átlag; pixel szám; szórás és a vektor kivágat négy sarok koordinátája). Ezeknek az értékeit táblázatba rendezve írtam ki Python kóddal.

Kiugróérték-szűrés (Outlier removal):

A 10 db értékből ki kellett szűrjem a kiugró értékeket. Ezt egy VBA kóddal oldottam meg. A kóddal egy táblázatot hoztam létre, ahol a Kép neve; Csatorna (N;G;B) Átlag, Medián, Módusz, Szórás, Standard hiba, Variancia, Minimum, Maximum, Terjedelem, Q₁ (Alsó kvartilis), Q₂ (Felső kvartilis), IQR (Interkvartilis tartomány), Alsó határ, Felső határ, Ferdeség és Csúcsosság került a kivágatok jellemzésére (7. ábra). Ezután a kiugró értékek kiszámítását végeztem, egyszerűen egy excel képlettel, majd a kiugró értékeket kizselektálva átlagos NGB pixel értékeket kaptam a kép nevekhez minden sávra.

Ezt a táblázatot használtam az ArcGIS Pro Notebook kód szerkesztőjében tovább. Az ArcGIS Notebook-ban nyíltforráskódú Python könyvtárak (Pandas;Rasterio;Numpy) használatával írtam meg a kódot, amivel a 3.1.és 3.2. egyenleteket használva a relatív normalizáltam a drónos képeket.

Sávonkénti szorzótényező számítása (*Band-wise scale factor*):

$$k_N = \frac{N_{ref}}{N_{PIF}}; k_G = \frac{G_{ref}}{G_{PIF}}; k_B = \frac{B_{ref}}{B_{PIF}} \quad 3.1$$

Ahol:

$k_{N;G;B}$:Normalizálási szorzótényezőt (skálafaktort) jelenti, N,G,B sávokra;

$N_{ref}; G_{ref}; B_{ref}$: referencia sáv értékek (N:172;G:96;B:110; 6. táblázat) és a

$N_{PIF}; G_{PIF}; B_{PIF}$: a normalizálandó képek PIF átlagértékeit jelenti.

A következő lépésben a sávok szerint korrigáltam a képek DN pixel értékét a sávonkénti szorzó tényezővel:

$$N_{korr} = N_{eredeti} * k_N; G_{korr} = G_{eredeti} * k_G; B_{korr} = B_{eredeti} * k_B \quad 3.2$$

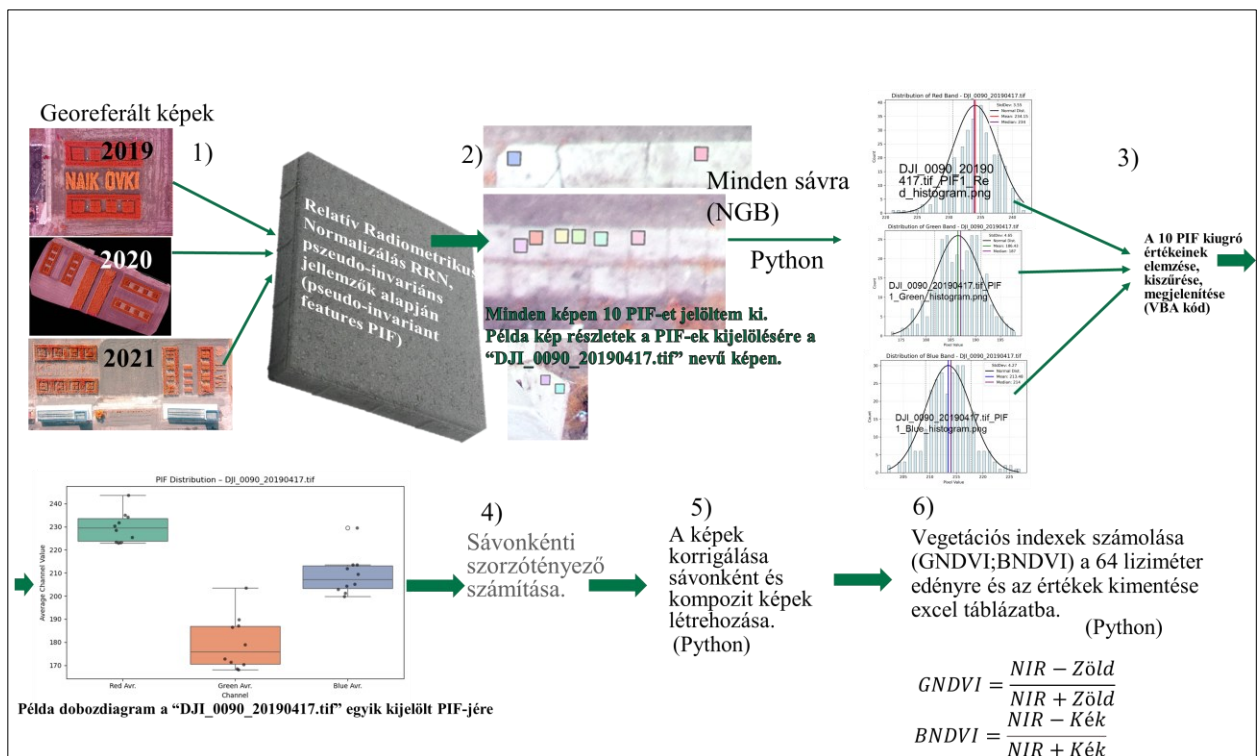
Ahol:

N_{corr} : N;G;B sáv korrigált,

$N_{eredeti}$:N; G;B sáv eredeti és

$k_{N;G;B}$:normalizálási szorzótényezőt (skálafaktort) N,G,B sávokra jelenti.

A képek normalizálása után a szintén Python kódokat írtam, hogy a liziméter edényt és a fájlmenyiséget feldolgozzam és a GNDVI és BNDVI értékeket számoljak az edényekre. A kód maga GNDVI és BNDVI (2.2. és 2.3.) egyenletekkel két raszter réteget hoz létre, majd ezekből a 64 liziméter edényhez létrehozott vektor rétegekkel először kivágatokat hoz létre, majd a kivágatokat egy geodatbázisban vagy kimeneti könyvtárban tárolja és ezeknek kiolvassa a raszter statisztikájából a kivágat vegetációs index értékeit és szórását és a visszakövethetőség érdekében menti a kivágat négy sarok koordinátáját. A kimeneti fájl egy excel, amit a kezelések további statisztikai kiértékelésre használtam (7. ábra). Az automatizálást a képek georeferálása nélkül nem lehetett volna elvégezni. Ezért volt fontos első lépésben georeferálni a képeket. Így kisebb képenkénti vektor korrigálással egy menetben ki menthettem az edény átlag vegetációs indexeket és szórás stb. értékeket.



7. ábra A skálatényezőn alapuló PIF-normalizáció kiugróérték-kezeléssel vagy robusztus PIF-alapú normalizálás lineáris skálázással folyamatábrája a georeferálás után a képek relatív radiometrikus normalizálásán át, a vegetációs indexek számolásáig

3.2.9. Őszi búza mag minőségi paramétereinek mérése

A Foss Infratec™ NOVA gabonaanalizátor egy korszerű, közeli infravörös transzmittancia (NIT) technológián alapuló műszer, amely lehetővé teszi a búza szemcseminta gyors és pontos vizsgálatát őrlés nélkül (FOSS, 2014). A készülék kevesebb mint egy perc alatt képes akár tíz alminta elemzésére, ezáltal ideális választás laboratóriumi vagy kereskedelmi célú nagy áteresztőképességű mérésekhez. A műszer által vizsgálható főbb beltartalmi paraméterek közé tartozik a nedvesség-, fehérje-, glutén-, siker-, keményítő-, rost- és hamutartalom, valamint a hektoliter-tömeg meghatározása is. A készülék fejlett kalibrációs rendszert alkalmaz, amely mesterséges neurális hálózatra (ANN) és részleges legkisebb négyzetek (PLS) módszerére épül, több tízezer kereszt-ellenőrzött minta alapján (Abbasi et al., 2014). A FOSS Infratec™ sorozat (beleértve a NOVA-t) több nemzetközi szabványban szerepel, pl. ISO 12099 (NIR kalibrálás), és megfelel az AACC, ICC irányelveknek. Megfelel az EN 15948 szabványnak, így pontossága alkalmas a gabonák kereskedelmi minősítéséhez is. Az eszköz EU és USA piacokon is elfogadott gabonaminősítésre.

A NOVA analizátor automatikus mintacella-beállítással rendelkezik, amely a szemcseméret alapján (6–33 mm között) optimalizálja a mérési környezetet. A Foss Infratec NOVA a nemzetközi gabonakereskedelem egyik legszélesebb körben alkalmazott NIR-alapú eszköze, amelyet elsősorban a fizikai átvételek, minőségi ellenőrzések és kutatási célok során használnak.

Korlátjai:

- Zeleny-érték esetén: Mivel a Zeleny egy fizikai ülepedési teszt, az Infratec™ NOVA csak indirekt módon, NIR predikcióval tudja becsülni - tehát kalibrációfüggő.
- Helyi fajtákhoz illesztés szükséges: Hazai fajtákra, termőhelyi sajátosságokra külön kalibráció finomhangolásra lehet szükség.
- Nem laborhelyettesítő minden paraméternél: Ahol kémiai/fizikai reakciót mérnek (pl. Zeleny, falling number), ott a NIR csak jól közelítő, nem referenciaérték.

Alapmodellei:

- W:deformációs munka (a tézsta nyújtásához szükséges munka)
- Zeleny szedimentációs index: a búzából meghatározott feltételek mellett előállított lisztből, tejsavas oldatban keletkező üledéknek a milliliterben kifejezett térfogata.
- Sikértartalom: búzalisztből készült tézstából meghatározott körülmények között kimosott, nagyrészt vízben nem oldódó (főként gliadinból és gluteninből álló), de hidratálódó fehérjékből álló képlékeny, rugalmas anyagok összessége százalékban kifejezve. A mosás automatizált sikérmosó géppel történik.

Fehérjetartalom: Az egyik legfontosabb mutató a búzaliszt minőségének meghatározásában. Befolyásolja a nitrogéntrágyázás és a vetés időzítése is. Például a vetés 14 vagy 28 napos késleltetése növelheti az összes fehérjetartalmat (Pan et al., 2006). Aszályos körülmények között egyes genotípusok esetében akár 14,1%-os növekedés is megfigyelhető (Barić et al., 2006).

Zeleny ülepitési érték (Zeleny Sedimentation Value, ZSV): A ZSV a fehérjeminőség és a sikérerősség egyik jellemzője. A genetikai háttér, a termőhely és a környezeti tényezők mind hatással vannak rá. Például aszályos körülmények között a ZSV átlagosan 1,2 ml-rel nőhet (Barić et al., 2006; Muqaddasi et al., 2023). A ZSV korrelál a liszt vízzoldékony oldószerwisszatartó kapacitásával (SRC) is ($r = 0,24$; $P < 0,05$) (Hrušková et al., 2012).

Ezerszemtömeg (Thousand Kernel Weight, TKW): A szemek méretére és tömegére utal. Aszályos időjárás esetén akár 5-2 g-os csökkenés is előfordulhat.

3.2.10. A vegetációs modell index értékek és a SPAD relativ klorofill tartalom értékek görbeillesztése

A 3.3. egyenlet alapján 2. fokú regressziós modellt illesztettem a 2020-as SPAD-GNDVI, illetve a SPAD-BNDVI adatokra. Ez azt jelenti, hogy egy parabola alakú görbét kerestem, amely a lehető legjobban írja le az adatok közötti kapcsolatot.

Általános forma:

$$y = a * x^2 + b * x + c \quad 3.3$$

Ahol:

x: a független változó (pl. GNDVI vagy BNDVI)

y: a célváltozó (pl. SPAD)

és az illesztett együtthatók,

a: másodfokú tag együtthatója (görbület)

b: elsőfokú tag együtthatója (lejtés)

c: konstans tag (metszéspont) (pl. az a SPAD érték, amikor a GNDVI vagy BNDVI =0)

3.2.11. A modellek identifikációjának ellenőrzése méréstartományra vetített relatív hiba százalékban kifejezve számolása

A modellek identifikációjának ellenőrzéséhez és a modell validálás kiértékeléshez a méréstartományra vetített relatív hibát (Normalized Mean Absolute Error (NMAE)) alkalmaztam (Kline and McClintock, 1953; Géczi et al., 2019; Roider et al., 2024).

Átlagos Abszolút Hiba (MAE)

Az előrejelzési pontosságot mérő mutatót Átlagos Abszolút Hibának (MAE, mean absolute error) nevezzük (3.4. egyenlet). Az Átlagos Abszolút Hiba – ahogy a neve is mutatja – az abszolút hibák átlaga. Az abszolút hiba a becült (előrejelzett) érték és a valós (mért) érték különbségének abszolút értéke (Chai, 2022; Hodson, 2022). Az Átlagos Abszolút Hiba a folytonos változók előrejelzési pontosságát méri, és megmutatja, hogy mekkora hibára számíthatunk átlagosan az előrejelzés során, figyelmen kívül hagyva azok irányát (pozitív vagy negatív eltérés) (Hodson, 2022). Az MAE és a négyzetes gyök átlagos hiba RMSE (root mean square error) ugyanabban a mértékegységben fejezi ki az előrejelzési hibát, mint maga az előrejelzett változó (Chai, 2022). Mindkét mutató 0 és végtelen között vehet fel értéket, és nem érzékenyek a hiba irányára (Willmott and Matsuura, 2005). Ezek negatív irányultságú mutatók, vagyis minél kisebb az értékük, annál jobb a modell teljesítménye (3.4. egyenlet).

Az MAE értéke a következő képlettel számítható:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad 3.4$$

Ahol:

n =hibák száma,

Σ =összeadás

$|y_i - \hat{y}_i|$ =az abszolút hibák (azaz a megfigyelt, mért és becült értékek különbségeinek abszolút értéke) (Excel képlet: =SUM(ABS(H2:H641-Q2:Q641)/COUNTA(H2:H641))).

A méréstartományra vetített relatív hibát kiszámítása:

A méréstartományra vetített relatív hiba vagy a normalizált átlagos abszolút hiba (NMAE) százalék egy olyan mutató, amelyet prediktív modellek pontosságának értékelésére használnak (3.5. egyenlet). Az átlagos abszolút hiba (MAE) normalizálásával az NMAE értelmezhetőbbé és összehasonlíthatóbbá válik különböző adathalmazok és skálák között (Piotrowski et al., 2022; Roider et al., 2024).

$$NMAE = \frac{MAE}{\bar{y}} * 100 \quad 3.5$$

Ahol:

MAE = Átlagos Abszolút Hiba; \bar{y} =mért (valós) értékek tartománya, vagyis legnagyobb mért SPAD érték és a legkisebb mért SPAD érték különbsége.

3.2.12. Michaelis–Menten típusú görbék a vegetációs indexek és a levélklorofill-tartalom (SPAD-érték) közötti kapcsolat jellemzésére

A Michaelis–Menten modell egy klasszikus, nemlineáris matematikai modell (3.6. egyenlet), amelyet eredetileg az enzimkinetika leírására fejlesztettek ki, de számos más területen – így például a mezőgazdasági modellezésben, növényélettani vizsgálatokban vagy távérzékelés alapú klorofillbecslésben – is sikerrel alkalmazzák (Cho and Lim, 2018; Srinivasan, 2022; Daliman et al., 2024a).

A modell különösen akkor hasznos, ha egy biológiai folyamat telítődéssel jár, vagyis ha a válaszváltozó (pl. SPAD relatív klorofill-tartalom) kezdetben gyorsan nő, majd egy bizonyos szintet elérve már alig változik, hiába nő tovább a magyarázóváltozó (pl. GNDVI vagy BNDVI) (Daliman et al., 2024b).

A modell matematikai alakja a következő (Srinivasan, 2022):

$$v = \frac{V_{\max} * [S]}{K_m + [S]} \quad 3.6$$

Ahol:

v (*sebesség*): a reakció sebessége (itt a SPAD-érték változási üteme a vegetációs index függvényében),

V_{\max} (*maximális sebesség*): a maximális SPAD-érték (pl. GNDVI esetén 60,17, BNDVI esetén 58,09; a méréseim során ez az aszimptotikus határ, amit a SPAD-értékek megközelítenek, amikor a vegetációs index nagyon magas.)

K_m : ez a pszeudo-egyensúlyi konstans, amelyet Michaelis–Menten konstansnak neveznek. Az az indexérték (vagy szubsztrát-koncentráció), amelynél a reakció sebessége (vagy SPAD-index érték) eléri a maximális sebesség (V_{\max}) felét. Ez pl. GNDVI esetén 0,136, BNDVI esetén 0,117, ami azt jelzi, hogy a BNDVI hamarabb éri el a telítettség felét, míg a GNDVI lassabb közeledést mutat.

S : a szubsztrát koncentrációja (nálam a GNDVI vagy BNDVI indexérték) (Srinivasan, 2022).

3.3. Alkalmazott statisztikai módszerek

3.3.1. R programnyelv használata a statisztikai értékelésre

Az adatok statisztikai elemzéséhez az R programnyelvet (v. 4.5.1) használtam, az RStudio integrált fejlesztői környezet (IDE) (v. 2025.05.1+513) segítségével (R Core Team, 2024; Posit Software, PBC, 2025). A következő csomagokat használtam: `readxl` (Wickham and Bryan, 2023) az Excel fájlok beolvasására, `stringi` (Gagolewski, 2024) karakterláncok kezelésére, `plyr` (Wickham, 2020) és `dplyr` (Jr and Dupont, 2024) adatmanipulációra, `readr` (Wickham et al., 2024) adatbeolvasásra, valamint `Hmisc` (Jr and Dupont, 2024) a korrelációs elemzésekhez. A Pearson-féle korrelációs együtthatókat az `Hmisc` csomag `rcorr()` függvényével számítottam ki. A boxplot a `stats` csomagban található beépített függvénnyel a két kategóriaváltozó közötti interakciók és azoknak a folytonos változóra gyakorolt hatásának vizualizálására használtam (Becker et al., 1988; Chambers et al., 1983; Murrell, 2005). Az `interaction.plot` a `stats` csomagban található beépített

függvénnyel kétutas kölcsönhatás diagrammot hoztam létre az interakciós hatások értékelésére (Lamina et al., 2012; Dag et al., 2024; Toyama, 2024). A `bartlett.test()` stats csomagban és a `levene_test()` a car csomagban található beépített függvényekkel, amelyet egyváltozós varianciahomogenitás tesztelésre használtam (Bartlett, 1937; Fox and Weisberg, 2019). A manova {stats} függvényt használtam az átfogó többváltozós varianciaanalízis (MANOVA) futtatására (Hand and Taylor, 1987). Az `mshapiro.test(U)` az mvn csomag többváltozós Shapiro-Wilk normális eloszlású tesztet használtam (Shapiro and Wilk, 1965). Az MVN csomag `mvn()` további függvényeit (`mvn_test = "hz"` → Henze–Zirkler globális teszt a multivariáns normalitásra (Henze and Zirkler, 1990); `univariate_test = "SW"` → Shapiro–Wilk normalitásteszt minden egyes változóra külön; `multivariate_outlier_method = "adj"` → Hardin–Rocke „adjusted” (illesztett) szabály robusztus (Mahalanobis-) outlierok jelölésére (a küszöb F-eloszlás alapján korrigált χ^2 -határ); a `resid()` az outlierok vizsgálatára a MANOVA-modell reziduálisain (Chambers and Hastie, 1992)) használtam. A `lillie.test {nortest}` függvényt a Lilliefors (Kolmogorov–Smirnov) normalitáspróba futtatására használtam (Thode, 2002). A `games_howell_test {rstatix}` függvényt a Games-Howell post hoc teszt csoportátlagok közötti különbségek azonosítására használtam (Lee and Lee, 2018). A `t.test {stats}` függvényt, az alapértelmezése szerinti Welch-féle kétmintás t-próbának a futtatására használtam. A `plyr`; `tidyr`; `ggplot2` csomagokat a fazettált átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram (CLD jelöléssel) (faceted mean \pm SD bar plot with error bars and CLD (compact letter display) letters) készítéshez használtam. A mellékletekben található táblázatokat a Quarto a Posit által kifejlesztett, többnyelvű, új generációs R Markdown verzióval mentettem ki.

3.3.2. Statisztikai elővizsgálat, feltételvizsgálat, függő változók közötti korreláció és a kiugró értékek meghatározására

Pearson-féle korrelációs együttható

A Pearson-féle korrelációs együttható (Pearson-korreláció) a változók közötti lineáris kapcsolat erősségét és irányát méri, értékei -1 és +1 között mozognak. Ez a módszer a két folytonos változó közötti kovarianciát a szórások szorzatával normalizálja, így standardizált mutatót ad. A pozitív érték (pl. $r = 0,989$) erős együttmozgást jelez, míg a negatív érték (pl. $r = -0,198$) ellentétes kapcsolatot mutat. A nullához közeli értékek (pl. $r = 0,013$) gyenge vagy hiányzó lineáris kapcsolatra utalnak. A számítás feltételezi a változók normális eloszlását és lineáris kapcsolatot. Az elemzéshez az R szoftver `cor()` függvényét használtam, amely a Pearson-korrelációs mátrixot számítja ki a válaszváltozókra (pl. fehérje, siker, Zeleny, W, hozam). Az Hmisc csomag `rcorr()` függvényével a korrelációk szignifikanciáját (p-értékek) is meghatároztam (Jr and Dupont, 2024). A korrelációs vizsgálat segít azonosítani, hogy mely változók mozognak együtt, például a fehérje és siker erős pozitív kapcsolatot mutatott ($r = 0,989$). Ez az elővizsgálat a későbbi MANOVA elemzés alapjául szolgált, feltárva a változók közötti összefüggéseket. Az eredményeket korrelációs mátrix formájában jelenítettem meg a további statisztikai elemzések előkészítéséhez.

Kiugró értékek észlelése

Az egyszerű kiugró értékek észlelésére (simple outlier detection) a `mvoutlier` R csomag `aq.plot` függvényét alkalmaztam, amely robusztus főkomponens-analízis (PCA) segítségével azonosítja a multivariáns kiugró értékeket az adatokban (Filzmoser and Gschwandtner, 2023). A módszer az

első két robusztus főkomponensre vetíti az adatokat, és az alpha paraméterrel meghatározott valószínűségi küszöb (pl. 0,001) alapján jelöli ki a szignifikánsan eltérő megfigyeléseket. Ez a megközelítés alkalmas többváltozós adathalmazok elemzésére, ahol a hagyományos egyváltozós módszerek nem elegendők a komplex összefüggések felismerésére. Az outlier-ek meghatározása után azok indexeit a which függvény segítségével azonosítottam a további elemzésekhez.

Kétutas (kétfaktoros) dobozdiagram (two-way boxplot vagy grouped boxplot)

A kétutas boxplotok statisztikai grafikus eszközként szolgálnak az adatok eloszlásának és variációjának vizuális elemzésére, különösen a többváltozós kísérletekben, ahol két kategorikus változót (pl. kezelés típusa és időtartam) vizsgálunk egy numerikus válaszváltozóval (pl. hozam vagy minőségi mutató) szemben. Ezek az ábrák a boxplot() függvény segítségével az R programozási környezetben is létre hozhatók, ahol az ~ operátorral definiálhatók a faktorok (pl. változó ~ faktor1 + faktor2) (Murrell, 2005). A boxplotok mediánt, alsó és felső kvartileket (a doboz szélét), bajuszokat ($1,5 \times \text{IQR}$ -t) és kiugró értékeket (pontokat a bajuszokon kívül) ábrázolnak, lehetővé téve a csoportok közötti eltérések, szórás és rendellenes megfigyelések azonosítását. Alkalmasak a kezelések hatásának előzetes felmérésére, például a vízszint vagy időtartam hatásainak összehasonlítására mezőgazdasági vagy kísérleti adatokban, továbbá az adatok szimmetriájának és eloszlási tulajdonságainak gyors áttekintésére. A grafikonok testreszabásához a par() függvényt használható (pl. par(mfrow=c(1,1) több plot elrendezésére), míg az adatminőségi problémák (pl. NA értékek) kezelésére az na.omit() függvény alkalmazható. A kétutas boxplotok hasznosak a további statisztikai elemzések előkészítésében, mivel segítenek azonosítani a potenciális kiugrókat vagy adateltéréseket. A kétutas boxplottal vizuálisan összehasonlíthatjuk a válaszváltozó eloszlását a két tényező (vízszint és időtartam) összes elérhető kombinációjában (Hu, 2020). Ezzel látható a középszint-változásokat (mediánok) a vízszintek között időtartamonként, és fordítva. Felmérhetjük a szórást/heteroszkedaszticitást (dobozmagasság, bajuszok), ami segít eldönteni, hogy robusztus post hoc (pl. Games–Howell) kell-e. Kiugrókat azonosíthatjuk (körök), és így elkülöníthetjük a „valódi” csoportkülönbséget a szélső pontok hatásától. Interakcióra utaló mintázatot kereshetünk, ha a vízszintek „rangora” változik az időtartamok között (nem párhuzamos mediánmintázat), az vízszint \times időtartam kölcsönhatásra utal. Egyenlőtlen mintaszámok/hiányzó kombinációk hatását is látjuk (dobozok száma/szélessége), ami fontos az értelmezésnél és a modell specifikálásánál.

Kétutas kölcsönhatás diagram (two-way interaction plot)

A kétutas kölcsönhatás diagram arra szolgál, hogy szemléltessen egy válaszváltozó átlagos (vagy becsült marginális) értékeit két tényező összes kombinációjában, és vizuálisan megmutassa az interakciót. A kétutas kölcsönhatás diagrammok segítenek a lineáris modellekben a jelentős interakciók értelmezésében, megmutatva, hogy egy független változó hatása a függő változóra hogyan változik egy másik független változó szintjein (Toyama, 2024). Ha a vonalak nagyjából párhuzamosak, akkor a tényezők hatása többnyire összeadódó (additív) (nincs vagy gyenge interakció); ha széttartanak vagy kereszteződnek, az a kölcsönhatás jelenlétére utal. A kölcsönhatás diagram segít a részletes összehasonlítások, hatásméretetek (simple effects) megtervezésében, és hasznos a modell-eredmények értelmezéséhez, de nem helyettesíti a formális tesztet (pl. ANOVA/lineáris modell interakciós tagja, kontrasztok). A jó gyakorlatban a pontokhoz

hibaoszlopot (standard error/confidence interval;SE/CI) is rajzolunk, és kiegyensúlyozatlan elrendezésben becült marginális átlagokat ábrázolunk. A kétutas kölcsönhatás diagram tehát diagnosztikus, hipotézis-generáló és kommunikációs eszköz, amelyet mindig kísér megfelelő statisztikai próba és hatásméret-becslés.

Bartlett-féle varianciahomogenitási teszt

A Bartlett-teszt egy statisztikai eljárás, amelyet több csoport varianciájának homogenitásának tesztelésére használnak (Bartlett, 1937). A Bartlett-próba több sokaság szórásának összehasonlítására vonatkozó próba, ha mindegyik sokaság normális eloszlású. A chi-négyzet (χ^2) eloszlás közelítésén alapul, amely nagy mintanagyságok esetén hatékony, de kis minták vagy nagy populációszám esetén problémás lehet (Fu and Lin, 2007; Ma et al., 2015).

A varianciák homogenitásának Bartlett-tesztje több okból is szükséges a többváltozós varianciaanalízis (MANOVA) elvégzése előtt:

A varianciák egyenlőségének feltételezése:

A MANOVA feltételezi, hogy a függő változók varianciái az összehasonlított csoportokban egyenlőek. Ez a varianciák homogenitásának feltételezése. Ha ez a feltételezés nem teljesül, a MANOVA eredményei érvénytelenek lehetnek, ami helytelen következtetésekhez vezethet.

Hatása az I. típusú hiba arányára: Ha a varianciák nem egyenlőek (azaz ha heteroszkedaszticitás van), az növelheti az I. típusú hiba arányát, ami azt jelenti, hogy nagyobb az esélye a nullhipotézis helytelen elutasításának. Ez félrevezető eredményekhez és értelmezésekhez vezethet.

A MANOVA robusztussága:

Bár a MANOVA viszonylag robusztus a varianciák homogenitásának feltételezésének megsértése tekintetében, a feltételezés jelentős eltérései befolyásolhatják a teszt erejét. A Bartlett-teszt segít azonosítani, hogy a feltételezés teljesül-e, lehetővé téve a kutatók számára, hogy megalapozott döntéseket hozzanak a MANOVA megfelelőségéről.

Statisztikai döntések irányítása:

Ha a Bartlett-teszt azt jelzi, hogy a varianciák nem egyenlőek, a kutatóknak alternatív statisztikai módszereket vagy kiigazításokat kell fontolóra venniük, például egy másik teszt (pl. Welch ANOVA) használatát vagy az adatok transzformálását a varianciák stabilizálása érdekében.

Levene-féle varianciahomogenitási teszt

A Levene-tesztet is több csoport varianciájának egyenlőségének értékelésére használnak. Különösen akkor hasznos, ha a normális eloszlás feltételezése nem teljesül, így a Bartlett-teszt robusztus alternatívájaként szolgál (Fox and Weisberg, 2019).

A modell-reziduálok vizsgált többletmátrix eloszlásának ellenőrzése

A MANOVA után a következő logikus lépés a modell-reziduálok (vagy a vizsgált többletmátrix) eloszlásának ellenőrzése. A klasszikus Wilks-Lambda és rokon tesztek feltételezik, hogy a hibatag multivariáns normális. A MVN::mvn() ezt egységesen ellenőrzi:

A Henze–Zirkler (HZ) teszt egy globális (többváltozós) normalitáspróba (Alao et al., 2019); a Shapiro–Wilk (SW) tesztekét változónként külön futtatja (egyváltozós ellenőrzés); az outliereket robusztus Mahalanobis-távolság alapján jelöli, az adjusted (illesztett) (Hardin–Rocke) küszöbvel, amely az robusztus (MCD-alapú; Minimum Covariance Determinant) közép–kovariancia becslést használja, és F-eloszlásra korrigálja a χ^2 -küszöböt.

Lilliefors (Kolmogorov–Smirnov) normalitáspróba

A Lilliefors (Kolmogorov–Smirnov) normalitáspróba azt vizsgálja, hogy az adataink egy ismeretlen várható értékű és szórású normális eloszlásból származnak-e (Thode, 2002). Ez a lépés a MANOVA utáni diagnosztika része: a többváltozós normalitást (HZ-teszt) kiegészítjük egyváltozós tesztekkel; a Lilliefors alternatívája a Shapiro–Wilknek, és különösen akkor illik rá, amikor μ és σ is a mintából van becsülve (Zgueb et al., 2020).

3.3.3. Hipotézisvizsgálat

Két tényezős véletlen blokkos elrendezésű többváltozós varianciaanalízis (Two-factor, randomized block design, RBD, multivariate analysis of variance (MANOVA)) overall test and follow-up analysis

Ez a tervezés a kísérleti egységek közötti variabilitás szabályozására szolgál, az egységeket blokkokba csoportosítva. Minden blokk tartalmazza az összes kezelést, és a blokkokon belül véletlenszerűen osztja el a kezeléseket (Krzanowski and Marriott, 1994; Moder, 2022). Kétfaktoros tervezés (RBD), két független változót (faktort) tartalmaz, amelyeket manipulálnak, hogy megfigyeljék azok hatását a függő változókra. Egy kétfaktoros RBD-ben minden blokk tartalmazza a két faktor összes kombinációját (Moder, 2022; Yatim and Ismail, 2014).

Games-Howell post-hoc teszt

A Games–Howell post hoc teszt az varianciaanalízis keretében a csoportátlagok közötti különbségek azonosítására használtam. Ez a teszt akkor is megfelelő, ha a varianciák egyenlőtlenek és a mintaméret eltérőek, ami robusztussá teszi számos gyakorlati alkalmazásban.

Főbb jellemzői és alkalmazásai:

Más post hoc tesztekkel ellentétben a Games–Howell teszt nem feltételezi az egyenlő varianciákat vagy az egyenlő mintaméreteket, így bonyolultabb adatkészletekhez is alkalmas (Pazos et al., 2022). Gyakran használják a Welch-féle ANOVA-val együtt, amely szintén nem feltételezi a varianciák homogenitását (Dang et al., 2024). Ez a kombináció hatékonyan elemzi az egyenlőtlen varianciájú adatokat. A teszt segítségével hatásméretet, például az eta-négyzet (η^2) is kiszámítható a csoportok közötti különbségek nagyságának mérésére (Zgueb et al., 2020).

Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test)

A Welch kétmintás t-próba egy statisztikai próba, amelyet két független csoport átlagainak összehasonlítására használnak, különösen akkor, ha a varianciák egyenlőségének feltételezése nem teljesül. A klasszikus Student-féle t-próbával ellentétben, amely egyenlő varianciákat feltételez, a Welch-féle t-próba nem követeli meg ezt a feltételezést, így heteroszkedaszticitás (egyenlőtlen varianciák) esetén robusztusabbá teszi (Reed, 2005).

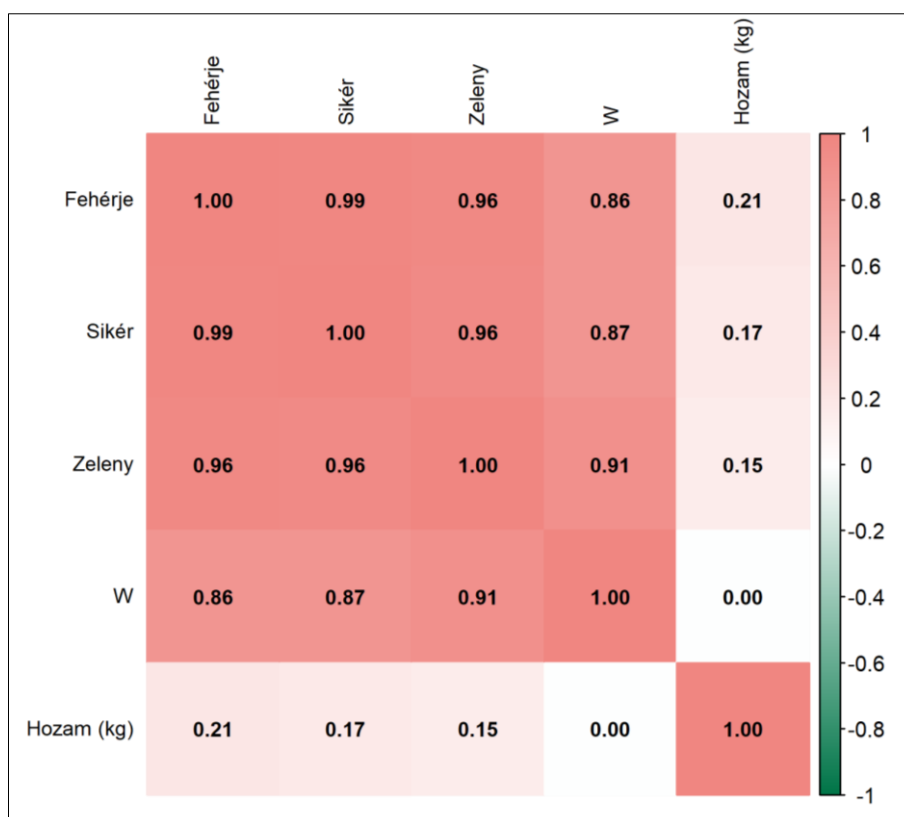
4. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

Cél: Megérteni, hogyan befolyásolják a vízszint és időtartam kezelések a gabona minőségét és hozamát a különböző években, és a számított vegetációs indexek kapcsolatának összefüggéseit összehasonlítani a SPAD relatív klorofill tartalom mérésekkel.

Adatok: 168 megfigyelés (sor) van (56 liziméter edény *3 év), ami a hozam és minőségi paraméterekre vonatkozik, minden sor egy liziméter edény mérése egy adott év/vízszint/időtartam kombinációval. A vegetációs index és SPAD relatív klorofill tartalom mérések összevetésénél 2019-ben, n=448; 2020-ban, n=440; 2021-ben, n=192 párhuzamos mérés történt, összesen n=1084.

4.1. Az őszi búza termés eredmények statisztikai elővizsgálata, a függő változók közötti korreláció és a kiugró értékek meghatározására

A Pearson-féle korrelációs együtthatóval vizsgáltam a válaszváltozók (fehérje, sikér, Zeleny érték, W érték, hozam) közötti lineáris kapcsolatokat az R szoftver cor() és Hmisc csomag rcorr() függvényeivel. Az eredmények erős pozitív korrelációt mutattak a minőségi paraméterek között, különösen a fehérje és a sikér ($r = 0,989$, $p < 0,001$), a fehérje és a Zeleny érték ($r = 0,961$, $p < 0,001$), valamint a Zeleny és a W érték ($r = 0,909$, $p < 0,001$) esetében, jelezve, hogy ezek a paraméterek szorosan együtt mozognak a kezelések hatására (8. ábra).

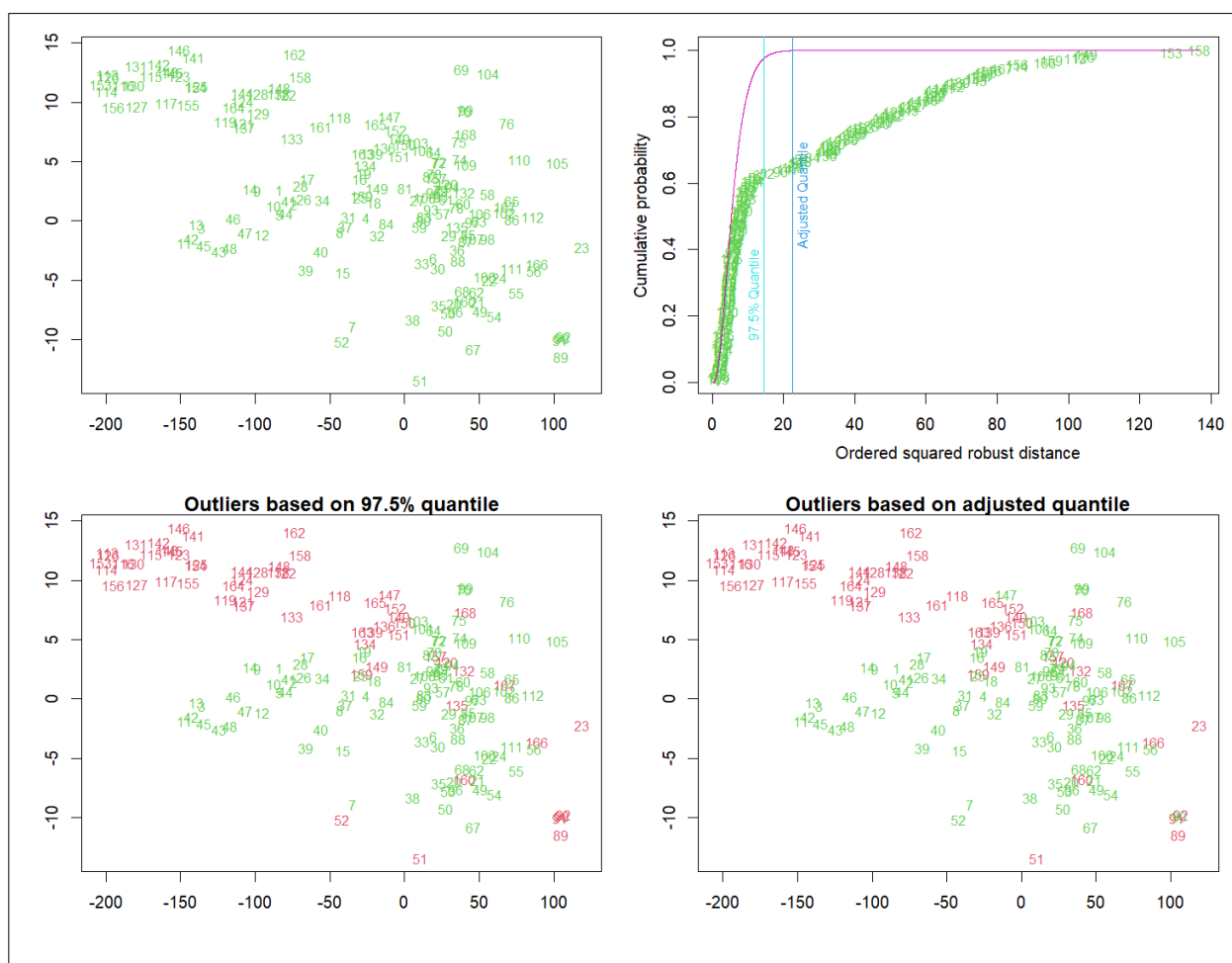


8. ábra Az őszi búza szemtermés minőségi tulajdonságainak korrelációs mátrixa

Ezzel szemben a hozam csak mérsékelt korrelációt mutatott a minőségi paraméterekkel ($r = 0,155$ – $0,206$, illetve $r = -0,171$ – $-0,297$).

Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a vízszint és időtartam kezelések elsősorban a gabona minőségi tulajdonságait befolyásolják összehangoltan, míg a hozam részben független hatások alatt áll.

Többváltozós kiugróértékek (9. ábra), az `mvoutlier::aq.plot()` függvényt alkalmaztam $\alpha = 0,001$ szignifikanciaszinten. A pontok robusztus Mahalanobis-távolság alapján minősülnek kiugrónak; a felső jobb panel a 97,5%-os és az adjusted küszöböt mutatja, az alsó panelek a kiugró megfigyeléseket színezik (9. ábra). Az egyszerű kiugró értékek észlelésére alkalmazott `aq.plot` függvény 54 kiugró értéket azonosított a 168 megfigyelésből, ami az adatok 32%-át teszi ki. A módszer robusztus kovariancia-becslést és robusztus főkomponens-vetítést használ; nálam az első két robusztus főkomponens a teljes variancia $\sim 97,2\%$ -át magyarázta, ezért a felső bal panelen látható kétdimenziós pontfelhő a lényegi szerkezetet jól visszaadja.



9. ábra Az őszi búza szemtermés minőségi értékeinek robusztus többváltozós kiugróérték-vizsgálata (RD^2 , kiigazított kvantilis (adjusted quantile), $\alpha = 0,001$)

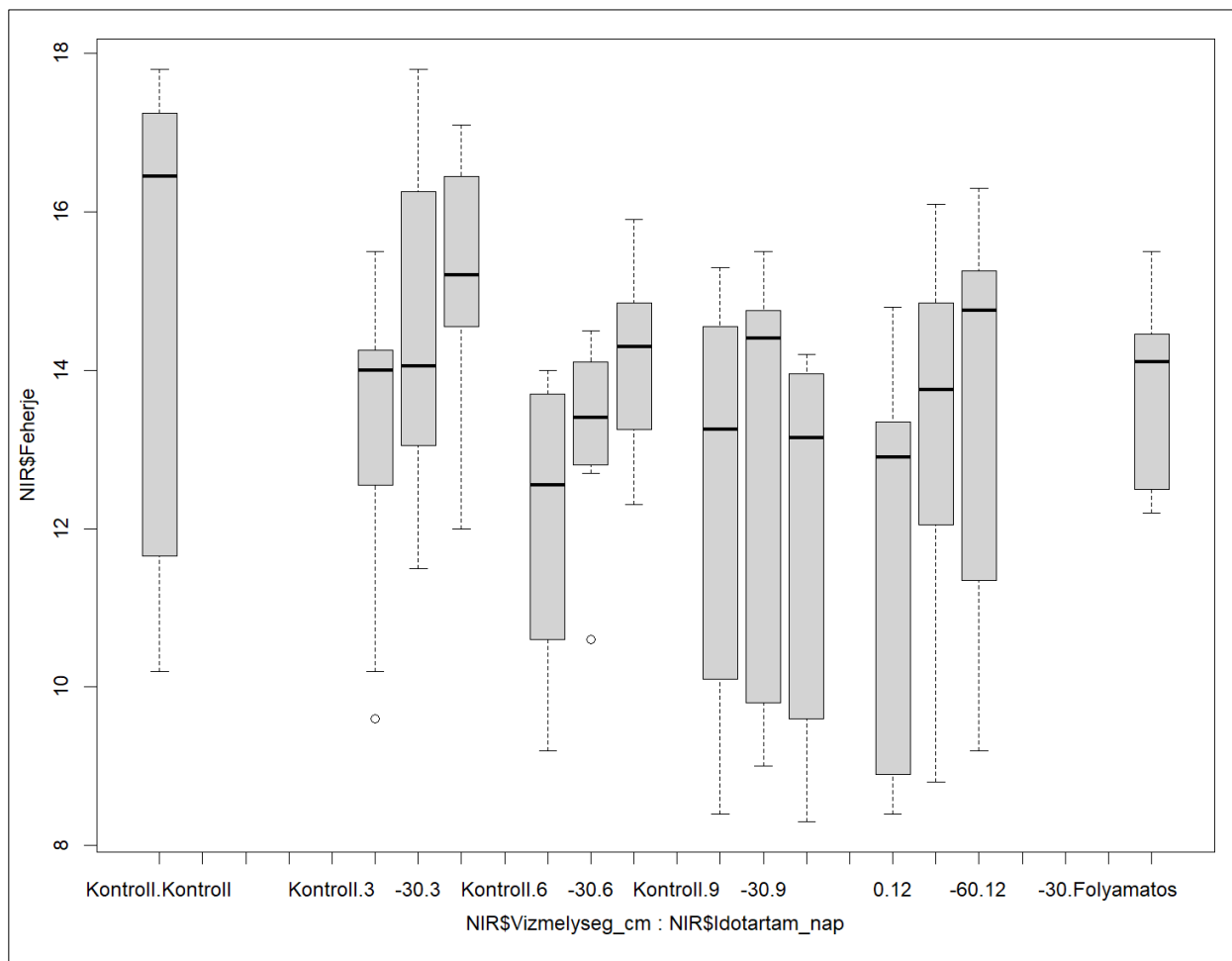
A felső jobb panelen a rendezett, négyzetes robusztus távolságok kvantilgörbéje látható, a függőleges vonalak a klasszikus 97,5%-os és az „adjusted quantile” küszöböt jelölik; ez utóbbi a valós adatok (aszimmetria, heteroszkedaszticitás) miatti torzulásokra korrigál, ezért megbízhatóbb. Az outlier-ek főként a 113-146 és 148-168. sorokban koncentráálódtak, míg egyedi kiugrások a 23., 51., 89-92. sorokban fordultak elő. Ez arra utalhat, hogy bizonyos kezelési

kombinációk (pl. specifikus év, vízszint vagy időtartam) szokatlan eredményeket produkáltak, vagy adatminőségi problémák állnak fenn, amelyek további ellenőrzést igényelnek a későbbi statisztikai elemzések megbízhatósága érdekében.

4.1.1. Az őszi búza termésének kétutas (kétfaktoros) dobozdiagram (boxplot) elemzése

Fehérjetartalom eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

A 10. ábrán a fehérje erősen különbözik a kombinációk között. A Kontroll.Kontroll doboz nagyon magas és széles (nagy szórás, magas medián), de több kontroll-időtartam kombinációnál (Kontroll.6, Kontroll.9) a medián alacsonyabb és vannak alsó kiugrók is.



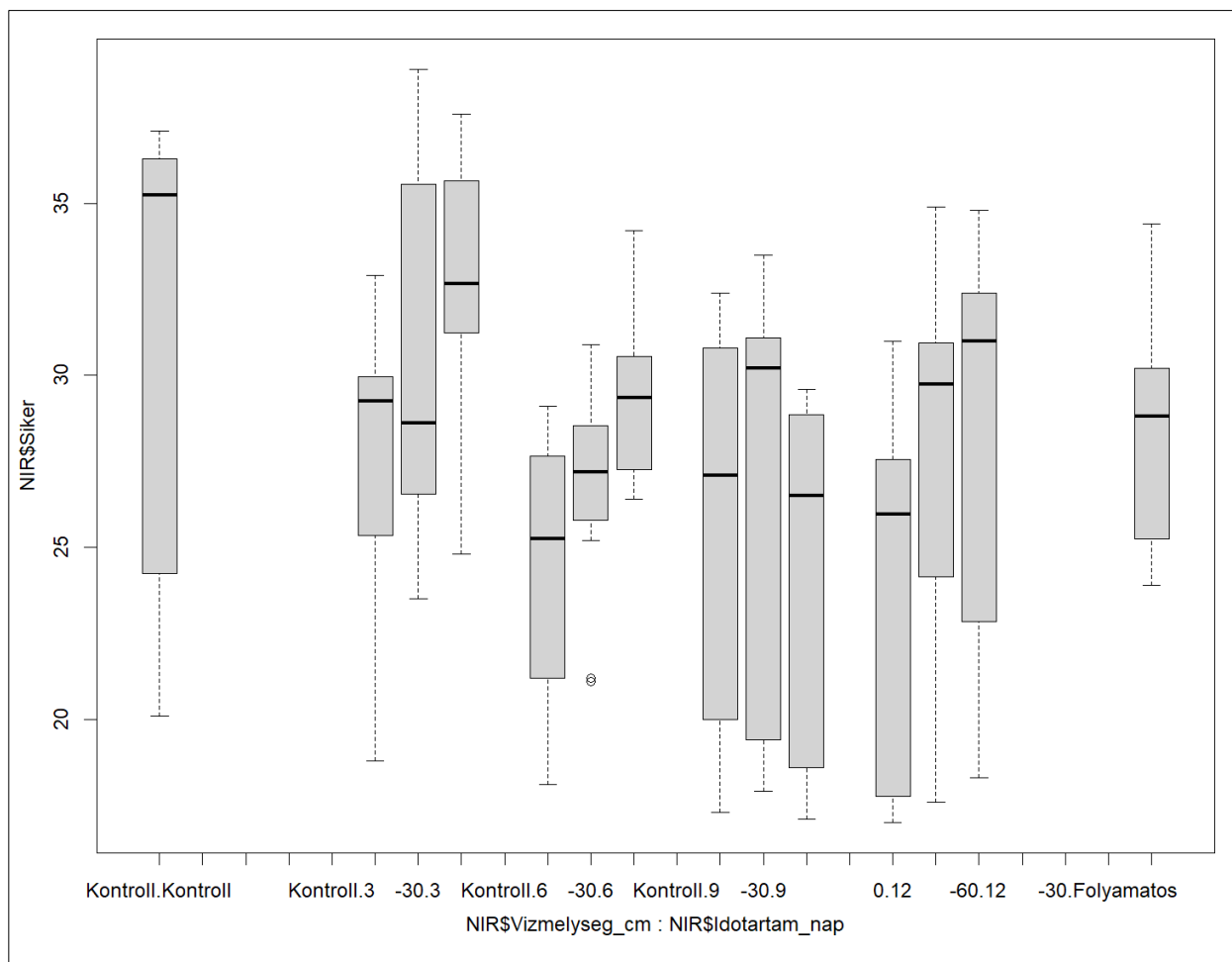
10. ábra Őszi búza –Fehérjetartalom eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

A 12 napos mélyebb vízszint esetén kettősséget láthatunk: 0.12 inkább alacsonyabb fehérjét ad, míg a -60.12 csoport magasabb mediánnal és szélesebb tartománnyal jelenik meg (10. ábra). A -30.3 / -30.6 / -30.9 kombinációk többnyire a közép-magas tartományban vannak. A fehérjére mindkét tényező és az interakció is hat: a mélyebb és/vagy hosszabb vízborítás nem azonos irányú

minden szinten, de több esetben növeli a fehérjét a kontrollhoz képest, míg a 0 cm, 12 nap inkább csökkent.

Sikér (%) eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

A 11. ábrán a sikér a fehérje mintázatát követi (ez a korrelációk alapján várható is). A Kontroll.Kontroll itt is magas és széles, a Kontroll.6 alacsonyabb, 0.12 visszafogottabb, a -60.12 és több -30-as variáns (pl. -30.3, -30.6, -30.9) közép-magas tartományban mozog. Összességében a sikérnél is azt látom, hogy a mélyebb vízszint + hosszabb tartam sok esetben magasabb értéket ad, de nem mindegy, hogy 0 cm vagy -30/-60 cm a beállítás (11. ábra).

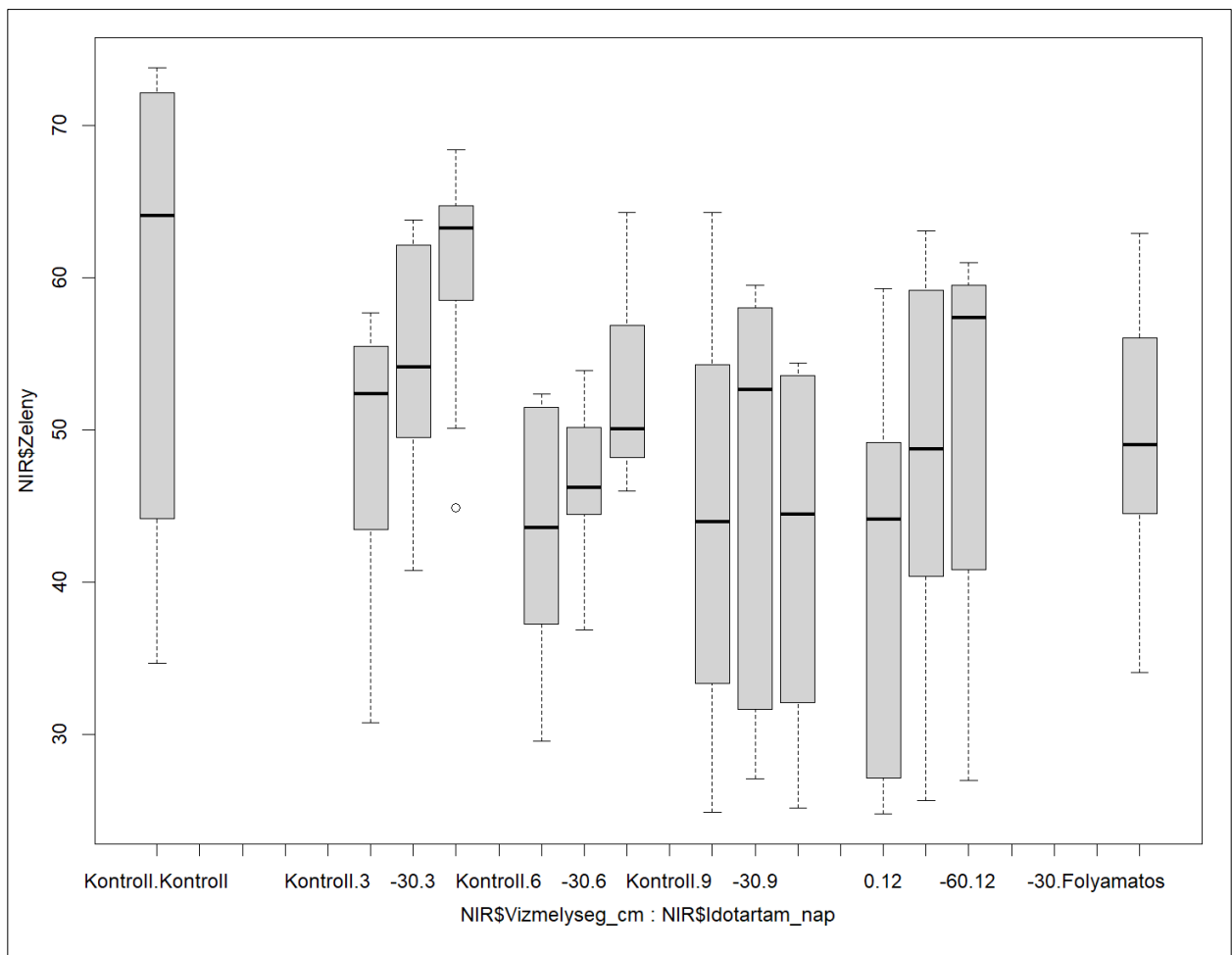


11. ábra Őszi búza –Sikér (%) eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

Zeleny-érték eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

A 12. ábrán a Zeleny-értékek eloszlása nagyon hasonló a fehérje/sikér ábrákhoz. A Kontroll.Kontroll itt is kifejezetten magas mediánnal és széles tartománnyal jelenik meg. A -30.3 és -30.6 felső-közép zónában vannak; a Kontroll.6 és 0.12 inkább alacsonyabb; a -60.12 és -30.Folyamatos közép–magas. Vizuálisan tehát a minőségi index (Zeleny) is érzékeny a vízszint–

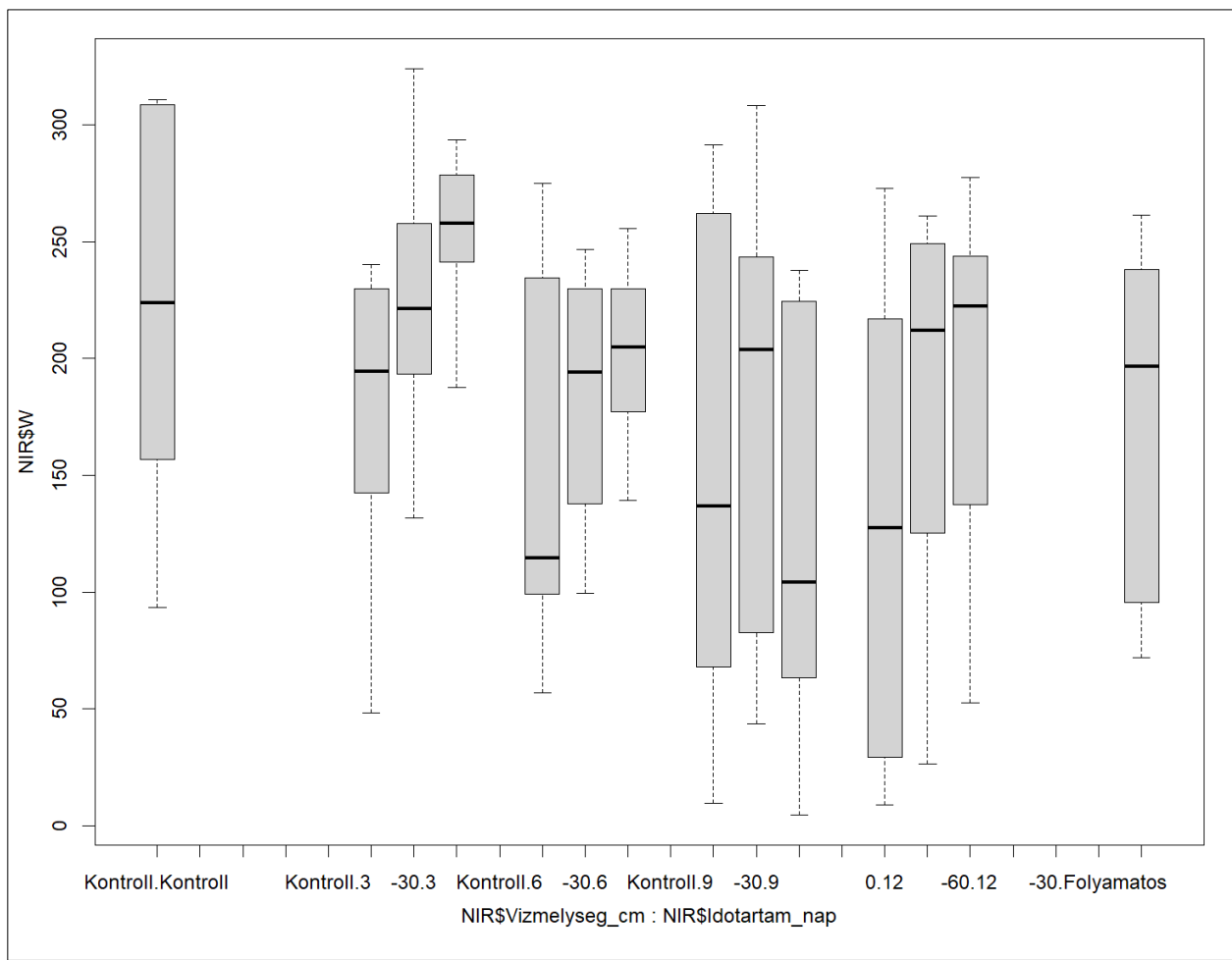
időtartam kombinációra; a „0 cm/12 nap” kedvezőtlenebb, a „-60 cm/12 nap” és több „-30 cm” variáns kedvezőbb (12. ábra).



12. ábra Őszi búza –Zeleny-érték eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

W érték eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

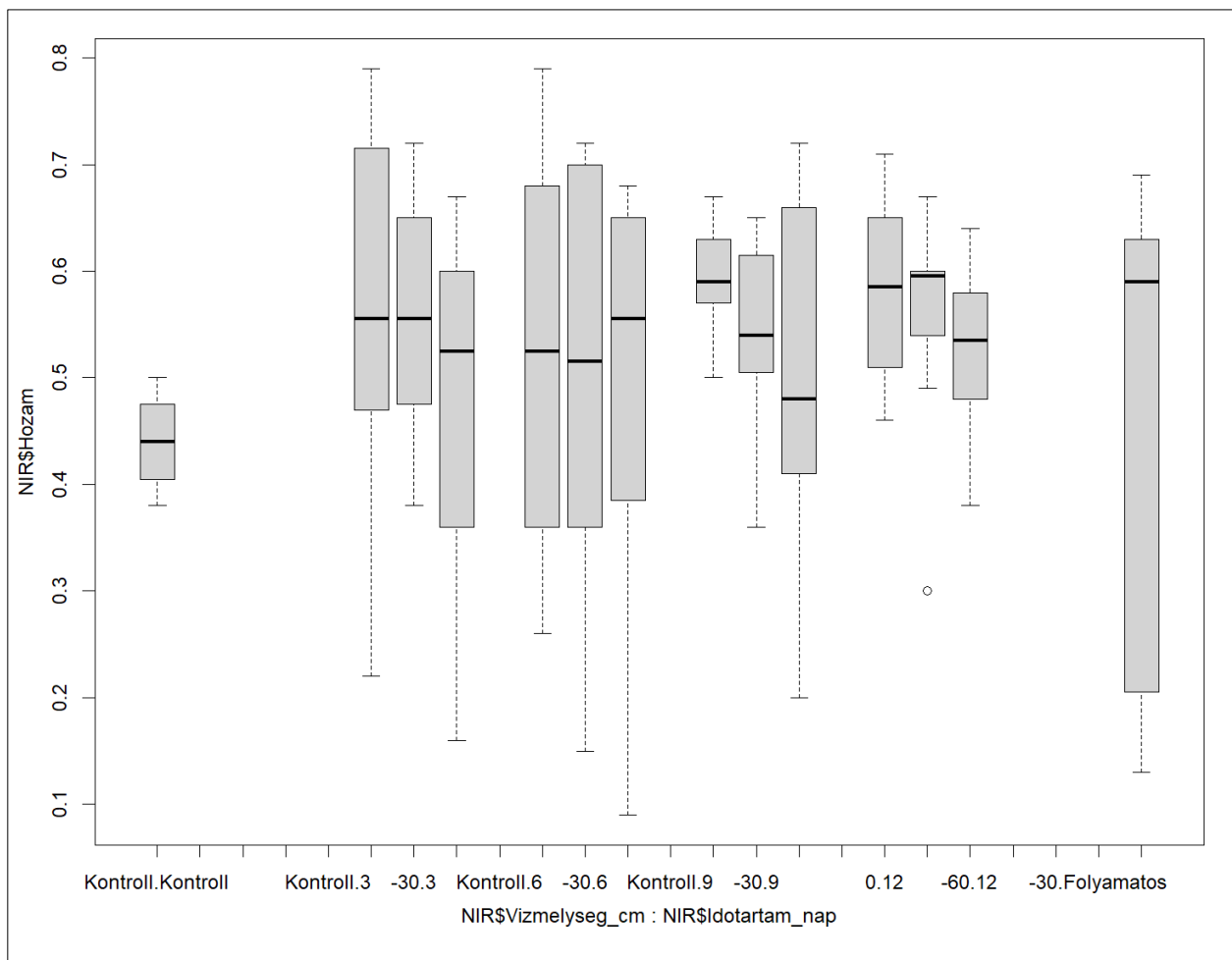
A 13. ábrán a W-értékeknél a szórás a legnagyobb, ami az W érték ismert változékonyságával összhangban van. A Kontroll.Kontroll csoport nagyon magas felső kvartilisig nyúlik (egyértelműen erős „W”), utána több kombináció (pl. -30.3, -30.6, -30.9, -60.12, -30.Folyamatos) is közép-magas mediánokkal szerepel. A Kontroll.6 és 0.12 inkább alacsonyabb mediánt mutat, és jóval szélesebb szórással. A W mutató érzékeny a kezelésekre: vannak gyengébb (pl. 0 cm/12 nap, Kontroll/6 nap) és erősebb (pl. Kontroll.Kontroll, -60 cm/12 nap, több -30-as variáns) állapotok (13.ábra).



13. ábra Őszi búza $-W$ érték eloszlása vízszint \times időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

Hozam (kg/liziméter edény) eloszlása vízszint \times időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

A 14. ábrán a hozam jóval kiegyensúlyozottabb, mint a minőségi jellemzők. A Kontroll.Kontroll mediánja alacsonyabb; a 3–9 napos tartamoknál, főleg -30 cm mellett (-30.3, -30.6, -30.9) a medián magasabb és stabilabb. A 0.12 kombináció gyengébb; a -60.12 és -30.Folyamatos közepes–jó tartományba esik, de a -30.Folyamatos doboz nagyon magas, ami nagy időbeli/ismétlésbeli szórásra utal. Vizuálisan tehát a hozamra a vízszint hatása markánsabb, az időtartam önmagában kevésbé egyértelmű; ez összhangban áll azzal, hogy a formális elemzésben a hozamra a vízszint és évhatás jellemzően erősebb, míg az időtartam-hatás gyengébb (14. ábrán).

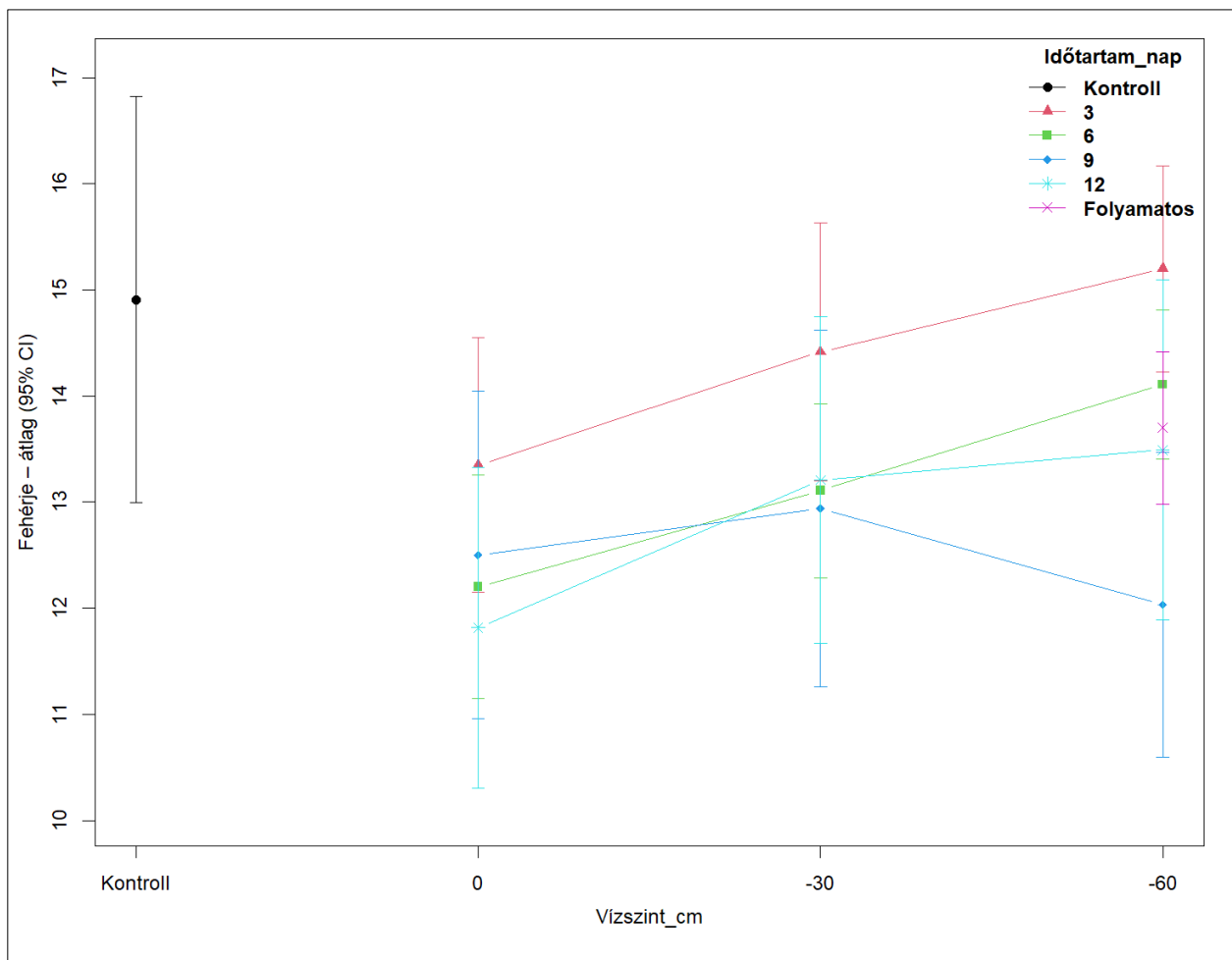


14. ábra Őszi búza –Hozam (kg/liziméter edény) eloszlása vízszint \times időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)

4.1.2. Az őszi búza termésének kétutas (kétfaktoros) interakció diagram (two-way interaction plot) elemzése

Fehérje – vízszint \times időtartam interakció

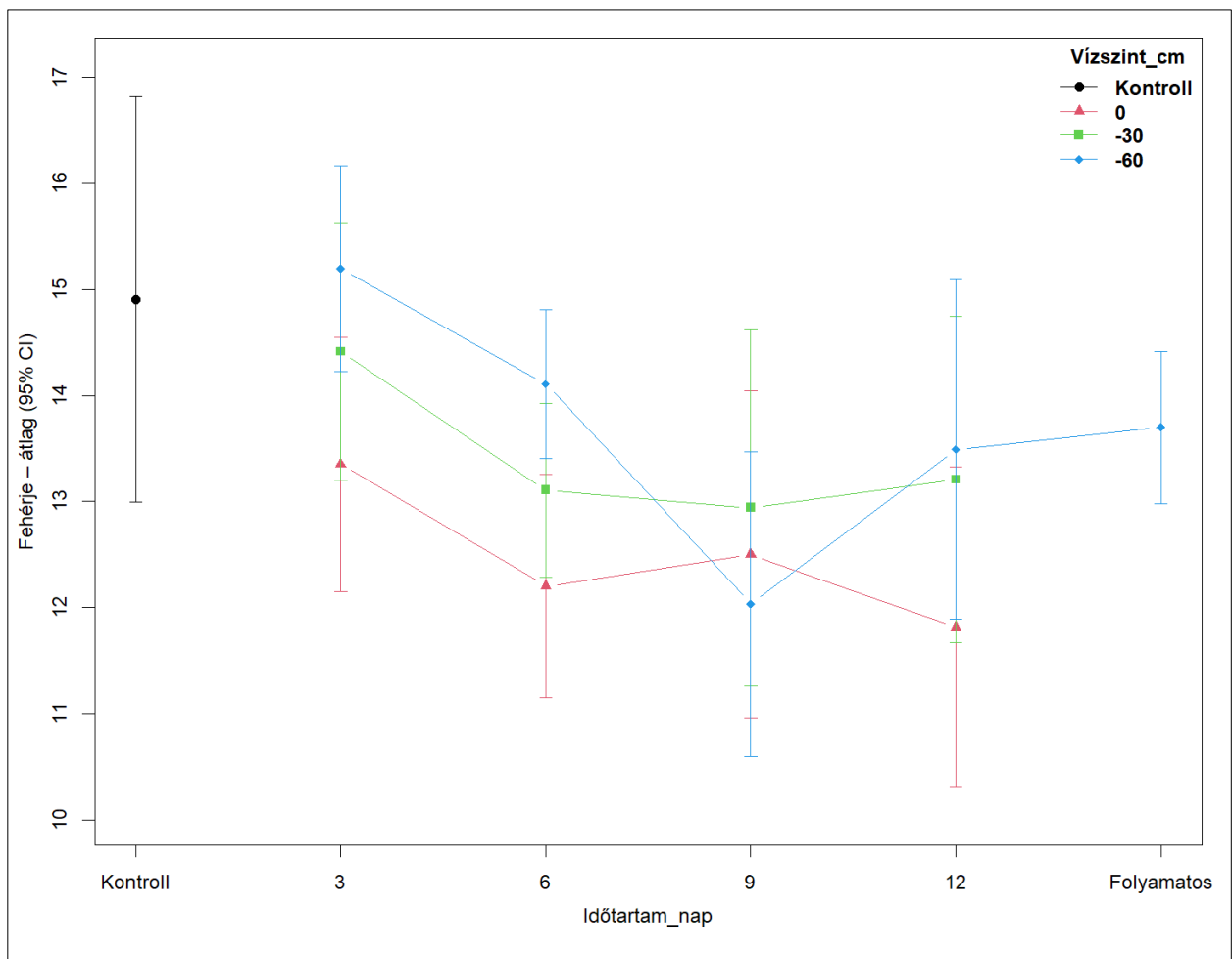
A 15. ábrán a rövid (3 nap) és hosszú (12 nap) időtartamnál a fehérje átlagai többnyire emelkednek 0 \rightarrow -60 cm felé, 9 napnál viszont visszaesés látszik -60 cm-en. Ez a nem párhuzamos mintázat megerősíti az interakció gyanúját. A 0 cm-es és -30 cm-es szintek között általában mérsékeltebb a különbség, míg -60 cm-en markánsabb eltérés jelenik meg (15. ábrán). A konfidencia-intervallumok (CI-k) átfedése miatt a látott irányok értelmezhetők, de következtetéshez post hoc összehasonlítást is alkalmazok.



15. ábra Őszi búza –Fehérjetartalom – vízszint × időtartam interakció (x-tengely: Vízszint_cm, jelmagyarázat: Időtartam_nap)

Fehérje – időtartam × vízszint interakció

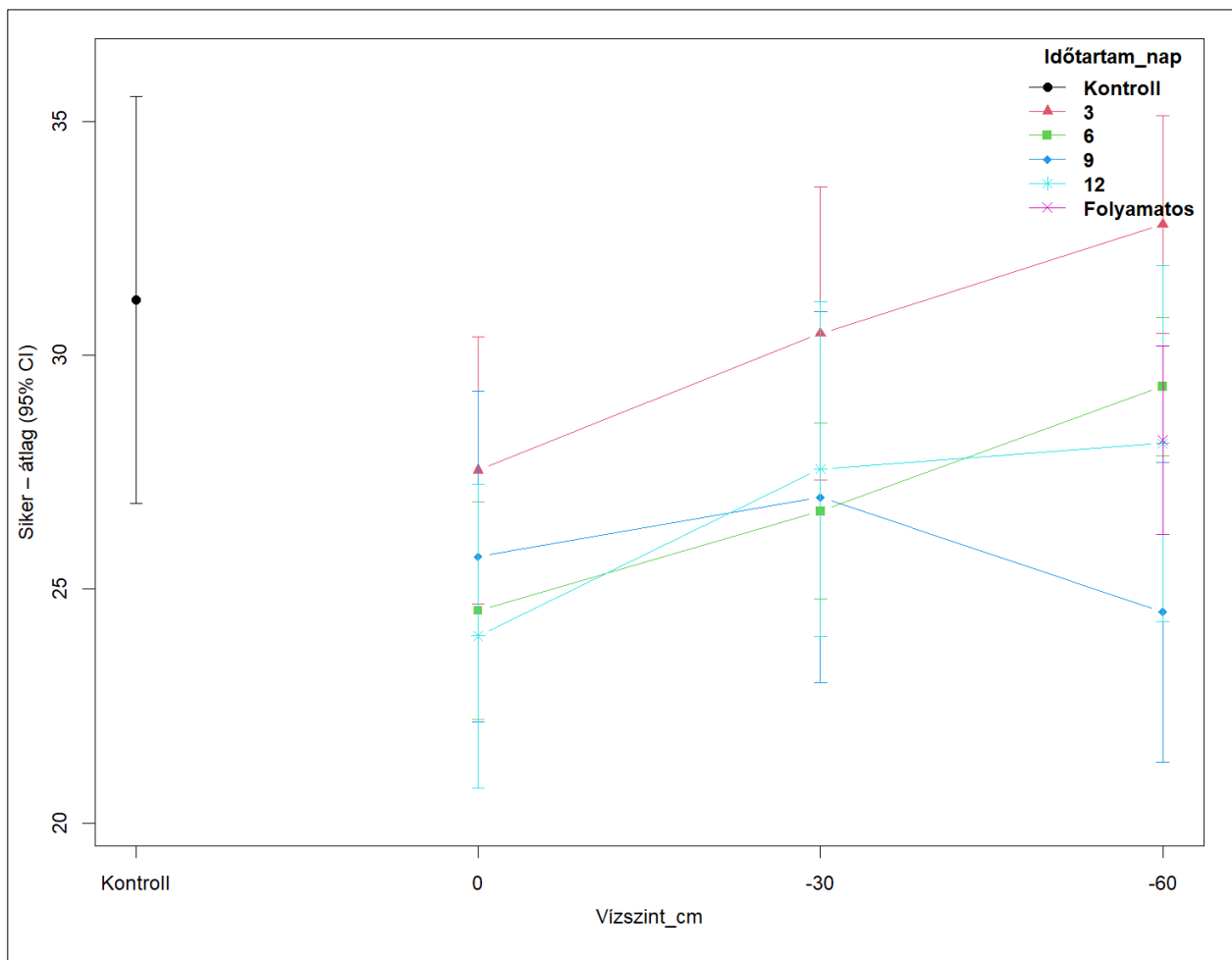
A 16. ábrán a görbék több helyen nem párhuzamosak és részben kereszteződnek, ami interakcióra utal a vízszint és az időtartam között. A -60 cm-es szintnél U-alakú mintázat látható: 3 napnál magas, 9 napnál mélypont, 12 napnál visszapattanás. A 0 cm-es szint jellemzően alacsonyabb fehérjét ad, a -30 cm közepén helyezkedik el enyhe javulással 12 napnál (16. ábra). A hibaoszlopok több esetben átfednek, ezért a különbségek egy részét formális teszt erősítheti meg.



16. ábra Őszi búza –Fehérjetartalom – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)

Sikér – vízszint × időtartam interakció

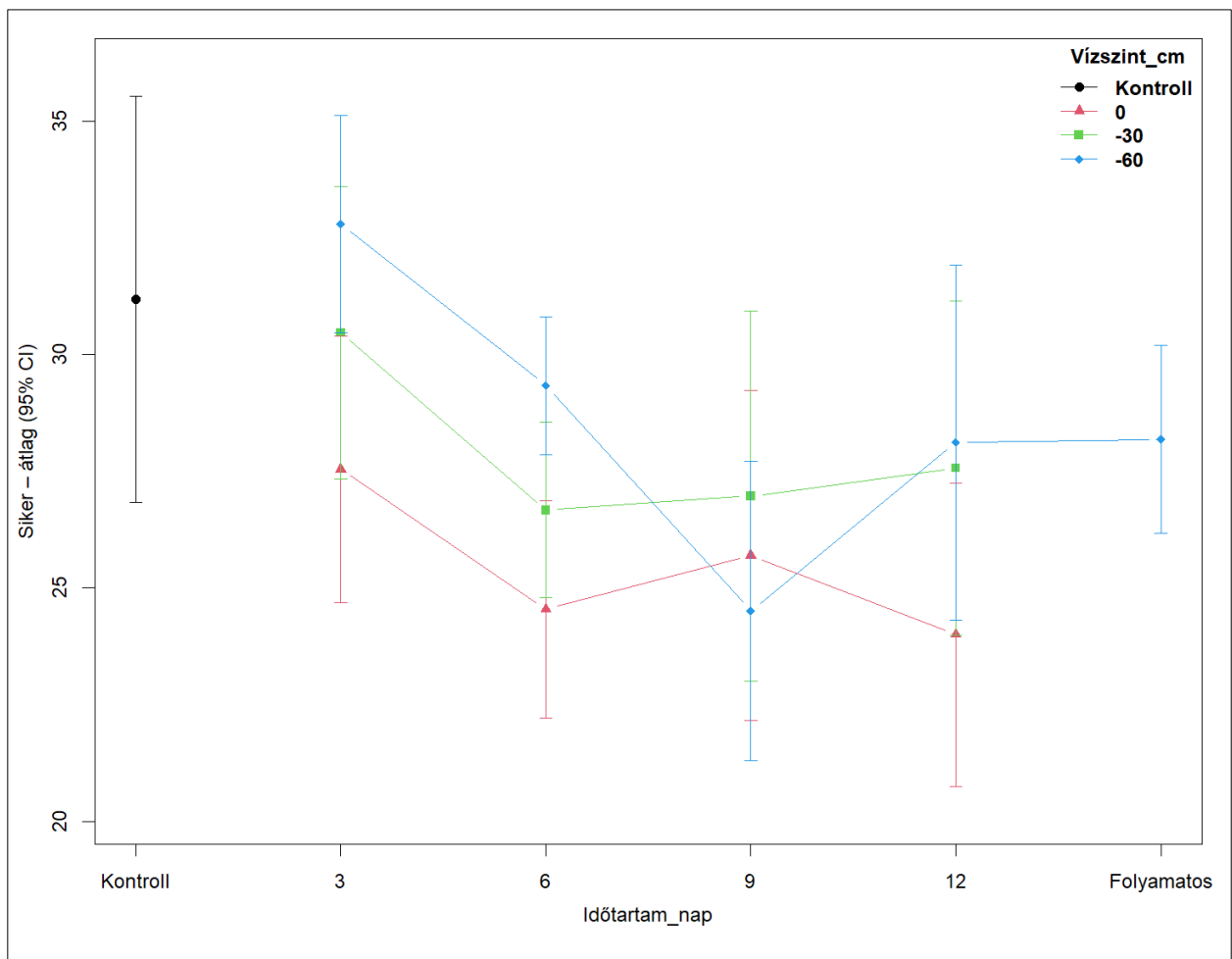
A 17. ábrán a vonalak nem párhuzamosak: 3 és 12 napnál 0→-60 cm irányban emelkedés látszik, 9 napnál viszont eltér a trend. Ez a mintázat interakció jelenlétére utal a vízszint és az időtartam között. A 0 és -30 cm közötti különbségek többnyire mérsékeltek, -60 cm-en markánsabb eltolódás mutatkozik (17. ábrán). A CI-k alapján néhány eltérés bizonytalan, ezért a végső megállapításokat modell-alapú tesztekre alapozom.



17. ábra Őszi búza –Siker (%) – vízszint \times időtartam interakció (x: Vízszint, színezés: Időtartam)

Siker – időtartam \times vízszint interakció

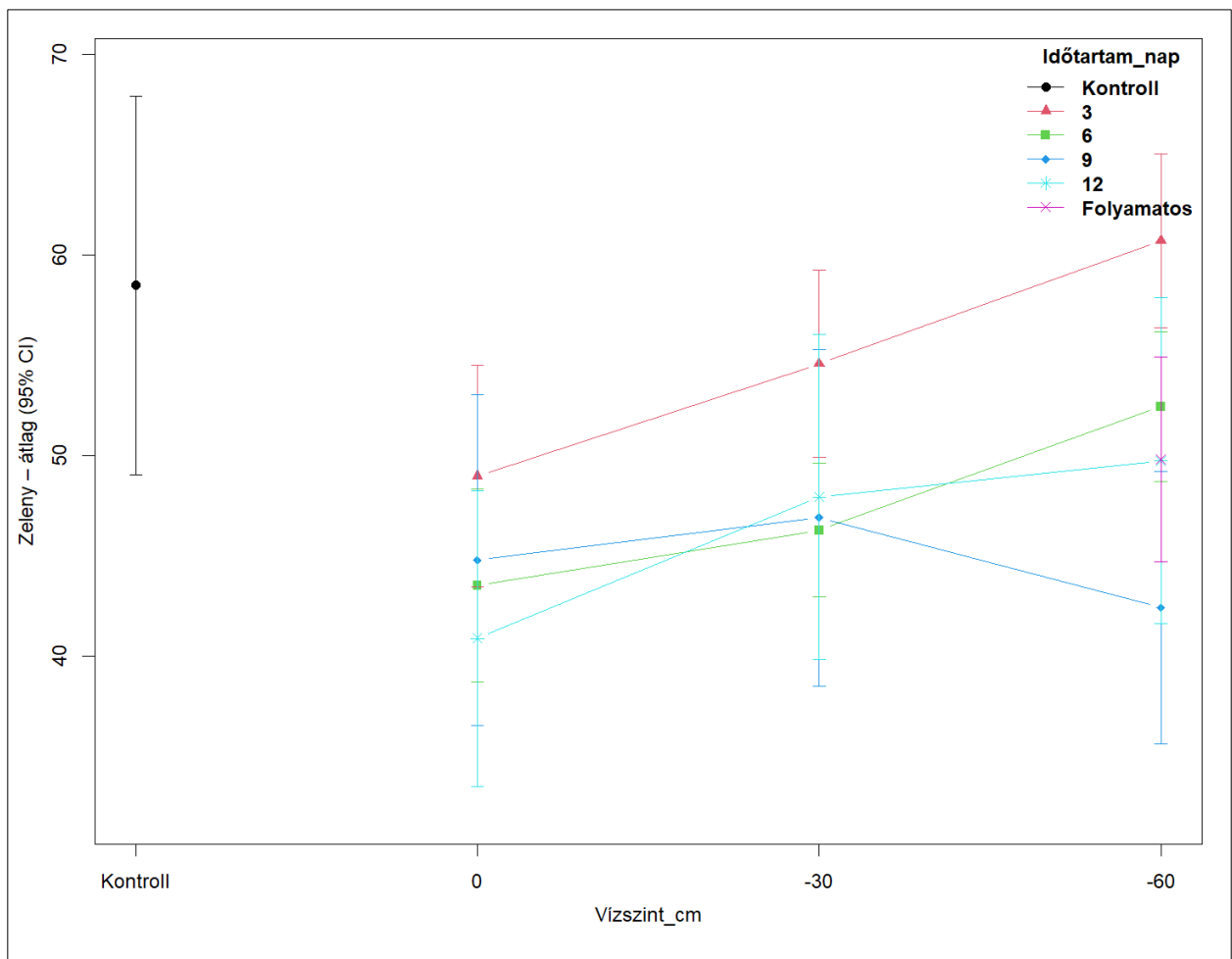
A 18. ábrán a siker a fehérje mintázatát követi, ami a két mutató ismert együttjárásával összhangban van. A -60 cm-en U-alak rajzolódik ki (3 nap magas, 9 nap alacsony, 12 nap ismét magasabb), 0 cm-en inkább alacsony szint figyelhető meg (18. ábra). A -30 cm köztes értékeket ad, és 12 napnál enyhe javulást jelez. A hibaoszlopok több csoportnál tágak, így a különbségek egy része csak tendenciaként értelmezhető.



18. ábra Őszi búza –Siker (%) – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)

Zeleny – vízszint × időtartam interakció

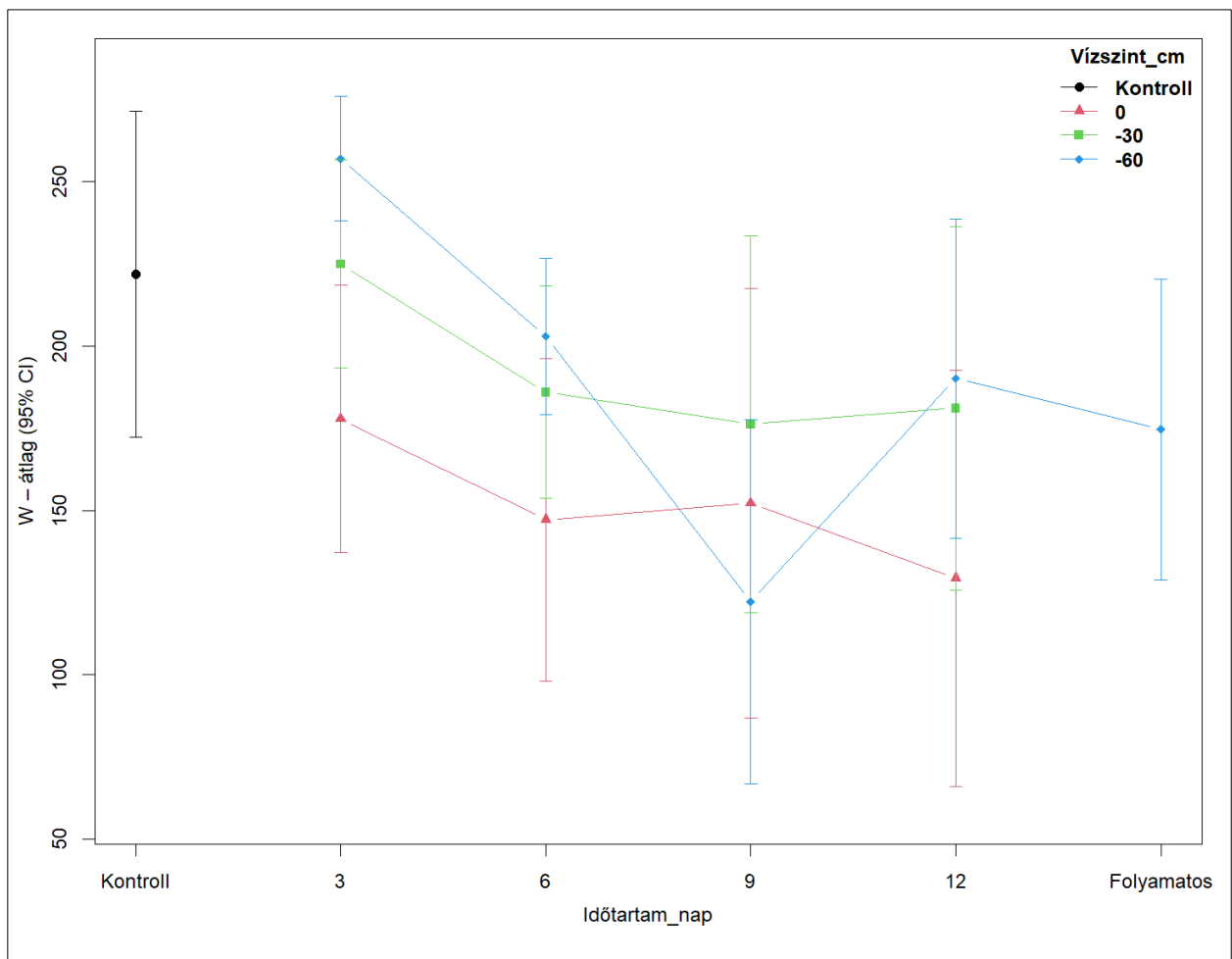
A 19. ábrán a rövidebb és hosszabb tartamoknál 0→-60 cm felé általában növekedést látok, míg 9 napnál eltér a trend. Ez a nem párhuzamos vonalmintázat interakcióra utal. A -30 cm gyakran átmenetet képez a 0 és -60 cm között (19. ábra). A bizonytalanságot jelző hibaoszlopok több esetben fedik egymást, ezért a különbségek értékelését post hoc összehasonlításokkal támasztom alá.



19. ábra Őszi búza –Zeleny-érték – vízszint × időtartam interakció (x: Vízszint, színezés: Időtartam)

Zeleny – időtartam × vízszint interakció

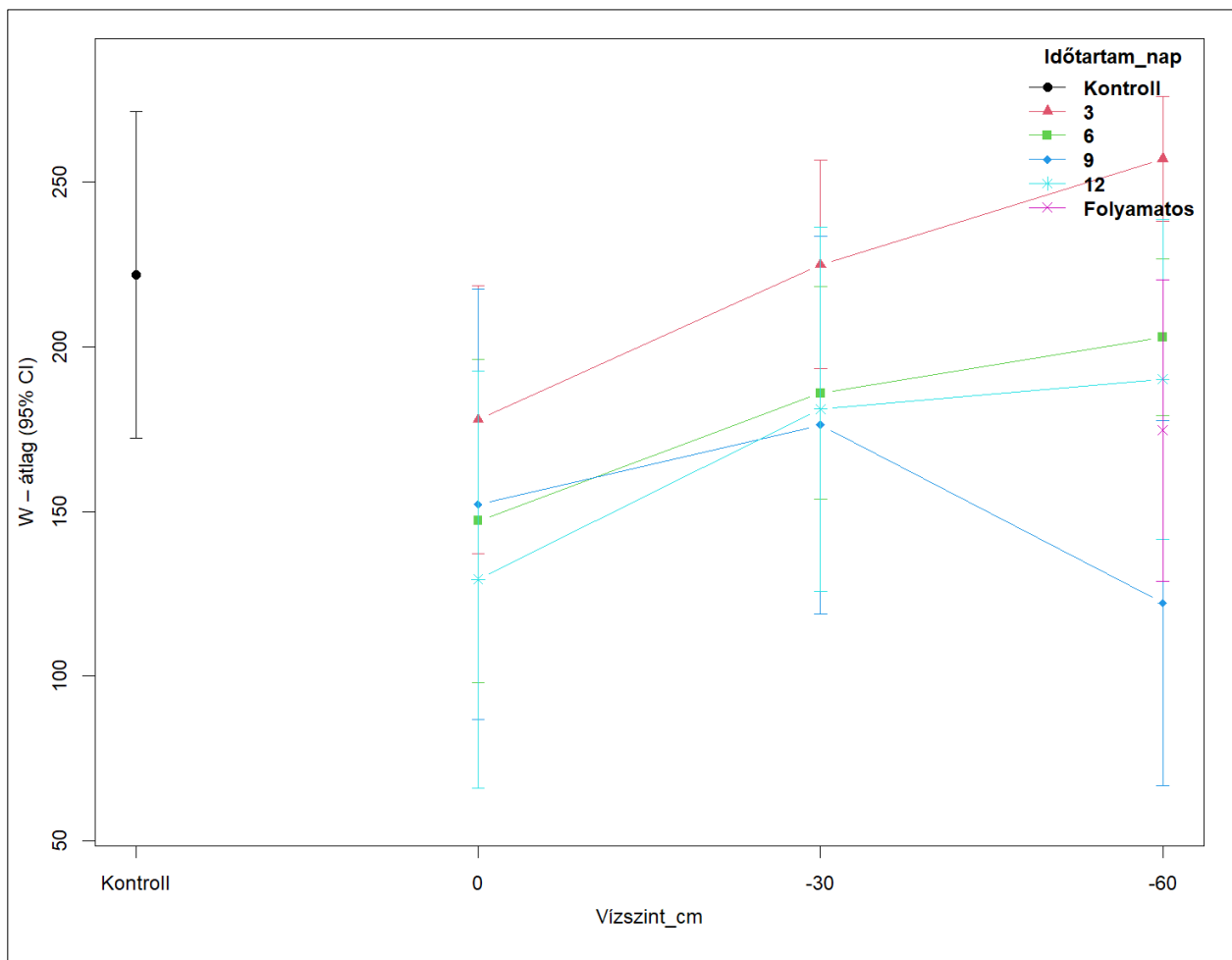
A 20. ábrán a Zeleny-értékek ugyanazt a szerkezetet mutatják, mint a fehérje és a sikér: 0 cm-en alacsonyabb szint, -60 cm-en U-alak, -30 cm-en köztes értékek. Különösen 9 napnál látszik a visszaesés a mélyebb vízszintnél (20. ábra). A 12 napos beállítás több szinten is javulást hoz. A CI-k átfedése miatt a vizuális különbségek egy részét statisztikai tesztekkel ellenőrzöm.



20. ábra Őszi búza –Zeleny-érték – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)

W– vízszint × időtartam interakció

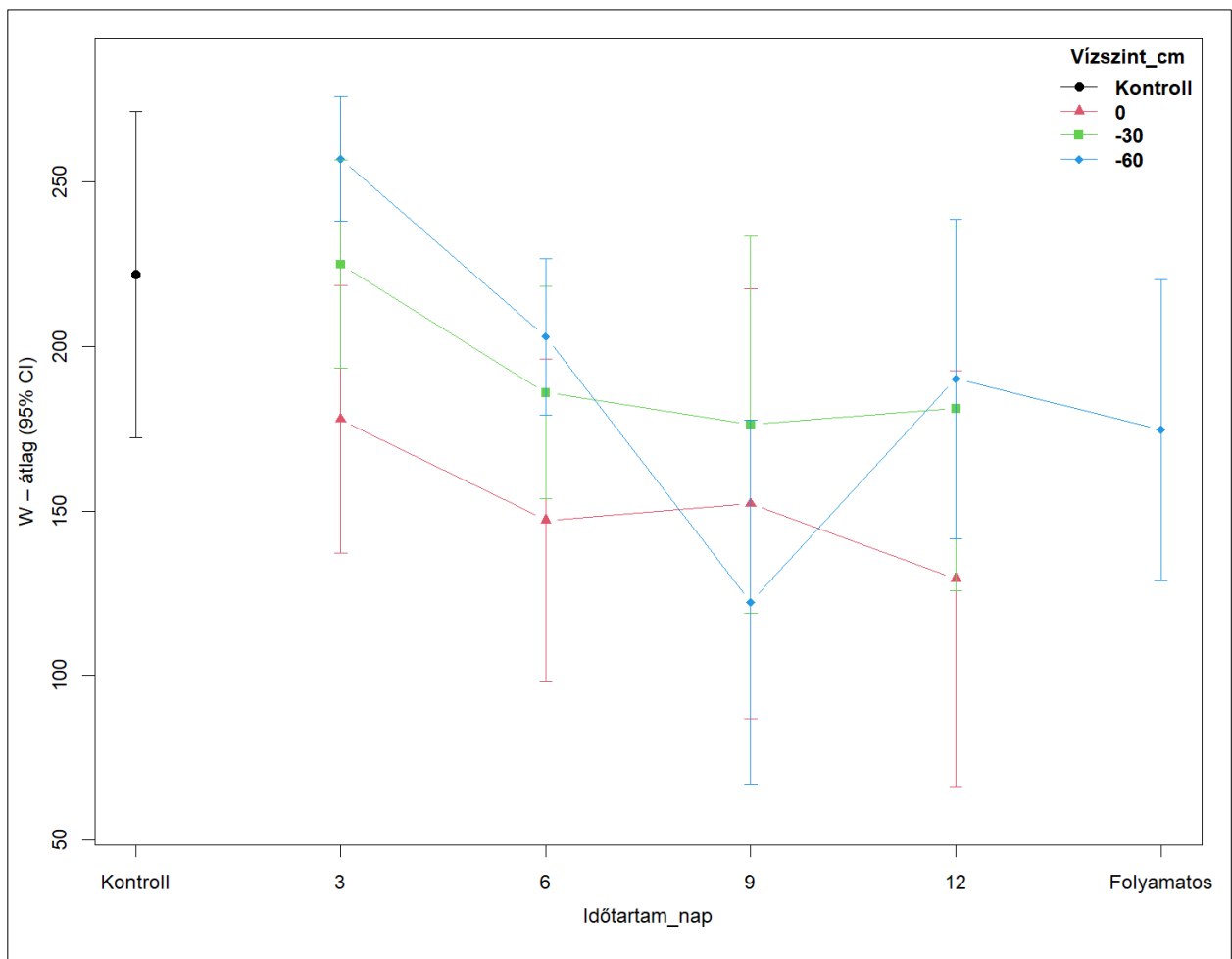
A 21. ábrán több időtartamnál 0→-60 cm irányban emelkedő trend látszik, de 9 napnál eltérő a minta, ami interakcióra utal. A -60 cm-en megjelenő nagy bizonytalanság a mérések szórására utal. A -30 cm gyakran köztes vagy enyhén emelkedő értékeket mutat (21. ábra). A vizuális eltérések ellenére a CI-k átfedése miatt formális összehasonlításra van szükség.



21. ábra Őszi búza $-W$ -érték-vízszint \times időtartam interakció (x : Vízszint, színezés: Időtartam)

W) – időtartam \times vízszint interakció

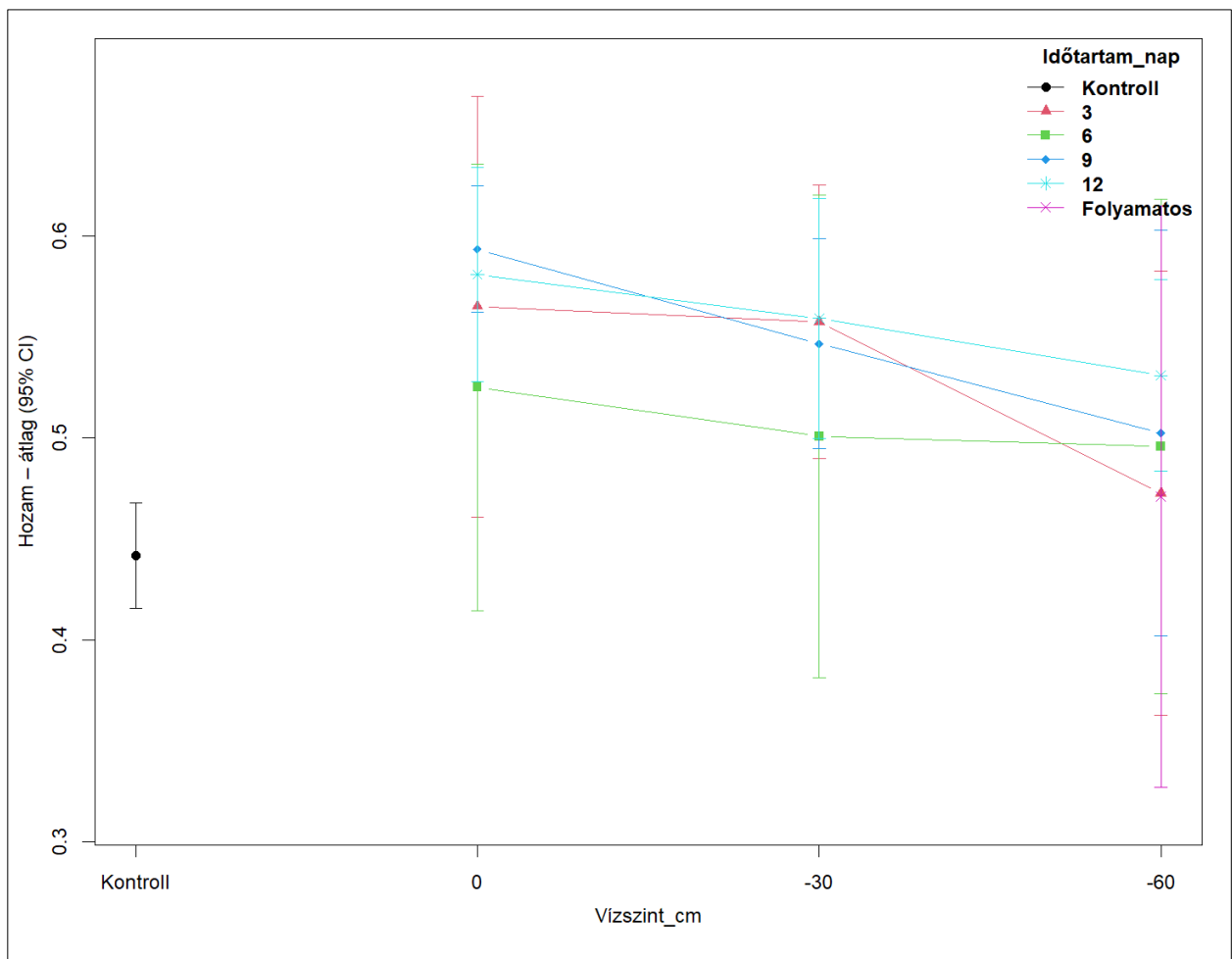
A 22. ábrán W mutatón nagy variabilitást látok: a hibaoszlopok különösen -60 cm és hosszabb tartamok mellett tágak. A -60 cm-es görbe kifejezett U-alakot mutat (3 nap magas, 9 nap erős esés, 12 nap visszaemelkedés). A 0 cm általában alacsonyabb W -értéket ad, a -30 cm közepén helyezkedik el (22. ábra). A széles CI-k miatt óvatosan következtetek, és a különbségek megerősítésére modell-alapú elemzést használok.



22. ábra Őszi búza $-W$ -érték- időtartam \times vízszint interakció (x : Időtartam, színezés: Vízszint)

Hozam – vízszint \times időtartam interakció

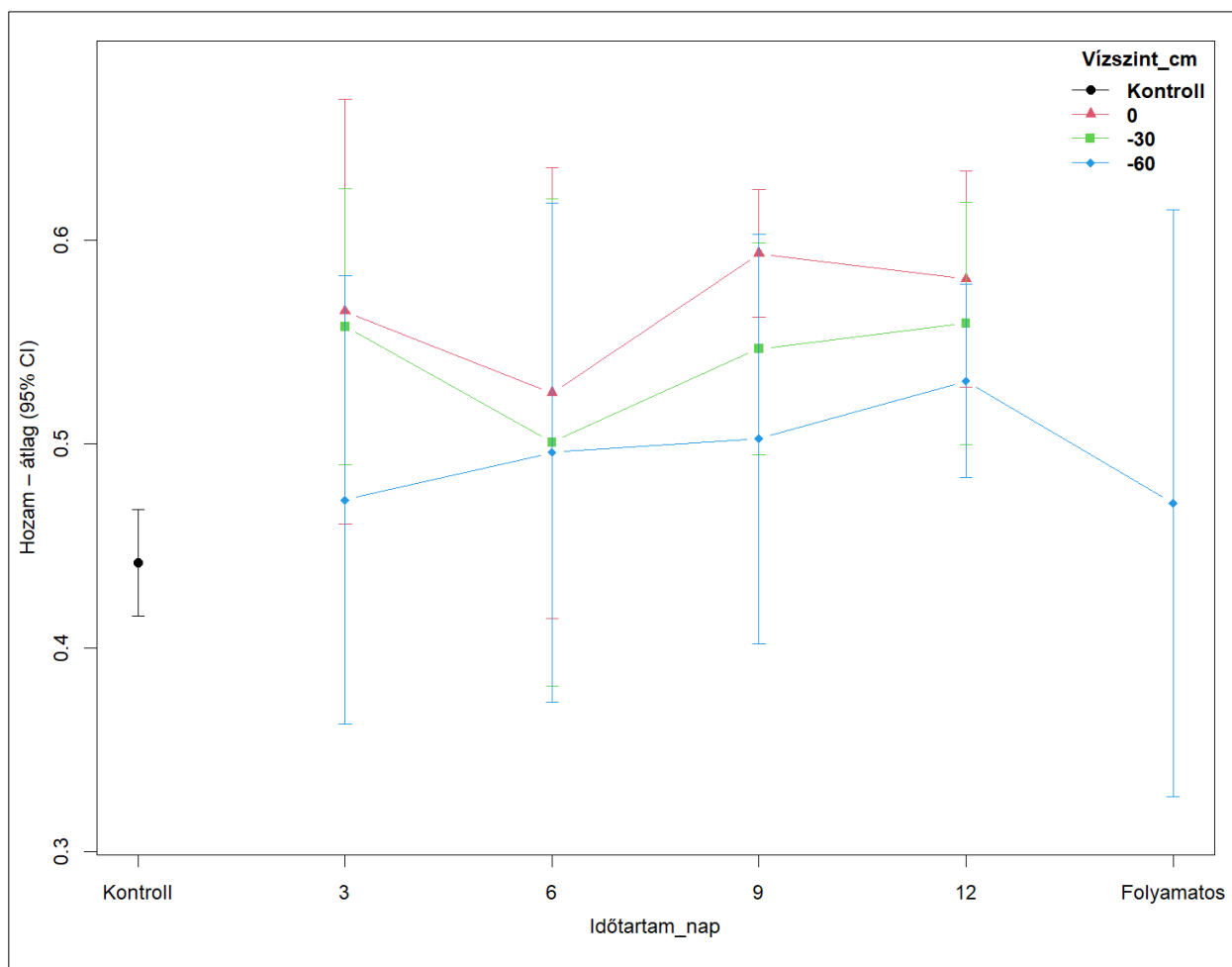
A 23. ábrán a vonalak többnyire lejtősek 0 \rightarrow -60 cm felé, tehát a mélyebb vízszint a hozam csökkenésével jár. A különbség több időtartamnál is konzisztens, ami vízszint-domináns hatásra utal. A -30 cm rendszerint köztes, a 0 cm kedvezőbb, a -60 cm kedvezőtlenebb hozamot jelez (23. ábra). A CI-k átfedése miatt a vízszint szerinti rangsort formális tesztekben is ellenőrzöm.



23. ábra Őszi búza – Hozam – vízszint \times időtartam interakció (x : Vízszint, színezés: Időtartam)

Hozam – időtartam \times vízszint interakció

A 24. ábrán a hozam görbéi többnyire párhuzamosak, ami gyenge interakciót jelez; a vízszint főhatása tűnik meghatározónak. A 0 és -30 cm-es beállítások átlagosan magasabb hozamot adnak, míg -60 cm és a kontroll inkább alacsonyabbat. Időtartam mentén lokális csúcs rajzolódik ki (pl. 9–12 nap körül 0 cm-en), de az eltérés nagysága mérsékeltebb (24. ábra). A CI-k jellemzően átfednek, ezért a végső következtetést további teszt eredményekre alapozom.



24. ábra Őszi búza – Hozam – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)

4.1.3. Feltételvizsgálat ellenőrzése az őszi búza termésének Bartlett-féle és Levene-féle varianciahomogenitás tesztje

Az egyváltozós varianciahomogenitást Bartlett-próbával (univariate Bartlett-test) ellenőriztem (és a Levene-próbát csak tájékoztatásul tettem mellé) (7. táblázat).

Időtartam szerinti varianciák (7. táblázat) (Időtartam_nap)

Fehérje: $p = 0,0022 \rightarrow$ nem azonos varianciák.

Sikér: $p = 0,011 \rightarrow$ nem azonos varianciák.

Zeleny: $p = 0,0026 \rightarrow$ nem azonos varianciák.

W: $p = 0,0277 \rightarrow$ nem azonos varianciák.

Hozam: $p \approx 1,0 \times 10^{-8} \rightarrow$ erősen nem azonos varianciák.

Az időtartam szintek között a legtöbb változónál heteroszkedaszticitás van (a szórások eltérnek).

Vízszint szerinti varianciák (Vízmélység_cm)

Fehérje: $p = 0,319 \rightarrow$ nincs bizonyíték varianciakülönbségre.

Sikér: $p = 0,422 \rightarrow$ nincs bizonyíték varianciakülönbségre.

Zeleny: $p = 0,409 \rightarrow$ nincs bizonyíték varianciakülönbségre.

W: $p = 0,670 \rightarrow$ nincs bizonyíték varianciakülönbségre.

Hozam: $p \approx 3,5 \times 10^{-5} \rightarrow$ nem azonos varianciák.

7. táblázat Őszi búza – Bartlett-féle és Levene-féle varianciahomogenitási teszt eredménye

Kimenet	Faktor	Próba	Statisztika	Szabadságfok (df)	p_érték	Következtetés
Fehérje	Időtartam_nap	Bartlett	18,716	5	0,00217	Nem azonos varianciák
Fehérje	Vízmélység_cm	Bartlett	3,511	3	0,319	Azonos varianciák
Sikér	Időtartam_nap	Bartlett	14,86	5	0,011	Nem azonos varianciák
Sikér	Vízmélység_cm	Bartlett	2,81	3	0,422	Azonos varianciák
Zeleny	Időtartam_nap	Bartlett	18,323	5	0,00257	Nem azonos varianciák
Zeleny	Vízmélység_cm	Bartlett	2,891	3	0,409	Azonos varianciák
W	Időtartam_nap	Bartlett	12,575	5	0,0277	Nem azonos varianciák
W	Vízmélység_cm	Bartlett	1,554	3	0,67	Azonos varianciák
Hozam	Időtartam_nap	Bartlett	45,744	5	1,02E-08	Nem azonos varianciák
Hozam	Vízmélység_cm	Bartlett	23,306	3	3,49E-05	Nem azonos varianciák
Fehérje	Időtartam_nap	Levene	2,65	5, 162	0,0248	Nem azonos varianciák
Fehérje	Vízmélység_cm	Levene	1,022	3, 164	0,384	Azonos varianciák
Sikér	Időtartam_nap	Levene	2,902	5, 162	0,0155	Nem azonos varianciák
Sikér	Vízmélység_cm	Levene	0,696	3, 164	0,556	Azonos varianciák
Zeleny	Időtartam_nap	Levene	4,415	5, 162	0,000853	Nem azonos varianciák
Zeleny	Vízmélység_cm	Levene	0,858	3, 164	0,464	Azonos varianciák
W	Időtartam_nap	Levene	4,777	5, 162	0,000424	Nem azonos varianciák
W	Vízmélység_cm	Levene	1,441	3, 164	0,233	Azonos varianciák
Hozam	Időtartam_nap	Levene	5,102	5, 162	0,000226	Nem azonos varianciák
Hozam	Vízmélység_cm	Levene	3,604	3, 164	0,0148	Nem azonos varianciák

A Bartlett/Levene sorokban a „Nem azonos varianciák” (heteroszkedaszticitás) azt jelenti, hogy az adott kimenő változó (pl. Fehérje) csoportonkénti szórásai eltérnek az adott faktor (=csoportosító változó) szintjei között. A klasszikus (egyutas/kétutas) ANOVA és a szokványos post-hoc tesztek feltételei sérülnek. Az „Azonos varianciák” pedig azt, hogy nem találtam bizonyítékot eltérésre (a varianciahomogenitás feltétele tartható).

4.1.4. MANOVA átfogó teszt és utóelemzés Wilk-féle Lambda-próbával

A varianciahomogenitás tesztek után az átfogó két tényezős véletlen blokkos elrendezésű többváltozós varianciaanalízist (MANOVA-t) az öt kimenő változóra (Fehérje, Sikér, Zeleny, W, Hozam) futtattam a Vízmélység, Időtartam és Év tényezőkkel, interakcióval (8. táblázat). A vízmélység multivariáns főhatása szignifikáns volt (Wilks $\lambda=0,56417$, approx. $F=6,282$, num $df=15$, den $df=408,96$, $p=5,225 \times 10^{-12}$). Az előntés időtartamának főhatása szintén szignifikáns (Wilks $\lambda=0,55753$, approx. $F=4,737$, num $df=20$, den $df=491,81$, $p=1,533 \times 10^{-10}$) volt. Az Év hatása kiugróan nagy és erősen szignifikáns (Wilks $\lambda=0,02248$, approx. $F=167,834$, num $df=10$, den $df=296,00$, $p < 2,2 \times 10^{-16}$) volt. A Vízmélység×Időtartam interakció gyenge, de eléri a szignifikanciát (Wilks $\lambda=0,74779$, approx. $F=1,492$, num $df=30$, den $df=594,00$, $p=0,04606$). A Wilks λ értékek alapján a hatások erősségének sorrendje: Év \gg (Vízmélység \approx Időtartam) $>$ Interakció (8. táblázat). A Reziduumok= 152, a reziduális szabadságfokot jelenti, vagyis a hiba (csoporton belül) kovarianciamátrix becsléséhez rendelkezésre álló információ mennyiségét. Az

F-próbákban szereplő nevező szabadságfokok (den Df) közelítő mennyiségek, ezért térnek el a 152-től. Mind a vízborítás mélysége, mind annak időtartama kimutathatóan befolyásolja a minőségi mutatók és a hozam közös mintázatát, miközben az évek közötti különbségek dominánsak (8. táblázat). Az átfogó MANOVA összeszt ugyanakkor önmagában nem mutatja meg, mely kimenők viszik a prímet vagy mi az eltérések iránya, ehhez további univariáns bontások és egyszerű hatások vizsgálata szükséges.

8. táblázat Az őszi búza termésének és a Vízmélység, Időtartam és Év interakciójának MANOVA átfogó tesztje és utóelemzése Wilk-féle Lambda-próbával

Effect	Df	Wilks_lambda	approx_F	num_Df	den_Df	Pr(>F)	Signif
Vízmélység_cm	3	0,56417	6,282	15	408,96	5,23E-12	*** (0)
Időtartam_nap	4	0,55753	4,737	20	491,81	1,53E-10	*** (0)
Év	2	0,02248	167,834	10	296	< 2,2e-16	*** (0)
Vízmélység_cm:Időtartam_nap	6	0,74779	1,492	30	594	0,04606	* (0,05)
Reziduumok	152						

4.1.5. Különálló egyváltozós ANOVA-k ellenőrzése

Az egyváltozós (univariate) ANOVA tesztek részletes elemzésének eredményei arra adnak választ, hogy a MANOVA által kimutatott általános hatások pontosan melyik függő változóra (pl. fehérje, hozam stb.) és milyen mértékben érvényesek (12. táblázat; 144.old). Ez az elemzés tárja fel a vizsgálat legizgalmasabb részleteit. Míg a MANOVA egyetlen, átfogó választ adott, ezek az egyváltozós tesztek külön-külön vizsgálják mind az öt mért paramétert. A legfontosabb tanulság, hogy a vizsgált tényezők nem egyformán hatnak mindenre. Különbség van a minőségi és a mennyiségi mutatók között.

Eredmények értelmezése változónként

Fehérje (Fehérjetartalom)

Minden tényező szignifikáns: A vízmélység, az időtartam, az év és a vízmélység-időtartam kölcsönhatás is statisztikailag szignifikáns hatást gyakorol a fehérjetartalomra.

Legerősebb hatás: Az Év (F-érték = 126,3) messze a legmeghatározóbb, de a Vízmélység_cm (F=14,8) és az Időtartam_nap (F=10,2) is nagyon erős.

Kölcsönhatás: A szignifikáns interakció (p=0,019) azt jelenti, hogy a vízmélység hatása a fehérjére függ a kezelés hosszától.

Sikér (Sikértartalom)

Hasonló a Fehérjéhez: Itt is minden tényező és a kölcsönhatás is szignifikáns.

Hatások erőssége: Az Év (F=81,9) itt is a legdominánsabb, ezt követi a Vízmélység_cm (F=12,7) és az Időtartam_nap (F=9,4). Kölcsönhatás: A Fehérjéhez hasonlóan a p=0,017 érték egyértelmű, de a főhatásoknál gyengébb interakciót jelez.

Zeleny (Zeleny-szám)

Minden tényező szignifikáns: Az eddigi mintázat folytatódik, minden hatás kimutatható.

Erősebb kölcsönhatás: A legfontosabb különbség, hogy itt a Vízmélység_cm:Időtartam_nap interakció sokkal erősebb ($p=0,0054$, **). Ez azt jelenti, hogy a Zeleny-szám esetében a vízmélység és az időtartam együttes, kombinált hatása különösen hangsúlyos. Hatások erőssége: Az Év ($F=113,8$) hatása itt is kiemelkedő.

W (W-érték)

Minden tényező szignifikáns: A W-értékre is hatással van minden vizsgált tényező és a kölcsönhatásuk is. Hatások erőssége: Az Év ($F=80,0$) a legerősebb, de a másik két főhatás is magasan szignifikáns. Kölcsönhatás: A $p=0,01137$ szignifikáns, ami megerősíti, hogy a vízmélység és az időtartam együttesen is befolyásolja a tézta minőségét jelző W-értéket.

Hozam (Terméshozam)

Ez a legfontosabb eredmény! A hozam teljesen másképp viselkedik, mint a minőségi paraméterek. Szignifikáns hatások: A Vízmélység_cm ($p=4,758e-05$) és az Év ($p < 2,2e-16$) szignifikánsan befolyásolja a hozamot. Tehát a vízmélység és az évjárat számít.

NEM SZIGNIFIKÁNS hatások:

Az Időtartam_nap ($p=0,1885$) NINCS szignifikáns hatással a hozamra. A kölcsönhatás ($p=0,8095$) SEM szignifikáns. Értelmezés: Ez egy kulcsfontosságú felfedezés. Míg a minőséget (fehérje, siker stb.) minden tényező befolyásolta, addig a mennyiséget (hozam) a kezelés időtartama és annak kölcsönhatása a vízmélységgel nem befolyásolta.

Összegzés és következtetések:

Minőség kontra Mennyiség: Az eredmények egyértelműen szétválasztják a minőségi és mennyiségi mutatókat. A minőségi paraméterek (Feherje, Siker, Zeleny, W) komplexebben reagálnak: minden tényező számít, beleértve a vízmélység és az időtartam finomhangolását is (kölcsönhatás). Ezzel szemben a mennyiségi mutatót (Hozam) csak a fő tényezők, a vízmélység és az évjárat befolyásolják, az időtartam nem.

Gyakorlati jelentőség:

Ha a cél a minőség javítása (pl. malomipari felhasználás), akkor a vízmélységet és a kezelés időtartamát együtt, egymásra optimalizálva kell beállítani.

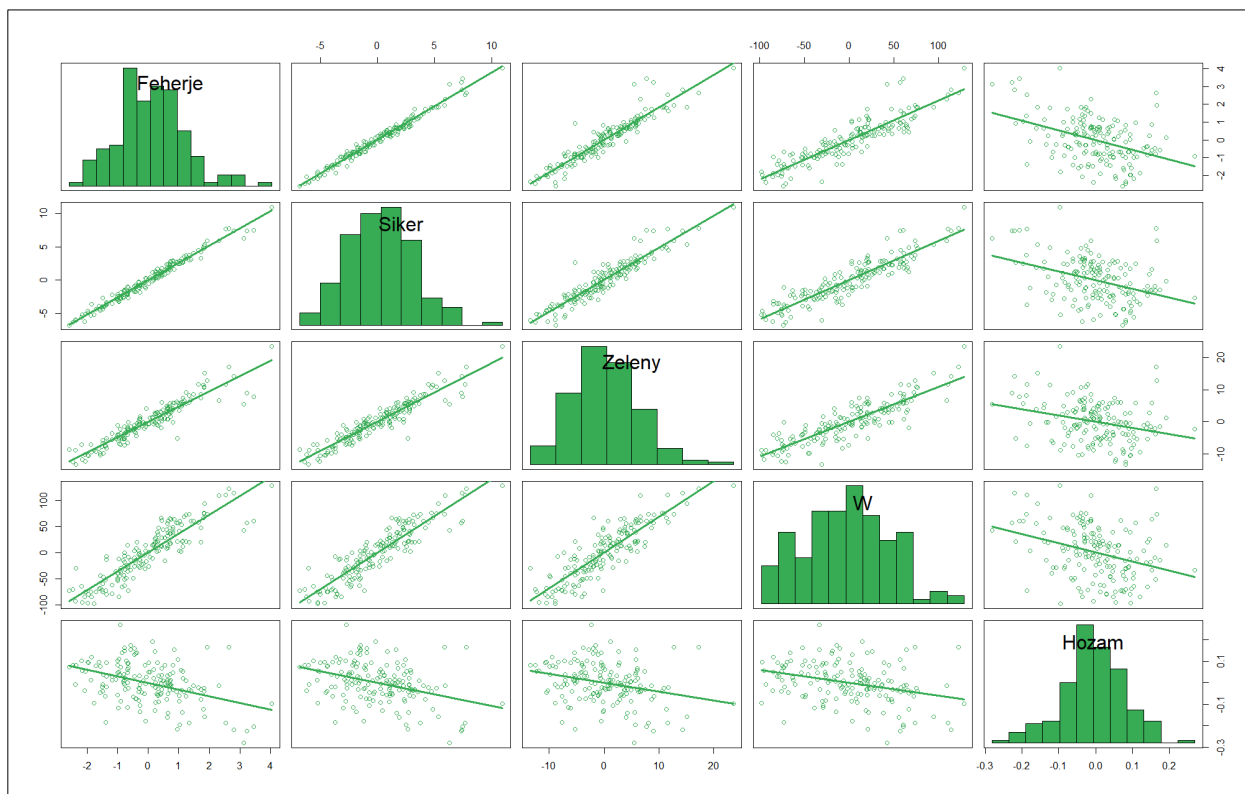
Ha a cél a hozam maximalizálása, akkor az adatok alapján a kezelés időtartama a vizsgált tartományon belül irreleváns. Ez lehetőséget adhat a költséghatékonyság növelésére, ha egy rövidebb kezelés is ugyanazt a hozamot eredményezi.

Az évjárat hatása: Minden egyes vizsgált paraméter esetében az év hatása volt a legdominánsabb. Ez aláhúzza, hogy a környezeti (időjárás) tényezőknek mekkora, sokszor a technológiát is felülíró szerepük van a mezőgazdaságban.

4.1.6. A modell-reziduálok normáeloszlásának ellenőrzése grafikusán az őszi búza termésének páronkénti szórásdiagramjain

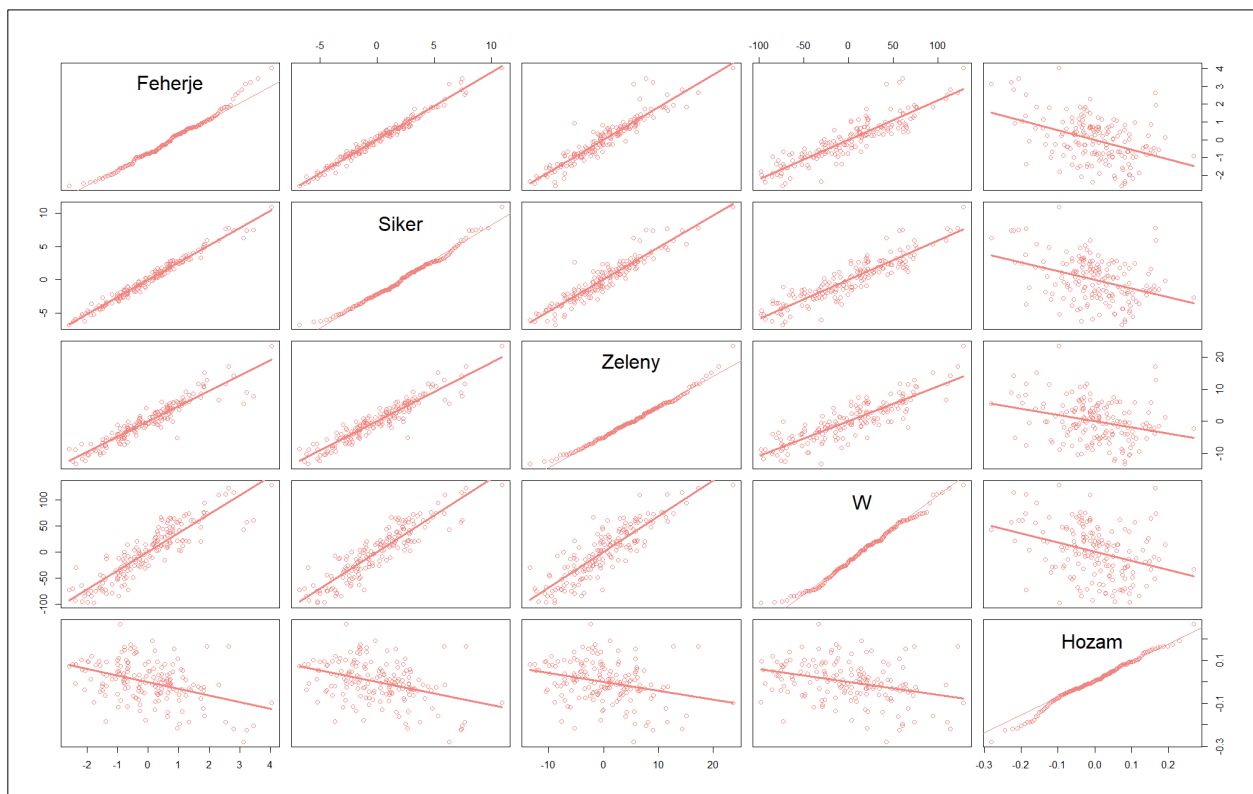
A 25. ábrán a hisztogramok egycsúcsú, többnyire közel szimmetrikus eloszlásokat mutatnak, helyenként mérsékelt ferdeséggel. A szórásdiagramok ismét megerősítik a minőségi mutatók

szoros pozitív kapcsolatot és mindegyikük negatív irányú kapcsolatát a Hozammal. Jelentős klasztereződés vagy többmodális szerkezet nem látszik, legfeljebb néhány perifériás megfigyelés (25. ábra).



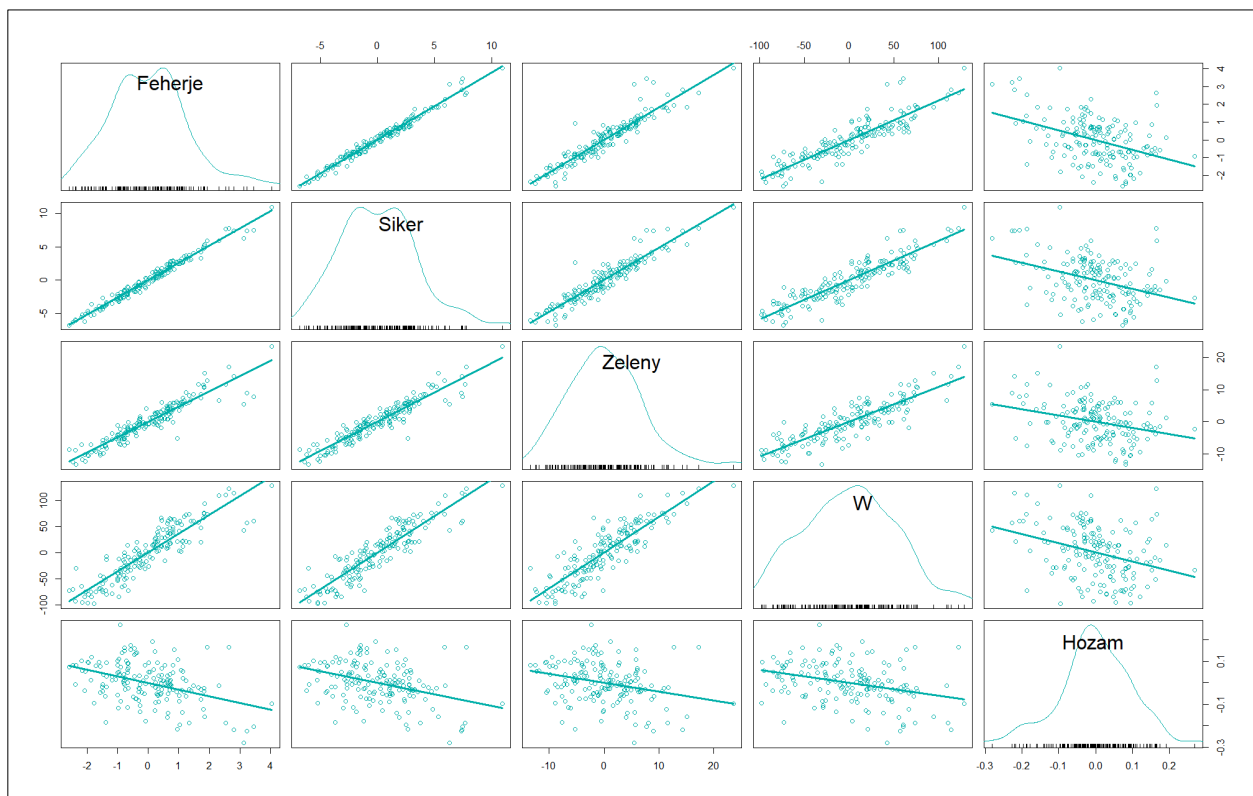
25. ábra Őszi búza – termésének Hisztogram-mátrixa

A 26. ábrán a diagonál QQ-pontsorok többnyire szépen a vonal mentén helyezkednek el, csak a szélső kvantiliseknél látszik kisebb eltérés (vastagabb farok). Az főátlón kívüli (off-diagonális) panelekben az összefüggések közel egyenesek, és csak szórványosan tűnnek fel lehetséges kiugró pontok. Az ANOVA normalitási feltételei elfogadhatónak tűnnek (26. ábrán).



26. ábra Az Őszi búza – termésének QQ-mátrix

A 27. ábrán a diagonálon látható sűrűséggörbék nagyjából normális eloszlást jeleznek, legfeljebb enyhe ferdeséggel. A páronkénti szórásdiagramok erős pozitív együttjárást mutatnak a Fehérje–Siker–Zeleny–W között, miközben mindegyik fordított irányban kapcsolódik a Hozamhoz. Az illesztett trendek lényegében lineárisak, feltűnő nemlinearitás vagy durva heteroszkedaszticitás nélkül (27. ábrán).



27. ábra Az őszi búza – termésének sűrűségmátrixa

4.1.7. A modell-reziduálok normáleloszlásának ellenőrzése átfogó Shapiro-Wilk teszttel

Az átfogó Shapiro–Wilk normalitásteszt nullhipotézise az, hogy a Z változó normális eloszlású. Az eredmény ($W = 0,79667$, $p = 5,152 \times 10^{-14}$) egyértelműen elutasítja ezt a nullhipotézist, tehát a Z eloszlása szignifikánsan eltér a normálistól. A nagyon kicsi W és p-érték erős nem-normalitást jelez, ami származhat ferdeségből, vastag farkakból, kiugrókból vagy többmodális (keverék) eloszlásból. Ha a Z több csoport összevont adata, az eltérő csoportátlagok/szórások önmagukban is okozhatnak nem-normalitást, ezért MANOVA-hoz inkább a modell reziduálisainak normalitását érdemes vizsgálni. Gyakorlati következtetésként a normalitásfeltétel a Z-re nem teljesül; célszerű QQ-plot/hisztogram ellenőrzés, és szükség esetén transzformáció (pl. log, négyzetgyök) vagy robusztus/permutációs eljárás alkalmazása.

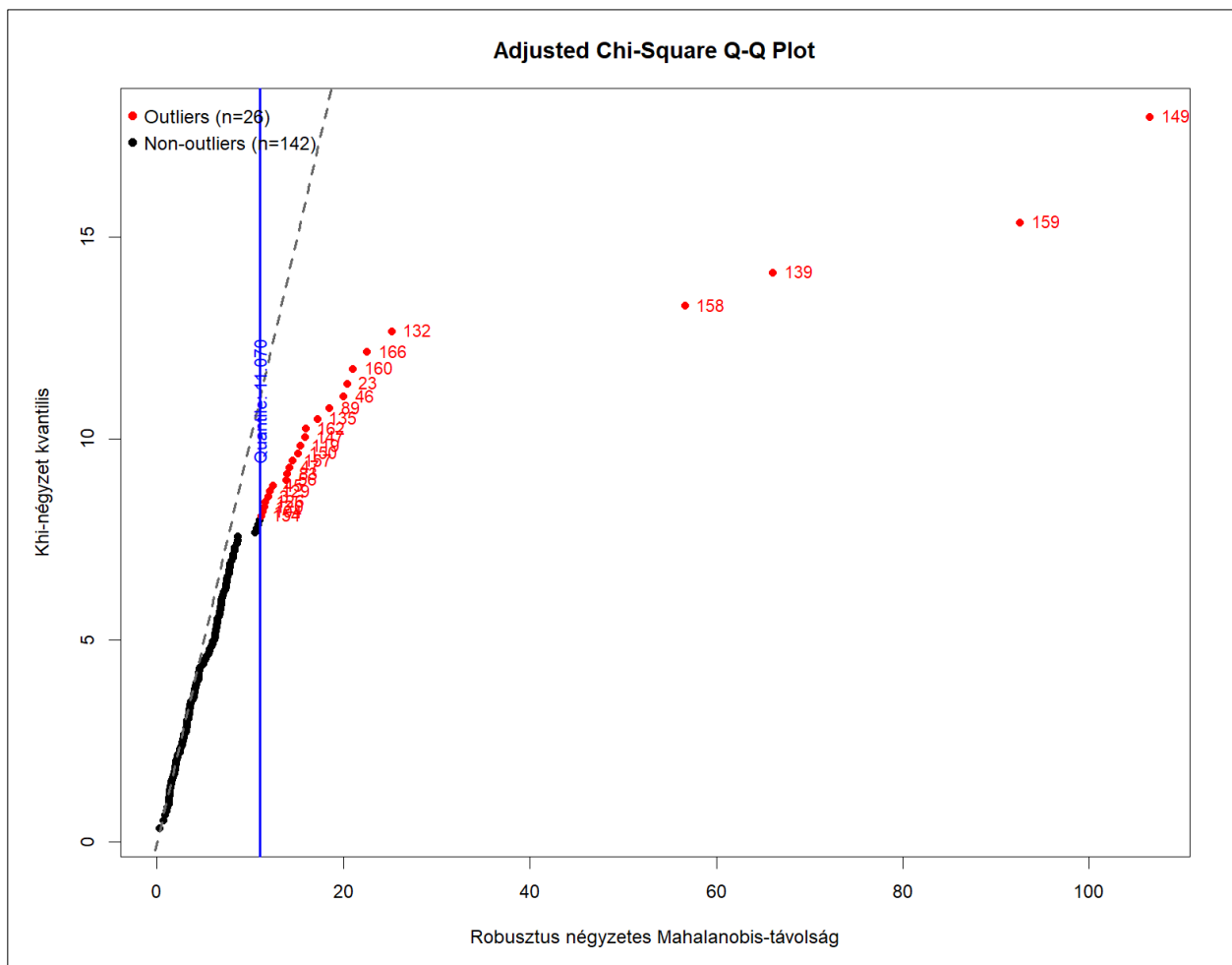
4.1.8. A modell-reziduálok multivariáns normáleloszlás ellenőrzése Henze–Zirkler (HZ) teszttel és egyváltozós Shapiro–Wilk normalitás teszttel

Az átfogó MANOVA után a következő lépés a modell-reziduálok (vagy a vizsgált többletmátrix) eloszlásának ellenőrzése (13. táblázat, 147.old). A klasszikus Wilks-Lambda és rokon tesztek feltételezik, hogy a hibatag multivariáns normális. Multivariáns normalitás Henze–Zirkler (HZ) teszt: $HZ = 1,265$, $p < 0,001 \rightarrow$ a multivariáns normalitást elutasítom. Tehát a változók közös eloszlása (a kovarianciastruktúrával együtt) nem normális. Egyváltozós normalitás Shapiro–Wilk (SW) teszt: SW= Fehérje: $W=0,984$, $p=0,046$ (5%-on „nem normális”); a többi (Siker, Zeleny, W, Hozam) $p > 0,05 \rightarrow$ nem utasítjuk el a normalitást. Mivel 5 tesztet futtattam, egy Holm-korrekciónak után a 0,046 már nem maradna szignifikáns, így a fő probléma inkább

többszörös jellegű (közös farok/korrelációs szerkezet, nem pedig erős egyváltozós torzulás). Leírók (reziduális skála): az átlagok 0 körül vannak (helyes), a ferdeség kicsi ($|skew| \approx 0,1-0,4$), a kurtózis 2,5–3,5 között (néhol kissé „vastagabb” farok, pl. Zeleny, Fehérje, Hozam). Outlierek (adjusted MD²): 16 megfigyelés lépte át a korrigált küszöböt; a legextrémebbek #149 (MD²=108,7), #159 (94,2), #139 (66,8), #158 (56,7). Ezek erősen hozzájárulhatnak a HZ-teszt szignifikanciájához. Ezután new_data objektum az outlierek nélküli adatot hoztam létre, ami érzékenységi (robosztus/permutációs) újrafuttatáshoz azonnal használható.

4.1.9. Outlierek azonosítása robusztus Mahalanobis-távolsággal

A 28. Q–Q ábra a robusztus (MCD-alapú; Minimum Covariance Determinant) négyzetes Mahalanobis-távolságokat hasonlítja az elméleti Khi-négyzet (χ^2) kvantilisokhoz; ha a reziduálisok multivariáns normálisak lennének, a pontok a szaggatott 45°-os referencia mentén sorakoznának. A fekete pontok (nem-outlierek) a kis és közepes kvantilisoknál viszonylag jól követik ezt a görbét, de a felső kvantilisoknál a pontfelhő felfelé „elszakad”, ami vastag jobb oldali farokra és a normalitástól való eltérésre utal. A kék függőleges vonal a $\chi^2(p, 0,95)$ határát ($\approx 11,07$) jelöli; ettől jobbra eső megfigyelések (pirossal) multivariáns outliereknek számítanak az alkalmazott küszöb szerint. Láthatóan több ($n=26$) olyan eset van – köztük extrémek a #149, #159, #139 és #158 –, amelyek sokkal nagyobb távolságot vesznek fel, mint amit a normális modell megengedne (28. ábra) A 28. ábrán a reziduális eloszlás nem illeszkedik jól a multivariáns normalitáshoz, és az eredmények értelmezésénél érdemes robusztus/permutációs ellenőrzést vagy outlier-érzékenységi vizsgálatot végezni.



28. ábra Q–Q ábra: Outlierek azonosítása robusztus Mahalanobis-távolsággal (MCD-alapú MD^2 ; Hardin–Rocke (adjusted) küszöb, $\alpha=0,95$; $p=5$; $n=168$.)

4.1.10. A reziduális mátrix multivariáns normalitás tesztje

A reziduális mátrix multivariáns normalitását a Henze–Zirkler teszttel ellenőriztem (MVN::mvn, „hz”) (13. táblázat, 147. old). Az eredmény $HZ = 1,265$; $p < 0,001$, vagyis a multivariáns normalitás hipotézisét elutasítom; a reziduális eloszlás többváltozós értelemben számottevően eltér a normálistól. Az egyváltozós normalitást a Shapiro–Wilk próbával vizsgáltam: Fehérje: $W = 0,984$, $p = 0,046$ (nem normális 5%-on); Siker: $p = 0,093$; Zeleny: $p = 0,106$; W: $p = 0,082$; Hozam: $p = 0,173$ – ezeknél nem utasítható el a normalitás ($p > 0,05$). A leíró statisztikák a reziduális skálán a vártak megfelelően 0 körüli átlagokat adnak, a ferdeség kicsi ($|\text{skew}| \lesssim 0,4$), a kurtózis értékek 2,5–3,5 közöttiek, azaz alapvetően mérsékelt eltérések jellemzik az eloszlásokat.

A multivariáns outliereket a Hardin–Rocke-féle „adjusted” (illesztett) szabály alapján jelöltem ki (Phuttisen and Srisodaphol, 2024). Összesen 16 megfigyelés lépte túl a korrigált küszöböt; a legextrémebbek: #149 ($MD^2 = 108,745$), #159 (94,197), #139 (66.830) és #158 (56,712) (13. táblázat, 147. old). Ezek az esetek nagy valószínűséggel felelősek a multivariáns normalitás sérüléséért. A csomag az outlierek eltávolításával egy új adatmátrixot is előállít ($\$new_data$), amely adat a további érzékenységi elemzésekhez használom.

A reziduálokra vonatkozó multivariáns normalitás nem teljesül, egyváltozós szinten viszont csak a Fehérje mutat szignifikáns eltérést. Mivel a normalitás-tesztek nagy mintában ($n = 168$) kis eltérésekre is érzékenyek, a gyakorlati hatás főként a többszörös outlierok jelenlétében jelentős. Ennek megfelelően javasolt a MANOVA eredmények robusztus vagy permutációs ellenőrzése, illetve egy érzékenységi vizsgálat a jelölt outlierok kizárásával (és változatlan modell-specifikációval). Az outlier-küszöb az „adjusted” F-alapú szabály szerint történt; ez magyarázza, hogy a küszöb értéke nagyobb, mint a klasszikus $\chi^2_{\{p,0,95\}}$ kvantilis.

4.1.11. Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normalitás teszt a modell reziduumokra

Kontextusban az előző eredményekkel, a Henze-Zirkler teszt p-értéke $< 0,001$ volt, ami szintén a nem-normálisságot támasztja alá. Az egyváltozós Shapiro–Wilk normalitás a Fehérje változó p-értéke (0,046) már a 0,05 szignifikanciaszint alatt van, ami szintén nem-normálisságot jelez, bár a többi változó (Sikér, Zeleny, W, Hozam) normálisnak tűnik egyváltozós szinten. A Lilliefors teszt az összes reziduumot egyszerre vizsgálja (többváltozós kontextusban), és megerősíti, hogy az összetett eloszlás nem normális, függetlenül az univariát eredményektől.

Eredmény kimenet:

Teszt: Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test

Adatok: mod\$residuals

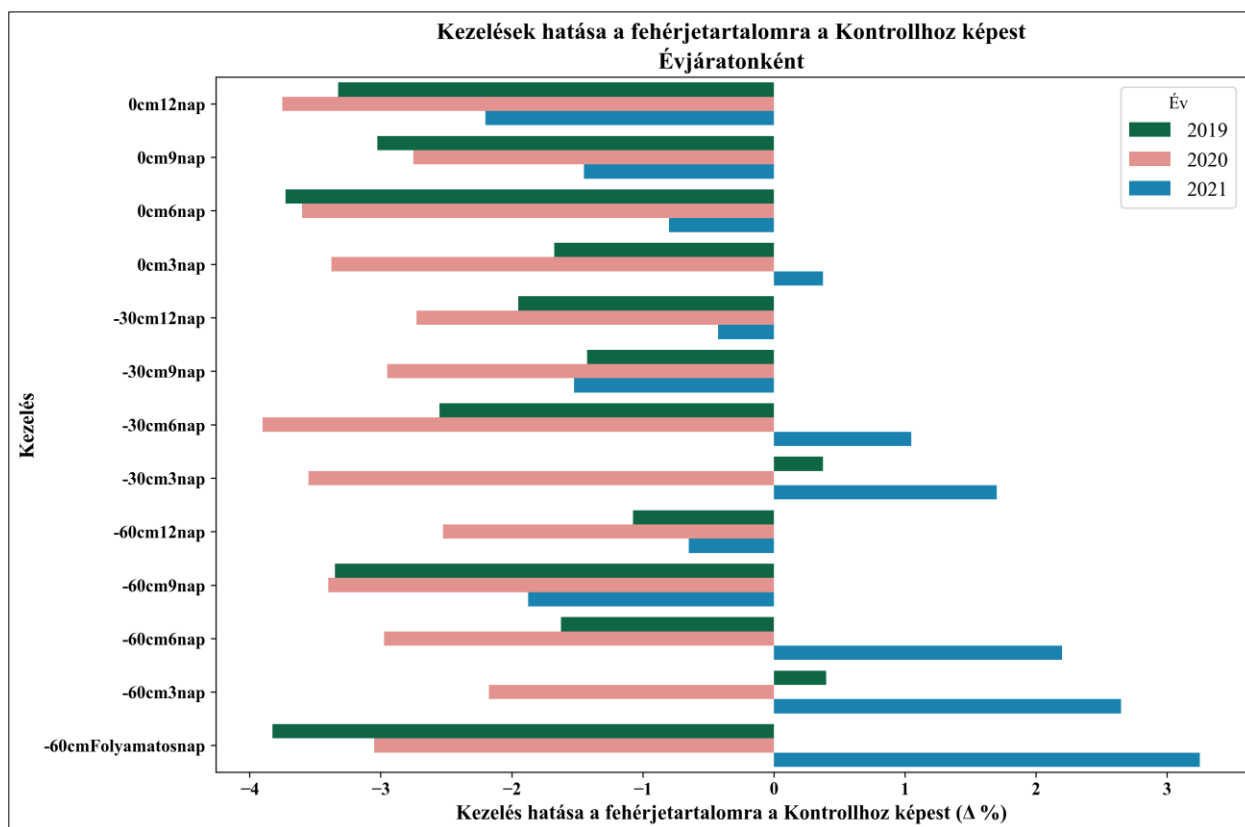
Statisztika: $D = 0,27118$

p-érték: p-value $< 2,2e-16$

4.2. Az őszi búza fehérje tartalmának változása a kezelések hatására (2019-2021)

Az 29. ábra és a 41. ábra (169. old.) azt szemlélteti, hogy a különböző vízmélység- és időtartam-kezelések hogyan befolyásolták a fehérjetartalmat a kontrollhoz képest három egymást követő évben. Látható, hogy az árasztásos kezelések (0 cm) hatása évjáratonként eltérő: míg 2019-ben és 2021-ben egyes kezelések pozitívak, addig 2020-ban negatív irányú eltérést mutattak. A -30 cm-es vízszint rövid távon (3 és 6 nap) általában kedvező vagy semleges hatást gyakorolt, különösen 2021-ben.

A -60 cm-es kezelések többsége mérsékelten csökkentette a fehérjetartalmat, különösen, ha rövidebb ideig (3-6 nap) volt fenntartva a vízszint. Kivétel ezalól az aszályos 2021-ben tapasztalt folyamatosan fenntartott -60 cm-es vízszint. A vizuális eredmények is alátámasztják, hogy az évjáráthatás jelentős, és ugyanaz a kezelés egyik évben előnyös, másokban viszont kedvezőtlen lehet. A következő fejezetekben statisztikailag kívánom részletezni vagy megcáfolni a 29. ábrából itt leszűrt megállapításaimat.



29. ábra 2019-2021: A kezelések hatása a fehérjetartalomra a kontrollhoz képest (Δ százalékpont)

4.2.1. Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérje időtartam szerinti összehasonlítások

Azért ezt a tesztet használtam (és nem a gyakoribb Tukey HSD-t), mert az előző elemzések szerint a csoportok szórása nem egyenlő, és a Games-Howell teszt robusztusabb ilyen esetekben.

Az egyváltozós ANOVA tesztek kimutatták, hogy a kezelés időtartama szignifikánsan befolyásolja a fehérjetartalmat. A post-hoc teszt arra ad választ, hogy pontosan melyik időtartamok (3, 6, 9, 12 napos, stb.) között van a szignifikáns különbség. Az elemzést évenként és vízmélységenként végeztem el, ami lehetővé teszi a korábban látott kölcsönhatások részletes feltárását.

A táblázat értelmezése:

A 14. táblázatok (mellékletek 148. old.) értelmezésénél a *group1* és *group2* az összehasonlított két csoportot jelöli. Az *estimate* a két csoport átlaga közötti becsült különbség, ahol a negatív előjel azt jelenti, hogy a *group2* átlaga volt magasabb. A *p.adj* a Bonferroni-kiigazított p-érték, amely a többszörös összehasonlításokból adódó hibaforrást korrigálja; ha $p < 0,05$, a különbség statisztikailag szignifikáns. A *conf.low* és *conf.high* a 95%-os konfidencia intervallum alsó és felső határai a becsült különbségre, ami azt mutatja, hogy hová eshet a valódi különbség statisztikai bizonytalansággal. A *p.adj.signif* a szignifikancia gyors jelölése (ns = nem szignifikáns, * = szignifikáns, ** = erősen szignifikáns). A betűs csoportosítás (A, B, AB...) a legkönnyebben

értelmezhető összefoglalás: azok a csoportok, amelyeknek van közös betűjelük, statisztikailag NEM különböznek egymástól. Azok, amelyeknek nincs közös betűjük (pl. A és B), szignifikánsan eltérnek. Az AB jelölés azt jelenti, hogy az a csoport nem különbözik sem az A, sem a B jelű csoportoktól, egyfajta átmenetet képez.

Részletes eredmények értelmezése csoportonként (fehérjére időtaram szerinti összehasonlítások)

-30 cm-es Vízmélység (Vm30)

2021: A 3 napos és a 9 napos kezelés között szignifikáns különbség volt ($p=0,015$), ahol a 9 napos kezelés eredményezett magasabb fehérjetartalmat. A 3 napos "A", a 9 napos "B" jelölést kapott, míg a 6 és 12 napos kezelések "AB" jelölést kaptak, átmenetet képezve. Ez arra utal, hogy 9 napnál lokális csúcs figyelhető meg, de 6 és 12 nap nem különíthető el tőle megbízhatóan. Így a fehérje 3 napról 9 napra nő, míg a 6 és 12 nap átmeneti/átfedő mintázatot ad.

2020: Ebben az évben és mélységben nem volt szignifikáns különbség egyetlen időtartam között sem (minden $p_{adj} \geq 0,091$). A betűkódolás egységesen "A" minden szintre, ami azt mutatja, hogy nincs szignifikáns különbség a szintek között, és a fehérjetartalom nem mutat érzékelhető időtartam-hatást.

2019: A 3 napos kezelés szignifikánsan alacsonyabb fehérjetartalmat eredményezett, mint a 6 napos ($p=0,004$) és a 9 napos ($p=0,033$) kezelés. A 3 kontra 12 nap összehasonlítás nem érte el a szignifikanciát ($p=0,071$), de a 3 napnál alacsonyabb fehérjét sugallt. A betűkódolás szerint a 3 napos "A" jelzést kapott, míg a 6 és 9 napos "B" jelzést, a 12 napos pedig "AB"-t, ami azt jelenti, hogy a 3 napos egyértelműen elkülönül a 6 és 9 napostól. Ez a minta azt jelenti, hogy 2019-ben 6–9 nap környékén magasabb fehérjeszint jelent meg, míg 3 napnál alacsonyabb volt.

-60 cm-es Vízmélység (Vm60)

2021: A 9 napos kezelés szignifikánsan jobb volt, mint a 3 napos ($p=0,009$) és a 6 napos ($p=0,015$). A Folyamatos elárasztás szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a 9 napos ($p=0,009$) és a 12 napos ($p=0,035$). A 9 napos kezelés "B" jelölést kapott, kiemelkedve a rövidebbek közül, és eltérve a 3, 6 és Folyamatos szintektől, amelyek "A" jelölésűek. A 12 napos "AB" jelölést kapott. Így ezen a mélységen és évben a 9 nap tűnik optimálisnak, a „Folyamatos” pedig következetesen gyengébbnek bizonyult (14. táblázat, 148. old.).

2020: A 9 napos kezelés szignifikánsan jobb volt a 3 naposnál ($p=0,019$), a 12 naposnál ($p=0,006$) és a folyamatosnál ($p=0,041$). A 12 napos kezelés is szignifikánsan jobb volt, mint a folyamatos ($p=0,045$). A betűkódolás szerint a 9 napos "B" jelölést kapott, ami a kiemelkedő csoportot jelöli, míg a többiek "A" vagy "AB" jelölésűek. A 9 nap emelkedik ki, a 6 nap részben hozzá közelít, míg a 3, 12 és a Folyamatos alapvetően alacsonyabb szintet képviselnek (14. táblázat, 148. old.).

2019: Ebben az évben nagyon erős hatások mutatkoztak. A Folyamatos elárasztás és a 9 napos kezelés szignifikánsan jobb eredményt adott, mint a 3 napos ($p<0,001$). A Folyamatos elárasztás jobb volt, mint a 6 napos ($p=0,032$) és a 12 napos ($p=0,038$) is (14. táblázat, 148. old.). A betűkódolás itt volt a legtisztább: 3="A", 6="B", 9="BC", 12="AB", Folyamatos="C". Ez

egyértelmű rangsort állított fel: a Folyamatos elárasztás (C) adta a legmagasabb fehérjetartalmat, utána jött a 9 napos (BC), majd a 6 napos (B), és végül a 3 napos (A). Ez kiegyensúlyozott, de világos mintázatot mutatott, miszerint a hosszabb, folyamatos vízellátás/hatás itt a legjobb fehérjeeredményt adta.

4.2.2. Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Fehérje %-a a kontrollhoz viszonyítva

2021: A kontrollhoz képest a 3 nap (-60 cm) és 6 nap (-60 cm) szignifikánsan magasabb a kontrollnál (13,60 és 13,15 kontra 10,95; $p=0,015$ és $p=0,031$), míg a 0 cm (teljes árasztás), 12 nap szignifikánsan alacsonyabb (8,75 kontra 10,95; $p\approx 0,011$) és 9 nap (-30, -60 cm) szignifikánsan alacsonyabb fehérjetartalmat mutat a kontrollnál (9,43 és 9,08 kontra 10,95; $p\approx 0,031$ és $p\approx 0,0146$) (15. táblázat, 151. old.). A 0 cm-es vízszint 12 napos kezelésnél jelentős csökkenést okoz.

2020: Minden kombináció szignifikánsan alacsonyabb fehérjetartalmat mutat a kontrollhoz képest, különösen a 3, 6 és 9 napos kezelések erősen szignifikánsak (-30, -60, 0 cm) (15. táblázat). Ebben az évjáratban a kontroll adta a legmagasabb fehérjét, a vízszint-kezelések következetesen csökkentették.

2019: A kontrollhoz képest a 12 nap (0 cm), 6 nap (-30, 0 cm), 9 nap (-30, -60, 0 cm) és 3 nap (0 cm) szignifikánsan alacsonyabb, míg a 12 nap (-60 cm) és 3 nap (-30, -60 cm) nem mutat szignifikáns eltérést (15. táblázat, 151. old.).

4.2.3. Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérje és vízmélység szerinti összehasonlítások

3 nap

2019: 0 vs -30: $\Delta\approx +2.05$ ($p=0,036$, *), 0 vs -60: $\Delta\approx +2.07$ ($p=0,032$, *), -30 vs -60: n.s. → 0 cm (teljes árasztás) magasabb fehérjét adott, mint a két süllyesztett vízszint; -30 és -60 egymáshoz hasonló.

2020: 0 vs -30: n.s.; 0 vs -60: $\Delta\approx +1.20$ ($p=0,006$, **), -30 vs -60: $\Delta\approx +1.38^{**}$ ($p=0,003$, ****) → -60 cm a legalacsonyabb, mert mind 0-hoz, mind -30-hoz képest kisebb fehérje.

2021: minden pár n.s. → nincs kimutatható különbség a vízszintek között.

A 3 napos időtartam 2019-ben és 2020-ban a alacsonyabb vízszinten (-60 cm) csökkentette a fehérjét a 0 cm-hez képest; 2021-ben nem látszik különbség.

6 nap

2019: 0 vs -60: $\Delta\approx +2.10$ ($p=0,014$, *), 0 vs -30: határközele (n.s., $p=0,068$), -30 vs -60: n.s. → -60 cm alacsonyabb a 0 cm-nél.

2020: minden pár n.s. → nincs különbség.

2021: 0 vs -60: $\Delta\approx +3.00$ ($p=0,022$, *), 0 vs -30: n.s., -30 vs -60: n.s. → ismét a -60 cm ad alacsonyabb fehérjét, mint a 0 cm.

2019-ben és 2021-ben a 6 napos időtartam a -60 cm hátrányos a fehérjére a 0 cm-hez viszonyítva; 2020-ban nincs jel.

9 nap

2019: -30 vs -60: $\Delta \approx -1.93$ ($p=0,004$, ****) \rightarrow itt -60 cm magasabb a -30 cm-nél; 0 vs -30 és 0 vs -60: n.s.

2020: minden pár n.s.

2021: minden pár n.s.

A 9 napos időtartam alatt statisztikailag többnyire nincs különbség, kivétel 2019, ahol -60 cm > -30 cm (de 0 cm-hez képest ekkor sincs kimutatható eltérés).

12 nap

2019: 0 vs -60: $\Delta \approx +2.25$ ($p=0,046$, *), 0 vs -30: n.s., -30 vs -60: n.s. \rightarrow -60 cm alacsonyabb, mint 0 cm.

2020: minden pár n.s.

2021: minden pár n.s.

A 12 napos időtartamnak csak 2019-ben látszik hatása, ott a -60 cm csökkenti a fehérjét a 0 cm-hez képest; a többi évben nincs különbség.

Rövid konklúzió (fehérjetartalom, őszi búza)

A -60 cm-en tartott vízszint gyakran társult alacsonyabb fehérjével, különösen rövidebb (3-6 nap) kezeléseknél és 2019-ben (több szignifikáns különbség), illetve 2021-ben 6 napnál.

A 0 cm (kétfázisú állapot) a 3-6 napos szakaszban több esetben magasabb fehérjét adott a -60 cm-hez képest.

-30 cm többnyire köztes volt (ritkán különült el mindkettőtől), kivéve 2019/9 napot, amikor -60 cm > -30 cm.

A közép- és hosszabb időtartamoknál (9-12 nap) az évek közötti variabilitás erős: legtöbbször nincs különbség, 2019-ben viszont 12 napnál a 0 cm még mindig jobb a -60 cm-nél.

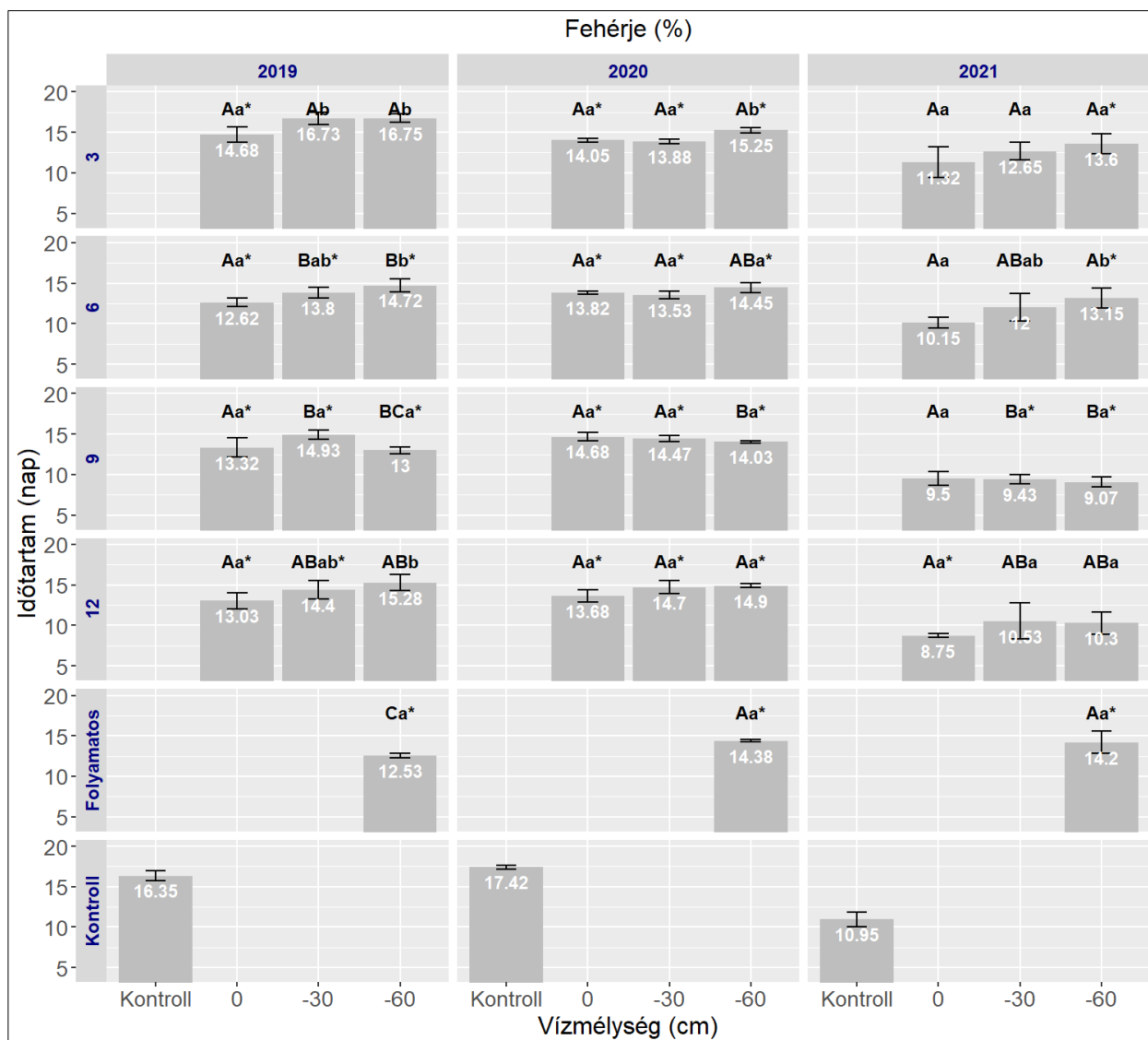
A minta azt sugallja, hogy túl mély (-60 cm) vízszint csökkentheti a fehérjetartalmat, főleg bizonyos évek/kezelési ablakok mellett; a hatás időfüggő és évfüggő.

4.2.4. A fehérje (%), vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávok oszlopdiagram statisztikai elemzése

A 30. ábra fehérjetartalom átlagát és szórását mutatja év \times időtartam bontásban, a vízszintek (0; -30; -60 cm) szerinti oszlopok felett CLD betűk jelzik a Games–Howell szerinti csoportosítást. CLD jelölésben a nagybetűk az időtartamra összehasonlítása (függőlegesen olvasva); kisbetűk vízmélység összehasonlítása (vízszintesen olvasva) és a csillagjelölés (*) a Welch-féle kétmintás t-próbára vonatkozó szignifikáns eltérés a kontrollhoz viszonyítva.

2019-ben a kontroll 16-16,5% körüli fehérjéhez képest több kezelés csillaggal jelzett eltérést mutat. A 3 napos kezeléseknél mindhárom vízszint azonos időtartam-csoportban marad (nagybetű: A), de vízszintenként kisebb különbségek látszanak (kisbetű: „a” kontra „b”), és a 0 cm-es, valamint a két süllyesztett vízszint közül legalább az egyik kombináció *-gal jelzett kontrolltól való szignifikáns eltérést mutat (30. ábra). A 6-12 napos idősorban több helyen jelenik meg B vagy C nagybetű, ami időtartam-hatást jelez a -30/-60 cm szinteken; különösen feltűnő a 9 nap \times -60 cm cellában a BCa* jel, amely egyszerre utal időtartam-különállásra (BC) és kontrolltól való szignifikáns eltérésre. A Folyamatos \times -60 cm kombináció 2019-ben Ca* megjelölést kap: a

nagybetűs „C” erős időtartam-különbséget, a * pedig egyértelmű kontrolltól való eltérést jelez (30. ábra).



30. ábra Fehérjetartalom vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibásávós oszlopdiagram (CLD jelöléssel)

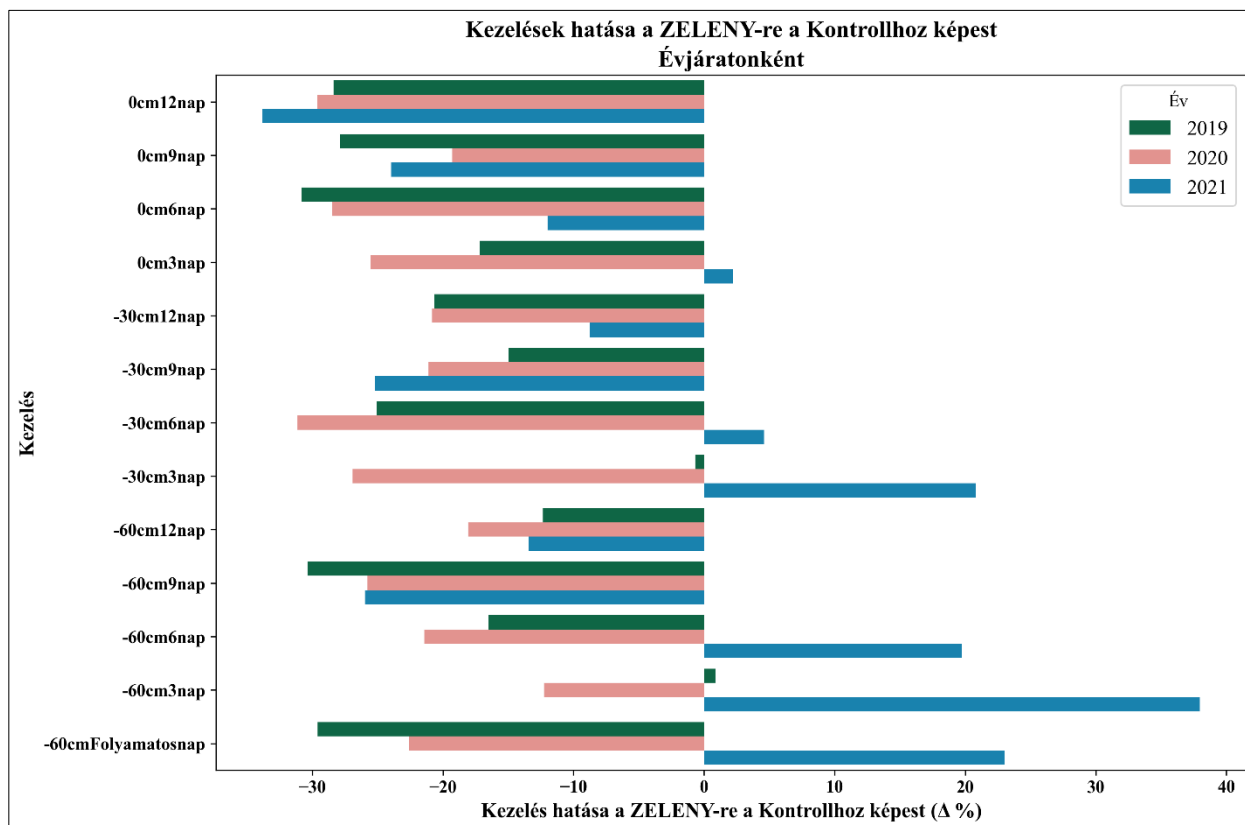
2020-ban a mintázat egyszerre homogénebb és markánsabb a kontrollhoz viszonyítva. Az időtartamok legtöbbször A (vagy AA/AB) nagybetűt kapnak, tehát a négy (illetve öt) időtartam egymáshoz képest többnyire nem különül el ugyanazon vízszinten. Ugyanakkor a legtöbb oszlop *-gal jelölt, ami azt mutatja, hogy szinte minden kezelés szignifikánsan eltért a kontroll fehérjeszintjétől. Ezen belül a 9 napos sor -60 cm-en Ba* címkével jelenik meg, ami mérsékelt időtartam-különbséget is jelez ugyanazon vízszinten. A Folyamatos × -60 cm 2020-ban Aa*: időtartamon belül „A”, de egyértelműen eltér a kontrolltól.

2021-ben a kontroll alacsonyabb szintje mellett vegyes kép rajzolódik ki. A 3 napos sorban a 0 és -30 cm kezelések Aa (kontrolltól nem szignifikáns), míg a -60 cm Aa* (szignifikáns eltérés), ami arra utal, hogy a sekélyebb vízszintek rövid időtartamnál nem változtatták meg érdemben a

fehérjét a kontrollhoz képest (30. ábra). A 6-12 napos intervallumban a -30/-60 cm oszlopoknál gyakran B nagybetű jelenik meg (ABa, Ba, ABa), ami az időtartam-összehasonlításban különállást jelez a 0 cm-hez vagy rövidebb idejű kezelésekhez képest. Ezzel párhuzamosan a * csillag több helyen feltűnik (pl. Ab*, Ba*), jelezve, hogy bizonyos mélyebb vízszintek mellett a fehérje eltér a kontrolltól. A Folyamatos × -60 cm 2021-ben is Aa*, vagyis időtartamon belül nem különül el, de a kontrolltól szignifikánsan magasabb.

4.3. Az őszi búza Zeleny-értékének változása a kezelések hatására (2019-2021)

A 31. ábra és a 41. ábra (169. old.) azt mutatja be, hogy a különböző kezelések milyen mértékben befolyásolták a hozamot az adott év kontrolljához képest három egymást követő évben (2019, 2020, 2021). Jól látható, hogy bizonyos kezelések – például a -60cm3nap – jelentősen javította 2021-ben a Zeleny-értéket. Hasonlóan viselkedett az előzőhöz a -30cm3nap-os kezelés. Egyes kezelések, pl. -60cm folyamatos hatása viszont évjáratonként eltérő, míg 2021-ben meglehetősen pozitív, máskor 2019-ben és 2020-ban negatív hatást gyakorolt a Zeleny-értékre. Az 31. ábra rávilágít arra, hogy a kezelések a 2021-es évjárat néhány kezelését (-60cm3nap;-60cm6nap;-30cm3nap;-60cmFolyamatos) leszámítva, inkább negatívan hatnak a Zeleny-értékre.



31. ábra 2019-2021: A kontrollhoz képest a kezelések hatása a Zeleny-értékre

4.3.1. Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére időtartam szerinti összehasonlítások

Részletes eredmények értelmezése csoportonként Zeleny-értékre (időtartam szerinti összehasonlítások)

A mellékletek 17. táblázatában, a 155. oldalon található a futtatás teljes eredménye.

0 cm Vízmélység (Vm0) (kétfázisú talajállapot)

2021: Egyetlen szignifikáns különbség van: a 6 napos kezelés szignifikánsan jobb ($p=0,042$), mint a 12 napos (CLD: 3=A, 6=A, 9=A, 12=B). 2020 és 2019: Egyik évben sem volt statisztikailag kimutatható különbség a különböző időpontokban mintázott kontroll parcellák Zeleny-értékei között (CLD:A, A, A, A).

-30 cm-es Vízmélység (Vm30)

2021-ben -30 cm-en a 9 napos kezelés Zeleny-átlaga szignifikánsan magasabb volt a 3 naposnál ($p = 0,022$) és a 6 naposnál ($p = 0,037$), míg a 12 napos szint „köztes” maradt, nem különbözött sem a 9 napostól, sem a rövidebb időtartamoktól; ezt a CLD is helyesen tükrözi (3 = A, 6 = A, 9 = B, 12 = AB).

2020-ban -30 cm-en egyetlen pár sem lett szignifikáns, így az összes időtartam azonos betűjelet kap (A), ami konzisztens a 30. táblázattal.

2019-ben -30 cm-en a 6 napos kezelés szignifikánsan felülmúlta a 3 napost ($p = 0,007$), a 9 és 12 napos pedig átmeneti helyzetben volt (CLD: 3 = A, 6 = B, 9 = AB, 12 = AB).

2019: A 6 napos kezelés szignifikánsan jobb ($p=0,007$) volt a 3 naposnál. Itt is a hosszabb stressznek volt pozitív hatása (CLD: 3=a, 6=b, 9=ab, 12=ab) (17. táblázat, 155. old.).

-60 cm-es Vízmélység (Vm60)

2021: Nagyon hasonlóan a 30 cm-eshez, a 9 napos kezelés itt is szignifikánsan jobb minőséget adott, mint a 3 napos ($p=0,031$) és a 6 napos ($p=0,004$). (CLD: 3=B, 6=B, 9=A, 12=AB, Folyamatos=AB)

2020: Nagyon komplex hatás. A 9 napos kezelés volt a legjobb, szignifikánsan felülmúlta a 12 naposat ($p<0,001$) és a Folyamatosat ($p=0,017$). Érdekes módon a Folyamatos szignifikánsan rosszabb volt a 12 naposnál is ($p=0,004$), ami egy optimum-görbére utal. (CLD: 3=ABC, 6=ABC, 9=A, 12=B, Folyamatos=C)

2019: Rendkívül erős hatások. A 9 napos és a Folyamatos kezelés is erősen jobb ($p<0,0001$) Zeleny-értéket eredményezett, mint a rövid, 3 napos kezelés. (CLD: 3=A, 6=AB, 9=B, 12=AB, Folyamatos=B)

4.3.2. Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza Zeleny-értékére a kontrollhoz viszonyítva

A mellékletek 18 táblázatában, a 155. oldalon található a teszt összefoglaló táblázata.

2021-ben egyik kezelés sem marad szignifikáns a kontrollhoz képest a Holm-korrektció után. A legkisebb korrigált p-érték is $\sim 0,19$ körül van (pl. 0 cm–12 nap: diff = -13,40; padj = 0,192; 0 cm–9 nap: diff = -9,50; padj = 0,232). A 3 nap / -60 cm kis mintán nyers szinten emelkedést jelzett, de padj = 0,458 \rightarrow nem szignifikáns.

2020-ban viszont széles körű, statisztikailag erős csökkenést látunk a kontrollhoz képest. Szignifikáns (Holm-korrektció utáni) csökkenés több időtartamnál és vízszintnél is megmarad:

0 cm: 3 nap (diff = -18,55; padj = $3,1 \times 10^{-4}$), 6 nap (-20,68; padj = $3,2 \times 10^{-7}$), 9 nap (-13,99; padj = 0,012), 12 nap (-21,50; padj = 0,020);

-30 cm: 3 nap (-19,55; padj = $2,3 \times 10^{-5}$), 6 nap (-22,60; padj = 0,0051), 9 nap (-15,33; padj = 0,00076), 12 nap (-15,13; padj = 0,0166);

-60 cm: 3 nap (-8,90; padj = 0,0189), 6 nap (-15,55; padj = 0,0126), 9 nap (-18,73; padj = $5,37 \times 10^{-6}$), 12 nap (-13,13; padj = $3,7 \times 10^{-7}$). Ezekhez igen nagy hatásnagyságok társulnak (Hedges g jellemzően -2 és -5 közötti tartományban), ami biológiailag is erős visszaesést jelez.

2019-ben a korrigált tesztek alapján több kezelés szignifikáns csökkenést jelez, de a kép mérsékelt, mint 2020-ban. Szignifikáns csökkenés:

0 cm: 3 nap (-10,85; padj = 0,034), 6 nap (-19,48; padj = 0,0028), 9 nap (-17,63; padj = 0,0028), 12 nap (-17,93; padj = 0,0032);

-30 cm: 6 nap (-15,85; padj = 0,00050), 12 nap (-13,05; padj = 0,043);

-60 cm: 6 nap (-10,43; padj = 0,021), 9 nap (-19,20; padj = 0,0032). A „Folyamatos” sor 2019-ben is csökkenést mutat (-18,70; padj = 0,0055). Ezekhez is nagy, többnyire -1,5...-3 közötti Hedges g értékek tartoznak, tehát a különbségek nemcsak statisztikailag, hanem gyakorlati értelemben is számottevők.

4.3.3. Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére és vízmélység szerinti összehasonlítások

Részletes eredmények értelmezése csoportonként Zeleny-értékére (vízmélység szerinti összehasonlítások)

A mellékletek 19. táblázatában, a 158. oldalon található a futtatás teljes eredménye.

3 nap

2021-ben nincs szignifikáns különbség a vízszintek között (minden $p \geq 0,156$), a CLD: A,A,A. 2020-ban viszont a -60 cm szint szignifikánsan alacsonyabb a 0 cm-nél (estimate = 9,65; 95% CI: 1,99...17,3; $p = 0,023$) és a -30 cm-nél (estimate = 10,6; 95% CI: 2,82...18,5; $p = 0,019$), míg 0 kontra -30 nem különbözik ($p = 0,672$); ebből a CLD: 0 = -30 = A, -60 = B. 2019-ben a különbségek nem szignifikánsak (minden $p \geq 0,072$), CLD: A,A,A.

6 nap

2021-ben a 0 cm szint szignifikánsan magasabb a -60 cm-nél (estimate = 12,6; 95% CI: 5,37...19,8; $p = 0,009$), a -30 kontra -60 és a 0 kontra -30 párok nem szignifikánsak ($p = 0,181$ ill. 0,171). Ennek megfelelő, minimális különbséget kifejező CLD: 0 = A, -30 = AB, -60 = B (a -30

köztes, mert egyik „szélsőtől” sem tér el bizonyíthatóan). 2020-ban és 2019-ben a 6 napos összevetések mind nem szignifikánsak (minden $p \geq 0,199$).

9 nap

2021-ben és 2020-ban nincs szignifikáns különbség (minden $p \geq 0,162$). 2019-ben viszont -30 kontra -60 szignifikáns (estimate = -9,75; 95% CI: -18,1...-1,38; $p = 0,031$), ami azt jelenti, hogy -60 cm > -30 cm. Mivel a 0 cm egyikükhöz képest sem különbözik szignifikánsan (0 kontra -30: $p = 0,126$; 0 kontra -60: $p = 0,849$), CLD: -60 = A, 0 = AB, -30 = B.

12 nap

2021-ben egyik pár sem szignifikáns (0 kontra -30: $p = 0,414$; 0 kontra -60: $p = 0,273$; -30 kontra -60: $p = 0,970$), a CI-k mindenhol átfogják a nullát, ezért a CLD helyesen „0 = -30 = -60 = A”. Ugyanez a helyzet 2020-ban (minden $p > 0,10$) és 2019-ben is (minden $p \geq 0,098$): 12 napnál tehát egyik évben sem mutatkozik megbízható különbség a vízszintek között, így a CLD mindhárom évben egyszintű („AAA”).

Azokban a cellákban, ahol szignifikancia megjelent, mindig a -60 cm szint állt rosszabbul (alacsonyabb Zeleny), kivéve a 2019/9 nap blokkban, ahol épp ellenkezőleg: -60 cm volt magasabb (negatív estimate -30 kontra -60). A 0 cm szint jellemzően a legkedvezőbb vagy a kedvezőbb csoporttal azonos (2020/3 nap: $0 = -30 > -60$; 2021/6 nap: $0 > -60, -30$ köztes). A nem szignifikáns párok CI-i szélesek és a nullát tartalmazzák, ami szóráskülönbségekkel összhangban van (a Games–Howell épp az eltérő szórás/elem-szám miatt robusztus).

CLD-k összefoglalva (csak az eltérők kiemelve).

– 2020/3 nap: 0 = -30 = A; -60 = B.

– 2021/6 nap: 0 = A; -30 = AB; -60 = B.

– 2019/9 nap: -60 = A; 0 = AB; -30 = B.

Minden más blokk: A,A,A.

4.3.4. A Zeleny-érték vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag-szórás hibasávós oszlopdiaagram statisztikai elemzése

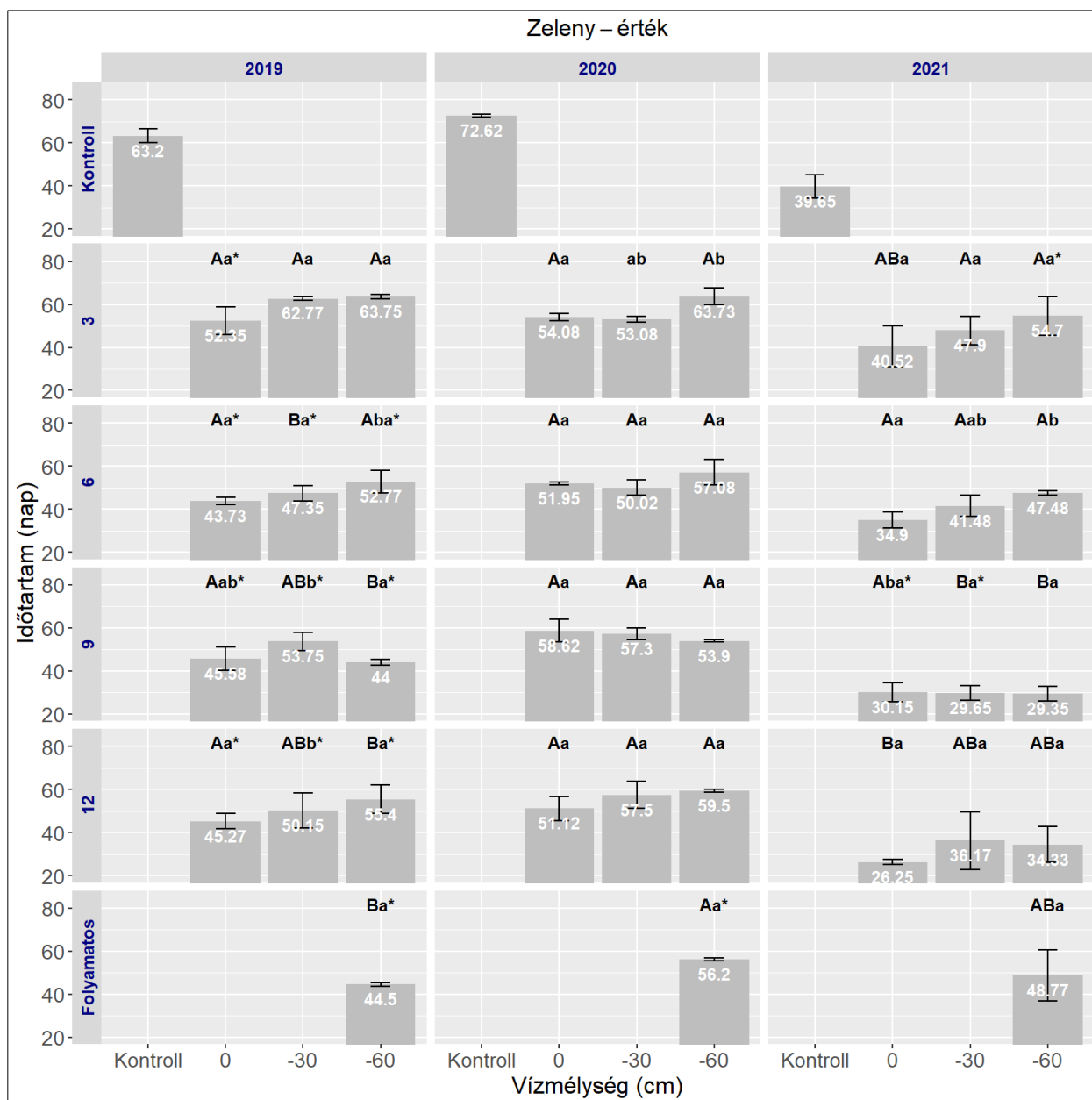
Az 32. ábra Zeleny-érték átlagát és szórását mutatja év×időtartam bontásban, a vízszintek (0; -30; -60 cm) szerinti oszlopok felett CLD betűk jelzik a Games–Howell szerinti csoportosítást. CDL jelölésben a nagybetűk az időtartamra összehasonlítása (függőlegesen olvasva); kisbetűk vízmélység összehasonlítása (vízszintesen olvasva) és a csillagjelölés (*) a Welch-féle kétmintás t-próbára vonatkozó szignifikáns eltérés a kontrollhoz viszonyítva.

2019-ben a kontroll érték magas Zeleny-értéket mutatott, amelyhez képest több kezelés szignifikánsan alacsonyabb értékeket eredményezett. A 3 napos kezeléseknél nem alakult ki különbség a vízmélységek között (azonos kisbetűk), de mindhárom szint eltért a kontrolltól. A 6 napos kezelésben a -30 cm mélységhez tartozó csoport különállt (Ba), míg a -60 cm köztes pozíciót foglalt el (ABa*), ami arra utal, hogy a vízmélység fokozódása mérsékelten befolyásolta a Zeleny-

értéket. A 9 napos kezeléseknél a betűjelölések (Aab, ABb, Ba*) jól mutatják, hogy a hosszabb előntés szignifikánsan differenciált hatást váltott ki, a kontrollhoz képest pedig minden szint alacsonyabb értéket adott. A 12 napos kezeléseknél szintén a kontrollhoz viszonyított szignifikáns csökkenés volt megfigyelhető, de a vízmélységek közötti különbségek nem váltak kifejezetté. A folyamatos kezelés 2019-ben a legalacsonyabb Zeleny-értéket eredményezte (Ba*), és egyértelműen különállt az időtartamok között is (32. ábra).

2020-ban a kontrollhoz képest általánosan alacsonyabb értékeket mértem, bár a csillaggal jelölt szignifikáns eltérés csak egyes kezeléseknél mutatkozott. A 3 napos kezeléseknél a -60 cm szint különálló csoportba sorolódott (Ab). A 6 és 9 napos kezeléseknél a vízmélységek közötti különbség nem volt szignifikáns (azonos kisbetűk), de az értékek a kontrollhoz képest mérsékeltébbek voltak. A 12 napos kezelésnél mindhárom vízmélység egységesen alacsonyabb Zeleny-értéket adott, és a -60 cm-es szint (Aa*) szignifikánsan eltért a kontrolltól. A folyamatos kezelés 2020-ban szintén szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott (Aa*), ami a tartós -60 cm vízmélység vízszint kedvezőtlen hatására utal (32. ábra).

2021-ben a kontroll Zeleny-értéke számottevően alacsonyabb volt, mint az előző években, így a vízszintes és időtartam-kezelések differenciáló hatása is erősebben jelentkezett. A 3 napos kezelésnél a -60 cm szint (Aa*) eltért a kontrolltól, miközben a kisebb mélységek hasonló csoportot alkottak. A 6 napos kezelésben a betűkiosztás (Aa, Ab, Ba) egyértelműen jelezte, hogy a mélyebb vízszintek csökkentették a Zeleny-értéket. A 9 napos kezeléseknél a -30 és -60 cm szintek alacsonyabb értékeket mutattak (Ba, ABa), és a kontrollhoz viszonyított különbségek is jelentősek voltak. A 12 napos kezeléseknél minden vízmélység csökkentett értéket adott, de a betűjelölések szerint az egymás közötti különbségek mérsékelték maradtak. A folyamatos előntés 2021-ben is a legalacsonyabb Zeleny-értékhez vezetett (ABa), amely a kontrolltól szignifikánsan eltért (32. ábra).

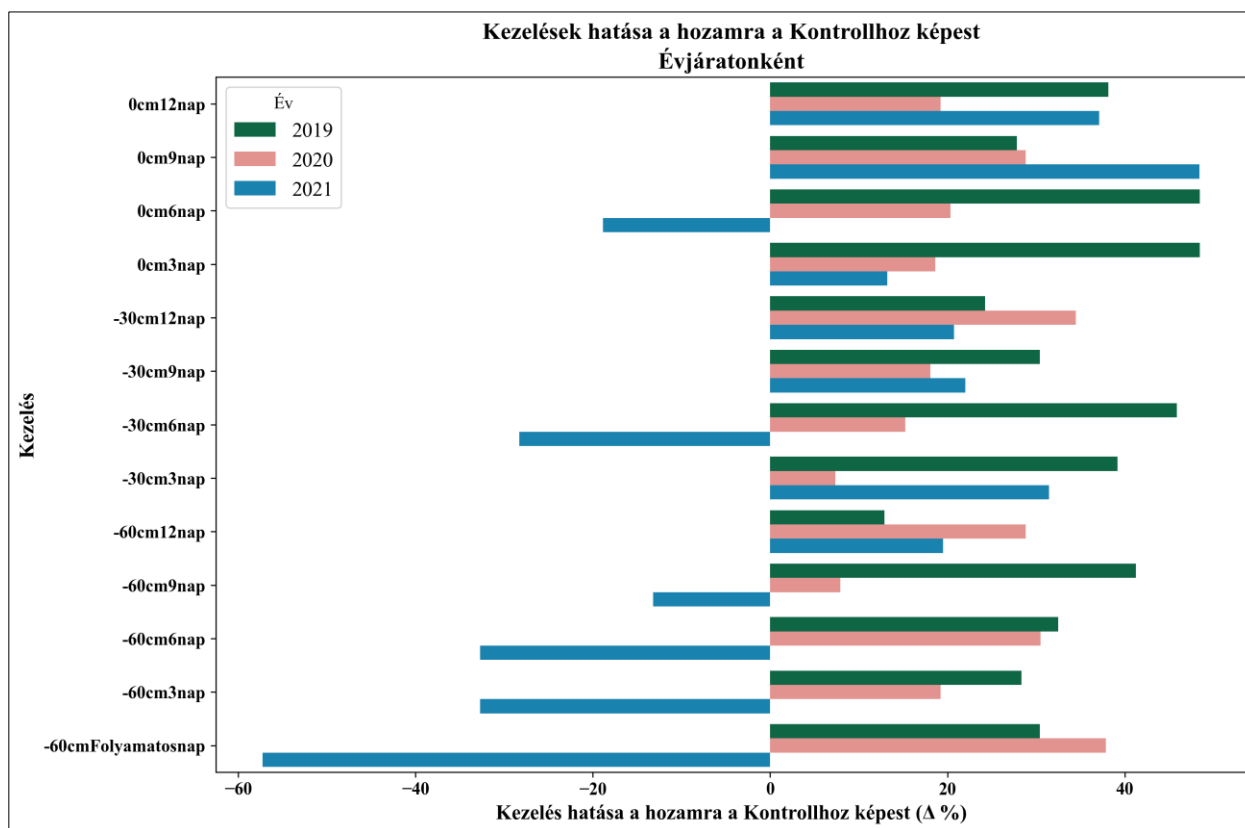


32. ábra A Zeleny-érték vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibásávós oszlopdiaagram (CLD jelöléssel)

4.4. Az őszi búza hozam változása a kezelések hatására (2019-2021)

A 33. ábra és a 41. ábra (169. old.) mögötti százalékos eltérés képlet minden évben külön-külön számolja ki a kontroll átlagát, és azt használja referenciaként a többi kezelés százalékos eltéréséhez – vagyis nem egy általános, többéves kontroll átlagot használ, hanem mindig az aktuális év átlag kontroll értékét. Így az 33. ábra azt mutatja be, hogy a különböző kezelések milyen mértékben befolyásolták a hozamot az adott év kontrolljához képest három egymást követő évben (2019, 2020, 2021). Jól látható, hogy bizonyos kezelések – például a -60cm folyamatosnap jelentős hozamcsökkenést eredményeztek 2021-ben. Egyes kezelések (pl. 0cm3nap) hatása viszont évről-évre eltérő, míg 2019-ben rekord pozitív, máskor 2020-ban és 2021-ben mérsékelt hatást

gyakorolt a hozamra. A 0cm6nap, -30cm6nap kezelések megmagyarázhatatlan, inkább hibát jelentő értéket produkáltak 2021-ben. De az eredményekből kitűnik, hogy a kezelések a 2021-es év hozamra gyakorolt hatása függött az évjáratától.



33. ábra 2019-2021: A kezelések hatása a hozamra a kontrollhoz képest

A következő fejezetekben statisztikailag kívánom részletezni vagy megcáfolni a 33. ábrából fentebb leszűrt megállapításaimat.

4.4.1. Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozamának időtartam szerinti összehasonlítások

Részletes eredmények értelmezése csoportonként (hozam időtartam szerinti összehasonlítások)

A mellékletek 20. táblázatában, a 162. oldalon található a futtatás teljes eredménye.

0 cm Vízmélység (Vm0)

2021:

Szignifikáns különbségek: A 20. táblázaton (a 6 napos kezelés szignifikánsan alacsonyabb hozamot adott, mint a 9 napos ($p=0,004$) és a 12 napos ($p=0,02$). Betűs jelölés: 3=ab, 6=a, 9=b, 12=b

Értelmezés: Ebben az évben a 6 napos kezelés hozama (a) szignifikánsan elmaradt a 9 és 12 napos kezelésektől (b). A 3 napos kezelés (ab) átmenetet képezett, nem különbözött szignifikánsan sem a leggyengébb, sem a legjobb csoportoktól.

2020 és 2019:

Szignifikáns különbségek: Egyetlen páros összehasonlítás sem mutatott szignifikáns különbséget ($p > 0.05$ mindenhol). Betűs jelölés: 3=a, 6=a, 9=a, 12=a

Értelmezés: Ebben a két évben a kontroll parcellákon a kezelés időtartamának nem volt kimutatható hatása a hozamra.

-30 cm-es Vízmélység (Vm30)

2021:

Szignifikáns különbség: A 3 napos és a 6 napos kezelés között van szignifikáns különbség ($p=0.041$), a 6 napos adta a magasabb hozamot. Betűs jelölés: 3=a, 6=b, 9=ab, 12=ab

Értelmezés: A 3 napos kezelés (a) szignifikánsan gyengébb hozamot eredményezett, mint a 6 napos (b). A 9 és 12 napos kezelések (ab) nem mutattak szignifikáns eltérést sem a 3, sem a 6 napostól (20. táblázat, a 162. old.).

2020:

Szignifikáns különbségek: A 12 napos kezelés szignifikánsan jobb hozamot adott, mint a 6 napos ($p=0,009$) és a 9 napos ($p=0,028$). Betűs jelölés: 3=ab, 6=b, 9=b, 12=a

Értelmezés: A 12 napos kezelés (a) egyértelműen a legjobb volt, szignifikánsan felülmúlta a 6 és 9 napos kezeléseket (b). A 3 napos (ab) ismét egy köztes eredményt hozott.

2019:

Szignifikáns különbség: A 9 napos kezelés szignifikánsan jobb volt, mint a 6 napos ($p=0,006$).

Betűs jelölés: 3=ab, 6=a, 9=b, 12=ab

Értelmezés: Ebben az évben a 6 napos kezelés (a) hozama maradt el szignifikánsan a 9 naposétól (b). A többi kezelés nem különbözött ezektől.

-60 cm-es Vízmélység (Vm60)

2021:

Szignifikáns különbség: A folyamatos elárasztás szignifikánsan alacsonyabb hozamot adott, mint a 12 napos kezelés ($p=0,005$). Betűs jelölés: 3=ab, 6=ab, 9=ab, 12=a, Folyamatos=b

Értelmezés: Itt egyértelműen a folyamatos elárasztás (b) volt a leggyengébb, szignifikánsan rosszabb, mint a 12 napos kezelés (a). A többi kezelés (ab) a kettő között helyezkedett el.

2020:

Szignifikáns különbségek: A folyamatos elárasztás szignifikánsan jobb volt, mint a 3 napos ($p=0,026$) és a 9 napos ($p=0,003$). Betűs jelölés: 3=a, 6=ab, 9=a, 12=ab, Folyamatos=b

Értelmezés: Az előző évvel ellentétben itt a folyamatos kezelés (b) volt a legjobb, szignifikánsan felülmúlva a 3 és 9 napos kezeléseket (a). A 6 és 12 napos kezelések (ab) ismét a köztes kategóriába estek (20. táblázat, a 162. old.).

2019:

Szignifikáns különbségek: Egyetlen páros összehasonlítás sem mutatott szignifikáns különbséget ($p > 0,05$ mindenhol). Betűs jelölés: 3=a, 6=a, 9=a, 12=a, Folyamatos=a

Értelmezés: Ebben az évben -60 cm-es vízszint mellett a kezelés időtartama nem befolyásolta a hozamot.

4.4.2. Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza hozamának a kontrollhoz viszonyítva

A mellékletek 21. táblázatában, a 165. oldalon található a futtatás teljes eredménye.

Eredmények év szerinti bontásban

2021:

0 cm: 9 nap (0,590 kontra 0,3975; $p=0,009$) és 12 nap (0,545 kontra 0,3975; $p=0,034$) szignifikánsan magasabb hozamot adott a kontrollhoz képest; 6 nap (0,3225 kontra 0,3975; $p=0,0496$) szignifikánsan alacsonyabb volt. A 3 napos hatás pozitív irányú, de nem szignifikáns.

-30 cm: egyik időtartamnál sincs szignifikáns eltérés (3 nap: $p=0,052$, a CI épp érinti a 0-t), az irány többnyire kismértékű növekedés.

-60 cm: minden időtartam nem szignifikáns (3 és 6 napnál csökkenő irány, 9 és 12 napnál enyhe növekedés).

2021-ben: a válasz kifejezetten időtartam-érzékeny. 0 cm-en hosszabb elárasztás (9–12 nap) növelte, közepes (6 nap) rontotta a hozamot; a mélyebb vízszintek hatása gyenge vagy inkonzisztens (21. táblázat, a 165. old.).

2020:

Széles körű, pozitív hozamhatás: a legtöbb kombináció szignifikánsan magasabb a kontrollnál.

0 cm: 3, 6, 9, 12 nap mind szignifikáns növekedés ($p \in [0,00035; 0,025]$); a nyereség kb. +0,085...+0,170 kg/m².

-30 cm: 6, 9, 12 nap szignifikáns (+0,028...+0,197 kg/m²), 3 nap nem szignifikáns.

-60 cm: 3, 6, 12 nap szignifikáns (+0,045...+0,192 kg/m²), 9 nap nem szignifikáns ($p=0,084$).

2020-ban: az vízmélység kezeléseket követően növekedett a hozamot a kontrollhoz képest, különösen 6–12 napos időtávon és minden vizsgált vízszinten (21. táblázat, a 165. old.).

2019:

Tartós és erős pozitív hatás: szinte minden kezelés szignifikánsan magasabb hozamot adott, kivétel -60 cm, 12 nap (nem szignifikáns).

0 cm: 3, 6, 9, 12 nap mind szignifikánsan magasabb (pl. 12 nap: 0,670 kontra 0,485; $p \approx 2,8 \times 10^{-4}$).

-30 cm: 3, 6, 9, 12 nap mind szignifikáns (+0,041...+0,245 kg/m²); a 6 napos hatás kiemelkedő ($p \approx 2,9 \times 10^{-7}$).

-60 cm: 3, 6, 9 nap szignifikáns (+0,088...+0,252 kg/m²), 12 nap nem szignifikáns.

2019-ben: az összes vízszint és legtöbb időtartam jelentős hozamnövekedéssel jár a kontrollhoz viszonyítva; a hatások nagysága jellemzően +0,12...+0,25 kg/m² (\approx +25–50%) tartományban mozog (21. táblázat, a 165. old.).

4.4.3. Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozam és vízmélység szerinti összehasonlítások

3 nap

A 2021-es év 3 napos adataira (NIR_2021_I3) a p-adjúkált értékek 0,793 (0 cm vs. -30 cm), 0,361 (0 cm vs. -60 cm) és 0,052 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, bár az utolsó közel van a szignifikancia küszöbéhez, a betűkiosztás A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm).

A 2020-as év 3 napos adataira (NIR_2020_I3) a p-értékek 0,476 (0 cm vs. -30 cm), 0,993 (0 cm vs. -60 cm) és 0,401 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm).

A 2019-es év 3 napos adataira (NIR_2019_I3) a p-értékek 0,508 (0 cm vs. -30 cm), 0,113 (0 cm vs. -60 cm) és 0,148 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm).

A 3 napos kezeléseknél egyik évben sem találtam szignifikáns különbséget a vízszintek között. 2021-ben, 2020-ban és 2019-ben egyaránt a CLD: 0 = A, -30 = A, -60 = A; a 2021-es -30 vs -60 összevetés p = 0,052 volt, ez 0,05 mellett nem tekinthető szignifikánsnak, ezért itt is „A” marad mindhárom szint.

6 nap

A 2021-es év 6 napos adatoknál (NIR_2021_I6) a p-értékek 0,788 (0 cm vs. -30 cm), 0,781 (0 cm vs. -60 cm) és 0,98 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm).

A 2020-as év 6 napos adatok (NIR_2020_I6) 0,369 (0 cm vs. -30 cm), 0,537 (0 cm vs. -60 cm) és 0,299 (-30 cm vs. -60 cm) p-értékekkel rendelkeznek, mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm).

A 2019-es év 6 napos adatok (NIR_2019_I6) 0,894 (0 cm vs. -30 cm), 0,111 (0 cm vs. -60 cm) és 0,01 (-30 cm vs. -60 cm, szignifikáns) p-értékeket mutatnak, mégis a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm), ami inkonzisztencia.

A 6 napos kezeléseknél az évek többségében szintén nem láttam igazolt eltérést (2021: 0 = A, -30 = A, -60 = A; 2020: 0 = A, -30 = A, -60 = A). Egyedül 2019-ben jelent meg szignifikáns különbség: a -60 cm szint szignifikánsan eltért a -30 cm-től (p = 0,010), miközben a 0 cm egyikhez sem különbözött; ennek megfelelően a CLD itt: 0 = AB, -30 = A, -60 = B.

9 nap

2021-ben a 9 napos eredmények (NIR_2021_I9) 0,22 (0 cm vs. -30 cm), 0,027 (0 cm vs. -60 cm, szignifikáns) és 0,191 (-30 cm vs. -60 cm, nem szignifikáns) p-értékeket mutatnak, a betűk A (0 cm), AB (-30 cm) és B (-60 cm).

2020-ban a 9 napos eredmények (NIR_2020_I9) 0,073 (0 cm vs. -30 cm), 0,002 (0 cm vs. -60 cm, szignifikáns) és 0,084 (-30 cm vs. -60 cm, nem szignifikáns) p-értékeket mutatnak, a betűk A (0 cm), AB (-30 cm) és B (-60 cm).

2019-ben a 9 napos eredmények (NIR_2019_I9) 0,883 (0 cm vs. -30 cm), 0,154 (0 cm vs. -60 cm) és 0,101 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm).

A 9 napos kezeléseknél 2021-ben és 2020-ban következetes mintázatot találtam: a -60 cm hozama szignifikánsan eltért a 0 cm-től (2021: $p = 0,027$; 2020: $p = 0,002$), a -30 cm pedig köztes és egyikhez sem különbözött szignifikánsan. Ennek CLD-je mindkét évben: 0 = A, -30 = AB, -60 = B. Ezzel szemben 2019-ben a páronkénti összehasonlítások mind nem szignifikánsak voltak, így a CLD: 0 = A, -30 = A, -60 = A.

12 nap

2021-ben a 12 napos adatok (NIR_2021_I12) p-értékei 0,688 (0 cm vs. -30 cm), 0,463 (0 cm kontra -60 cm) és 0,998 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm). A folyamatos időtartamra (NIR_2021_VmFolyamatos) nincs adat a megadott kimenetben, így azt nem lehet értékelni.

2020-ban a 12 napos adatok (NIR_2020_I12) p-értékei 0,111 (0 cm vs. -30 cm), 0,416 (0 cm vs. -60 cm) és 0,602 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm). A folyamatos időtartamra itt sincs adat.

2019-ben a 12 napos adatok (NIR_2019_I12) p-értékei 0,144 (0 cm vs. -30 cm), 0,097 (0 cm vs. -60 cm) és 0,516 (-30 cm vs. -60 cm), mind nem szignifikáns, a betűk A (0 cm), A (-30 cm) és A (-60 cm). A folyamatos időtartamra itt sincs adat.

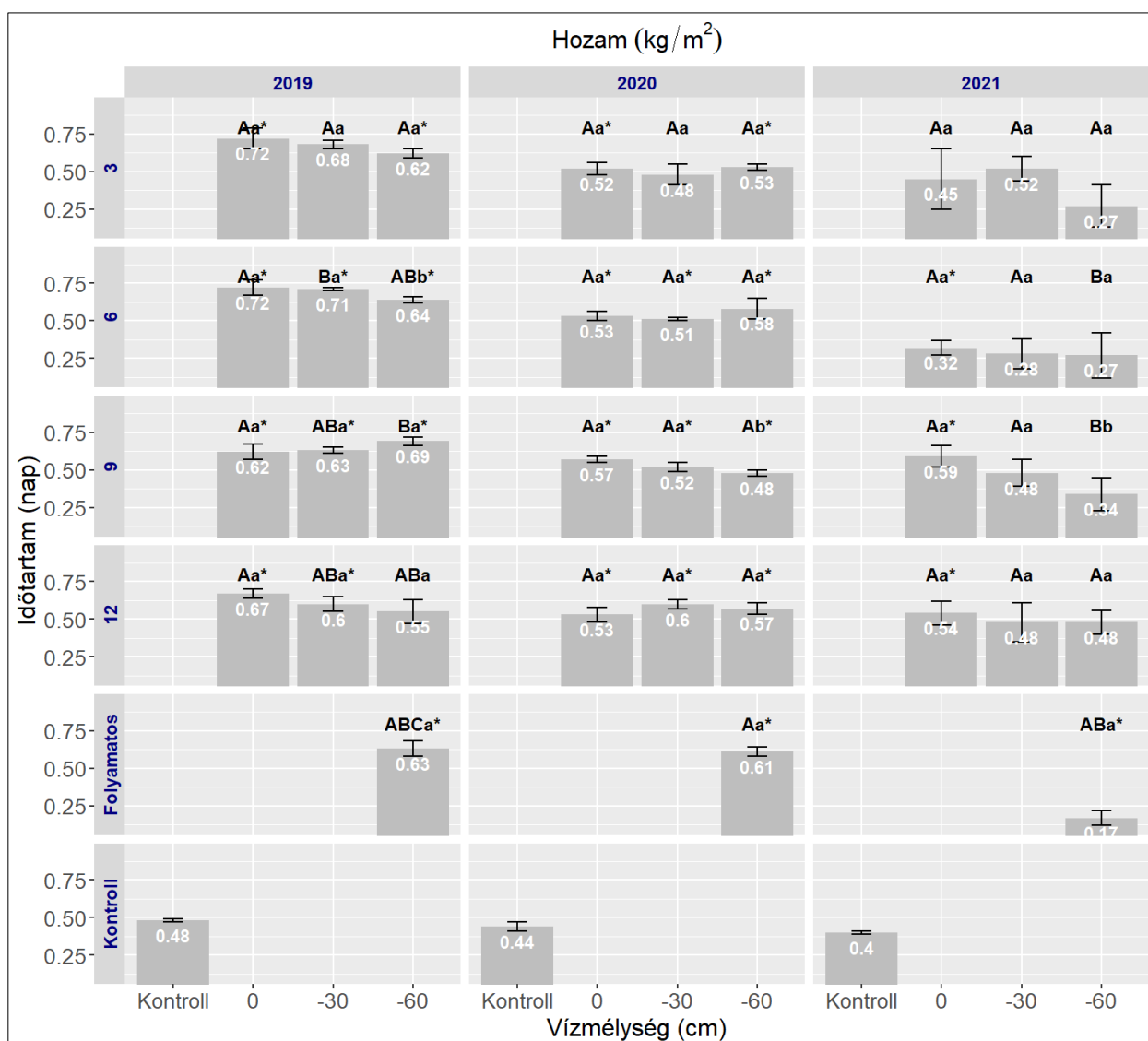
A 12 napos kezeléseknél egyik évben sem igazolódott vízmélység-hatás: 2021-ben, 2020-ban és 2019-ben is a CLD: 0 = A, -30 = A, -60 = A (a 2019-es 0 vs -60 $p = 0,097$ csak tendenciát jelez, de nem éri el a szignifikanciaszintet).

4.4.4. A hozam vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiaagram statisztikai elemzése

A 34. ábra a hozam átlagát és szórását mutatja év×időtartam bontásban, a vízszintek (0; -30; -60 cm) szerinti oszlopok felett CLD betűk jelzik a Games–Howell szerinti csoportosítást. CLD jelölésben a nagybetűk az időtartamra összehasonlítása (függőlegesen olvasva); kisbetűk vízmélység összehasonlítása (vízszintesen olvasva) és a csillag (*) annak jele, hogy a kontrolltól szignifikánsan eltér (Welch t-próba Holm korrekcióval).

A kontroll értékek mindhárom évben alacsonyabb szórást mutatnak, stabil viszonyítási pontként szolgálva az egyes kezelésekhöz.

2019-ben a 3 napos kezeléseknél nem alakult ki szignifikáns különbség a vízszintek között, azonban mindhárom érték magasabb volt a kontrollhoz képest (* jelölés). A 6 napos blokknál a -30 cm szint különálló csoportot (Ba*) képezett, míg a -60 cm köztes pozíciót foglalt el (ABb*), jelezve, hogy ez a vízmélység szint eltérő hatással bírt. A 9 napos kezelés során a nagybetűk differenciálódása (A, B) arra utal, hogy az időtartam hosszabbodása eltérő módon hatott a vízszintekre, a kontrolltól való szignifikáns eltéréssel együtt. A 12 napos kezelések esetén mindhárom vízszint szignifikánsan különbözött a kontrolltól, de egymástól nem, amit az egyszintű kisbetűs jelölés mutat. A folyamatos előntés 2019-ben kiemelkedően alacsony termést eredményezett (ABCa*), jól elkülönülve az időtartam többi kezelésétől (34. ábra).



34. ábra A hozam vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiaagram (CLD jelöléssel)

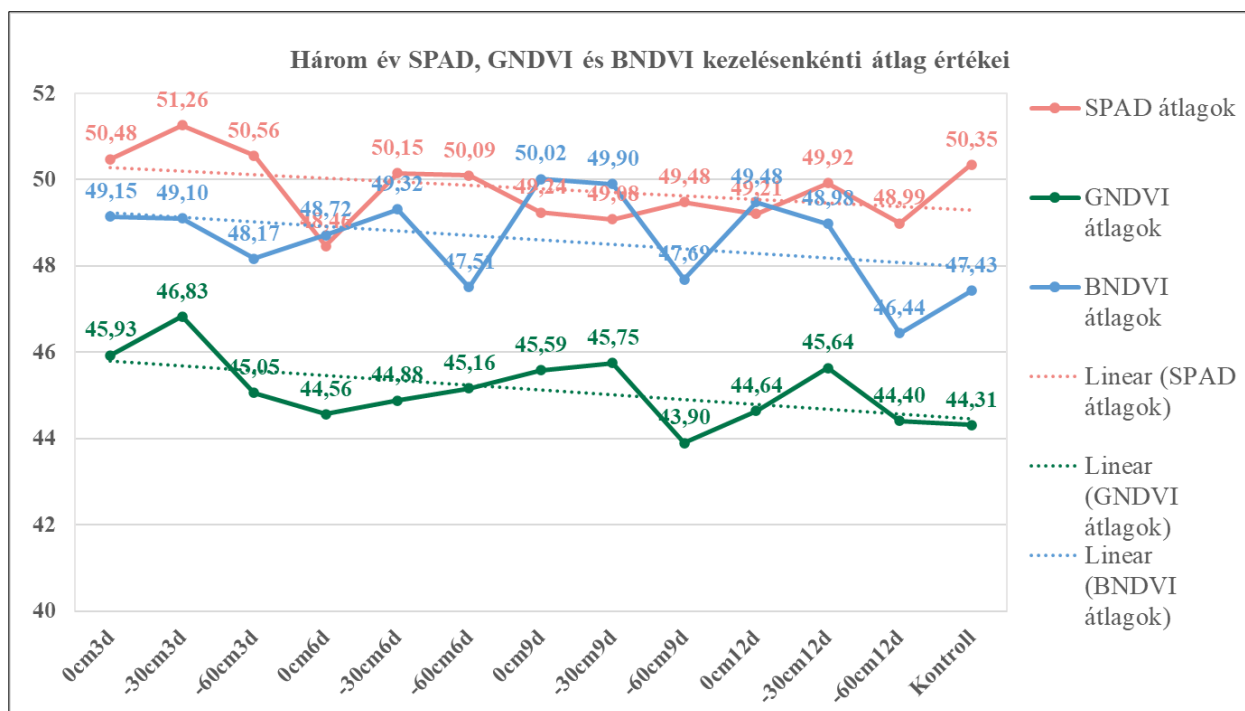
2020-ban a 3 és 6 napos kezelések főként egyszintű csoportokat alkottak, ami az időfaktor kiegyenlítődését jelzi, azonban a kontrollhoz viszonyított eltérések többször szignifikánsnak bizonyultak. A 9 napos kezelésben a -60 cm mélység már külön csoportot képezett (Ab*), ami a

mélyebb előntés hozamcsökkentő hatására utal. A 12 napos kezeléseknél ismételt szignifikáns különbség mutatkozott a kontrollhoz képest, de a vízmélységek egymással nem különböztek. A folyamatos előntés 2020-ban szintén jelentősen alacsonyabb hozamot adott, ezt az Aa* jelölés igazolja (34. ábra).

2021-ben a 3 napos kezeléseknél a vízmélységek nem különültek el egymástól, és a kontrolltól sem minden esetben tértek el, jelezve a rövid előntés mérsékelt hatását. A 6 napos kezelésnél a -60 cm szint egyértelműen különálló csoportot alkotott (Ba), míg a sekélyebb vízmélységek nem mutattak szignifikáns eltérést. A 9 napos blokknál szintén a -60 cm szint jelezte a legnagyobb hozamcsökkenést (Bb), míg a sekélyebb vízszintek azonos betűjelölést kaptak. A 12 napos kezeléseknél minden szint alacsonyabb volt a kontrollhoz képest, de a vízmélységek nem mutattak szignifikáns eltérést. A folyamatos előntés 2021-ben is kiugróan alacsony értéket adott (ABa), amely egyben különálló időtartam-csoportba is sorolta.

4.5. A kezelések közti különbségek vizsgálata a GNDVI, BNDVI indexekkel és a SPAD relatív klorofill értékekkel

A 35. ábrán a három év (2019–2021) során mért SPAD, GNDVI és BNDVI értékek kezelésenkénti átlagait mutatja be. A SPAD értékek (korall színű vonal) minden kezelésnél a legmagasabbak, és viszonylag kis ingadozással mozognak 48 és 51 között. A GNDVI átlagok (zöld vonal) enyhén csökkenő tendenciát mutatnak, különösen a -30 cm 3 nap és 0 cm 3 nap kezelése között. A BNDVI értékek (kék vonal) jóval nagyobb fluktuációt mutatnak, és több kezelésnél is látványos visszaesés figyelhető meg (pl. -30 cm 3 nap esetén 43,93).

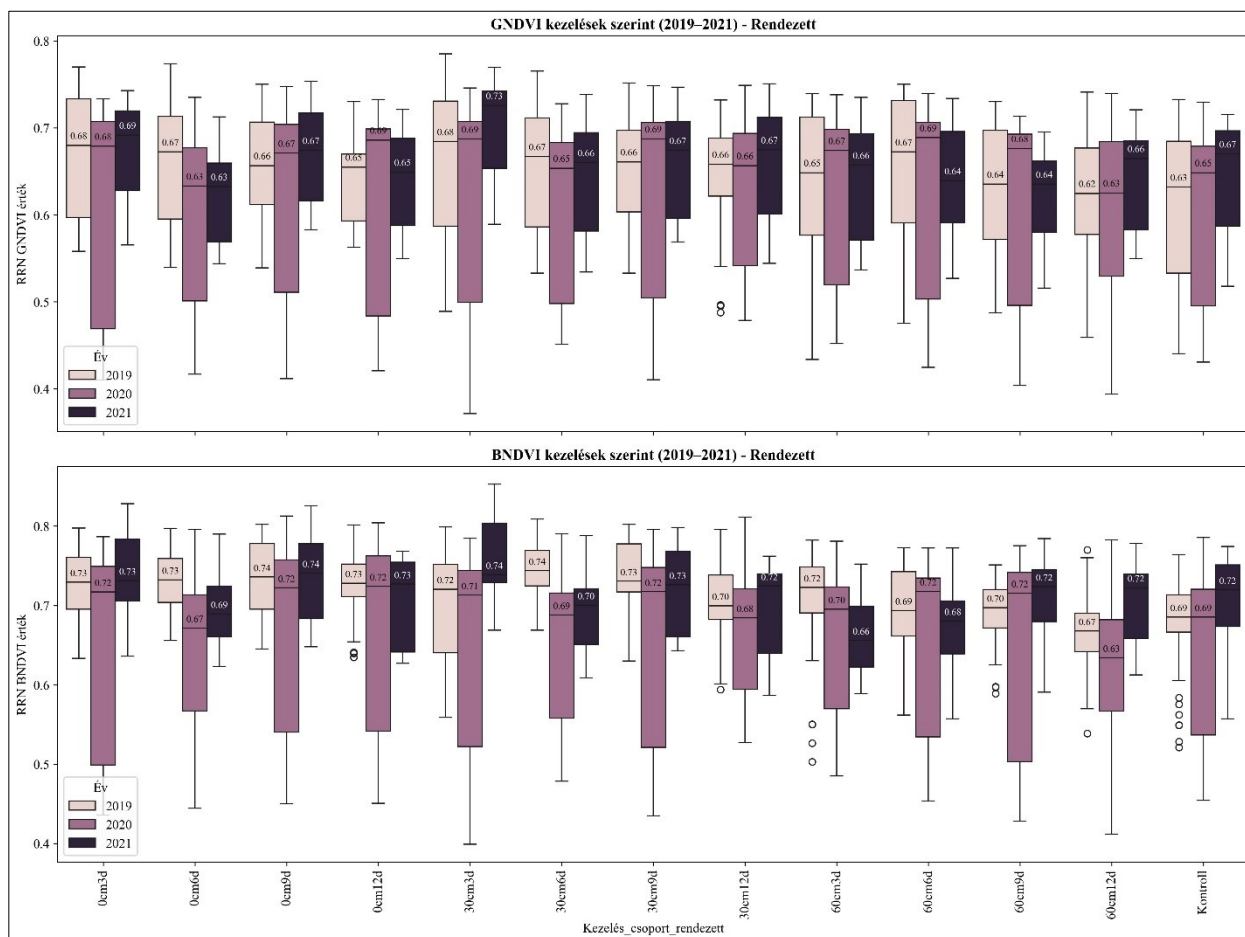


35. ábra Három (2019-2021) év SPAD, GNDVI és BNDVI kezelésenkénti összesített átlag értékei

A lineáris trendvonalak alapján a SPAD értékek összességében stabilak maradtak, míg a GNDVI és BNDVI értékek enyhén csökkenő trendet követnek.

A BNDVI esetében a csökkenés mértéke meredekebb, ami a mutató érzékenységére utalhat az egyes kezelések hatására. Érdekes, hogy a kontroll kezelés SPAD értéke (50,35) hasonló a kezelt parcellákhoz, míg a GNDVI és BNDVI alacsonyabb értékeket mutat. Ez azt jelezheti, hogy a SPAD nem minden esetben képes érzékelni a kezelés hatását olyan erőteljesen, mint a spektrális indexek.

A 36. ábra a 2019–2021 közötti három év GNDVI és BNDVI értékeinek eloszlását mutatja be dobozdiagramokon, külön a két indexre. A felső grafikon a GNDVI változásait, míg az alsó a BNDVI értékek alakulását szemlélteti az egyes kezelések mentén. Mindkét mutató esetén jól látható, hogy az eloszlások és mediánok jelentős változatosságot mutatnak év és kezelés szerint. A 2021-es év (sötétlila) több esetben alacsonyabb medián GNDVI értékekkel jellemezhető, ami kedvezőtlenebb vegetációs állapotot jelezhet 36. ábra. A 2019-es és 2021-es évek váltakozva dominálnak a magasabb értékekkel, de általánosságban a 2019-es év (világos szín) tűnik a legkiegyensúlyozottnak. A BNDVI eloszlások szintén évről-évre tükrözik, és több kezeléskor is megfigyelhetők szélsőértékek, különösen a 2021-es évben. Ez arra utal, hogy a vegetációs indexek érzékenyek lehetnek az adott év időjárási körülményeire. Az eloszlások szélessége is változó, ami a kezelések közötti variabilitást jelzi.



36. ábra A GNDVI és BNDVI indexek adatainak évek között dobozdiagramja

4.5.1. A GNDVI és a BNDVI összefüggései SPAD relatív klorofilltartalom értékkel

A görbeillesztést a 2020-as év adataira végeztem, mert ez volt az egyetlen szezon, amely egyidejűleg teljesítette a kalibrációval szemben támasztott metodikai követelményeim. Egyrészt mind a GNDVI, mind a BNDVI pozitív, fiziológiailag értelmezhető kapcsolatot mutatott a SPAD-dal ($r=0,519$ és $r=0,586$; $p<0,001$), szemben 2019-cel ($r\approx 0$) és 2021-gyel, ahol a BNDVI-kapcsolat iránya negatív volt ($r=-0,180$). Másrészt a 2. fokú polinom illesztési feltételei (maradékdiagnosztika) 2020-ban teljesültek, és a modell átvihetősége is igazolódott: a 2020-on tanult egyenletek 2019-re és 2021-re alkalmazva 5 alatti MAE-t adtak (GNDVI-modell: 4,83, BNDVI-modell: 4,71). Ezzel szemben a 2019-es és 2021-es év (különösen a BNDVI esetén) vagy az illeszthetőséget nem biztosította, vagy év-specifikus viszonyt tükrözött, amely gyengén lenne általánosítható. Döntésemet előre rögzített kritériumok vezérelték (fiziológiai konzisztencia, illesztési feltételek, külső validációs hiba \leq), nem csupán a korrelációs együttható nagysága (42.;43.;44.;45.;46.;47.;48.;49.;50.ábrák)

9. táblázat Pearson korreláció a GNDVI, a BNDVI és a SPAD között

Év	SPAD vs GNDVI	p-érték (GNDVI)	SPAD vs BNDVI	p-érték (BNDVI)	Értelmezés
2019	+0.012	0.800	-0.004	0.937	Egyáltalán nincs korreláció
2020	+0.519	~0.000	+0.586	~0.000	Közepes-erős pozitív korreláció
2021	+0.373	~0.000	-0.180	0.013	Gyenge pozitív (GNDVI), gyenge negatív (BNDVI)

A 4.1. és a 4.2. képletek egy 2. fokú polinomiális regressziós modell, amit a 2020-as összes adatok alapján illesztettem a SPAD (relatív klorofilltartalom) és a GNDVI / BNDVI (UAV-ból számolt vegetációs indexek) kapcsolatára.

A függvények alapján, ha van egy UAV-ból származó GNDVI vagy BNDVI érték, akkor a SPAD értéket (relatív klorofilltartalmat) becsülhetünk hasonló érzékenységű kamera használatával búzára.

(Az Agro változat egy átalakított NGB kamerával rendelkezik, melyben eltérő lencsetag és speciális szűrő található, mely a 390-570 nm, valamint a 680-790 nm közötti tartományban ereszti át fényt, vagyis a kék (kb. 450-495 nm), a zöld (kb. 495-570 nm) és az közeli infravörös tartományt.)

2020 egész adathalmazra, ($n=440$):

SPAD és GNDVI kapcsolata (2020):

$$SPAD = -177,25025 * GNDVI^2 + 235,27506 * GNDVI - 25,64773 \quad 4.1$$

SPAD és BNDVI kapcsolata (2020):

$$SPAD = -167,54836 * BNDVI^2 + 246,17302 * GNDVI - 38,15253 \quad 4.2$$

Modell indentifikáció a 2019-es és 2021-es év adataival:

A 2020-as adatok alapján illesztett másodfokú regressziós modelleket 2019-es és 2021-es méréseken indentifikáltam (10. táblázat), összesen 640 adatpont felhasználásával. A GNDVI alapú modell átlagos abszolút hibája (MAE) 4,83, míg a BNDVI modellé 4,71 volt. Tekintettel arra, hogy a mért SPAD értékek 28,3 és 56,8 közé estek, ezek az eltérések mérsékeltnek tekinthetők. A normalizált MAE (NMAE) mindkét modell esetében 17% körüli volt, ami UAV-alapú, nem invazív klorofill-becslés esetén elfogadható pontosságot jelent. Az RMSE értékek 7 körül alakultak, ami arra utal, hogy néhány kiugró érték előfordulhatott, de a hibaeloszlás összességében nem szélsőséges. A két különböző vegetációs index hasonló prediktív teljesítményt mutatott, így a modellválasztás rugalmasan illeszthető a rendelkezésre álló szenzorhoz. Fontos, hogy a modellek más évek adataira is jól alkalmazhatók voltak, ami erősíti időbeli általánosíthatóságukat. A kvadratikus forma (3.3. egyenlet) leírja a biológiai telítődési jelenséget, amely a SPAD és vegetációs index variánsok közötti kapcsolatban megfigyelhető. A 2020-ra számolt képletet a 2019-es és 2021-es adatokra indentifikáltam.

10. táblázat A modellek indentifikációjának eredménye a 2019 és 2021 év összes adatával

Modell	2019+2021=n adatpont	MAE	NMAE (%)	RMSE	SPAD max.	SPAD min.
GNDVI → SPAD	448+192=640	4,83	16,97	7,01	56,8	28,3
BNDVI → SPAD	448+192=640	4,71	16,53	7,039	56,8	28,3

n=640

GNDVI modellezés átlagos abszolút hiba (MAE):4,83

SPAD max.: 56,8

SPAD min:28,3

GNDVI modell normalizált átlagos abszolút hiba (NMAE) %:16,97 %

GNDVI modell RMSE:7,01

n=640

BNDVI átlagos abszolút hiba (MAE): 4,71

SPAD max.: 56,8

SPAD min:28,3

BNDVI modell normalizált átlagos abszolút hiba (NMAE) %:16,53 %

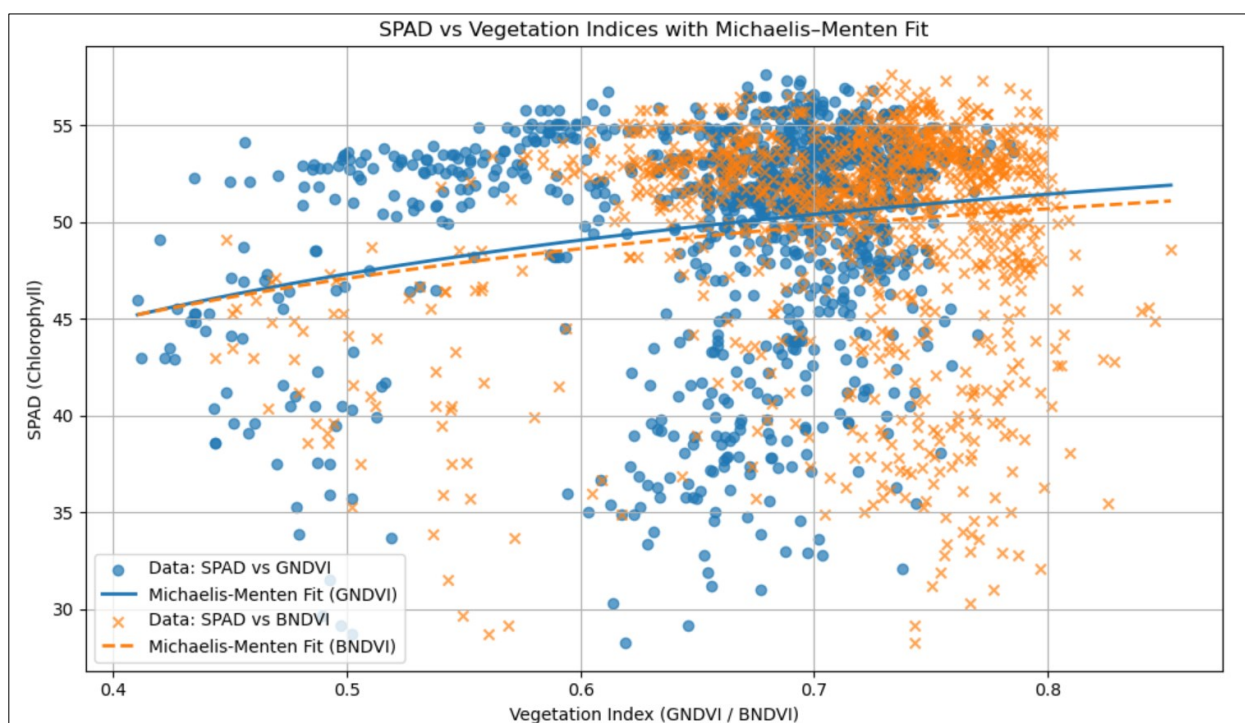
BNDVI modell RMSE:7,039

4.5.2. Michaelis–Menten típusú görbék a vegetációs indexek és a levélklorofill-tartalom (SPAD-érték) közötti kapcsolat jellemzésére

A 37. ábrán a vegetációs indexek és a levélklorofill-tartalom (SPAD-érték) közötti kapcsolat jellemzésére Michaelis–Menten típusú 3.6. egyenlet szerinti görbét illesztettem a GNDVI és BNDVI értékekre. A modellek illeszkedésének minőségét a V_{max} , K_m , RMSE és R^2 paraméterek alapján értékeltem. Az eredmények azt mutatták, hogy a GNDVI esetében a modell által becsült

maximális SPAD-érték ($V_{max} = 60,17$) magasabb volt, mint a BNDVI esetében ($V_{max} = 58,09$), ami arra utal, hogy a GNDVI érzékenyebben képes követni a klorofilltartalom változásait, különösen a magasabb tartományban. A K_m értékek hasonló nagyságrendűek voltak (0,136, illetve 0,117), azonban a BNDVI esetében a modell korábban eléri a telítettség felét, ami azt jelezheti, hogy ez az index hamarabb elveszíti érzékenységét a SPAD-növekedéssel szemben.

A modellek illesztési hibája szintén a GNDVI javára billenti a mérleget: az alacsonyabb RMSE érték (5,56 kontra 5,61) pontosabb illesztésre utal. Bár az R^2 érték mindkét esetben viszonylag alacsony (GNDVI: 0,040; BNDVI: 0,023; 11. táblázat), tehát az indexek önmagukban csak kis mértékben magyarázzák a SPAD-értékek varianciáját, a GNDVI így is valamivel jobb magyarázóerőt mutatott. Megállapítható, hogy a GNDVI a két vizsgált index közül érzékenyebb és pontosabb prediktor a levélklorofill-tartalom (SPAD) modellezésére, még ha a kapcsolat erőssége korlátozott is.



37. ábra GNDVI-SPAD és BNDVI- SPAD közötti kapcsolatot mutatja, egy-egy Michaelis-Menten görbével illesztve az összes évre

11. táblázat Michaelis-Menten modell mérőszámok GNDVI-SPAD és BNDVI- SPAD közötti kapcsolatra

	Model	V_{max}	K_m	RMSE	R^2
0	SPAD ~ GNDVI	60.167231	0.135731	5.563424	0.040435
1	SPAD ~ BNDVI	58.086783	0.116790	5.614434	0.022758

Okok a megfigyelt különbségekre

A növények eltérően hasznosítják a zöld, kék és közel infravörös fényt a fotoszintézis során. A kék fény a leghatékonyabb, erőteljes fotoszintetikus aktivitást eredményezve, míg a zöld fény, bár kevésbé hatékony, befolyásolja a növény morfológiáját és adaptív válaszait. A GNDVI a zöld színt

használja a NIR mellett, míg a BNDVI a kéket. A fotoszintézishez kék és vörös tartományok „szükségesek”, a zöld fényt a növények visszaverik, különösen az egészséges zöld növények. GNDVI ahol NIR a közeli infravörös visszaverődés (jellemzően 750–900 nm), Zöld pedig a zöld fény visszaverődése (kb. 500–570 nm). BNDVI a kék fény visszaverődése (kb. 400–500 nm). A BNDVI szintén jelzi a növényzet egészségi állapotát, de nagyobb hatással van rá a kék fény abszorpciója, amelyet erősen befolyásol a klorofill és más pigmentek, például a karotinoidok. Mindkét index a NIR (amely egészséges növényzetben magas a levelek szórása miatt) és a látható spektrum (ahol a klorofill abszorpciója történik) közötti kontrasztra épül, de abban különböznek, hogy a zöld és a kék fény visszaverődése hogyan járul hozzá érzékenységükhöz.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS A JAVASLATOK

Az őszi búza vízszint- és időtartam-kezeléseinek hatását vizsgáló statisztikai elemzésem számos jelentős megfigyeléssel szolgált, amelyek mélyebb betekintést nyújtanak a hozam, valamint a minőségi mutatók – különösen a fehérjetartalom és a Zeleny-index – alakulásába. Az ANOVA-modellek által kimutatott kölcsönhatások alapján világosan kirajzolódik, hogy sem a vízszint, sem az elárasztás időtartama önmagában nem elegendő a termelési eredmények megbízható előrejelzésére, hanem azok együttes hatása, valamint az évjárat-specifikus környezeti tényezők döntő szerepet játszanak az eredmények alakulásában.

A multivariáns statisztikai vizsgálatok egyértelműen kimutatták, hogy az évjárat hatása rendkívül erős a vizsgált változók összességére nézve (Wilks = 0,02248, $p < 2,2e-16$), és ez minden egyes minőségi jellemzőre külön-külön is igaz. Emellett a vízszint és az időtartam főhatásai is szignifikánsan befolyásolták a fehérje-, szikér- és Zeleny-értékeket. Az ANOVA eredmények alapján például a vízszint hatása a fehérjetartalomra $F = 14,85$, $p = 1,59e-08$ értékkel jelentkezett, míg az időtartam hatása $F = 10,20$, $p = 2,41e-07$ értékű volt.

Az őszi búza minőségi tulajdonságai, mint a fehérjetartalom, a sikértartalom, a Zeleny-index és a W érték, szorosan együtt mozognak, amit a nagyon magas korrelációs értékek is alátámasztanak ($r = 0,955-0,989$, $p < 0,001$). Ez arra utal, hogy ezek a minőségi jellemzők együttesen reagálnak a vízszint- és időtartam-kezelésekre, vagyis a kedvező hatások több mutatóban egyszerre érvényesülnek.

A terméshozam ugyanakkor csak gyenge pozitív korrelációt mutat a minőségi paraméterekkel ($r = 0,155-0,206$), vagyis a hozam növekedése nem feltétlenül jár együtt a minőség javulásával. Ez a megfigyelés is megerősíti, hogy a mennyiségi és minőségi célok elérése eltérő stratégiákat igényelhet.

A kontrollhoz viszonyított eltérések szinte minden esetben a vízszint és az időtartam együttes befolyásától függttek. Különösen a -60 cm-es vízszint, valamint a 9 napos kezelés kombinációja mutatott következetes pozitív hatást a fehérjetartalomra. Ez a kezelés ugyanis olyan mérsékelt stresszállapotot idézhet elő, amely serkenti a fehérjeszintézisért felelős fiziológiai mechanizmusokat, miközben nem csökkenti drasztikusan a terméshozamot. Ezzel szemben a rövid, 3 napos kezelések rendre gyengébb eredményeket hoztak, akár hozam, akár minőségi paraméterek tekintetében. A folyamatos kezelések hatása évjáratonként eltért, ami tovább növeli a technológiai bizonytalanságot.

A hozamvizsgálat során a vízszint és időtartam hatása szintén változatos mintázatot mutatott. A 2020-as évben több kezelés is szignifikáns hozamnövekedést okozott a kontrollhoz képest, míg 2021-ben az eltérések többsége nem volt szignifikáns. A leghatékonyabb kezelések évjáratonként eltérőek voltak, ami ismételten a környezeti feltételek jelentőségére világít rá. A hozamra gyakorolt hatásnál azonban a szignifikancia ritkábban volt kimutatható, és azok is sokszor gyenge hatásnagyságot mutattak.

A minőségi mutatók – különösen a Zeleny-index – vizsgálata során egyértelműen kirajzolódott, hogy a mérsékelt vízstressz pozitívan befolyásolja a sütőipari értéket. Ennek oka a koncentrációs hatás, mely során a növény kevesebb keményítőt termel, így a fehérjekomponensek aránya

növekszik a szemben. Ezt támasztja alá a statisztikai elemzés is, mely szerint a 9 napos kezelés jellemzően magasabb Zeleny-értékhez vezetett, különösen -60 cm-es vízszint mellett. Ugyanakkor a kontrollhoz viszonyított eltérések évről-évre erősen különböztek, amit az éves kontrollértékek (pl. 2019: 63,2; 2020: 72,6; 2021: 39,7) is alátámasztanak. A legszigorúbb összehasonlítási alapot a 2020-as év jelentette, ahol a kezelések hatásai jobban előtérbe kerültek.

A multivariáns statisztikai elemzés tovább erősítette az évről-évre jelentőségét: a MANOVA szerint az évről-évre erősen szignifikáns hatással bírt mind a minőségi mutatók, mind a hozam szempontjából. Emellett a vízszint és időtartam főhatásai is szignifikánsak voltak, és a vízszint-időtartam interakciója szintén befolyásolta a vizsgált paramétereket, különösen a fehérjetartalom esetében. A varianciáhozomogenitás hiánya miatt a Welch-teszt és Games–Howell post-hoc eljárások alkalmazása indokolt volt, amelyek pontosabb különbségek kimutatását tették lehetővé a kezelések között.

A fentiek alapján levonható a következtetés, hogy az őszi búza vízszint- és időtartam-kezelésének optimalizálása rendkívül kontextusfüggő. Egyetlen univerzálisan legjobb kezelés nem létezik; a célhoz (pl. hozammaximalizálás vagy minőségjavítás) igazított, évről-évre és talajállapot-specifikus stratégiákra van szükség. A 9 napos kezelés -60 cm-es vízszint mellett több évben is kedvező kompromisszumot kínált a hozam és a minőség között, míg a rövid (3 napos) és a folyamatos elárasztás gyakran kedvezőtlenebb eredményeket hozott.

A vízszint és időtartam kölcsönhatása is szignifikáns volt több minőségi paraméter esetében – például a Zeleny-indexre vonatkozóan $F = 3,21$, $p = 0,0054$.

2020-ban például a -30 cm-es vízállás mellett a 6 és 12 napos kezelések között szignifikáns hozamkülönbség mutatkozott ($p = 0,009$), ami arra utal, hogy ebben az évről-évre a hosszabb ideig tartó mérsékelt vízstressz kedvezőbb feltételeket teremtett a hozam növekedéséhez. Ugyanez az év mutatta ki azt is, hogy a -60 cm-es vízborítás 9 napos időtartama is szignifikáns hozamnövekedést eredményezett a kontrollhoz képest ($p = 0,005$).

Ezek azt jelenti, hogy azonos vízszint mellett nem mindegy, hány napig tart a kezelés, és fordítva: ugyanazon időtartam mellett sem mindegy, milyen mély a vízállás.

A kezelési döntések meghozatalánál tehát figyelembe kell venni az évről-évre jellemző meteorológiai körülményeket, a talaj vízgazdálkodási sajátosságait, valamint a kívánt termelési célt (pl. malmai vagy takarmánybúza).

Végül az elemzés rávilágít arra, hogy a precíziós mezőgazdasági megközelítések és az UAV-alapú vegetációs indexek, különösen a GNDVI, bevonása lehetőséget ad arra, hogy a klorofilltartalom és vegetációs állapot pontosan nyomon követhető legyen. Ez különösen fontos lehet nagy területű szántóföldi kultúrák esetében, ahol a térbeli változékonyság és az évről-évre kezelés kulcsfontosságú a hozam- és minőségoptimalizálás szempontjából.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A kutatás statisztikailag igazolt tézisei:

1. Tézis: Megállapítottam, hogy az őszi búza minőségi és mennyiségi paramétereire gyakorolt vizes stressz hatását dominánsan az évjárat-hatás határozza meg, amelynek statisztikai ereje felülmúlja az alkalmazott (3,6,9,12 napos időtartamon és 0 cm (kétfázisú talaj), -30 cm (a felszíntől -30 cm-en beállított vízszint) és -60 cm (a felszíntől -60 cm-en beállított vízszint)) kezeléseket.

Statisztikai alátámasztás: A többváltozós varianciaanalízis (MANOVA) eredményei (8. táblázat) egyértelműen kimutatták, hogy az Év faktor Wilks-féle Lambda értéke ($\lambda = 0,02248$) és F-statisztikája ($F = 167,834$) nagyságrendekkel erősebb, mint a Vízmélység ($\lambda = 0,56417$, $F = 6,282$) vagy az Időtartam ($\lambda = 0,55753$, $F = 4,737$) hatása ($p < 2,2e-16$ minden esetben)

Ezt a dominanciát az összes egyváltozós ANOVA teszt is megerősíti, ahol az Év F-értéke minden egyes vizsgált paraméter (fehérje, sikér, Zeleny érték, W érték, hozam) esetében a legmagasabb volt (pl. Fehérje $F=126,3082$, Sikér $F=81,8964$; Zeleny $F=11,7941$; W $F=80,0361$, Hozam $F=84,8474$; mind $p < 2,2e-16$). A 30., 32. és 34. ábrák vizuálisan is igazolják, hogy az egyes évek kontrollcsoportjai között akkora a különbség (pl. Zeleny-érték 2020 kontra 2021), amely gyakran meghaladja a kezelések éven belüli hatását.

2. Tézis: Igazoltam, hogy az őszi búza minőségi és mennyiségi mutatói eltérő módon reagálnak 3,6,9,12 napos időtartamon és 0 cm (kétfázisú talaj), -30 cm (a felszíntől -30 cm-en beállított vízszint) és -60 cm (a felszíntől -60 cm-en beállított vízszint) időtartamra és vízmélységekre; míg a minőségi paraméterek (fehérje, sikér, Zeleny-, W-érték) együttesen és komplexen változnak, addig a hozam (mennyiség) válaszreakciója ettől részben független mintázatot mutat.

Statisztikai alátámasztás: A Pearson-féle korrelációs mátrix magasan szignifikáns, erős pozitív korrelációt igazolt a minőségi mutatók között ($r = 0,955-0,989$, $p < 0,001$), míg a hozam gyenge pozitív korrelációt mutatott a minőségi paraméterekkel ($r = 0,155-0,206$)

Ezt a kettősséget az egyváltozós ANOVA tesztek is megerősítik: a minőségi paraméterek esetében mindhárom főhatás (év, vízmélység, időtartam) és a vízmélység×időtartam interakció is szignifikáns volt ($p < 0,05$). Ezzel szemben a hozam esetében az időtartam ($p = 0,1885$) és a vízmélység×időtartam interakció ($p = 0,8095$) nem volt szignifikáns az egyváltozós ANOVA szerint.

3. Tézis: Igazoltam, hogy a 3,6,9,12 napos időtartamon és 0 cm (kétfázisú talaj), -30 cm (a felszíntől -30 cm-en beállított vízszint) és -60 cm (a felszíntől -60 cm-en beállított vízszint) kezeléseket minőségre (fehérjetartalomra és Zeleny-értékre) gyakorolt hatása kontextusfüggő: kedvező évjáratokban a kezeletlen kontrollhoz képest minden stresszhatás minőségromlást okoz, míg kedvezőtlen évjáratokban a rövid idejű, mérsékelt stressz statisztikailag igazolható minőségjavulást (koncentrációs hatást) eredményezhet.

Statisztikai alátámasztás: A Welch-féle t-próbák ezt a kettős hatást igazolják. A 2020-as, kiemelkedően jó minőségű évben szinte minden kezelés szignifikánsan ($p < 0,05$ a Holm-korrektúra után is) alacsonyabb fehérje- és Zeleny-értéket eredményezett, mint a kontroll (pl. 2020, 0 cm, 3 nap: Zeleny diff = -18,55, $p_{adj} = 3,1e-04$). Ezzel szemben a 2021-es, gyenge évjáratban

a 3 napos, -60 cm-es kezelés szignifikánsan növelte a fehérjetartalmat (diff = +2,65; p = 0,0151, Holm korrekció után is), és a 6 napos -60 cm-es kezelés is (diff = +2,2, p = 0,0314). A Zeleny-érték 2021-ben, 3 napos, -60 cm-es kezeléskor pozitív irányú volt (diff = +15,05), bár a Holm-korrekció után nem maradt szignifikáns (p.adj=0,366).

4. Tézis: Kimutattam, hogy az őszi búza terméshozamát a kedvező évjáratokban (2019, 2020) a legtöbb vizes kezelés (és 0 cm=kétfázisú talaj; -30 cm=a felszíntől -30 cm-en beállított vízszint;-60 cm = a felszíntől -60 cm-en beállított vízszint) szignifikánsan növelte a kezeletlen kontrollhoz képest, míg a kedvezőtlen (2021) évben a hatásuk bizonytalanra és időtartam-függővé vált.

Statisztikai alátámasztás: A Welch-féle t-próbák ezt a mintázatot egyértelműen mutatják

A 2019-es és 2020-as években a kezelések túlnyomó többsége statisztikailag szignifikáns (p < 0,05), pozitív hozameltérést mutatott a kontrollhoz képest (pl. 2019, 0 cm, 12 nap: p≈2,8e-04, 2020, 0 cm, 9 nap: p≈0,00035). Ezzel ellentétben 2021-ben a hatás vegyes volt: a 0 cm-es vízszintnél a 6 napos kezelés szignifikánsan csökkentette (p = 0,04958), míg a 9 napos (p = 0,00905) és 12 napos (p = 0,0341) kezelések szignifikánsan növelték a hozamot. A mélyebb vízszintek (-30 és -60 cm) esetében 2021-ben a kezelések többségénél nem volt szignifikáns eltérés a kontrollhoz képest.

5. Tézis: Kimutattam, hogy az alkalmazott vizes kezelések (és 0 cm=kétfázisú talaj; -30 cm=a felszíntől -30 cm-en beállított vízszint;-60 cm = a felszíntől -60 cm-en beállított vízszint) optimális stratégiájának megválasztása kompromisszumot igényel a terméshozam (mennyiség) és a minőség (pl. Zeleny-index) között, mivel a minőségjavító stresszhatások gyakran hozamcsökkenéssel járhatnak.

Statisztikai alátámasztás: A Games-Howell post-hoc tesztek szerint a Zeleny-érték esetében a mérsékelt stressz, különösen a 9 napos kezelés a -60 cm-es vízszintnél, szignifikánsan javította a minőséget (pl. 2021, -60 cm, 9 nap vs. 3 és 6 nap: p = 0,031 és p = 0,004). Ugyanezen körülmények között (pl. 2021, -60 cm, 9 nap), a hozam nem mutatott szignifikáns eltérést a kontrollhoz képest a Welch-féle t-próba szerint (p = 0,4032). Ez azt jelzi, hogy a minőségjavulás nem feltétlenül társul hozamnövekedéssel, sőt, más esetekben a hozam csökkenhet is. A 2021-es évben a 0 cm-es vízszint mellett a 6 napos kezelés szignifikánsan csökkentette a hozamot (p = 0,0496), míg a 9 és 12 napos kezelések növelték (p = 0,009, p = 0,034). Ez a dilemmát hangsúlyozza a gazdálkodási döntésekben.

6. Tézis: A vizsgálataimmal igazoltam, hogy a felszíntől mérve folyamatosan -60 cm-en tartott vízszint hatása az őszi búza minőségi és mennyiségi paramétereire nem konzisztensen kedvező, hanem erősen évjárat- és paraméterfüggő, gyakran kedvezőtlen, de kivételesen előnyös is lehet.

Statisztikai alátámasztás: A Games-Howell és Welch-féle t-próbák eredményei alapján a „Folyamatos” kezelés hatása változatos:

Fehérje: 2021-ben -60 cm-es vízszintnél a folyamatos kezelés szignifikánsan alacsonyabb fehérjetartalmat eredményezett, mint a 9 és 12 napos kezelések (p = 0,009 és p = 0,035). Ezzel szemben 2019-ben -60 cm-en a folyamatos kezelés szignifikánsan magasabb fehérjetartalmat mutatott, mint a 3 és 12 napos kezelések (p < 0,001 és p = 0,038).

Zeleny-érték: 2020-ban -60 cm-en a folyamatos kezelés szignifikánsan rosszabb volt, mint a 12 napos ($p = 0,004$). Míg 2019-ben ugyanezen vízmélységnél a folyamatos kezelés szignifikánsan jobb volt, mint a 3 napos ($p < 0,0001$).

Hozam: 2021-ben -60 cm-en a folyamatos elárasztás szignifikánsan alacsonyabb hozamot eredményezett, mint a 12 napos kezelés ($p = 0,005$). Viszont 2020-ban -60 cm-en a folyamatos elárasztás szignifikánsan jobb volt, mint a 3 napos ($p = 0,026$) és a 9 napos ($p = 0,003$) kezelés. Ez a mintázat aláhúzza a folyamatos kezelés kockázatos és évjárat-specifikus jellegét.

7. Tézis: 2. fokú polinomiális regressziós modellel bizonyítottam, hogy a SPAD érték GNDVI (4,83 Átlagos Abszolút Hibával, MAE) indexszel és a BNDVI (4,71 MAE) indexszel becsülhető.

A függvények alapján, ha van egy UAV-ból származó GNDVI vagy BNDVI érték, akkor a SPAD értéket (relatív klorofilltartalmat) 4,83 átlagos abszolút hibával a GNDVI-ra és 4,71 átlagos abszolút hibával a BNDVI-ra becsülhetünk hasonló érzékenységgű kamera használatával búzára.

A SPAD és GNDVI kapcsolatára:

2020 egész adathalmazra ($n=440$)

$$\text{GNDVI} = (-177.25 * \text{GNDVI}^2) + (235.27 * \text{GNDVI}) + (-25.64)$$

$$\text{BNDVI} = (-167.54 * \text{BNDVI}^2) + (246.17 * \text{BNDVI}) + (-38.15)$$

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat célja az őszi búza (*Triticum aestivum* L.) vízborítással szembeni válaszreakcióinak vizsgálata volt, különös tekintettel a vízmélység és az előntés időtartamának hatására. A téma jelentősége abban áll, hogy a klímaváltozás következtében egyre gyakoribbá váló extrém csapadékesemények és vízháztartási zavarok, mint például a belvíz, komoly kihívást jelentenek a gabonatermesztésben. A kutatás célkitűzése olyan vízgazdálkodási ajánlások megalapozása volt, amelyek figyelembe veszik a vízborítottság mértékét és időtartamát, és elősegítik a hozam és a termés minőségének optimalizálását.

Az irodalmi áttekintés során bemutatásra kerültek a vízstressz fiziológiai hatásai, különös tekintettel a gyökérszóna levegőellátottságára, a fotoszintézisre és a nitrogénmetabolizmusra gyakorolt következményekre. Részletesen ismertetésre kerültek a vegetációs indexek szerepe, valamint a SPAD-mérés, mint a klorofilltartalom becslésére alkalmas eszköz. A nemzetközi kutatási eredmények alapján megalapozott hipotézisként fogalmazódott meg, hogy az enyhe, időben korlátozott vízstressz javíthatja a termés minőségi paramétereit. A kísérletet kontrollált környezetben, liziméteres rendszerben hajtottuk végre három éven keresztül. A kezelések 0 cm (felszíni előntés), -30 cm és -60 cm vízszint mellett 3, 6, 9 és 12 napos előntési időtartamokat foglaltak magukban, valamint szerepelt egy kontroll (öntözés nélküli) csoport is. A vizsgálatok során mértük a terméshozamot, a fehérjetartalmat, a siker- és Zeleny-indexet, valamint vegetációs indexeket és SPAD-értékeket is rögzítettünk. A mérési adatok feldolgozásához többváltozós statisztikai módszereket (MANOVA, ANOVA, Welch-próba, Games–Howell post-hoc teszt) alkalmaztunk.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a hozamot elsődlegesen az évjáráti körülmények és a vízmélység befolyásolta, míg az időtartam hatása kevésbé volt kifejezett. A minőségi paraméterek – különösen a fehérje és a Zeleny-index – érzékenyebben reagáltak a kezelésekre, különösen a -60 cm-es vízszint és a 9 napos tartam kombinációjára. A vizsgálatok igazolták, hogy a túl rövid (3 nap) vagy a túl hosszú (folyamatos) elárasztás nem kedvező, míg a mérsékelt idejű, közepes mélységű vízstressz javíthatja a minőséget. A kutatás fő következtetése, hogy nincs minden évjáratra egységesen alkalmazható optimális kezelés, ugyanakkor a 9 napos előntés -60 cm-es vízszinten több évben is előnyös hatású volt. A 3 napos kezelés szinte minden esetben alacsonyabb fehérjetartalmat eredményezett. A vegetációs indexek és a SPAD-mérés összehasonlítása alapján a GNDVI mutatta a legerősebb kapcsolatot a klorofilltartalommal, így a jövőben precíziós eszközként alkalmazható lehet a vízstressz korai detektálására. A dolgozat új tudományos eredményei között szerepel a vegetációs indexek és a SPAD-érték közötti kapcsolat kvantitatív modellezése, az eltérő vízszintek és időtartamok hatásának statisztikai validálása, valamint olyan kombinációk azonosítása, amelyek bizonyos évjáratokban minőségnövekedést eredményeztek. A kutatás egyedisége abban rejlik, hogy több évre kiterjedő, precíziós technikával támogatott, kontrollált környezetben zajló vízborításos kísérletre alapul.

Összefoglalva, a dolgozat hozzájárul a fenntartható búzatermesztés vízgazdálkodási gyakorlatának fejlesztéséhez. A klímaváltozás hatásainak kezelésére olyan javaslatokat tesz, amelyek figyelembe veszik a környezeti variabilitást, és lehetővé teszik a termésminőség célzott

befolyásolását. Az eredmények gyakorlati jelentőséggel bírnak a precíziós mezőgazdaságban alkalmazható döntéstámogató rendszerek fejlesztéséhez is.

8. SUMMARY

The objective of the dissertation was to investigate the response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to inundation, with particular emphasis on the effects of water depth and duration of flooding. The significance of the topic lies in the fact that, due to climate change, extreme precipitation events and disruptions in water balance, such as inland water excess are becoming increasingly frequent and pose considerable challenges to cereal crop production. The aim of the research was to provide a scientific basis for water management recommendations that take into account the extent and duration of waterlogging, thereby supporting the optimization of both yield and grain quality.

The literature review covered the physiological effects of water stress, focusing in particular on root zone aeration, photosynthesis, and nitrogen metabolism. The role of vegetation indices and the use of SPAD measurement as a non-destructive tool to estimate chlorophyll content were also discussed in detail. Based on international research findings, the working hypothesis of the study posited that mild and temporally limited water stress may enhance certain grain quality parameters. The experiment was conducted over three years under controlled conditions using a lysimeter system. Treatments included water levels of 0 cm (surface flooding, waterlogging), -30 cm, and -60 cm, combined with durations of 3, 6, 9, and 12 days, alongside a control group that received no inundation. Measurements included yield, grain protein content, gluten content, Zeleny sedimentation index, as well as vegetation indices and SPAD values. Data analysis was performed using multivariate statistical methods, including MANOVA, ANOVA, Welch tests, and the Games–Howell post-hoc procedure.

Based on the results, it was found that yield was primarily influenced by the growing season and water depth, while the effect of duration was less pronounced. In contrast, quality parameters especially protein content and the Zeleny index responded more sensitively to treatment combinations, particularly under -60 cm water depth and a 9-day duration. The findings confirmed that both very short (3-day) and excessively long (continuous) flooding treatments were generally unfavorable, while moderate water stress of intermediate duration and depth appeared to improve grain quality.

A key conclusion of the study is that no universally optimal treatment exists across all years; however, the combination of -60 cm water depth with a 9-day duration proved beneficial in multiple years. The 3-day treatment consistently resulted in lower protein content. Among the vegetation indices studied, GNDVI exhibited the strongest relationship with SPAD-measured chlorophyll content, indicating its potential for use as a reliable early indicator of water stress in precision agriculture. The scientific contributions of this dissertation include the quantitative modeling of the relationship between vegetation indices and SPAD values, the statistical validation of the effects of varying water levels and durations, and the identification of specific treatment combinations that resulted in improved grain quality under certain growing conditions. The uniqueness of this study lies in its multi-year, controlled-environment approach, supported by precision monitoring technologies.

In summary, this dissertation contributes to the development of sustainable water management practices in wheat production. It proposes adaptive strategies that account for environmental variability and support the targeted improvement of grain quality under water stress conditions. The findings hold practical relevance for the development of decision-support systems in precision agriculture.

M1.: IRODALOMJEGYZÉK

1. Abbasi, H., Emam-Djomeh, Z., Ardabili, S.M.S., 2014. Artificial Neural Network Approach Coupled with Genetic Algorithm for Predicting Dough Alveograph Characteristics. *Journal of Texture Studies* 45, 110–120. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12054>
2. Alao, A.N., Ayinde, K., Solomon, G.S., 2019. A comparative study on sensitivity of multivariate tests of normality to outliers. *ASM Science Journal* 12, 65–71.
3. Anne Frank Joe, A., Gopal, A., Pandian, R., 2020. Performance evaluation of chemometric prediction models-key components of wheat grain. *Journal of Scientific and Industrial Research* 79, 148–152.
4. Araki, H., Hamada, A., Hossain, Md.A., Takahashi, T., 2012. Waterlogging at jointing and/or after anthesis in wheat induces early leaf senescence and impairs grain filling. *Field Crops Research* 137, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.006>
5. Arduini, I., Baldanzi, M., Pampana, S., 2019. Reduced Growth and Nitrogen Uptake During Waterlogging at Tillering Permanently Affect Yield Components in Late Sown Oats. *Front. Plant Sci.* 10, 1087. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01087>
6. Árendás, T., Németh, T., Radimsky, L., Bedő, Z., 2008. APPLICABILITY OF THE NMIN METHOD AS A FUNCTION OF THE YEAR, BASED ON THE RESULTS OF WHEAT EXPERIMENTS. *Cereal Research Communications* 36, 207–210.
7. Bagherikia, S., Soughi, H., Khodarahmi, M., Naghipour, F., 2025. The Effect of Sowing Dates on Grain Yield and Quality in Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Food Science & Nutrition* 13, e70035. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70035>
8. Bannari, A., Khurshid, K.S., Staenz, K., Schwarz, J., 2006. Wheat crop chlorophyll content estimation from ground-based reflectance using chlorophyll indices, in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.
9. Barabás, Z., 1987. A búzatermesztés kézikönyve. Mezőgazd. K., Budapest.
10. Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
11. Barić, M., Kereša, S., Šarčević, H., Habuš Jerčić, I., Horvat, D., Drezner, G., 2006. Influence of drought during the grain filling period to the yield and quality of winter wheat (*T. aestivum* L.), in: *Proceedings of 3rd International Congress FLOUR-BREAD '05 and 5th Croatian Congress of Cereal Technologist*. Prehrambeno tehnološki fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, pp. 19–24.
12. Bartlett, M.S., 1937. Properties of sufficiency and statistical tests. *Proc. R. Soc. Lond. A* 160, 268–282. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0109>
13. Becker, R.A., Chambers, J.M., Wilks, A.R., 1988. *The New S Language*. Wadsworth & Brooks/Cole.

14. Bedard-Haughn, A., 2009. Managing excess water in Canadian prairie soils: A review. *Can. J. Soil. Sci.* 89, 157–168. <https://doi.org/10.4141/CJSS07071>
15. Berk, A., Conforti, P., Hawes, F., 2015. An accelerated line-by-line option for MODTRAN combining on-the-fly generation of line center absorption within 0.1 cm⁻¹ bins and pre-computed line tails, in: Velez-Reyes, M., Kruse, F.A. (Eds.), . Presented at the SPIE Defense + Security, Baltimore, Maryland, United States, p. 947217. <https://doi.org/10.1117/12.2177444>
16. Bieńkowska, T., Suchowilska, E., Kandler, W., Krska, R., Wiwart, M., 2019. *Triticum polonicum* L. as potential source material for the biofortification of wheat with essential micronutrients. *Plant Genet. Resour.* 17, 213–220. <https://doi.org/10.1017/S1479262118000394>
17. Bíróné Dr. Kircsi, A., 2020. Súlyos aszály 2020 áprilisában. Tanulmányok. URL https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2808 (accessed 6.18.25).
18. Birth, G.S., McVey, G.R., 1968. Measuring the Color of Growing Turf with a Reflectance Spectrophotometer¹. *Agronomy Journal* 60, 640–643. <https://doi.org/10.2134/agronj1968.00021962006000060016x>
19. Bozán, C., Takács, K., Körösparti, J., Laborczi, A., Túri, N., Pásztor, L., 2018. Integrated spatial assessment of inland excess water hazard on the Great Hungarian Plain. *Land Degrad Dev* 29, 4373–4386. <https://doi.org/10.1002/ldr.3187>
20. Briggs, L.J., Schantz, H.L., 1913. The Water Requirements of Plants. I. Investigation in the Great Plains in 1910 and 1911. US. Dep., Agr. Bur. Plant Indr. Bull. 284., 1-49 pp. <https://scispace.com/pdf/water-requirement-of-plants-i-investigations-in-the-great-3f335yjguj.pdf>
21. Broeske, M., Conley, S., Gaska, J., Roth, A., 2020. Visual Guide: Winter Wheat Development and Growth Staging.
22. Broncano-Mateos, C.J., Pinilla, C., Gonzalez-Crespo, R., Castillo-Sanz, A., 2010. Relative Radiometric Normalization of Multitemporal images. *IJIMAI* 1, 53. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2010.139>
23. Canty, M.J., Nielsen, A.A., Schmidt, M., 2004. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 91, 441–451. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.10.024>
24. Chai, T., 2022. Root Mean Square, in: Daya Sagar, B.S., Cheng, Q., McKinley, J., Agterberg, F. (Eds.), *Encyclopedia of Mathematical Geosciences, Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–3. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26050-7_280-1
25. Chambers, J.M., Cleveland, W.S., Kleiner, B., Tukey, P.A., 1983. *Graphical Methods for Data Analysis*. Wadsworth & Brooks/Cole.

26. Chambers, J.M., Hastie, T. (Eds.), 1992. Statistical models in S, Wadsworth & Brooks/Cole computer science series. Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, Pacific Grove, Calif.
27. Chen, J., Yang, T.-T., Yan, S.-H., Yong, Y.-D., Zhang, S.-Y., Li, W.-Y., 2024. Effects of waterlogging at jointing stage on starch particle size distribution and pasting properties of soft wheat. *Acta Agronomica Sinica(China)* 50, 1877–1884. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2024.31072>
28. Chiu, T.-Y., 2019. Understanding Generalized Whitening and Coloring Transform for Universal Style Transfer, in: 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Presented at the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Seoul, Korea (South), pp. 4451–4459. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00455>
29. Cho, Y.-S., Lim, H.-S., 2018. Comparison of various estimation methods for the parameters of Michaelis-Menten equation based on *in vitro* elimination kinetic simulation data. *Transl Clin Pharmacol* 26, 39. <https://doi.org/10.12793/tcp.2018.26.1.39>
30. Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E., 2004. Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing* 25, 1565–1596. <https://doi.org/10.1080/0143116031000101675>
31. Csorba, P., 2021. Magyarország kistájai. Meridián Táj- és Környezetföldrajzi Alapítvány, Debrecen.
32. Dag, O., Kasikci, M., Yilmaz, M.A., Weerahandi, S., Ananda, M.M.A., 2024. twowaytests: An R package for two-way tests in independent groups designs. *SoftwareX* 27, 101862. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101862>
33. Dakin, J.P., Brown, R.G.W. (Eds.), 2017. Handbook of Optoelectronics: Concepts, Devices, and Techniques Volume one, 2nd ed. CRC Press, Second edition. | Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press,. <https://doi.org/10.1201/9781315157009>
34. Daliman, S., Anak Michael, M.J., Rendra, P.P.R., Sukiyah, E., Hadian, M.S.D., Sulaksana, N., 2024a. Dual Vegetation Index Analysis and Spatial Assessment in Kota Bharu, Kelantan using GIS and Remote Sensing. *BIO Web Conf.* 131, 05009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413105009>
35. Daliman, S., Anak Michael, M.J., Rendra, P.P.R., Sukiyah, E., Hadian, M.S.D., Sulaksana, N., 2024b. Dual Vegetation Index Analysis and Spatial Assessment in Kota Bharu, Kelantan using GIS and Remote Sensing. *BIO Web Conf.* 131, 05009. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413105009>
36. Dang, T.X., Nguyen, P.T., Nguyen, T.A., Tran, H.V.V., 2024. Optimization of Barrette Wall Depths for Urban Excavation Stability Using FEM and ANOVA Testing. *cea* 12, 3530–3544. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120529>

37. De San Celedonio, R.P., Abeledo, L.G., Miralles, D.J., 2014. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley. *Plant Soil* 378, 265–277. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2028-6>
38. Den Besten, N., Steele-Dunne, S., De Jeu, R., Van Der Zaag, P., 2021. Towards Monitoring Waterlogging with Remote Sensing for Sustainable Irrigated Agriculture. *Remote Sensing* 13, 2929. <https://doi.org/10.3390/rs13152929>
39. Ding, J., Huang, Z., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., Guo, W., 2018. Does cyclic water stress damage wheat yield more than a single stress? *PLoS ONE* 13, e0195535. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195535>
40. Ding, J., Liang, P., Wu, P., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., Gao, D., Chen, Y., Guo, W., 2020. Effects of waterlogging on grain yield and associated traits of historic wheat cultivars in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. *Field Crops Research* 246, 107695. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107695>
41. Dövényi, Z. (Ed.), 2010. Magyarország kistájainak katasztere, 2., átd. és bőv. kiadás. ed. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest.
42. Dowell, F.E., Maghirang, E.B., Xie, F., Lookhart, G.L., Pierce, R.O., Seabourn, B.W., Bean, S.R., Wilson, J.D., Chung, O.K., 2006. Predicting Wheat Quality Characteristics and Functionality Using Near-Infrared Spectroscopy. *Cereal Chem* 83, 529–536. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0529>
43. Du, Y., Teillet, P.M., Cihlar, J., 2002. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote Sensing of Environment* 82, 123–134. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00029-9)
44. Du, Z., Li, X., Miao, J., Huang, Y., Shen, H., Zhang, L., 2024. Concatenated Deep-Learning Framework for Multitask Change Detection of Optical and SAR Images. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* 17, 719–731. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3333959>
45. Eckert, B., Amend, T., Belitz, H.-D., 1993. The course of the SDS and Zeleny sedimentation tests for gluten quality and related phenomena studied using the light microscope. *Z Lebensm Unters Forch* 196, 122–125. <https://doi.org/10.1007/BF01185570>
46. Elvidge, C.D., Yuan, D., Ridgeway D., W., S. Lunetta, R., 1995. Relative radiometric normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) data using an automatic scattergram-controlled regression. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61(10), 1255–1260. <https://doi.org/10.14358/PERS.61.10.1255>
47. Elzenga, J.T.M., Van Veen, H., 2010. Waterlogging and Plant Nutrient Uptake, in: Mancuso, S., Shabala, S. (Eds.), *Waterlogging Signalling and Tolerance in Plants*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 23–35. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10305-6_2
48. Erdődiné Molnár, Z., Kovács, A., 2021. Aszályos, fagykáros tavasz után nyári csapadéktöbblet – 2020-as év agrometeorológiai áttekintése. *Tanulmányok*. URL

- https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2963&hir=Aszalyos,_fagykaros_tavasz_utan_nyari_csapadektobbet_%E2%80%93_2020-as_ev_agrometeorologiai_attekintese (accessed 6.18.25).
49. Erdődiné Molnár, Z., Kovács, A., 2020. 2019-es év agrometeorológiai áttekintése. Tanulmányok. URL https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2727 (accessed 6.18.25).
 50. Eurostat, 2025. Production value of cereals in Hungary from 2018 to 2024 (in million euros).
 51. FAO, 2013. Dietary protein quality evaluation in human nutrition: report of an FAO Expert Consultation [on Protein Quality Evaluation in Human Nutrition], 31 March - 2 April, 2011, Auckland, New Zealand, FAO food and nutrition paper. Presented at the Expert Consultation on Protein Quality Evaluation in Human Nutrition, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
 52. Fehér, F., Horváth, J., Ondruss, L., 1986. Területi vízrendezés. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
 53. Feng, K.K., Zhang, Y.F., Feng, M.C., Wang, H.Y., Wang, C., Yang, W.D., 2022. COMBINED NITROGEN AND PHOSPHORUS APPLICATION SYNERGISTICALLY REGULATE GRAIN YIELD AND PROTEIN CONTENT IN WINTER WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.). *Appl. Ecol. Env. Res.* 20, 1599–1611. https://doi.org/10.15666/aecer/2002_15991611
 54. FOSS, 2014. InfratecTM NOVA Grain Analyser for grain and flour.
 55. Foss Analytical, 2023. InfratecTM NOVA Grain Analyzer Manual. Foss Analytical A/S, Hillerød, Denmark.
 56. Fox, J., Weisberg, S., 2019. An R Companion to Applied Regression, Third. ed. Sage Publications.
 57. Freebody, M., 2024. Chip-Scale Visible Sources Aim to Release Quantum Technology from the Lab. *Photonics Spectra* 58, 38–44. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85203983601&origin=inward&txGid=84bad1af2d7da1be473f08211ac799b8>
 58. Fu, H., Lin, F., 2007. Modification of Bartlett's statistic. *Jixie Qiangdu/Journal of Mechanical Strength* 29, 237–240.
 59. Gagolewski, M., 2024. stringi: Fast and Portable Character String Processing Facilities.
 60. Gaile, Z., Bankina, B., Pluduma-Paunina, I., Sterna, L., Bimsteine, G., Svarta, A., Kaneps, J., Arhipova, I., Sutka, A., 2023. Performance of Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Depending on Fungicide Application and Nitrogen Top-Dressing Rate. *Agronomy* 13, 318. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020318>

61. Gaj, R., Górski, D., Przybył, J., 2012. Effect of differentiated phosphorus and potassium fertilization on winter wheat yield and quality. *J. Elem.* <https://doi.org/10.5601/jelem.2013.18.1.04>
62. Gál, N., Tóth, T.M., Raucsik, B., Földes, T., Farsang, A., 2017. Effects of inland excess water on bulk density and clay mineralogy of a chernozem soil using xrt and xprd techniques. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 12, 189–196.
63. Gatys, L.A., Ecker, A.S., Bethge, M., 2016. Image Style Transfer Using Convolutional Neural Networks, in: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Presented at the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Las Vegas, NV, USA, pp. 2414–2423. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.265>
64. Géczi, G., Kicsiny, R., Korzenszky, P., 2019. Modified effectiveness and linear regression based models for heat exchangers under heat gain/loss to the environment. *Heat Mass Transfer* 55, 1167–1179. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2495-z>
65. Ghosh, S., Mistri, B., 2020. Drainage induced waterlogging problem and its impact on farming system: a study in Gosaba Island, Sundarban, India. *Spat. Inf. Res.* 28, 709–721. <https://doi.org/10.1007/s41324-020-00328-8>
66. Gombos, B., Szalókiné Zima, I., Csengeri, E., 2022. Characteristics of Groundwater Level in the Szarvas-Békésszentandrás Oxbow Subbasin. *Columella* 9, 13–21. <https://doi.org/10.18380/SZIE.COLUM.2022.9.2.13>
67. Gordillo-Salinas, V.M., Flores-Magdaleno, H., Ortiz-Solorio, C.A., Arteaga-Ramírez, R., 2021. Evaluation of nitrogen status in a wheat crop using unmanned aerial vehicle images. *Chil. j. agric. res.* 81, 408–419. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392021000300408>
68. Gorinoiu, G., Petolescu, C., Agapie, A.L., Buzna, C., Rain, P., Horablaga, N.M., Horablaga, A., Samfira, I., Boldea, M.V., Petrescu, I., Sarac, I., Onisan, E., 2025. Yield, Protein, and Starch Equilibrium of Indigenous Varieties: An Open Door for Computational Breeding in Enhancing Selection Strategies. *Agronomy* 15, 1280. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061280>
69. Grabowski, J., Brzozowska, I., Brzozowski, J., Cymes, I., 2014. Effect of some meteorological parameters on yields and the content of macroelements in winter wheat grain. *J. Elem.* <https://doi.org/10.5601/jelem.2014.19.1.637>
70. Győri, Z., 2015. Az őszi búza ásványi elem-tartalmának változása Magyarországon 1839-től napjainkig. *Agrokem* 64, 189–198. <https://doi.org/10.1556/0088.2015.64.1.13>
71. Győri Zoltán., Mile Irma, Győriné., 2011. A búza és kukorica minősége és feldolgozása. Szaktudás, Budapest.
72. Hall, F.G., Strebel, D.E., Nickeson, J.E., Goetz, S.J., 1991. Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment* 35, 11–27. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90062-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90062-B)

73. Hamazaspyan, M., Navasardyan, S., 2023. Diffusion-Enhanced PatchMatch: A Framework for Arbitrary Style Transfer with Diffusion Models, in: 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Presented at the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), IEEE, Vancouver, BC, Canada, pp. 797–805. <https://doi.org/10.1109/CVPRW59228.2023.00087>
74. Hand, D.J., Taylor, C.C., 1987. *Multivariate Analysis of Variance and Repeated Measures*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3143-5>
75. Hao, Z., Shi, Y., 2023. A Comparative Study of Fourier Transform Near-Infrared Spectroscopy and Physicochemical Methods in Wheat Quality Analysis. *Applied Sciences* 13, 11368. <https://doi.org/10.3390/app132011368>
76. Harper, R.J., Dell, B., Ruprecht, J.K., Sochacki, S.J., Smettem, K.R.J., 2021. Salinity and the reclamation of salinized lands, in: *Soils and Landscape Restoration*. Elsevier, pp. 193–208. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00007-2>
77. Hassan, M.M., Jahan, C.S., Cheong, J.-Y., Hamm, S.-Y., 2023. Hydrogeological characteristics of waterlogged areas in Natore District, Bangladesh. *Hydrogeol J* 31, 557–570. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02585-3>
78. Hellriegel, H., 1883. *Beiträge zu den Naturwissenschaftlichen Grundlagen des Ackerbaus*. Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.
79. Henrich, V., Jung, A., Götze, C., Sandow, C., Thürkow, D., Glaesser, C., 2009. Development of an online indices database: Motivation, concept and implementation. Presented at the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop Innovative Tool for Scientific and Commercial Environment Applications, Tel Aviv, Israel.
80. Henze, N., Zirkler, B., 1990. A class of invariant consistent tests for multivariate normality. *Communications in Statistics - Theory and Methods* 19, 3595–3617. <https://doi.org/10.1080/03610929008830400>
81. Herzog, M., Striker, G.G., Colmer, T.D., Pedersen, O., 2016. Mechanisms of waterlogging tolerance in wheat – a review of root and shoot physiology. *Plant Cell & Environment* 39, 1068–1086. <https://doi.org/10.1111/pce.12676>
82. Hodson, T.O., 2022. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geosci. Model Dev.* 15, 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>
83. Hollis, J., Lilly, A., 2023. The pedology of anaerobic soils, in: *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, pp. 398–416. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00090-2>
84. Hong, D., Zhang, B., Li, H., Li, Y., Yao, J., Li, C., Werner, M., Chanussot, J., Zipf, A., Zhu, X.X., 2023. Cross-city matters: A multimodal remote sensing benchmark dataset for cross-city semantic segmentation using high-resolution domain adaptation networks. *Remote Sensing of Environment* 299, 113856. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113856>

85. Horvat, D., Đukić, N., Magdić, D., Mastilović, J., Šimić, G., Torbica, A., Živančev, D., 2013. Characterization of bread wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) by glutenin proteins. *Cereal Research Communications* 41, 133–140. <https://doi.org/10.1556/CRC.2012.0021>
86. Horvat, D., Jurković, Z., Drezner, G., Šimić, G., Novoselović, D., Dvojković, K., 2006. Influence of gluten proteins on technological properties of Croatian wheat cultivars. *Cereal Research Communications* 34, 1177–1184. <https://doi.org/10.1556/CRC.34.2006.2-3.258>
87. Hruskova, M., Famera, O., 2003. Prediction of wheat and flour Zeleny sedimentation value using NIR technique. *Czech Journal of Food Sciences* 21, 91–96.
88. Hrušková, M., Švec, I., Karas, J., 2012. Solvent retention capacity values in relation to the Czech commercial wheat quality. *Int J of Food Sci Tech* 47, 2421–2428. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03118.x>
89. Hu, K., 2020. Become Competent within One Day in Generating Boxplots and Violin Plots for a Novice without Prior R Experience. *MPs* 3, 64. <https://doi.org/10.3390/mps3040064>
90. Huang, X., Belongie, S., 2017. Arbitrary Style Transfer in Real-Time with Adaptive Instance Normalization, in: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Presented at the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Venice, pp. 1510–1519. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.167>
91. Huang, Y., Peng, J., Chen, N., Sun, W., Du, Q., Ren, K., Huang, K., 2023. Cross-scene wetland mapping on hyperspectral remote sensing images using adversarial domain adaptation network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 203, 37–54. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.07.009>
92. Huete, A., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 59, 440–451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
93. Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
94. Hunt Jr., E.R., Daughtry, C.S.T., 2014. Chlorophyll meter calibrations for chlorophyll content using measured and simulated leaf transmittances. *Agronomy Journal* 106, 692–702.
95. Ibadzade, M., 2021. Assessing the impact of irrigation with agricultural wastewater on aerobic rice (*Oryza sativa* L.). *Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem*. <https://doi.org/10.54598/000840>
96. Iwabuchi, T., Matsue, Y., Matsunaka, H., 2011. Factors causing Fluctuation in Grain Protein Content of Bread Wheat Cultivar “Minaminokaori.” *Jpn. J. Crop Sci.* 80, 403–407. <https://doi.org/10.1626/jcs.80.403>
97. Jancsó, M., 2019. Nemzeti Agrárkutatói és Innovációs Központ Öntözési és Vízgazdálkodási Kutatóintézet (NAIK ÖVKI) Szarvas, in: *A Magyar Növénynevelés Az Ezredfordulón (1990-2018)*. Agroinform Kiadó, Budapest, pp. 73–74.

98. Jia, J., Chi-Keung Tang, 2005. Tensor voting for image correction by global and local intensity alignment. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 27, 36–50. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.20>
99. Jiang, J., Zhang, Q., Wang, W., Wu, Y., Zheng, H., Yao, X., Zhu, Y., Cao, W., Cheng, T., 2022. MACA: A Relative Radiometric Correction Method for Multiflight Unmanned Aerial Vehicle Images Based on Concurrent Satellite Imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 60, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3158644>
100. Jiang, X., Mao, D., Zhu, M., Wang, X., Li, C., Zhu, X., Guo, W., Ding, J., 2022. Evaluating the Waterlogging Tolerance of Wheat Cultivars during the Early Growth Stage Using the Comprehensive Evaluation Value and Digital Image Analysis. *Agriculture* 12, 384. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030384>
101. Jiaya Jia, Chi-Keung Tang, 2003. Image registration with global and local luminance alignment, in: *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision. Presented at the ICCV 2003: 9th International Conference on Computer Vision*, IEEE, Nice, France, pp. 156–163 vol.1. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2003.1238331>
102. Jin-tao, C., Guang-cheng, S., Larona, K., Jia, L., Ji-hui, D., Shuang'en, Y., Gerrit, H., 2020. Gas exchange traits, growth and yield attributes in winter wheat under waterlogging stress during anthesis. *International Journal of Agriculture and Biology* 24, pp.179-187. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1422>
103. Johnson, J., Alahi, A., Fei-Fei, L., 2016. Perceptual Losses for Real-Time Style Transfer and Super-Resolution, in: *Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. (Eds.), Computer Vision – ECCV 2016, Lecture Notes in Computer Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 694–711. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46475-6_43
104. Jolánkai, M., 1982. *Őszibúza-fajták tápanyag- és vízhasznosítása. Kandidátusi értekezés (Kandidátusi értekezéslet)*. Budapest.
105. Jordan, C.F., 1969. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology* 50, 663–666. <https://doi.org/10.2307/1936256>
106. Jr, F.E.H., Dupont, C., 2024. *Hmisc: Harrell Miscellaneous*.
107. Jun Pan, Mi Wang, Deren Li, Junli Li, 2010. A Network-Based Radiometric Equalization Approach for Digital Aerial Orthoimages. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 7, 401–405. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2009.2037442>
108. Kadar, R., Muntean, L., Racz, I., Ona, A., Ceclan, A., Hirişcău, D., 2018. The Effect of Genotype, Climatic Conditions and Nitrogen Fertilization on Yield and Grain Protein Content of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Not Bot Horti Agrobo* 47, 515–521. <https://doi.org/10.15835/nbha47211376>
109. Kang, S., Gu, B., Du, T., Zhang, J., 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural Water Management* 59, 239–254. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00150-6)

110. Karras, T., Aittala, M., Laine, S., Härkönen, E., Hellsten, J., Lehtinen, J., Aila, T., 2021. Alias-Free Generative Adversarial Networks. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2106.12423>
111. Kaur, A., Pannu, R.K., Buttar, G.S., 2010. Quality of wheat (*Triticum aestivum*) as influenced by sowing dates and nitrogen scheduling. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 80, 781–785.
112. Kim, S.J., Pollefeys, M., 2008. Robust Radiometric Calibration and Vignetting Correction. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 30, 562–576. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.70732>
113. Kitonga-Mwanza, L.L.M., Swiader, J., Mulwa, R.M.S., 2011. Evaluation of SPAD chlorophyll fluorescence for on-site nitrogen assessment in drip fertigated sweet corn. *Journal of Applied Horticulture* 13, 30–34.
114. Kline, S.J., McClintock, F.A., 1953. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. *Mechanical Engineering* 75, 3–8.
115. Kolozsvári, I., 2023. Intenzív üzemű halnevelő telep elfolyóvizének öntözéses hasznosítása rövid vágásfordulójú energiahűz ültetvényben és szemescirok kultúrákban (PhD-értekezés). Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem (MATE).
116. Kondić-Špika, A., Mladenov, N., Grahovac, N., Zorić, M., Mikić, S., Trkulja, D., Marjanović-Jeromela, A., Miladinović, D., Hristov, N., 2019. Biometric Analyses of Yield, Oil and Protein Contents of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Genotypes in Different Environments. *Agronomy* 9, 270. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060270>
117. Körösparti, J., Bozán, C., Túri, N., Kerezsi, G., Kajári, B., Pásztor, L., Laborzci, A., 2019. Kedvezőtlen vízgazdálkodási állapotú mezőgazdaságilag művelt területek nagy felbontású belvív-veszélyeztetettség és kockázati térképezése a 10.07. belvízvédelmi szakasz területén (Technikai Jelentés). NAIK Öntözési és Vízgazdálkodási Kutatóintézet (ÖVKI); MTA Agrár- és Technológiai Kutatóközpont (ATK), Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet (TAKI), Szarvas, Magyarország.
118. Kozák, P., 2006. A belvízjárás összefüggéseinek vizsgálata az Alföld délkeleti részén, a vízgazdálkodás európai elvárásainak tükrében (Doctoral dissertation). Doctoral School of Geosciences, University of Szeged.
119. Krzanowski, W.J., Marriott, F.H.C., 1994. *Multivariate Analysis. Part I: Distributions, Ordination and Inference.* Edward Arnold.
120. KSH, 2025a. Distribution of cereal production in Hungary in 2021.
121. KSH, 2025b. Fontosabb szántóföldi növények termésátlaga [kg/hektár] és termésterülete.
122. Kun, Á., 2018. Intenzív üzemű halnevelő-telepről származó szennyvíz mezőgazdasági elhelyezésének és hasznosításának vizsgálata energiahűz kísérletben (PhD). Szegedi Tudományegyetem, Szeged, Hungary. <https://doi.org/10.14232/phd.4171>

123. Kurt Polat, P.O., Yagdi, K., 2017. INVESTIGATION OF RELATIONSHIP BETWEEN SOME QUALITY CHARACTERS OF WINTER WHEAT GENOTYPES. *Turkish Journal Of Field Crops*. <https://doi.org/10.17557/tjfc.311016>
124. Kyratzis, A.C., Skarlatos, D.P., Menexes, G.C., Vamvakousis, V.F., Katsiotis, A., 2017. Assessment of Vegetation Indices Derived by UAV Imagery for Durum Wheat Phenotyping under a Water Limited and Heat Stressed Mediterranean Environment. *Front. Plant Sci.* 8, 1114. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01114>
125. Lamina, C., Sturm, G., Kollerits, B., Kronenberg, F., 2012. Visualizing interaction effects: a proposal for presentation and interpretation. *Journal of Clinical Epidemiology* 65, 855–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2012.02.013>
126. Lásztity Radomir, 1981. *Gabonafehérjék*. Mezőgazdasági K., Budapest.
127. Lee, S., Lee, D.K., 2018. What is the proper way to apply the multiple comparison test? *Korean J Anesthesiol* 71, 353–360. <https://doi.org/10.4097/kja.d.18.00242>
128. Li, D., Wang, M., Pan, J., 2006. Auto-dodging processing and its application for optical RS images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* 31, 753–756.
129. Li, J., Li, Q., Guo, N., Xian, Q., Lan, B., Nangia, V., Mo, F., Liu, Y., 2024. Polyamines mediate the inhibitory effect of drought stress on nitrogen reallocation and utilization to regulate grain number in wheat. *Journal of Experimental Botany* 75, 1016–1035. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad393>
130. Li, X., Cai, J., Liu, F., Dai, T., Cao, W., Jiang, D., 2014. Physiological, proteomic and transcriptional responses of wheat to combination of drought or waterlogging with late spring low temperature. *Functional Plant Biol.* 41, 690. <https://doi.org/10.1071/FP13306>
131. Li, X., Feng, R., Guan, X., Shen, H., Zhang, L., 2019. Remote Sensing Image Mosaicking: Achievements and Challenges. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 7, 8–22. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2921780>
132. Li, X., Hui, N., Shen, H., Fu, Y., Zhang, L., 2015. A robust mosaicking procedure for high spatial resolution remote sensing images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 109, 108–125. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.009>
133. Li, Y., Kong, D., Zhang, Y., Tan, Y., Chen, L., 2021. Robust deep alignment network with remote sensing knowledge graph for zero-shot and generalized zero-shot remote sensing image scene classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 179, 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.08.001>
134. Li, Y., Shi, T., Zhang, Y., Ma, J., 2023. SPGAN-DA: Semantic-Preserved Generative Adversarial Network for Domain Adaptive Remote Sensing Image Semantic Segmentation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 61, 1–17. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3313883>
135. Liangpei Zhang, Chen Wu, Bo Du, 2014. Automatic Radiometric Normalization for Multitemporal Remote Sensing Imagery With Iterative Slow Feature Analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 52, 6141–6155. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2295263>

136. Ling, Q., Huang, W., Jarvis, P., 2011. Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*. *Photosynthesis Research* 107, 205–215.
137. Liu, A.-X., Zhu, J.-Q., Jin, T., 2013. Advance of the Research on Crop Suffering from Waterlogged Stress, in: 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications. Presented at the 2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications (ISDEA), IEEE, China, Hong Kong, pp. 227–230. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2012.59>
138. Liu, D., Shi, Y., 2013. Effects of Different Nitrogen Fertilizer on Quality and Yield in Winter Wheat. *AJFST* 5, 646–649. <https://doi.org/10.19026/ajfst.5.3141>
139. Liu, Q., Zhang, F., Chen, J., Li, Y., 2020. Water stress altered photosynthesis-vegetation index relationships for winter wheat. *Agronomy Journal* 112, 2944–2955. <https://doi.org/10.1002/agj2.20256>
140. Liu, W., Liu, J., Luo, B., 2023. Unsupervised Domain Adaptation for Remote-Sensing Vehicle Detection Using Domain-Specific Channel Recalibration. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 20, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2023.3314644>
141. Loch, J., Kiss, S., 2000. *Agrokémia BSc hallgatók számára*. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen University Press, Debrecen.
142. Luan, F., Paris, S., Shechtman, E., Bala, K., 2017. Deep Photo Style Transfer, in: 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Presented at the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Honolulu, HI, pp. 6997–7005. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.740>
143. Luo, M., Ji, S., 2022. Cross-spatiotemporal land-cover classification from VHR remote sensing images with deep learning based domain adaptation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 191, 105–128. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.07.011>
144. Lysimeter Research Group, 2025.
145. Ma, M., Li, Y., Xue, C., Xiong, W., Peng, Z., Han, X., Ju, H., He, Y., 2021. Current Situation and Key Parameters for Improving Wheat Quality in China. *Front. Plant Sci.* 12, 638525. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.638525>
146. Ma, X.-B., Lin, F.-C., Zhao, Y., 2015. An Adjustment to the Bartlett's Test for Small Sample Size. *Communications in Statistics - Simulation and Computation* 44, 257–269. <https://doi.org/10.1080/03610918.2013.773347>
147. Ma, Y., Chai, L., Jin, L., Yan, J., 2024. Hierarchical alignment network for domain adaptive object detection in aerial images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 208, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.01.005>
148. Ma, Y., Wei, J., Huang, X., 2022. Balancing Colors of Nonoverlapping Mosaicking Images With Generative Adversarial Networks. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 19, 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3126261>

149. Majeed, J.A., Mahmood, A., Bibi, S., Jabeen, A., Javaid, M.M., Ahmad, H.B., Nargis, J., 2023. Waterlogging and Crop Productivity, in: Hasanuzzaman, M. (Ed.), *Climate-Resilient Agriculture*, Vol 1. Springer International Publishing, Cham, pp. 237–256. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37424-1_11
150. Malik, A.I., Colmer, T.D., Lambers, H., Setter, T.L., Schortemeyer, M., 2002. Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat. *New Phytologist* 153, 225–236. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00318.x>
151. Marcheva, M., 2021. Yield and quality stability of common winter wheat varieties 27, 111–118.
152. Marcial-Pablo, M.D.J., Gonzalez-Sanchez, A., Jimenez-Jimenez, S.I., Ontiveros-Capurata, R.E., Ojeda-Bustamante, W., 2019. Estimation of vegetation fraction using RGB and multispectral images from UAV. *International Journal of Remote Sensing* 40, 420–438. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1528017>
153. Markelin, L., Honkavaara, E., Näsi, R., Viljanen, N., Rosnell, T., Hakala, T., Vastaranta, M., Koivisto, T., Holopainen, M., 2017. RADIOMETRIC CORRECTION OF MULTITEMPORAL HYPERSPECTRAL UAS IMAGE MOSAICS OF SEEDLING STANDS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-3/W3, 113–118. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W3-113-2017>
154. Marti, A., Augst, E., Cox, S., Koehler, P., 2015. Correlations between gluten aggregation properties defined by the GlutoPeak test and content of quality-related protein fractions of winter wheat flour. *Journal of Cereal Science* 66, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.10.010>
155. Martínez, D.E., Guiamet, J.J., 2004. Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie* 24, 41–46.
156. Md Noor, M.J., Mohamed Jais, I.B., Nyuin, J.D., 2011. Laboratory modelling: Settlement due to groundwater fluctuation in partially saturated soil. Presented at the Unsaturated Soils - Proceedings of the 5th International Conference on Unsaturated Soils, pp. 875–880.
157. Miao, J., Li, S., Bai, X., Gan, W., Wu, J., Li, X., 2025. RS-NormGAN: Enhancing change detection of multi-temporal optical remote sensing images through effective radiometric normalization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 221, 324–346. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.02.005>
158. Moder, K., 2022. Testing Interaction and Estimating Variance Components in Block Designs - Based on a Linear Model, in: Pilz, J., Oliveira, T.A., Moder, K., Kitsos, C.P. (Eds.), *Mindful Topics on Risk Analysis and Design of Experiments*. Springer International Publishing, Cham, pp. 135–146. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06685-6_10
159. Monostori, I., Árendás, T., Hoffman, B., Vágújfalvi, A., 2016. Relationship between SPAD value and grain yield can be affected by cultivar, environment and soil nitrogen content in wheat. *Euphytica* 210, 257–266.

160. Moradi, A., Ghaffari Novin, M., Bayat, M., 2024. A Comprehensive Systematic Review of the Effects of Photobiomodulation Therapy in Different Light Wavelength Ranges (Blue, Green, Red, and Near-Infrared) on Sperm Cell Characteristics in Vitro and in Vivo. *Reprod. Sci.* 31, 3275–3302. <https://doi.org/10.1007/s43032-024-01657-x>
161. Moran, M.S., Jackson, R.D., Slater, P.N., Teillet, P.M., 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment* 41, 169–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-V)
162. Muqaddasi, Q.H., Muqaddasi, R.K., Ebmeyer, E., Korzun, V., Argillier, O., Mirdita, V., Reif, J.C., Ganal, M.W., Röder, M.S., 2023. Genetic control and prospects of predictive breeding for European winter wheat's Zeleny sedimentation values and Hagberg-Perten falling number. *Theor Appl Genet* 136, 229. <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04450-7>
163. Murrell, P., 2005. *R Graphics*. Chapman & Hall/CRC Press.
164. Niaghi, A.R., Vand, R.H., Asadi, E., Majnooni-Heris, A., 2015. Evaluation of Single and Dual Crop Coefficient Methods for Estimation of Wheat And Maize Evapotranspiration. *Advances in Environmental Biology* 9, 963–971.
165. Oliveira, M., Sappa, A.D., Santos, V., 2015. A Probabilistic Approach for Color Correction in Image Mosaicking Applications. *IEEE Trans. on Image Process.* 24, 508–523. <https://doi.org/10.1109/TIP.2014.2375642>
166. OVF, 2018. *Vízkérelhárítási kézikönyv-18. Halastavak*. General Directorate of Water Management, Budapest.
167. Ozturk, A., Aydin, F., 2004. Effect of Water Stress at Various Growth Stages on Some Quality Characteristics of Winter Wheat. *J Agronomy Crop Science* 190, 93–99. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00080.x>
168. Pálfai, I., 2004. *Belvizek és aszályok Magyarországon: hidrológiai tanulmányok*. Közlekedési Dokumentációs Kft., Budapest.
169. Pan, J., Sharif, R., Xu, X., Chen, X., 2021. Mechanisms of Waterlogging Tolerance in Plants: Research Progress and Prospects. *Front. Plant Sci.* 11, 627331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331>
170. Pan, J., Zhu, Y., Cao, W., Dai, T., Jiang, D., 2006. Predicting the Protein Content of Grain in Winter Wheat with Meteorological and Genotypic Factors. *Plant Production Science* 9, 323–333. <https://doi.org/10.1626/pp.s.9.323>
171. Pang, Y., Wang, X., Zhao, M., Lu, Y., Yan, Q., Sun, S., Wang, Y., Liu, S., 2022. Identification and Validation of the Genomic Regions for Waterlogging Tolerance at Germination Stage in Wheat. *Agronomy* 12, 1848. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081848>

172. Pargaian, S., Prakash, R., Dubey, V.P., Singh, D., 2024. Crop cover identification based on different vegetation indices by using machine learning algorithms. *Environmental Research and Technology* 7, 422–434. <https://doi.org/10.35208/ert.1446909>
173. Park, J., Kim, Y., 2022. Styleformer: Transformer based Generative Adversarial Networks with Style Vector, in: 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Presented at the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, New Orleans, LA, USA, pp. 8973–8982. <https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00878>
174. Parvizi, Y., Ronaghi, A., Maftoun, M., Karimian, N.A., 2004. Growth, nutrient status, and chlorophyll meter readings in wheat as affected by nitrogen and manganese. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35, 1961–1976.
175. Pat S. ., C., Jr, 1996. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62(9), 1025-1036. <https://doi.org/DOI:10.14358/PERS.62.9.1025>
176. Pazos, J.M., Regalo, S.C.H., De Vasconcelos, P., Campos, J.A.D.B., Garcia, P.P.N.S., 2022. Effect of magnification factor by Galilean loupes on working posture of dental students in simulated clinical procedures: associations between direct and observational measurements. *PeerJ* 10, e13021. <https://doi.org/10.7717/peerj.13021>
177. Pearson, R.L., Miller, L.D., 1972. Remote Mapping of Standing Crop Biomass for Estimation of the Productivity of the Shortgrass Prairie, in: *Remote Sensing of Environment*, VIII. p. 1355.
178. Pepó, P., 2003. Effect of mineral fertilisation on the quality of winter wheat varieties on chernozem soil in the Hajdúság region of Hungary. *Növénytermelés* 52, 521–532.
179. Pepó, P., 1990. Őszi búzafajták trágyázása és öntözése (Kandidátusi értekezés). Debrecen.
180. Pepó, Péter, Győri, Z., Pepó, Pál, 1986. Agrotechnikai tényezők és az évjárat hatása az őszi búzafajták szemtermésének kémiai összetételére. *Növénytermelés* 17-24.
181. Petrasovits, I., 1988. *Az agrohidrológia főbb kérdései*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
182. Philpot, W., Ansty, T., 2013. Analytical Description of Pseudoinvariant Features. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 51, 2016–2021. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2227328>
183. Phuttisen, S., Srisodaphol, W., 2024. Detection of Outliers Method in Grouped Multivariate Data: A Method Based on Multiple Linear Regression. *Pak.j.stat.oper.res.* 445–453. <https://doi.org/10.18187/pjsor.v20i3.4575>
184. Pinkard, E.A., Patel, V., Mohammed, C., 2006. Chlorophyll and nitrogen determination for plantation-grown *Eucalyptus nitens* and *E. globulus* using a non-destructive meter. *Forest Ecology and Management* 236, 383–391.

185. Piotrowski, P., Rutyna, I., Baczyński, D., Kopyt, M., 2022. Evaluation Metrics for Wind Power Forecasts: A Comprehensive Review and Statistical Analysis of Errors. *Energies* 15, 9657. <https://doi.org/10.3390/en15249657>
186. Pitie, F., Kokaram, A., 2007. The linear Monge-Kantorovitch linear colour mapping for example-based colour transfer, in: IET 4th European Conference on Visual Media Production (CVMP 2007). Presented at the IET 4th European Conference on Visual Media Production (CVMP 2007), IEE, London, UK, pp. 23–23. <https://doi.org/10.1049/cp:20070055>
187. Pitie, F., Kokaram, A.C., Dahyot, R., 2005. N-dimensional probability density function transfer and its application to color transfer, in: Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1. Presented at the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05) Volume 1, IEEE, Beijing, China, pp. 1434-1439 Vol. 2. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2005.166>
188. Ploschuk, R.A., Miralles, D.J., Striker, G.G., 2021. Early- And late-waterlogging differentially affect the yield of wheat, barley, oilseed rape and field pea through changes in leaf area index, radiation interception and radiation use efficiency. *J Agronomy Crop Science* 207, 504–520. <https://doi.org/10.1111/jac.12486>
189. Pojić, M., Hadnadev, M., Dapčević, T., Mastilović, J., 2009. Uncertainty of determination of rheological properties of wheat dough by the alveograph method Proceedings of the 5th International Congress Flour-Bread '09. 7th Croatian Congress of Cereal Technologists, Opatija, Croatia, 21-23 October, 2009. Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Food Technology Osijek, Department of Cereal Processing Technology, Opatija, pp. 252–258.
190. Pongráczné Barancsi, Á., 2009. Őszi búzafajták extenzográfós és alveográfós paramétereinek vizsgálata, in: Doktori (Ph.D.) értekezés. DE AMTC MTK, Debrecen, p. 139.
191. Pongráczné Barancsi, Á., Mezei, Z., Győri, Z., Sípos, P., Boros, N., 2008. Szegedi őszi búza fajták alveográfós mutatói [elektronikus dokumentum], in: Polgár, J.P., Bene, S. (Eds.), XIV. Ifjúsági Tudományos Fórum. Pannon Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, Magyarország, pp. 1–5.
192. Posit Software, PBC, 2025. RStudio: Integrated Development Environment for R.
193. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48, 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
194. Qian, S., Huang, C., Cheng, B., Fu, X., 2021. New Technology and Tissue Repair and Regeneration (3): Application of Other New Technologies in Tissue Repair and Regeneration, in: Fu, X. (Ed.), *Regenerative Medicine in China*. Springer Singapore, Singapore, pp. 379–433. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1182-7_11
195. R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

196. Rasooli Sharabiani, V., Soltani Nazarloo, A., Taghinezhad, E., Veza, I., Szumny, A., Figiel, A., 2023. Prediction of winter wheat leaf chlorophyll content based on VIS / NIR spectroscopy using ANN and PLSR. *Food Science & Nutrition* 11, 2166–2175. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3071>
197. Reed, J.F., 2005. Contributions to two-sample statistics. *Journal of Applied Statistics* 32, 37–44. <https://doi.org/10.1080/0266476042000305140>
198. Robertson, D., Zhang, H., Palta, J.A., Colmer, T., Turner, N.C., 2009. Waterlogging affects the growth, development of tillers, and yield of wheat through a severe, but transient, N deficiency. *Crop Pasture Sci.* 60, 578. <https://doi.org/10.1071/CP08440>
199. Rodehutschord, M., Rückert, C., Maurer, H.P., Schenkel, H., Schipprack, W., Bach Knudsen, K.E., Schollenberger, M., Laux, M., Eklund, M., Siegert, W., Mosenthin, R., 2016. Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains from different genotypes. *Archives of Animal Nutrition* 70, 87–107. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2015.1133111>
200. Roider, J., Nguyen, A., Zanca, D., Eskofier, B.M., 2024. Assessing the Performance of Remaining Time Prediction Methods for Business Processes. *IEEE Access* 12, 130583–130601. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3459648>
201. Schlichting, A.F., Bonfim-Silva, E.M., de Silva, M.C., Farias, L.N., 2015. Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19, 1054–1058.
202. Schott, J.R., 2007. *Remote sensing: the image chain approach*, 2nd ed. ed. Oxford university press, Oxford.
203. Schott, J.R., Salvaggio, C., Volchok, W.J., 1988. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment* 26, 1–16. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90116-2)
204. Seo Dae Kyo, Eo Yang Dam, 2019. Local-Based Iterative Histogram Matching for Relative Radiometric Normalization. *한국측량학회지* 37, 323–330. <https://doi.org/10.7848/KSGPC.2019.37.5.323>
205. Shao, G.C., Lan, J.J., Yu, S.E., Liu, N., Guo, R.Q., She, D.L., 2013. Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages. *Photosynt.* 51, 429–437. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0039-9>
206. Shapiro, S.S., Wilk, M.B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591–611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
207. Shaw, E.B., 1955. *World Economic Geography With an Emphasis on Principles*. Wiley.
208. She, Y., Li, P., Qi, X., Guo, W., Rahman, S.U., Lu, H., Ma, C., Du, Z., Cui, J., Liang, Z., 2022. Effects of Shallow Groundwater Depth and Nitrogen Application Level on Soil Water

- and Nitrate Content, Growth and Yield of Winter Wheat. *Agriculture* 12, 311. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020311>
209. Sheng, K., Xu, L., Wang, M., Lei, H., Duan, A., 2022. The end-use quality of wheat can be enhanced by optimal water management without incurring yield loss. *Front. Plant Sci.* 13, 1030763. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030763>
210. Shibaeva, T.G., Mamaev, A.V., Sherudilo, E.G., 2020. Evaluation of a SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter to Estimate Chlorophyll Content in Leaves with Interveinal Chlorosis. *Russian Journal of Plant Physiology* 67, 596–602.
211. Shibaeva, T. G., Mamaev, A.V., Sherudilo, E.G., 2020. Evaluation of a SPAD-502 Plus Chlorophyll Meter to Estimate Chlorophyll Content in Leaves with Interveinal Chlorosis. *Russ J Plant Physiol* 67, 690–696. <https://doi.org/10.1134/S1021443720040160>
212. Sims, D.A., Gamon, J.A., 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81, 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
213. Singh, S., Pandey, P., Khan, Mohd.S., Semwal, M., 2021. Multi-temporal High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Multispectral Imaging for Menthol Mint Crop Monitoring, in: 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). Presented at the 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), IEEE, Maharashtra, India, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9418204>
214. Skudra, I., Ruza, A., 2016. Winter wheat grain baking quality depending on environmental conditions and fertilizer. *Agronomy Research* 14, 1460–1466.
215. Song, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S.A., 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. *Remote Sensing of Environment* 75, 230–244. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
216. Song, Y., Zhou, G., Guo, J., Dong, J., Pan, Y., Zhang, R., Zhang, L., Wu, S., Jia, H., Song, Q., Li, K., Chen, G., Xu, J., 2023. Influences of Global Warming on Yield Structure and Quality of Winter Wheat Xumai 33. Editorial Office of Journal of Applied Meteorological Science, *Yingyong Qixiang Xuebao* 34, 552–561.
217. Spaner, D., Todd, A.G., Navabi, A., Goonewardene, L.A., 2005. Can leaf chlorophyll measures at differing growth stages be used as an indicator of winter wheat and spring barley nitrogen requirements in eastern Canada? *Journal of Agronomy and Crop Science* 191, 101–114.
218. Srinivasan, B., 2022. A guide to the Michaelis–Menten equation: steady state and beyond. *The FEBS Journal* 289, 6086–6098. <https://doi.org/10.1111/febs.16124>
219. Statista, 2025. Cereals - Hungary.
220. Statkevičiūtė, G., Liatukas, Ž., Cesevičienė, J., Jaškūnė, K., Armonienė, R., Kuktaite, R., Brazauskas, G., 2022. Impact of Combined Drought and Heat Stress and Nitrogen on Winter

- Wheat Productivity and End-Use Quality. *Agronomy* 12, 1452. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061452>
221. Stefanovits, Pál., Filep, G., Füleky, G., 2005. Talajtan, Átdolg., bőv. kiad. ed. Mezőgazda, Budapest.
222. Sun, J., L Ni, JQ, Z., 2013. Principles and applications of remote sensing, Di 3 ban. ed. 武汉大学出版社, Wu han.
223. Syariz, M.A., Lin, B.-Y., Denaro, L.G., Jaelani, L.M., Van Nguyen, M., Lin, C.-H., 2019. Spectral-consistent relative radiometric normalization for multitemporal Landsat 8 imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 147, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.11.007>
224. Szalai, G. (Ed.), 1989. Az öntözés gyakorlati kézikönyve. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
225. Szalay, K.D., Farkas, I., Szalay, D., 2009. Evaluation of nutrient supply as abiotic stressor on winter wheat *Triticum aestivum* L. performance. Presented at the Cereal Research Communications, pp. 21–24.
226. Székely, Á., 2023. A rizs (*Oryza sativa* L.) szárazságtűrésének és vízfelhasználásának vizsgálata különböző termesztési körülmények között (PhD-értekezés). Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem (MATE).
227. Szentes, O., 2021. Extrém szárazság és forróság 2021 júniusában. Tanulmányok. URL https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3049 (accessed 6.18.25).
228. Sziebert, J., Nagy, L., Szlávik, L., Zellei, L., Varga, A., Pannonhalmi, M., Mátrai, I., Ficzer, A., Rátkai, G., Szabó, K., 2016. Vízkárelhárítási kézikönyv. Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest.
229. Talukder, P., Sinha, B., Biswas, S., Ghosh, A., Banerjee, A., Paul, S., 2024. A study on the prospect of converting C3 plants into C4 plants. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 58, 103191. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103191>
230. Tamás, J., 2013. Gazdálkodás belvizes és aszályos területeken. Szaktudás Kiadó Ház : Nemzeti Agrárgazdasági Kamara, Budapest.
231. Teillet, P.M., Guindon, B., Goodenough, D.G., 1982. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 8, 84–106. <https://doi.org/10.1080/07038992.1982.10855028>
232. Teinb, B., Eremeev, V., Keres, I., Selge, A., Luik, A., 2010. Effect of different plant production methods on yield and quality of winter wheat “Portal” in 2009. *Research for Rural Development* 1, 17–21.
233. Thode, H.C., 2002. Testing For Normality, 0 ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203910894>

234. Thome, K.J., 2001. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method. *Remote Sensing of Environment* 78, 27–38. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00247-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00247-4)
235. Titz, L., Sipos, G., Mureşan, D., Nagy, Z., 1973. *Az öntözés gyakorlata*. Ceres Könyvkiadó (Intreprinderea Poligrafică, Cluj), Bukarest.
236. Tóth, A., Sipos, P., Gyori, Z., 2006. Alveograph analysis of the rheological properties of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. *Novenytermeles* 55, 3–13.
237. Toyama, K.S., 2024. JNplots: an R package to visualize outputs from the Johnson–Neyman technique for categorical and continuous moderators, including options for phylogenetic regressions. *Evol Ecol* 38, 371–385. <https://doi.org/10.1007/s10682-023-10281-1>
238. Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8, 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
239. Tucker, C.J., 1977. Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physiological status (Technical Memorandum (TM), NASA Technical Reports No. X-923-77–183). NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt, MD, United States.
240. Tucker, C.J., Pinzon, J.E., Brown, M.E., Slayback, D.A., Pak, E.W., Mahoney, R., Vermote, E.F., El Saleous, N., 2005. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 26, 4485–4498. <https://doi.org/10.1080/01431160500168686>
241. Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., Pleijel, H., 2007. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research* 91, 37–46.
242. Vajda, I., 1975. *A tavaszi időszakos káros vízbőség néhány közvetlen hatása a szántóföldi növénytermesztésre (Kandidátusi értekezés)*. Gödöllő.
243. Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcette, J.-J., 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 35, 675–686. <https://doi.org/10.1109/36.581987>
244. Vlotman, W.F., 2023. Waterlogging and salinity: Cause and effect in the framework of a social, environmental and financial nexus. *Irrigation and Drainage* 72, 1283–1290. <https://doi.org/10.1002/ird.2829>
245. Wang, Y., Feng, L., Zhang, Z., Tian, F., 2023. An unsupervised domain adaptation deep learning method for spatial and temporal transferable crop type mapping using Sentinel-2 imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 199, 102–117. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.04.002>
246. Wang, Y., Yang, Z., Khan, H.A., Kootstra, G., 2024. Improving Radiometric Block Adjustment for UAV Multispectral Imagery under Variable Illumination Conditions. *Remote Sensing* 16, 3019. <https://doi.org/10.3390/rs16163019>

247. Wickham, H., 2020. plyr: Tools for Splitting, Applying and Combining Data.
248. Wickham, H., Bryan, J., 2023. readxl: Read Excel Files.
249. Wickham, H., Hester, J., Bryan, J., 2024. readr: Read Rectangular Text Data.
250. Willmott, C., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim. Res.* 30, 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
251. Wollmer, A.-C., Pitann, B., Mühling, K.-H., 2018. Nutrient deficiencies do not contribute to yield loss after waterlogging events in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Annals of Applied Biology* 173, 141–153. <https://doi.org/10.1111/aab.12449>
252. Wollmer, A.-C., Pitann, B., Mühling, K.H., 2018. Grain storage protein concentration and composition of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by waterlogging events during stem elongation or ear emergence. *Journal of Cereal Science* 83, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.07.007>
253. Wu, J.-D., Li, J.-C., Wang, C.-Y., Wei, F.-Z., Zhang, Y., Wu, W.-M., Wei, -Zhen, Zhang, Y., Wen-Ming, W., 2013. Effects of spraying foliar nitrogen on activities of key regulatory enzymes involved in protein formation in winter wheat suffered post-anthesis high temperature and waterlogging. *Journal of Food, Agriculture and Environment*.
254. Wu, Q., Tan, J., Zhu, J., Wang, W., Han, R., Zou, J., 2021. Effects of waterlogging after anthesis on the grain filling characteristics of winter wheat with different waterlogging tolerances. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 37, 74–81. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2021.18.009>
255. Wu, X., Tang, Y., Li, C., McHugh, A.D., Li, Z., Wu, C., 2018. Individual and combined effects of soil waterlogging and compaction on physiological characteristics of wheat in southwestern China. *Field Crops Research* 215, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.016>
256. Wu, X., Tang, Y., Li, C., Wu, C., Huang, G., 2015. Chlorophyll Fluorescence and Yield Responses of Winter Wheat to Waterlogging at Different Growth Stages. *Plant Production Science* 18, 284–294. <https://doi.org/10.1626/pp.s.18.284>
257. Wu, Y.-Q., Li, C.-S., Fan, G.-Q., Wu, X.-L., Tang, Y.-L., 2015. Effect of waterlogging on physical traits and yield of wheat in Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* 26, 1162–1170.
258. Xiang, Y., Zou, B., Li, H., 2009. Selective color transfer with multi-source images. *Pattern Recognition Letters* 30, 682–689. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.01.004>
259. Xie, L., Miao, J., Li, X., Bai, X., Yang, K., 2023. A GAN-based Relative Radiometric Correction Model of Remote Sensing Data, in: 2023 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI). Presented at the 2023 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI), IEEE, Xi'an, China, pp. 197–202. <https://doi.org/10.1109/ICCSI58851.2023.10303795>

260. Xie, R., Xia, M., Yao, J., Li, L., 2018. Guided color consistency optimization for image mosaicking. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 135, 43–59. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.012>
261. Xu, W., Wang, J., Wei, Z., Peng, M., Wu, Y., 2023. Deep Semantic-Visual Alignment for zero-shot remote sensing image scene classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 198, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.02.012>
262. Xue, L.-H., Cao, W.-X., Yang, L.-Z., 2007. Predicting Grain Yield and Protein Content in Winter Wheat at Different N Supply Levels Using Canopy Reflectance Spectra. *Pedosphere* 17, 646–653. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60077-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60077-0)
263. Yamamoto, Y., 2005. Precise radiometer in the short wave infrared (SWIR) range. Presented at the Proceedings of the SICE Annual Conference, pp. 2440–2443.
264. Yang, C., Dong, Y., Du, B., Zhang, L., 2022. Attention-Based Dynamic Alignment and Dynamic Distribution Adaptation for Remote Sensing Cross-Domain Scene Classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 60, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3225589>
265. Yang, C., Du, S.-M., Zhang, D.-Q., Fang, B.-T., 2021. Method for estimating relative chlorophyll content in wheat leaves based on chlorophyll fluorescence parameters. *Chinese Journal of Applied Ecology* 32, 609–616.
266. Yang, G., Kong, X., Hou, R., Ouyang, Z., 2022. Effects of warming on the protein content of winter wheat grains under the conservation tillage. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 38, 80–88. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.009>
267. Yang, L., Huang, C., Homer, C.G., Wylie, B.K., Coan, M.J., 2003. An approach for mapping large-area impervious surfaces: synergistic use of Landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 230–240. <https://doi.org/10.5589/m02-098>
268. Yang, X., C.P., L., 2000. Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66(8), 967-980. <https://doi.org/DOI: 10.14358/PERS.66.8.967>
269. Yang, Z., Cai, L., Han, L., Fan, X., Liu, X., 2021. Review of standards for near infrared spectroscopy methods. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 29, 313–320. <https://doi.org/10.1177/09670335211042016>
270. Yatim, B., Ismail, S., 2014. MANOVA versus alternative methods. Presented at the INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUANTITATIVE SCIENCES AND ITS APPLICATIONS (ICOQSIA 2014): Proceedings of the 3rd International Conference on Quantitative Sciences and Its Applications, Langkawi, Kedah Malaysia, pp. 934–939. <https://doi.org/10.1063/1.4903694>
271. Yoo, J., Uh, Y., Chun, S., Kang, B., Ha, J.-W., 2019. Photorealistic Style Transfer via Wavelet Transforms, in: 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision

- (ICCV). Presented at the 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Seoul, Korea (South), pp. 9035–9044. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00913>
272. Yu, L., Zhang, Y., Sun, M., Zhou, X., Liu, C., 2017. An auto-adapting global-to-local color balancing method for optical imagery mosaic. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 132, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.002>
273. Yu-Wing Tai, Jiaya Jia, Chi-Keung Tang, 2005. Local Color Transfer via Probabilistic Segmentation by Expectation-Maximization, in: 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). Presented at the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 747–754. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.215>
274. Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14, 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
275. Zeleny, L., 1947. A simple sedimentation test for estimating the bread-baking and gluten qualities of wheat flour. *Cereal Chem* 24, 465–475.
276. Zgueb, Y., Preti, A., Perra, A., El-Astal, S., Aviles Gonzalez, C.I., Piras, M., Testa, G., Kirolov, I., Tamburini, G., Ouali, U., Kalcev, G., Romano, F., Kovess, V., Carta, M.G., 2020. Staff Perception of Respect for Human Rights of Users and Organizational Well-being: A Study in Four Different Countries of the Mediterranean Area. *CPEMH* 16, 109–114. <https://doi.org/10.2174/1745017902016010109>
277. Zhang, C., Feng, Y., Hu, L., Tapete, D., Pan, L., Liang, Z., Cigna, F., Yue, P., 2022. A domain adaptation neural network for change detection with heterogeneous optical and SAR remote sensing images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 109, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102769>
278. Zhang, J., Liu, J., Pan, B., Shi, Z., 2020. Domain Adaptation Based on Correlation Subspace Dynamic Distribution Alignment for Remote Sensing Image Scene Classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 58, 7920–7930. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2985072>
279. Zhang, S., Feng, M.-C., Yang, W.-D., Wang, C., Sun, H., Jia, X.-Q., Wu, G.-H., 2018. Detection of grain protein content in winter wheat based on near infrared spectroscopy. *Chinese Journal of Ecology* 37, 1276–1281. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201804.026>
280. Zhang, Y., Chen, X., Geng, S., Zhang, X., 2025. A review of soil waterlogging impacts, mechanisms, and adaptive strategies. *Front. Plant Sci.* 16, 1545912. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1545912>
281. Zhang, Y., Yu, L., Sun, M., Zhu, X., 2017. A Mixed Radiometric Normalization Method for Mosaicking of High-Resolution Satellite Imagery. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 55, 2972–2984. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2657582>

282. Zhao, H., Dai, T., Jiang, D., Cao, W., 2008. Effects of High Temperature on Key Enzymes Involved in Starch and Protein Formation in Grains of Two Wheat Cultivars. *J Agronomy Crop Science* 194, 47–54. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2007.00283.x>
283. Zhao, H., Wang, J., Guo, J., Hui, X., Wang, Y., Cai, D., Yan, H., 2024. Detecting Water Stress in Winter Wheat Based on Multifeature Fusion from UAV Remote Sensing and Stacking Ensemble Learning Method. *Remote Sensing* 16, 4100. <https://doi.org/10.3390/rs16214100>
284. Zhao, J.-J., Ma, J.-J., Zheng, L.-J., Sun, X.-H., Wu, C.-B., 2022. Estimation of Evapotranspiration of Winter Wheat-Summer Maize Rotation System in Southern Shanxi Based on Dual-crop Coefficient Approach. *Water Saving Irrigation* 28–37. <https://doi.org/10.12396/jsgg.2022223>
285. Zhao, X.-L., Li, W.-X., 2005. Effect of the nitrogen and phosphorus levels and meteorological conditions on formation dynamics of grain protein content in spring wheat. *Acta Ecologica Sinica*.
286. Zhu, J.-Y., Park, T., Isola, P., Efros, A.A., 2017. Unpaired Image-to-Image Translation Using Cycle-Consistent Adversarial Networks, in: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Presented at the 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Venice, pp. 2242–2251. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.244>
287. Zhu, Z.-X., Liu, R.-H., Fang, W.-S., Wang, Y.-H., 2003. Evaluation indices of drought of winter wheat in North China. *Journal of Natural Disasters* 12, 145–150.
288. Zörb, C., Becker, E., Merkt, N., Kafka, S., Schmidt, S., Schmidhalter, U., 2017. Shift of grain protein composition in bread wheat under summer drought events. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 180, 49–55. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600367>

M2.: ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra Az őszi búza betakarított területének, termésmennyiségének és átlagtermésének alakulása 1990-2024 között és exportja 1998-2024 között Magyarországon (Forrás: Gabonaszövetség adatgyűjtése alapján saját szerkesztés, 2025 és a KSH adatátlak alapján saját szerkesztés (KSH, 2025b)	13
2. ábra Az őszi búza növekedési szakaszai (Zadoks et al., 1974).....	14
3. ábra 2019-2021: Csapadékösszeg és átlaghőmérséklet együttes ábrázolása a szarvasi Liziméter Telepen (ÖVKI), (adatforrás: a Telepen mért adat)	39
4. ábra 2000-2022: Békés vármegye búzatermelésének alakulása összevetve az éves országos aszályal érintett terület százalékának alakulásával és az éves országos csapadék összeggel (Adatforrás: 19.1.2.4. A búza termelése vármegye és régió szerint* https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0071.html ; HungaroMet Zrt.: ÉGHAJLAT > Magyarország éghajlata > Éghajlati visszatekintő > Elmúlt évek időjárása; Elmúlt évek időjárása https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_visszatekinto/elmult_evek_idojarasa/ ; Meteorológiai Adattár: https://odp.met.hu/ ; Fenntartható fejlődési célok; Aszályal érintett területek: https://ksh.hu/s/kiadvanyok/fenntarthato-fejlodes-indikatorai-2023/3-16-sdg-13?utm_source elérés, 2025. 09. 14.).....	40
5. ábra A kísérleti elrendezés	43
6. ábra Mérés a SPAD Konica Minolta 502 Plus klorofill-mérő készülékkel	44
7. ábra A skálatényezőn alapuló PIF-normalizáció kiugróérték-kezeléssel vagy robusztus PIF-alapú normalizálás lineáris skálázással folyamatábrája a georeferálás után a képek relatív radiometrikus normalizálásán át, a vegetációs idexek számolásáig	49
8. ábra Az őszi búza szemtermés minőségi tulajdonságainak korrelációs mátrixa.....	57
9. ábra Az őszi búza szemtermés minőségi értékeinek robusztus többváltozós kiugróérték-vizsgálata (RD ² , kiigazított kvantilis (adjusted quantile), $\alpha = 0,001$)	58
10. ábra Őszi búza –Fehérjetartalom eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot).....	59
11. ábra Őszi búza –Sikér (%) eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot).....	60
12. ábra Őszi búza –Zeleny-érték eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot).....	61
13. ábra Őszi búza –W érték eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot).....	62
14. ábra Őszi búza –Hozam (kg/liziméter edény) eloszlása vízszint × időtartam kombinációk szerint (kétfaktoros boxplot)	63
15. ábra Őszi búza –Fehérjetartalom – vízszint × időtartam interakció (x-tengely: Vízszint_cm, jelmagyarázat: Időtartam_nap).....	64
16. ábra Őszi búza –Fehérjetartalom – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint).....	65

17. ábra Őszi búza –Sikér (%) – vízszint × időtartam interakció (x: Vízszint, színezés: Időtartam)	66
18. ábra Őszi búza –Sikér (%) – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)	67
19. ábra Őszi búza –Zeleny-érték – vízszint × időtartam interakció (x: Vízszint, színezés: Időtartam)	68
20. ábra Őszi búza –Zeleny-érték – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)	69
21. ábra Őszi búza –W-érték-vízszint × időtartam interakció (x: Vízszint, színezés: Időtartam)	70
22. ábra Őszi búza –W-érték- időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)	71
23. ábra Őszi búza – Hozam – vízszint × időtartam interakció (x: Vízszint, színezés: Időtartam)	72
24. ábra Őszi búza – Hozam – időtartam × vízszint interakció (x: Időtartam, színezés: Vízszint)	73
25. ábra Őszi búza – termésének Hisztogram-mátrixa	77
26. ábra Az Őszi búza – termésének QQ-mátrix	78
27. ábra Az őszi búza – termésének sűrűségmátrixa	79
28. ábra Q–Q ábra: Outlierek azonosítása robusztus Mahalanobis-távolsággal (MCD-alapú MD ² ; Hardin–Rocke (adjusted) küszöb, $\alpha=0,95$; $p=5$; $n=168$.)	81
29. ábra 2019-2021:A kezelések hatása a fehérjetartalomra a kontrollhoz képest (Δ százalékpont)	83
30. ábra Fehérjetartalom vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram (CLD jelöléssel)	87
31. ábra 2019-2021: A kontrollhoz képest a kezelések hatása a Zeleny-értékre	88
32. ábra A Zeleny-érték vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram (CLD jelöléssel)	93
33. ábra 2019-2021:A kezelések hatása a hozamra a kontrollhoz képest	94
34. ábra A hozam vízszint- és időtartam-kezelések szerint (2019–2021) átlag–szórás hibasávós oszlopdiagram (CLD jelöléssel)	99
35. ábra Három (2019-2021) év SPAD, GNDVI és BNDVI kezelésenkénti összesített átlag értékei	100
36. ábra A GNDVI és BNDVI indexek adatainak évek között dobozdiagramja	101
37. ábra GNDVI-SPAD és BNDVI- SPAD közötti kapcsolatot mutatja, egy-egy Michaelis–Menten görbével illetve az összes évre	104
37. ábra A kísérleti elrendezés felülnézeti a georeferált NGB UAV képen	144
38. ábra A kísérleti elrendezés a pincében	145
39. ábra A drón kamera szűrőjének érzékenysége, mely a 390-570 nm, valamint a 680-790 nm közötti tartományban ereszt át fényt, vagyis a kék, a zöld és az infra közeli tartományt.	145
41. ábra Kezelési különbségek százaléka évenkénti bontásban a kontrollhoz képest	169
42. ábra Az őszi búza GNDVI és BNDVI és SPAD index értékének kétutas (kétfaktoros) interakció diagramja (two-way interaction plot) az időtartam és vízmélységre	170
43. ábra Az BNDVI normálítási vizsgálata (Q–Q ábra; 2019, 0 cm, 3 nap)	171

44. ábra Az BNDVI normálítási vizsgálata (Q–Q ábra; 2020, 0 cm, 3 nap)	171
45. ábra Az BNDVI normálítási vizsgálata (Q–Q ábra; 2021, 0 cm, 3 nap)	172
46. ábra A három év SPAD és GNDVI 2. fokú illesztése	172
47. ábra A három év SPAD és BNDVI 2. fokú illesztése	173
48. ábra A 2020-as év SPAD és GNDVI 2. fokú illesztése	173
49. ábra A 2020-as év SPAD és BNDVI 2. fokú illesztése	174
50. ábra A 2020-as év SPAD átlag értékei kezelésenként a mérési időpontokra	174

M3:TÁBLÁZATJEGYZÉK

1 táblázat A gabonafélék átlagos kémiai összetétele (Lásztity Radomir, 1981).....	15
2 táblázat Példák az őszi búza fehérjetartalmára és hozamára ható tényezőkről.....	16
3 táblázat Különböző búzafajták sikértartalma és Zeleny száma (Győri Zoltán és Mile Irma, 2011)	17
4 táblázat Az évjárat hatása a búza sikértartalmára (Győri Zoltán. and Mile Irma, 2011).....	19
5. táblázat A GK Déva őszi búza fajta tulajdonságai	42
6. táblázat DJI_0093.tif kép pixel statisztikája	47
7. táblázat Őszi búza – Bartlett-féle és Levene-féle varianciahomogenitási teszt eredménye	74
8. táblázat Az őszi búza termésének és a Vízmélység, Időtartam és Év interakciójának MANOVA átfogó tesztje és utóelemzése Wilk-féle Lambda-próbával	75
9. táblázat Pearson korreláció a GNDVI, a BNDVI és a SPAD között	102
10. táblázat A modellek indentifikációjának eredménye a 2019 és 2021 év összes adatával	103
11. táblázat Michaelis-Menten modell mérőszámok GNDVI-SPAD és BNDVI- SPAD közötti kapcsolatra.....	104
12. táblázat Az őszi búza termésének és a Vízmélység, Időtartam és Év interakciójának egyváltozós (univariate) ANOVA tesztje	146
13. táblázat A modell-reziduálok normáloszlásának ellenőrzése.....	147
14. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérjetartalmára, időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven	148
15. táblázat Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Fehérje %-a a kontrollhoz viszonyítva	151
16. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérjetartalmára, időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven	151
18. táblázat Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Zeleny-értékére a kontrollhoz viszonyítva.....	158
19. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére vízmélység szerinti összehasonlítások r programnyelven	158
20. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozamának időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven	162
21. táblázat Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Fehérje %-a a kontrollhoz viszonyítva	165
22. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozamára vízmélység szerinti összehasonlítások r programnyelven	165

M4. KÉPLETJEGYZÉK

2.1	28	
	$GNDVI = NIR - ZöldNIR + Zöld$	29
2.2	29	
	$BNDVI = NIR - KÉkNIR + KÉk$	30
2.3	30	
	$kN = NrefNPIF; kG = GrefGPIF; kB = BrefBPIF$	48
3.1	48	
	$Nkorr = Neredeti * kN; Gkorr = Geredeti * kG; Bkorr = Beredeti * kB$	48
3.2	48	
	$y = a * x^2 + b * x + c$	50
3.3	50	
	$MAE = \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i $	51
3.4	51	
	$NMAE = MAE_y * 100$	51
3.5	51	
	$v = VMAX * SKm + S$	52
3.6	52	
	$SPAD = -177,25025 * GNDVI^2 + 235,27506 * GNDVI - 25,64773$	102
4.1	102	
	$SPAD = -167,54836 * BNDVI^2 + 246,17302 * GNDVI - 38,15253$	102
4.2	102	

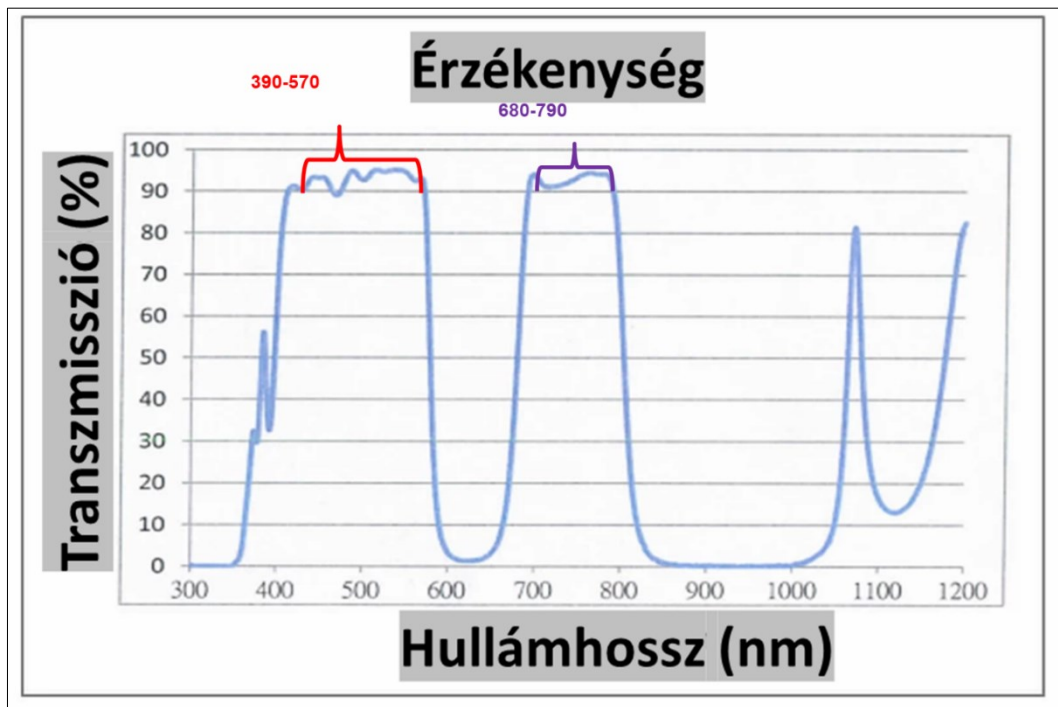
M5.: KÍSÉRLETI TERÜLET, ESZKÖZÖK ÉS FELDOLGOZÁS



38. ábra A kísérleti elrendezés felülnézeti a georeferált NGB UAV képen



39. ábra A kísérleti elrendezés a pincében



40. ábra A drón kamera szűrőjének érzékenysége, mely a 390-570 nm, valamint a 680-790 nm közötti tartományban ereszti át fényt, vagyis a kék, a zöld és az infra közeli tartományt

M6.: STATISZTIKAI ELŐVIZSGÁLAT MELLÉKLETEI

12. táblázat Az őszi búza termésének és a Vizmelység, Időtartam és Év interakciójának egyváltozós (univariate) ANOVA tesztje

Response	Factor	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	p_value	Significance
Feherje	Vizmelyseg_cm	3	7,44E+01	2,48E+01	1,48E+01	1,58643E-08	***
Feherje	Idotartam_nap	4	6,82E+01	1,71E+01	1,02E+01	2,40933E-07	***
Feherje	Ev	2	4,22E+02	2,11E+02	1,26E+02	4,83961E-33	***
Feherje	Vizmelyseg_cm:Idotartam_nap	6	2,63E+01	4,38E+00	2,62E+00	0,019038526	*
Feherje	Residuals	152	2,54E+02	1,67E+00			
Siker	Vizmelyseg_cm	3	4,39E+02	1,46E+02	1,27E+01	1,90538E-07	***
Siker	Idotartam_nap	4	4,36E+02	1,09E+02	9,44E+00	7,7095E-07	***
Siker	Ev	2	1,89E+03	9,45E+02	8,19E+01	7,3374E-25	***
Siker	Vizmelyseg_cm:Idotartam_nap	6	1,85E+02	3,08E+01	2,67E+00	0,017167164	*
Siker	Residuals	152	1,75E+03	1,15E+01			
Zeleny	Vizmelyseg_cm	3	2,28E+03	7,60E+02	1,75E+01	8,61093E-10	***
Zeleny	Idotartam_nap	4	2,18E+03	5,45E+02	1,25E+01	7,84213E-09	***
Zeleny	Ev	2	9,91E+03	4,95E+03	1,14E+02	6,19936E-31	***
Zeleny	Vizmelyseg_cm:Idotartam_nap	6	8,38E+02	1,40E+02	3,21E+00	0,005399743	**
Zeleny	Residuals	152	6,62E+03	4,35E+01			
W	Vizmelyseg_cm	3	7,12E+04	2,37E+04	8,61E+00	2,57965E-05	***
W	Idotartam_nap	4	9,86E+04	2,46E+04	8,93E+00	1,6602E-06	***
W	Ev	2	4,41E+05	2,21E+05	8,00E+01	1,80604E-24	***
W	Vizmelyseg_cm:Idotartam_nap	6	4,74E+04	7,90E+03	2,86E+00	0,011370444	*
W	Residuals	152	4,19E+05	2,76E+03			
Hozam	Vizmelyseg_cm	3	2,32E-01	7,74E-02	8,12E+00	4,75778E-05	***
Hozam	Idotartam_nap	4	5,94E-02	1,49E-02	1,56E+00	0,188510357	
Hozam	Ev	2	1,62E+00	8,09E-01	8,48E+01	1,7962E-25	***
Hozam	Vizmelyseg_cm:Idotartam_nap	6	2,85E-02	4,75E-03	4,98E-01	0,809460667	
Hozam	Residuals	152	1,45E+00	9,54E-03			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

13. táblázat A modell-reziduálok normáeloszlásának ellenőrzése

Test	Statistic	p.value	Method	MVN
Henze-Zirkle	1,265	<0.001	asymptotic	X Not normal

Test	Variable	Statistic	p.value	Normality
Shapiro-Wilk	Feherje	0,984	0,046	X Not normal
Shapiro-Wilk	Siker	0,986	0,093	✓ Normal
Shapiro-Wilk	Zeleny	0,987	0,106	✓ Normal
Shapiro-Wilk	W	0,986	0,082	✓ Normal
Shapiro-Wilk	Hozam	0,988	0,173	✓ Normal

Variable	n	Mean	Std.Dev	Median	Min	Max	25th	75th	Skew	Kurtosis
Feherje	168	0	1,233	-0,029	-2,582	4,042	-0,795	0,712	0,407	3,359
Siker	168	0	3,241	-0,077	-6,779	10,958	-2,233	2,262	0,364	3,151
Zeleny	168	0	6,294	-0,31	-13,347	23,52	-4,501	4,136	0,411	3,504
W	168	0	50,102	2,763	-98,307	128,302	-34,01	36,292	0,097	2,485
Hozam	168	0	0,093	-0,002	-0,282	0,269	-0,05	0,062	-0,263	3,326

Observation	Mahalanobis. Distance
149	108,75
159	94,197
139	66,83
158	56,712
132	25,929
166	22,944
160	21,909
46	20,229
23	19,921
89	19,527
135	17,862
162	16,517
150	15,557
147	15,155
119	14,479
157	14,427

M7.: FEHÉRJE STATISZTIKA

14. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérjetartalmára, időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven

```
## . post hoc test: Games-Howell (not equal variances) #####
## Games-Howell post hoc test for the Idotartam_nap subsets separately
# Időtartam szerinti összehasonlítások #####
library(rstatix)
games_howell_test(NIR_2021_Vm30, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3 6 -0.65 -4.37 3.07 0.914 ns
2 Feherje 3 9 -3.22 -5.56 -0.889 0.015 *
3 Feherje 3 12 -2.12 -6.96 2.71 0.413 ns
4 Feherje 6 9 -2.57 -6.41 1.26 0.153 ns
5 Feherje 6 12 -1.47 -6.43 3.48 0.729 ns
6 Feherje 9 12 1.1 -3.99 6.19 0.781 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm30, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "AB" "B" "AB"
games_howell_test(NIR_2020_Vm30, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3 6 -0.350 -1.42 0.717 0.645 ns
2 Feherje 3 9 0.600 -0.292 1.49 0.186 ns
3 Feherje 3 12 0.825 -0.965 2.61 0.351 ns
4 Feherje 6 9 0.950 -0.165 2.07 0.091 ns
5 Feherje 6 12 1.17 -0.568 2.92 0.176 ns
6 Feherje 9 12 0.225 -1.52 1.97 0.955 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm30, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_Vm30, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3 6 -2.93 -4.63 -1.22 0.004 **
2 Feherje 3 9 -1.8 -3.42 -0.178 0.033 *
3 Feherje 3 12 -2.33 -4.89 0.236 0.071 ns
4 Feherje 6 9 1.12 -0.343 2.59 0.129 ns
5 Feherje 6 12 0.600 -1.96 3.16 0.811 ns
6 Feherje 9 12 -0.525 -3.11 2.06 0.847 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm30, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "B" "B" "AB"
```

```
games_howell_test(NIR_2021_Vm60, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3 6 -0.450 -3.75 2.85 0.983 ns
2 Feherje 3 9 -4.53 -7.44 -1.61 0.009 **
3 Feherje 3 12 -3.3 -6.76 0.155 0.06 ns
4 Feherje 3 Folyamatos 0.600 -2.84 4.04 0.959 ns
5 Feherje 6 9 -4.08 -7.03 -1.12 0.015 *
6 Feherje 6 12 -2.85 -6.32 0.621 0.106 ns
7 Feherje 6 Folyamatos 1.05 -2.41 4.51 0.782 ns
8 Feherje 9 12 1.23 -2.00 4.45 0.547 ns
9 Feherje 9 Folyamatos 5.12 1.92 8.33 0.009 **
10 Feherje 12 Folyamatos 3.9 0.309 7.49 0.035 *
```

```
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm60, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm60$Idotartam_nap))
```

```
3 6 9 12 Folyamatos
"A" "A" "B" "AB" "A"
```

```
games_howell_test(NIR_2020_Vm60, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3 6 -0.800 -2.32 0.721 0.331 ns
2 Feherje 3 9 -1.22 -2.13 -0.317 0.019 *
3 Feherje 3 12 -0.350 -1.22 0.521 0.538 ns
4 Feherje 3 Folyamatos -0.875 -1.78 0.0326 0.056 ns
5 Feherje 6 9 -0.425 -2.08 1.23 0.714 ns
6 Feherje 6 12 0.450 -1.14 2.04 0.698 ns
7 Feherje 6 Folyamatos -0.0750 -1.73 1.58 0.999 ns
8 Feherje 9 12 0.875 0.366 1.38 0.006 **
9 Feherje 9 Folyamatos 0.350 0.0162 0.684 0.041 *
10 Feherje 12 Folyamatos -0.525 -1.03 -0.0161 0.045 *
```

```
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm60, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm60$Idotartam_nap))
```

```
3 6 9 12 Folyamatos
"A" "AB" "B" "A" "A"
```

```
games_howell_test(NIR_2019_Vm60, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3 6 -2.03 -3.89 -0.161 0.036 *
2 Feherje 3 9 -3.75 -5.00 -2.50 0.000207 ***
3 Feherje 3 12 -1.47 -3.86 0.911 0.216 ns
4 Feherje 3 Folyamatos -4.22 -5.42 -3.03 0.000192 ***
5 Feherje 6 9 -1.72 -3.59 0.136 0.065 ns
6 Feherje 6 12 0.550 -1.90 3.00 0.901 ns
7 Feherje 6 Folyamatos -2.2 -4.12 -0.284 0.032 *
8 Feherje 9 12 2.28 -0.146 4.70 0.061 ns
9 Feherje 9 Folyamatos -0.475 -1.49 0.536 0.443 ns
10 Feherje 12 Folyamatos -2.75 -5.26 -0.241 0.038 *
```

```

assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm60, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm60$Idotartam_nap))
  3    6    9    12 Folyamatos
  "A"  "B"  "BC" "AB"  "C"
games_howell_test(NIR_2021_Vm0, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3    6   -1.18  -5.46  3.11  0.679 ns
2 Feherje 3    9   -1.82  -6.01  2.36  0.406 ns
3 Feherje 3   12   -2.57  -7.12  1.97  0.201 ns
4 Feherje 6    9   -0.650 -2.53  1.23  0.641 ns
5 Feherje 6   12   -1.40  -2.87  0.0671 0.058 ns
6 Feherje 9   12   -0.75  -2.66  1.16  0.435 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm0, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_Vm0, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3    6   -0.225 -0.749  0.299 0.479 ns
2 Feherje 3    9    0.625 -0.538  1.79 0.275 ns
3 Feherje 3   12   -0.375 -2.08  1.33 0.785 ns
4 Feherje 6    9    0.850 -0.349  2.05 0.131 ns
5 Feherje 6   12   -0.150 -1.90  1.60 0.977 ns
6 Feherje 9   12    -1    -2.66  0.656 0.244 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm0, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_Vm0, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 3    6   -2.05  -4.12  0.0177 0.051 ns
2 Feherje 3    9   -1.35  -4.03  1.33 0.373 ns
3 Feherje 3   12   -1.65  -4.08  0.776 0.187 ns
4 Feherje 6    9    0.700 -1.92  3.32 0.716 ns
5 Feherje 6   12    0.400 -1.83  2.63 0.892 ns
6 Feherje 9   12   -0.300 -3.04  2.44 0.979 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm0, Feherje~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"

```

Magyarázat Welch-féle kétmintás t-próba a 15.,21. és a 18. táblázatokhoz oszlopaihoz:

Az 15.,21. és a 18.táblázatban minden sor egy konkrét kezelés–kontroll összehasonlítás egy adott évben. Az Ev az évjáratot jelöli (2019/2020/2021). A Vizmelyseg_cm a vízszint-kezelés

kódja: „0” teljes árasztás (kétfázisú talajállapot), míg „-30” és „-60” a talajfelszíntől számított süllyesztett vízszintet jelentik. Az Idotartam_nap az árasztás tartama napokban (3, 6, 9, 12, és „Folyamatos”); minden sorban ezt a kezelést hasonlítom a saját évének Kontroll csoportjához. A n_treat és n_ctrl a kezelés és a kontroll mintanagysága, a mean_treat és mean_ctrl pedig a kezelési és kontrollátlag fehérjetartalom (százalék, vagyis %-pontokban megadva). A diff a két átlag különbsége (mean_treat – mean_ctrl): pozitív érték kezelési átlagnövekedést, negatív csökkenést jelez a kontrollhoz képest. A t és df a Welch-féle kétmintás t-próba statisztikája és szabadságfoka, a p pedig ennek nyers p-értéke, míg a conf_low és conf_high a különbség 95%-os konfidenciaintervallumának alsó és felső határa. A hedges_g a normalizált effektusméret (Hedges-g; a minták szórásához viszonyított különbség), a g_magnitude pedig ennek kvalitatív minősítése (pl. „small”, „medium”, „large”). A több összehasonlítás miatt a p_adj_holm a Holm-módszerrel korrigált p-érték ugyanazon éven belül; ehhez igazodik a direction oszlop, amely szövegesen összegzi az eredményt („↑ magasabb a kontrollnál”, „↓ alacsonyabb a kontrollnál”, vagy „nincs szignifikáns különbség”), és a signif csillagozás (*, **, ***, „ns”) a korrigált p-érték küszöbei alapján.

15. táblázat Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Fehérje %-a a kontrollhoz viszonyítva

Vízmélység cm	Idotartam nap	n_treat	n_ctrl	mean_treat	mean_ctrl	diff	t	df	p	conf_low	conf_high	hedges_g	g_magnitude	p_adj_holm	direction	signif
0	3	4	4	14,68	16,35	-1,675	-2,92E+00	5,22E+00	3,12E-02	-3,13E+00	-2,21E-01	-2,29E+00	large	1,56E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
0	6	4	4	12,63	16,35	-3,725	-9,22E+00	5,68E+00	1,25E-04	-4,73E+00	-2,72E+00	-5,10E+00	large	1,63E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
0	9	4	4	13,33	16,35	-3,025	-4,49E+00	4,58E+00	7,98E-03	-4,81E+00	-1,24E+00	-4,14E+00	large	6,39E-02	nincs szignifikáns különbség	ns
0	12	4	4	13,03	16,35	-3,325	-5,52E+00	5,01E+00	2,66E-03	-4,87E+00	-1,78E+00	-4,55E+00	large	2,39E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
-30	3	4	4	16,73	16,35	0,375	7,71E-01	5,87E+00	4,70E-01	-8,21E-01	1,57E+00	5,13E-01	medium	7,29E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-30	6	4	4	13,8	16,35	-2,55	-5,62E+00	6,00E+00	1,36E-03	-3,66E+00	-1,44E+00	-3,49E+00	large	1,36E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
-30	9	4	4	14,93	16,35	-1,425	-3,44E+00	5,82E+00	1,45E-02	-2,45E+00	-4,04E-01	-1,95E+00	large	1,01E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-30	12	4	4	14,4	16,35	-1,95	-2,91E+00	4,60E+00	3,69E-02	-3,72E+00	-1,81E-01	-2,67E+00	large	1,56E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	3	4	4	16,75	16,35	0,4	9,85E-01	5,72E+00	3,65E-01	-6,06E-01	1,41E+00	5,48E-01	medium	7,29E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	6	4	4	14,73	16,35	-1,625	-3,21E+00	5,74E+00	1,96E-02	-2,88E+00	-3,72E-01	-2,22E+00	large	1,17E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	9	4	4	13	16,35	-3,35	-8,77E+00	5,23E+00	2,53E-04	-4,32E+00	-2,38E+00	-4,59E+00	large	3,03E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
-60	12	4	4	15,28	16,35	-1,075	-1,80E+00	5,06E+00	1,30E-01	-2,60E+00	4,51E-01	-1,47E+00	large	3,91E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	Folyamatos	4	4	12,53	16,35	-3,825	-1,09E+01	4,26E+00	2,84E-04	-4,78E+00	-2,87E+00	-5,24E+00	large	3,12E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
0	3	4	4	14,05	17,43	-3,375	-1,90E+01	5,94E+00	1,50E-06	-3,81E+00	-2,94E+00	-1,12E+01	large	1,95E-05	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
0	6	4	4	13,83	17,43	-3,6	-2,30E+01	5,15E+00	2,19E-06	-4,00E+00	-3,20E+00	-1,19E+01	large	2,63E-05	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
0	9	4	4	14,68	17,43	-2,75	-9,27E+00	4,39E+00	4,81E-04	-3,55E+00	-1,95E+00	-9,09E+00	large	1,92E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
0	12	4	4	13,68	17,43	-3,75	-9,39E+00	3,72E+00	1,01E-03	-4,89E+00	-2,61E+00	-1,24E+01	large	3,03E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
-30	3	4	4	13,88	17,43	-3,55	-1,78E+01	5,91E+00	2,31E-06	-4,04E+00	-3,06E+00	-1,17E+01	large	2,63E-05	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
-30	6	4	4	13,53	17,43	-3,9	-1,40E+01	4,58E+00	6,24E-05	-4,64E+00	-3,16E+00	-1,29E+01	large	3,74E-04	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
-30	9	4	4	14,48	17,43	-2,95	-1,23E+01	5,16E+00	5,17E-05	-3,56E+00	-2,34E+00	-9,75E+00	large	3,62E-04	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
-30	12	4	4	14,7	17,43	-2,725	-6,44E+00	3,63E+00	4,13E-03	-3,95E+00	-1,50E+00	-9,01E+00	large	4,13E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
-60	3	4	4	15,25	17,43	-2,175	-9,59E+00	5,42E+00	1,34E-04	-2,74E+00	-1,61E+00	-7,19E+00	large	6,68E-04	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
-60	6	4	4	14,45	17,43	-2,975	-8,54E+00	3,97E+00	1,07E-03	-3,95E+00	-2,00E+00	-9,84E+00	large	3,03E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
-60	9	4	4	14,03	17,43	-3,4	-2,33E+01	4,31E+00	1,07E-05	-3,79E+00	-3,01E+00	-1,12E+01	large	9,64E-05	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
-60	12	4	4	14,9	17,43	-2,525	-1,48E+01	5,78E+00	8,02E-06	-2,95E+00	-2,10E+00	-8,35E+00	large	8,02E-05	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
-60	Folyamatos	4	4	14,38	17,43	-3,05	-2,09E+01	4,31E+00	1,70E-05	-3,44E+00	-2,66E+00	-1,01E+01	large	1,36E-04	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
0	3	4	4	11,33	10,95	0,375	3,58E-01	4,16E+00	7,38E-01	-2,49E+00	3,24E+00	3,80E-01	small	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
0	6	4	4	10,15	10,95	-0,8	-1,48E+00	5,63E+00	1,93E-01	-2,15E+00	5,47E-01	-8,11E-01	large	9,66E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
0	9	4	4	9,5	10,95	-1,45	-2,41E+00	6,00E+00	5,23E-02	-2,92E+00	2,00E-02	-1,47E+00	large	3,55E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
0	12	4	4	8,75	10,95	-2,2	-4,92E+00	3,51E+00	1,10E-02	-3,51E+00	-8,87E-01	-2,23E+00	large	1,32E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-30	3	4	4	12,65	10,95	1,7	2,47E+00	5,71E+00	5,07E-02	-7,25E-03	3,41E+00	1,72E+00	large	3,55E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-30	6	4	4	12	10,95	1,05	1,10E+00	4,41E+00	3,30E-01	-1,52E+00	3,62E+00	1,06E+00	large	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
-30	9	4	4	9,425	10,95	-1,525	-2,92E+00	5,35E+00	3,05E-02	-2,84E+00	-2,08E-01	-1,55E+00	large	2,75E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-30	12	4	4	10,53	10,95	-0,425	-3,57E-01	3,88E+00	7,40E-01	-3,77E+00	2,92E+00	-4,31E-01	small	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	3	4	4	13,6	10,95	2,65	3,52E+00	5,35E+00	1,51E-02	7,54E-01	4,55E+00	2,68E+00	large	1,61E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	6	4	4	13,15	10,95	2,2	2,90E+00	5,31E+00	3,14E-02	2,85E-01	4,12E+00	2,23E+00	large	2,75E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	9	4	4	9,075	10,95	-1,875	-3,49E+00	5,57E+00	1,46E-02	-3,21E+00	-5,36E-01	-1,90E+00	large	1,61E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	12	4	4	10,3	10,95	-0,65	-8,09E-01	5,06E+00	4,55E-01	-2,71E+00	1,41E+00	-6,59E-01	medium	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
-60	Folyamatos	4	4	14,2	10,95	3,25	4,07E+00	5,09E+00	9,34E-03	1,21E+00	5,29E+00	3,29E+00	large	1,21E-01	nincs szignifikáns különbség	ns

16. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza fehérjetartalmára, időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven

Vízmélység szerinti összehasonlítások

```

library(rstatis)

games_howell_test(NIR_2021_I12, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.78 -2.82 6.37 0.372 ns
2 Feherje 0 -60 1.55 -1.22 4.32 0.201 ns
3 Feherje -30 -60 -0.225 -4.47 4.02 0.984 ns
assign_letters_GH_rstatis(games_howell_test(NIR_2021_I12, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"

games_howell_test(NIR_2020_I12, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.02 -0.669 2.72 0.231 ns
2 Feherje 0 -60 1.22 -0.273 2.72 0.087 ns
3 Feherje -30 -60 0.200 -1.40 1.80 0.885 ns
assign_letters_GH_rstatis(games_howell_test(NIR_2020_I12, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"

games_howell_test(NIR_2019_I12, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.38 -1.04 3.79 0.262 ns
2 Feherje 0 -60 2.25 0.0453 4.45 0.046 *
3 Feherje -30 -60 0.875 -1.52 3.27 0.534 ns
assign_letters_GH_rstatis(games_howell_test(NIR_2019_I12, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "AB" "B"

games_howell_test(NIR_2021_I3, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.33 -2.32 4.97 0.501 ns
2 Feherje 0 -60 2.28 -1.39 5.94 0.205 ns
3 Feherje -30 -60 0.950 -1.58 3.48 0.518 ns
assign_letters_GH_rstatis(games_howell_test(NIR_2021_I3, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"

games_howell_test(NIR_2020_I3, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 -0.175 -0.769 0.419 0.652 ns

```

```

2 Feherje 0 -60 1.20 0.491 1.91 0.006 **
3 Feherje -30 -60 1.38 0.637 2.11 0.003 **
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I3, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "B"
games_howell_test(NIR_2019_I3, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 2.05 0.167 3.93 0.036 *
2 Feherje 0 -60 2.07 0.258 3.89 0.032 *
3 Feherje -30 -60 0.0250 -1.40 1.45 0.998 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I3, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "B" "B"
games_howell_test(NIR_2021_I6, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.85 -1.48 5.18 0.228 ns
2 Feherje 0 -60 3 0.617 5.38 0.022 *
3 Feherje -30 -60 1.15 -2.20 4.50 0.56 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I6, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I6$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "AB" "B"
games_howell_test(NIR_2020_I6, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 -0.300 -1.26 0.663 0.541 ns
2 Feherje 0 -60 0.625 -0.664 1.91 0.276 ns
3 Feherje -30 -60 0.925 -0.346 2.20 0.14 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I6, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I6$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I6, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.18 -0.104 2.45 0.068 ns
2 Feherje 0 -60 2.1 0.588 3.61 0.014 *
3 Feherje -30 -60 0.925 -0.659 2.51 0.247 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I6, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I6$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "AB" "B"
games_howell_test(NIR_2021_I9, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

```

```

# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 -0.0750 -1.71 1.56 0.988 ns
2 Feherje 0 -60 -0.425 -2.08 1.23 0.716 ns
3 Feherje -30 -60 -0.350 -1.70 1.00 0.719 ns
assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2021_I9, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I9$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_I9, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 -0.200 -1.25 0.845 0.826 ns
2 Feherje 0 -60 -0.65 -1.72 0.419 0.173 ns
3 Feherje -30 -60 -0.450 -1.25 0.345 0.21 ns
assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2020_I9, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I9$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I9, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Feherje 0 -30 1.60 -0.684 3.88 0.139 ns
2 Feherje 0 -60 -0.325 -2.65 2.00 0.869 ns
3 Feherje -30 -60 -1.93 -2.98 -0.867 0.004 **
assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2019_I9, Feherje~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I9$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"

```

M8.:ZELENY-ÉRTÉK STATISZTIKA

17. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven

```
##. post hoc test: Games-Howell (not equal variances) #####
## Games-Howell post hoc test for the Idotartam_nap subsets separately
# Időtartam szerinti összehasonlítások #####
library(rstatix)
games_howell_test(NIR_2021_Vm30, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3 6 -6.42 -21.2 8.36 0.475 ns
2 Zeleny 3 9 -18.2 -32.7 -3.76 0.022 *
3 Zeleny 3 12 -11.7 -40.8 17.4 0.477 ns
4 Zeleny 6 9 -11.8 -22.7 -0.924 0.037 *
5 Zeleny 6 12 -5.30 -35.1 24.5 0.876 ns
6 Zeleny 9 12 6.52 -24.4 37.4 0.786 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm30, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "A" "B" "AB"
games_howell_test(NIR_2020_Vm30, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3 6 -3.05 -11.0 4.92 0.476 ns
2 Zeleny 3 9 4.22 -1.61 10.1 0.137 ns
3 Zeleny 3 12 4.42 -10.3 19.2 0.586 ns
4 Zeleny 6 9 7.27 -0.680 15.2 0.07 ns
5 Zeleny 6 12 7.48 -6.25 21.2 0.289 ns
6 Zeleny 9 12 0.200 -13.7 14.1 1 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm30, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_Vm30, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3 6 -15.4 -23.4 -7.49 0.007 **
2 Zeleny 3 9 -9.02 -19.0 1.000 0.067 ns
3 Zeleny 3 12 -12.6 -32.3 7.03 0.151 ns
4 Zeleny 6 9 6.4 -3.22 16.0 0.195 ns
5 Zeleny 6 12 2.80 -15.3 20.9 0.917 ns
6 Zeleny 9 12 -3.6 -21.4 14.2 0.861 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm30, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "B" "AB" "AB"
```

```
games_howell_test(NIR_2021_Vm60, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3 6 -7.23 -30.9 16.5 0.584 ns
2 Zeleny 3 9 -25.4 -47.3 -3.38 0.031 *
3 Zeleny 3 12 -20.4 -43.5 2.73 0.082 ns
4 Zeleny 3 Folyamatos -5.93 -34.6 22.7 0.923 ns
5 Zeleny 6 9 -18.1 -26.6 -9.66 0.004 **
6 Zeleny 6 12 -13.2 -34.9 8.61 0.179 ns
7 Zeleny 6 Folyamatos 1.30 -30.0 32.6 0.999 ns
8 Zeleny 9 12 4.98 -15.1 25.0 0.798 ns
9 Zeleny 9 Folyamatos 19.4 -10.2 49.1 0.16 ns
10 Zeleny 12 Folyamatos 14.4 -13.8 42.7 0.376 ns
```

```
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm60, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm60$Idotartam_nap))
```

```
3 6 9 12 Folyamatos
"A" "A" "B" "AB" "AB"
```

```
games_howell_test(NIR_2020_Vm60, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3 6 -6.65 -20.7 7.38 0.431 ns
2 Zeleny 3 9 -9.83 -20.3 0.667 0.06 ns
3 Zeleny 3 12 -4.23 -14.5 6.06 0.396 ns
4 Zeleny 3 Folyamatos -7.52 -17.8 2.77 0.116 ns
5 Zeleny 6 9 -3.18 -18.8 12.4 0.814 ns
6 Zeleny 6 12 2.42 -13.0 17.9 0.911 ns
7 Zeleny 6 Folyamatos -0.875 -16.4 14.6 0.997 ns
8 Zeleny 9 12 5.6 3.83 7.37 0.000392 ***
9 Zeleny 9 Folyamatos 2.30 0.569 4.03 0.017 *
10 Zeleny 12 Folyamatos -3.30 -5.27 -1.33 0.004 **
```

```
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm60, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm60$Idotartam_nap))
```

```
3 6 9 12 Folyamatos
"A" "A" "A" "A" "A"
```

```
games_howell_test(NIR_2019_Vm60, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3 6 -11.0 -24.8 2.82 0.093 ns
2 Zeleny 3 9 -19.8 -23.2 -16.3 0.00000811 ****
3 Zeleny 3 12 -8.35 -25.4 8.74 0.285 ns
4 Zeleny 3 Folyamatos -19.2 -22.0 -16.5 0.00000166 ****
5 Zeleny 6 9 -8.77 -22.3 4.72 0.161 ns
6 Zeleny 6 12 2.62 -13.5 18.8 0.967 ns
7 Zeleny 6 Folyamatos -8.27 -22.1 5.58 0.188 ns
8 Zeleny 9 12 11.4 -5.41 28.2 0.142 ns
9 Zeleny 9 Folyamatos 0.5 -2.93 3.93 0.974 ns
10 Zeleny 12 Folyamatos -10.9 -28.0 6.24 0.16 ns
```

```

assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm60, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm60$Idotartam_nap))
  3    6    9   12 Folyamatos
  "A"  "AB"  "B"  "AB"  "B"
games_howell_test(NIR_2021_Vm0, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
. y.  group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3    6   -5.62 -26.6  15.3  0.703 ns
2 Zeleny 3    9  -10.4 -31.0  10.2  0.318 ns
3 Zeleny 3   12  -14.3 -36.7   8.17 0.156 ns
4 Zeleny 6    9   -4.75 -14.8   5.27 0.418 ns
5 Zeleny 6   12   -8.65 -16.8 -0.497 0.042 *
6 Zeleny 9   12   -3.9  -14.0   6.21 0.44 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm0, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_Vm0, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
. y.  group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3    6   -2.12 -6.16   1.91 0.276 ns
2 Zeleny 3    9    4.55 -7.28  16.4 0.462 ns
3 Zeleny 3   12   -2.95 -15.5   9.64 0.758 ns
4 Zeleny 6    9    6.67 -5.87  19.2 0.23 ns
5 Zeleny 6   12   -0.825 -14.1  12.5 0.99 ns
6 Zeleny 9   12   -7.5  -20.8   5.82 0.302 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm0, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_Vm0, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
. y.  group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 3    6   -8.62 -23.4   6.13 0.199 ns
2 Zeleny 3    9   -6.77 -21.4   7.88 0.439 ns
3 Zeleny 3   12   -7.08 -20.9   6.78 0.326 ns
4 Zeleny 6    9    1.85 -10.5  14.2 0.909 ns
5 Zeleny 6   12    1.55 -6.03   9.13 0.846 ns
6 Zeleny 9   12   -0.300 -12.1  11.5 1 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm0, Zeleny~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"

```

18. táblázat Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Zeleny-értékére a kontrollhoz viszonyítva

Ev	Vizmely seg cm	Idotartam nap	n_treat	n_ctrl	mean_treat	mean_ctrl	diff	t	df	p	conf_low	conf_high	hedges_g	g_magnitudo	p_adj_holm	direction	signif
2019	0	3	4	4	52,35	63,2	-10,85	-3,05	4,36	0,03408	-20,42395	-1,27605	-3,0067	large	1,70E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	0	6	4	4	43,73	63,2	-19,475	-11,08	4,43	0,00021	-24,17134	-14,77866	-5,3968	large	2,77E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2019	0	9	4	4	45,58	63,2	-17,625	-5,61	4,80	0,00284	-25,80506	-9,44494	-4,8841	large	2,27E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
2019	0	12	4	4	45,28	63,2	-17,925	-7,66	5,94	0,00027	-23,66114	-12,18886	-4,9673	large	3,24E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2019	-30	3	4	4	62,78	63,2	-0,425	-0,26	3,38	0,80805	-5,26139	4,41139	-0,1178	negligible	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-30	6	4	4	47,35	63,2	-15,85	-6,82	5,95	0,00050	-21,54450	-10,15550	-4,3922	large	5,02E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2019	-30	9	4	4	53,75	63,2	-9,45	-3,57	5,51	0,01368	-16,07739	-2,82261	-2,6187	large	9,58E-02	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-30	12	4	4	50,15	63,2	-13,05	-2,97	3,86	0,04312	-25,43540	-0,66460	-3,6163	large	1,72E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-60	3	4	4	63,75	63,2	0,55	0,33	3,68	0,75792	-4,21165	5,31165	0,1524	negligible	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-60	6	4	4	52,78	63,2	-10,425	-3,35	4,83	0,02139	-18,50607	-2,34393	-2,8889	large	1,28E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-60	9	4	4	44,00	63,2	-19,2	-11,12	4,22	0,00028	-23,89986	-14,50014	-5,3206	large	3,24E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2019	-60	12	4	4	55,40	63,2	-7,8	-2,14	4,29	0,09473	-17,66697	2,06697	-2,1615	large	2,84E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-60	Folyamatos	4	4	44,50	63,2	-18,7	-11,37	3,58	0,00061	-23,48209	-13,91791	-5,1820	large	5,51E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2020	0	3	4	4	54,08	72,63	-18,55	-18,63	4,12	0,00004	-21,28320	-15,81680	-20,1238	large	3,14E-04	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
2020	0	6	4	4	51,95	72,63	-20,675	-38,52	5,92	0,00000	-21,99266	-19,35734	-22,4291	large	3,19E-07	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
2020	0	9	4	4	58,63	72,63	-14	-5,24	3,14	0,01205	-22,28765	-5,71235	-15,1878	large	4,82E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
2020	0	12	4	4	51,13	72,63	-21,5	-7,62	3,12	0,00407	-30,28482	-12,71518	-23,3241	large	2,04E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
2020	-30	3	4	4	53,08	72,63	-19,55	-24,87	4,88	0,00000	-21,58622	-17,51378	-21,2086	large	2,26E-05	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
2020	-30	6	4	4	50,03	72,63	-22,6	-12,29	3,30	0,00072	-28,16196	-17,03804	-24,5174	large	5,05E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2020	-30	9	4	4	57,30	72,63	-15,325	-10,94	3,53	0,00076	-19,42691	-11,22309	-16,6252	large	5,05E-03	↓ alacsonyabb a kontrollnál	**
2020	-30	12	4	4	57,50	72,63	-15,125	-4,73	3,10	0,01664	-25,11667	-5,13333	-16,4082	large	4,82E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
2020	-60	3	4	4	63,73	72,63	-8,9	-4,37	3,24	0,01889	-15,11959	-2,68041	-9,6551	large	4,82E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
2020	-60	6	4	4	57,08	72,63	-15,55	-5,21	3,11	0,01257	-24,86451	-6,23549	-16,8693	large	4,82E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*
2020	-60	9	4	4	53,90	72,63	-18,725	-41,46	4,51	0,00000	-19,92501	-17,52499	-20,3136	large	5,37E-06	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
2020	-60	12	4	4	59,50	72,63	-13,125	-23,87	5,98	0,00000	-14,47162	-11,77838	-14,2385	large	4,08E-06	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
2020	-60	Folyamatos	4	4	56,20	72,63	-16,425	-30,21	5,96	0,00000	-17,75785	-15,09215	-17,8185	large	1,15E-06	↓ alacsonyabb a kontrollnál	***
2021	0	3	4	4	40,53	39,65	0,875	0,16	4,86	0,87949	-13,32572	15,07572	0,1368	negligible	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	0	6	4	4	34,90	39,65	-4,75	-1,43	5,16	0,21021	-13,20572	3,70572	-0,7426	medium	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	0	9	4	4	30,15	39,65	-9,5	-2,67	5,71	0,03865	-18,30062	-0,69938	-1,4852	large	3,66E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	0	12	4	4	26,25	39,65	-13,4	-4,71	3,29	0,01475	-22,02867	-4,77133	-2,0949	large	1,92E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	3	4	4	47,90	39,65	8,25	1,90	5,81	0,10762	-2,45357	18,95357	1,2898	large	7,53E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	6	4	4	41,48	39,65	1,825	0,49	5,93	0,64312	-7,35249	11,00249	0,2853	small	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	9	4	4	29,65	39,65	-10	-3,09	4,89	0,02799	-18,37644	-1,62356	-1,5634	large	3,08E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	12	4	4	36,18	39,65	-3,475	-0,48	4,00	0,65682	-23,60174	16,65174	-0,5433	medium	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	3	4	4	54,70	39,65	15,05	2,83	4,99	0,03658	1,39144	28,70856	2,3529	large	3,66E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	6	4	4	47,48	39,65	7,825	2,77	3,21	0,06470	-0,85521	16,50521	1,2233	large	5,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	9	4	4	29,35	39,65	-10,3	-3,16	4,98	0,02533	-18,69768	-1,90232	-1,6103	large	3,04E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	12	4	4	34,33	39,65	-5,325	-1,06	5,23	0,33389	-18,01737	7,36737	-0,8325	large	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	Folyamatos	4	4	48,78	39,65	9,125	1,39	4,26	0,23216	-8,64629	26,89629	1,4266	large	1,00E+00	nincs szignifikáns különbség	ns

19. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza Zeleny-értékére vízmélység szerinti összehasonlítások r programnyelven

Vízmélység szerinti összehasonlítások

library(rstatix)

games_howell_test(NIR_2021_I12, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

A tibble: 3 × 8

.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif

* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>

1 Zeleny 0 -30 9.92 -17.9 37.7 0.414 ns

2 Zeleny 0 -60 8.08 -9.03 25.2 0.273 ns

3 Zeleny -30 -60 -1.85 -27.5 23.8 0.97 ns

assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I12, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),

factor(NIR_2021_I12\$Vizmelyseg_cm))

0 -30 -60

"A" "A" "A"

games_howell_test(NIR_2020_I12, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

A tibble: 3 × 8

.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif

* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>

1 Zeleny 0 -30 6.38 -6.65 19.4 0.353 ns

```

2 Zeleny 0 -60 8.38 -3.14 19.9 0.111 ns
3 Zeleny -30 -60 2 -11.1 15.1 0.817 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I12, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I12, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 4.88 -10.9 20.7 0.566 ns
2 Zeleny 0 -60 10.1 -2.44 22.7 0.098 ns
3 Zeleny -30 -60 5.25 -11.1 21.6 0.606 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I12, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2021_I3, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 7.38 -10.9 25.7 0.461 ns
2 Zeleny 0 -60 14.2 -5.89 34.2 0.156 ns
3 Zeleny -30 -60 6.80 -10.9 24.5 0.493 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I3, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_I3, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 -1 -4.57 2.57 0.672 ns
2 Zeleny 0 -60 9.65 1.99 17.3 0.023 *
3 Zeleny -30 -60 10.6 2.82 18.5 0.019 *
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I3, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "B"
games_howell_test(NIR_2019_I3, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 10.4 -2.78 23.6 0.091 ns
2 Zeleny 0 -60 11.4 -1.70 24.5 0.072 ns
3 Zeleny -30 -60 0.975 -1.11 3.06 0.372 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I3, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2021_I6, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

```

```

# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 6.58 -3.18 16.3 0.171 ns
2 Zeleny 0 -60 12.6 5.37 19.8 0.009 **
3 Zeleny -30 -60 6 -4.14 16.1 0.181 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I6, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I6$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "AB" "B"
games_howell_test(NIR_2020_I6, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 -1.93 -9.21 5.36 0.596 ns
2 Zeleny 0 -60 5.12 -7.10 17.4 0.33 ns
3 Zeleny -30 -60 7.05 -4.26 18.4 0.199 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I6, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I6$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I6, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 3.62 -2.94 10.2 0.242 ns
2 Zeleny 0 -60 9.05 -1.60 19.7 0.079 ns
3 Zeleny -30 -60 5.42 -4.87 15.7 0.291 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I6, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I6$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2021_I9, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 -0.5 -9.17 8.17 0.982 ns
2 Zeleny 0 -60 -0.800 -9.53 7.93 0.956 ns
3 Zeleny -30 -60 -0.300 -7.59 6.99 0.991 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I9, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I9$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_I9, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 -1.33 -11.4 8.74 0.898 ns
2 Zeleny 0 -60 -4.73 -15.7 6.25 0.313 ns
3 Zeleny -30 -60 -3.4 -8.91 2.11 0.162 ns

```

```

assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2020_I9, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I9$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I9, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Zeleny 0 -30 8.17 -2.62 19.0 0.126 ns
2 Zeleny 0 -60 -1.58 -12.4 9.29 0.849 ns
3 Zeleny -30 -60 -9.75 -18.1 -1.38 0.031 *
assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2019_I9, Zeleny~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I9$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"

```

M9. HOZAM STATISZTIKA

20. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozamának időtartam szerinti összehasonlítások r programnyelven

```
## . post hoc test: Games-Howell (not equal variances) #####
## Games-Howell post hoc test for the Idotartam_nap subsets separately
# Időtartam szerinti összehasonlítások #####
library(rstatix)
games_howell_test(NIR_2021_Vm30, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 3 6 -0.238 -0.463 -0.0120 0.041 *
2 Hozam 3 9 -0.0375 -0.244 0.169 0.918 ns
3 Hozam 3 12 -0.0425 -0.321 0.236 0.94 ns
4 Hozam 6 9 0.2 -0.0306 0.431 0.085 ns
5 Hozam 6 12 0.195 -0.0919 0.482 0.183 ns
6 Hozam 9 12 -0.00500 -0.285 0.275 1 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm30, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "B" "AB" "AB"
games_howell_test(NIR_2020_Vm30, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 3 6 0.0350 -0.125 0.195 0.761 ns
2 Hozam 3 9 0.0475 -0.105 0.200 0.613 ns
3 Hozam 3 12 0.12 -0.0327 0.273 0.102 ns
4 Hozam 6 9 0.0125 -0.0445 0.0695 0.835 ns
5 Hozam 6 12 0.085 0.0305 0.139 0.009 **
6 Hozam 9 12 0.0725 0.00946 0.136 0.028 *
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm30, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_Vm30, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 3 6 0.0325 -0.0436 0.109 0.399 ns
2 Hozam 3 9 -0.0425 -0.117 0.0315 0.262 ns
3 Hozam 3 12 -0.0725 -0.182 0.0366 0.189 ns
4 Hozam 6 9 -0.0750 -0.120 -0.0303 0.006 **
5 Hozam 6 12 -0.105 -0.220 0.00996 0.065 ns
6 Hozam 9 12 -0.0300 -0.140 0.0800 0.703 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm30, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm30$Idotartam_nap))
 3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
```

```
games_howell_test(NIR_2021_Vm60, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif  
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
```

```
1 Hozam 3 6 0 -0.382 0.382 1 ns  
2 Hozam 3 9 0.0775 -0.252 0.407 0.888 ns  
3 Hozam 3 12 0.208 -0.111 0.526 0.195 ns  
4 Hozam 3 Folyamatos -0.0975 -0.423 0.228 0.688 ns  
5 Hozam 6 9 0.0775 -0.283 0.438 0.909 ns  
6 Hozam 6 12 0.208 -0.150 0.565 0.252 ns  
7 Hozam 6 Folyamatos -0.0975 -0.466 0.271 0.749 ns  
8 Hozam 9 12 0.13 -0.127 0.387 0.384 ns  
9 Hozam 9 Folyamatos -0.175 -0.430 0.0802 0.165 ns  
10 Hozam 12 Folyamatos -0.305 -0.486 -0.124 0.005 **
```

```
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm60, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),  
 factor(NIR_2021_Vm60$Idotartam_nap))
```

```
3 6 9 12 Folyamatos  
"A" "A" "A" "A" "A"
```

```
games_howell_test(NIR_2020_Vm60, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif  
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
```

```
1 Hozam 3 6 0.0500 -0.136 0.236 0.696 ns  
2 Hozam 3 9 -0.0500 -0.101 0.000792 0.053 ns  
3 Hozam 3 12 0.0425 -0.0599 0.145 0.454 ns  
4 Hozam 3 Folyamatos 0.0825 0.0132 0.152 0.026 *  
5 Hozam 6 9 -0.1 -0.283 0.0830 0.244 ns  
6 Hozam 6 12 -0.00750 -0.180 0.165 1 ns  
7 Hozam 6 Folyamatos 0.0325 -0.144 0.209 0.91 ns  
8 Hozam 9 12 0.0925 -0.00816 0.193 0.067 ns  
9 Hozam 9 Folyamatos 0.132 0.0624 0.203 0.003 **  
10 Hozam 12 Folyamatos 0.0400 -0.0609 0.141 0.576 ns
```

```
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm60, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),  
 factor(NIR_2020_Vm60$Idotartam_nap))
```

```
3 6 9 12 Folyamatos  
"A" "AB" "A" "AB" "B"
```

```
games_howell_test(NIR_2019_Vm60, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
```

```
# A tibble: 10 × 8
```

```
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif  
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
```

```
1 Hozam 3 6 0.0200 -0.0583 0.0983 0.844 ns  
2 Hozam 3 9 0.0625 -0.0267 0.152 0.18 ns  
3 Hozam 3 12 -0.0750 -0.266 0.116 0.5 ns  
4 Hozam 3 Folyamatos 0.01000 -0.111 0.131 0.997 ns  
5 Hozam 6 9 0.0425 -0.0382 0.123 0.346 ns  
6 Hozam 6 12 -0.0950 -0.293 0.103 0.32 ns  
7 Hozam 6 Folyamatos -0.0100 -0.133 0.113 0.995 ns  
8 Hozam 9 12 -0.138 -0.328 0.0526 0.135 ns  
9 Hozam 9 Folyamatos -0.0525 -0.174 0.0689 0.501 ns  
10 Hozam 12 Folyamatos 0.085 -0.102 0.272 0.459 ns
```

```

assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm60, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm60$Idotartam_nap))
  3    6    9    12 Folyamatos
  "A"  "A"  "A"  "A"  "A"
games_howell_test(NIR_2021_Vm0, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 3    6   -0.128 -0.592  0.337 0.648 ns
2 Hozam 3    9    0.14  -0.312  0.592 0.602 ns
3 Hozam 3   12    0.0950 -0.349  0.539 0.818 ns
4 Hozam 6    9    0.267  0.120  0.415 0.004 **
5 Hozam 6   12    0.222  0.0469  0.398 0.02 *
6 Hozam 9   12   -0.0450 -0.229  0.139 0.826 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_Vm0, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2021_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_Vm0, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 3    6    0.00750 -0.0804  0.0954 0.988 ns
2 Hozam 3    9    0.0450 -0.0426  0.133 0.32 ns
3 Hozam 3   12    0.00250 -0.104  0.109 1 ns
4 Hozam 6    9    0.0375 -0.0221  0.0971 0.228 ns
5 Hozam 6   12   -0.00500 -0.104  0.0940 0.997 ns
6 Hozam 9   12   -0.0425 -0.142  0.0572 0.431 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_Vm0, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2020_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_Vm0, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F)
# A tibble: 6 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 3    6    0 -0.150  0.150 1 ns
2 Hozam 3    9   -0.1 -0.247  0.0469 0.179 ns
3 Hozam 3   12  -0.0500 -0.196  0.0965 0.573 ns
4 Hozam 6    9   -0.1 -0.224  0.0236 0.109 ns
5 Hozam 6   12  -0.0500 -0.165  0.0646 0.436 ns
6 Hozam 9   12   0.0500 -0.0533  0.153 0.376 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_Vm0, Hozam~Idotartam_nap, detailed = F),
  factor(NIR_2019_Vm0$Idotartam_nap))
  3 6 9 12
"A" "A" "A" "A"

```

21. táblázat Welch-féle kétmintás t-próba (Welch Two Sample t-test) az őszi búza termésének Fehérje %-a a kontrollhoz viszonyítva

Ev	Vizmelyse g cm	Idotartam nap	n_treat	n_ctrl	mean treat	mean ctrl	diff	t	df	p	conf_low	conf_high	hedges_g	g_magnitude	p_adj_h olm	direction	signif
2019	0	3	4	4	0.72	0.485	0.235	6.90	3,22	0.00492	0.13082	0.33918	15,8287	large	2,46E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2019	0	6	4	4	0.72	0.485	0.235	8.63	3,36	0.00210	0.15331	0.31669	15,8287	large	1,26E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2019	0	9	4	4	0.62	0.485	0.135	5.47	3,44	0.00831	0.06188	0.20812	9,0931	large	3,28E-02	↑ magasabb a kontrollnál	**
2019	0	12	4	4	0.67	0.485	0.185	11,51	4,11	0.00028	0.14085	0.22915	12,4609	large	2,78E-03	↑ magasabb a kontrollnál	**
2019	-30	3	4	4	0.68	0.485	0.19	10,41	3,84	0.00059	0.13847	0.24153	12,7977	large	4,74E-03	↑ magasabb a kontrollnál	**
2019	-30	6	4	4	0.71	0.485	0.2225	24,68	6,00	0.00000	0.20044	0.24456	14,9868	large	3,81E-06	↑ magasabb a kontrollnál	***
2019	-30	9	4	4	0.63	0.485	0.1475	12,13	5,04	0.00006	0.11631	0.17869	9,9350	large	7,68E-04	↑ magasabb a kontrollnál	***
2019	-30	12	4	4	0.60	0.485	0.1175	4,56	3,40	0.01503	0.04065	0.19435	7,9144	large	3,28E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2019	-60	3	4	4	0.62	0.485	0.1375	7,75	3,90	0.00166	0.08773	0.18727	9,2615	large	1,16E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2019	-60	6	4	4	0.64	0.485	0.1575	12,28	4,82	0.00008	0.12416	0.19084	10,6086	large	8,82E-04	↑ magasabb a kontrollnál	**
2019	-60	9	4	4	0.69	0.485	0.2	10,95	3,84	0.00049	0.14847	0.25153	13,4712	large	4,41E-03	↑ magasabb a kontrollnál	**
2019	-60	12	4	4	0.55	0.485	0.0625	1,56	3,16	0.21318	-0.06182	0.18682	4,2098	large	2,13E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2019	-60	Folyamato	4	4	0.63	0.485	0.1475	5,58	3,38	0.00820	0.06852	0.22648	9,9350	large	3,28E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2020	0	3	4	4	0.53	0.443	0.0825	3,42	5,15	0.01792	0.02108	0.14392	2,7278	large	8,96E-02	nincs szignifikáns különbség	ns
2020	0	6	4	4	0.53	0.443	0.09	4,84	6,00	0.00288	0.04450	0.13550	2,9757	large	2,64E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2020	0	9	4	4	0.57	0.443	0.1275	7,49	5,78	0.00035	0.08548	0.16952	4,2156	large	3,82E-03	↑ magasabb a kontrollnál	**
2020	0	12	4	4	0.53	0.443	0.085	3,22	4,79	0.02489	-0.01628	0.15372	2,8104	large	9,96E-02	nincs szignifikáns különbség	ns
2020	-30	3	4	4	0.48	0.443	0.0325	0,89	3,86	0.42768	-0.07086	0.13586	1,0746	large	4,28E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2020	-30	6	4	4	0.51	0.443	0.0675	4,52	4,60	0.00766	0.02810	0.10690	2,2318	large	4,60E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2020	-30	9	4	4	0.52	0.443	0.08	4,30	6,00	0.00508	0.03450	0.12550	2,6451	large	3,56E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2020	-30	12	4	4	0.60	0.443	0.1525	8,38	5,99	0.00016	-0.10794	0.19706	5,0422	large	2,04E-03	↑ magasabb a kontrollnál	**
2020	-60	3	4	4	0.53	0.443	0.085	5,42	5,15	0.00264	0.04504	0.12496	2,8104	large	2,64E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2020	-60	6	4	4	0.58	0.443	0.135	3,47	3,76	0.02820	0.02427	0.24573	4,4636	large	9,96E-02	nincs szignifikáns különbség	ns
2020	-60	9	4	4	0.48	0.443	0.035	2,09	5,68	0.08371	-0.00646	0.07646	1,1572	large	1,67E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2020	-60	12	4	4	0.57	0.443	0.1275	5,11	5,01	0.00372	0.06338	0.19162	4,2156	large	2,98E-02	↑ magasabb a kontrollnál	*
2020	-60	Folyamato	4	4	0.61	0.443	0.1675	8,49	5,93	0.00016	0.11906	0.21594	5,5382	large	2,04E-03	↑ magasabb a kontrollnál	**
2021	0	3	4	4	0.45	0.398	0.0525	0,52	3,02	0.63815	-0.26682	0.37182	3,6281	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	0	6	4	4	0.32	0.398	-0.075	-2,99	3,40	0.04958	-0.14976	-0.00024	-5,1830	large	4,96E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	0	9	4	4	0.59	0.398	0.1925	5,66	3,21	0.00905	0.08822	0.29678	13,3029	large	1,09E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	0	12	4	4	0.55	0.398	0.1475	3,60	3,14	0.03410	0.02034	0.27466	10,1931	large	3,75E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	3	4	4	0.52	0.398	0.125	3,05	3,14	0.05211	-0.00208	0.25208	8,6383	large	4,96E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	6	4	4	0.29	0.398	-0.1125	-2,24	3,10	0.10863	-0.26986	0.04486	-7,7744	large	8,69E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	9	4	4	0.49	0.398	0.0875	1,99	3,13	0.13685	-0.04923	0.22423	6,0468	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-30	12	4	4	0.48	0.398	0.0825	1,28	3,06	0.28912	-0.12050	0.28550	5,7012	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	3	4	4	0.27	0.398	-0.13	-1,92	3,05	0.14942	-0.34368	0.08368	-8,9838	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	6	4	4	0.27	0.398	-0.13	-1,72	3,04	0.18360	-0.36938	0.10938	-8,9838	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	9	4	4	0.35	0.398	-0.0525	-0,97	3,08	0.40318	-0.22273	0.11773	-3,6281	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	12	4	4	0.48	0.398	0.0775	2,03	3,17	0.13117	-0.04075	0.19575	5,3557	large	9,18E-01	nincs szignifikáns különbség	ns
2021	-60	Folyamato	4	4	0.17	0.398	-0.2275	-8,10	3,32	0.00270	-0.31230	-0.14270	-15,7216	large	3,51E-02	↓ alacsonyabb a kontrollnál	*

22. táblázat Games-Howell post-hoc teszt az őszi búza hozamára vízmélység szerinti összehasonlítások r programnyelven

Vízmélység szerinti összehasonlítások

library(rstatix)

games_howell_test(NIR_2021_I12, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

A tibble: 3 × 8

.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif

* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>

1 Hozam 0 -30 -0.0650 -0.311 0.181 0.688 ns

2 Hozam 0 -60 -0.0700 -0.240 0.100 0.463 ns

3 Hozam -30 -60 -0.00500 -0.250 0.240 0.998 ns

assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I12, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
factor(NIR_2021_I12\$Vizmelyseg_cm))

0 -30 -60

"A" "A" "A"

games_howell_test(NIR_2020_I12, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

A tibble: 3 × 8

.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif

* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>

1 Hozam 0 -30 0.0675 -0.0197 0.155 0.111 ns

```

2 Hozam 0 -60 0.0425 -0.0534 0.138 0.416 ns
3 Hozam -30 -60 -0.0250 -0.106 0.0560 0.602 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I12, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I12, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0675 -0.163 0.0277 0.144 ns
2 Hozam 0 -60 -0.123 -0.277 0.0318 0.097 ns
3 Hozam -30 -60 -0.0550 -0.207 0.0969 0.516 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I12, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I12$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2021_I3, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 0.0725 -0.316 0.461 0.793 ns
2 Hozam 0 -60 -0.182 -0.570 0.205 0.361 ns
3 Hozam -30 -60 -0.255 -0.513 0.00278 0.052 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I3, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_I3, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0500 -0.181 0.0808 0.476 ns
2 Hozam 0 -60 0.00250 -0.0753 0.0803 0.993 ns
3 Hozam -30 -60 0.0525 -0.0850 0.190 0.401 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I3, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I3, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
.y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0450 -0.172 0.0825 0.508 ns
2 Hozam 0 -60 -0.0975 -0.225 0.0301 0.113 ns
3 Hozam -30 -60 -0.0525 -0.125 0.0204 0.148 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I3, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I3$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2021_I6, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)

```

```

# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0375 -0.228 0.153 0.788 ns
2 Hozam 0 -60 -0.055 -0.352 0.242 0.781 ns
3 Hozam -30 -60 -0.0175 -0.308 0.273 0.98 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I6, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I6$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2020_I6, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0225 -0.0726 0.0276 0.369 ns
2 Hozam 0 -60 0.0450 -0.0978 0.188 0.537 ns
3 Hozam -30 -60 0.0675 -0.0814 0.216 0.299 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2020_I6, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I6$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2019_I6, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0125 -0.119 0.0939 0.894 ns
2 Hozam 0 -60 -0.0775 -0.179 0.0245 0.111 ns
3 Hozam -30 -60 -0.0650 -0.107 -0.0227 0.01 **
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2019_I6, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I6$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "A" "A"
games_howell_test(NIR_2021_I9, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.105 -0.277 0.0666 0.22 ns
2 Hozam 0 -60 -0.245 -0.451 -0.0387 0.027 *
3 Hozam -30 -60 -0.14 -0.355 0.0754 0.191 ns
assign_letters_GH_rstatix(games_howell_test(NIR_2021_I9, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2021_I9$Vizmelyseg_cm))
  0 -30 -60
"A" "AB" "B"
games_howell_test(NIR_2020_I9, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
  .y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 -0.0475 -0.100 0.00529 0.073 ns
2 Hozam 0 -60 -0.0925 -0.138 -0.0467 0.002 **
3 Hozam -30 -60 -0.045 -0.0971 0.00712 0.084 ns

```

```

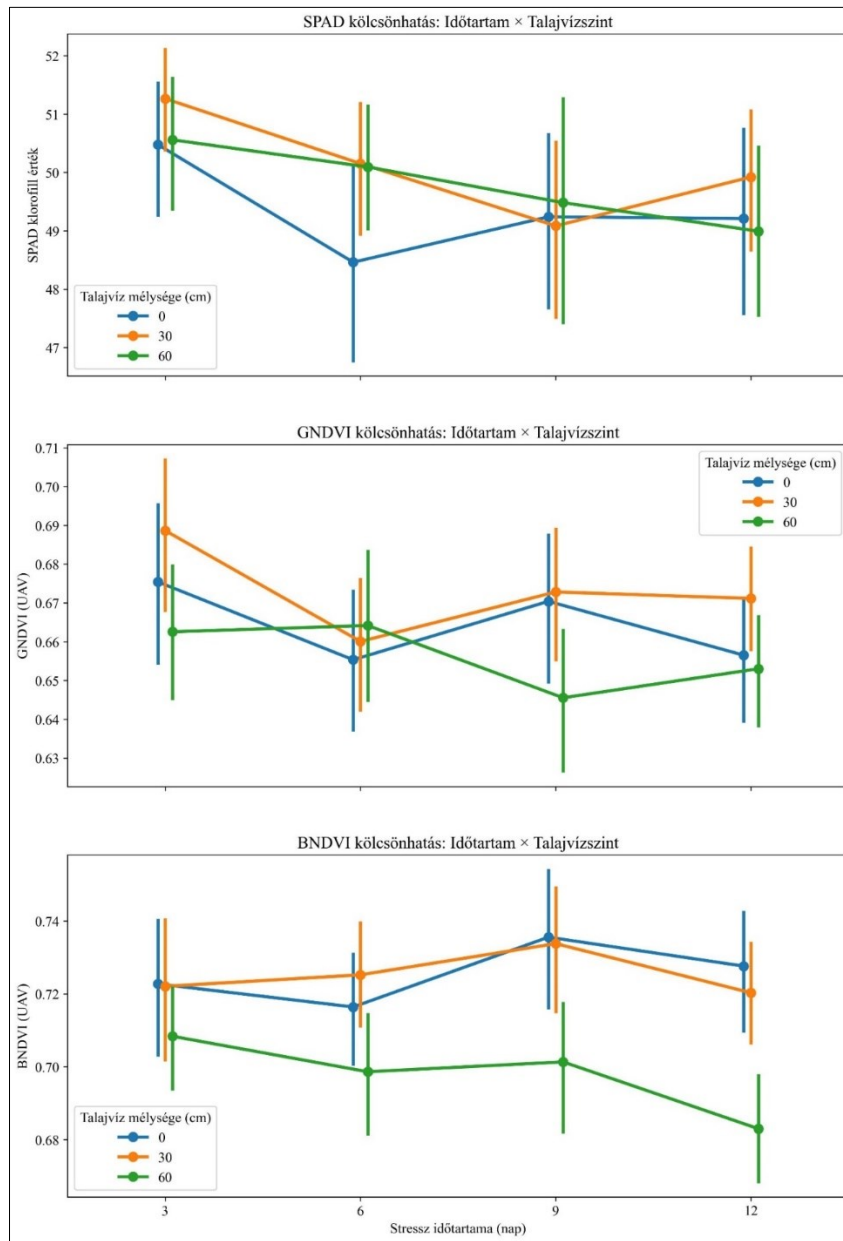
assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2020_I9, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2020_I9$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "AB" "B"
games_howell_test(NIR_2019_I9, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F)
# A tibble: 3 × 8
. y. group1 group2 estimate conf.low conf.high p.adj p.adj.signif
* <chr> <chr> <chr> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <chr>
1 Hozam 0 -30 0.0125 -0.0790 0.104 0.883 ns
2 Hozam 0 -60 0.0650 -0.0276 0.158 0.154 ns
3 Hozam -30 -60 0.0525 -0.0127 0.118 0.101 ns
assign_letters_GH_rstax(games_howell_test(NIR_2019_I9, Hozam~Vizmelyseg_cm, detailed = F),
  factor(NIR_2019_I9$Vizmelyseg_cm))
0 -30 -60
"A" "A" "A"

```

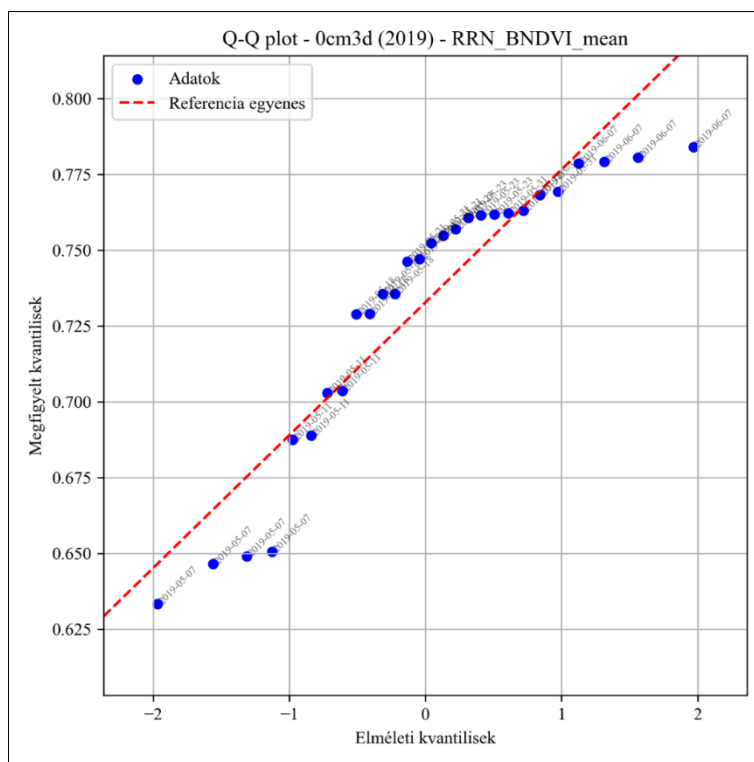


41. ábra Kezelési különbségek százaléka évenkénti bontásban a kontrollhoz képest

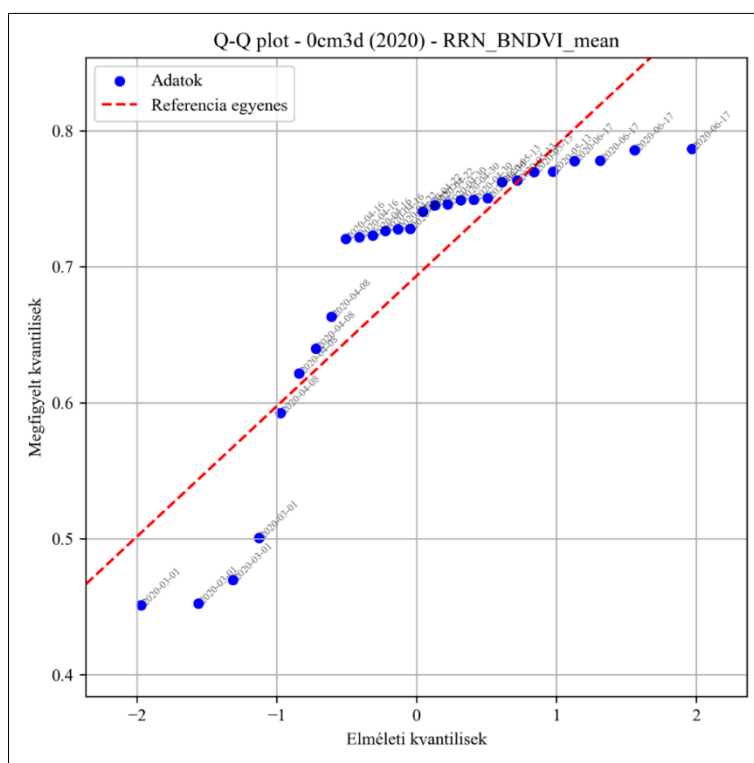
M10. SPAD RELATÍV KLOROFILTARTALOM INDEX ÉS A VEGETÁSCIÓS INDEXEK



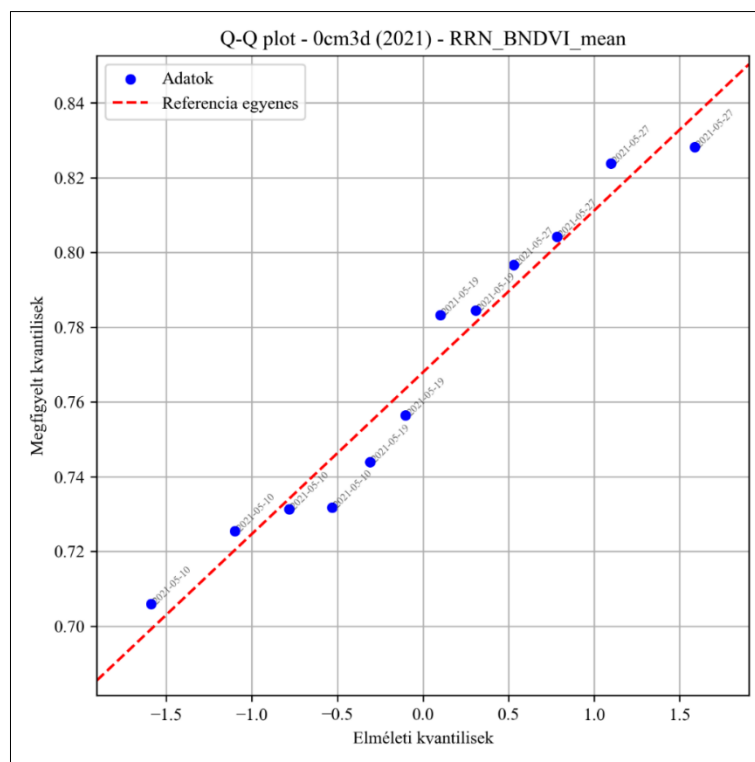
42. ábra Az őszi búza GNDVI és BNDVI és SPAD index értékének kétutas (kétfaktoros) interakció diagramja (two-way interaction plot) az időtartam és vízmélységre



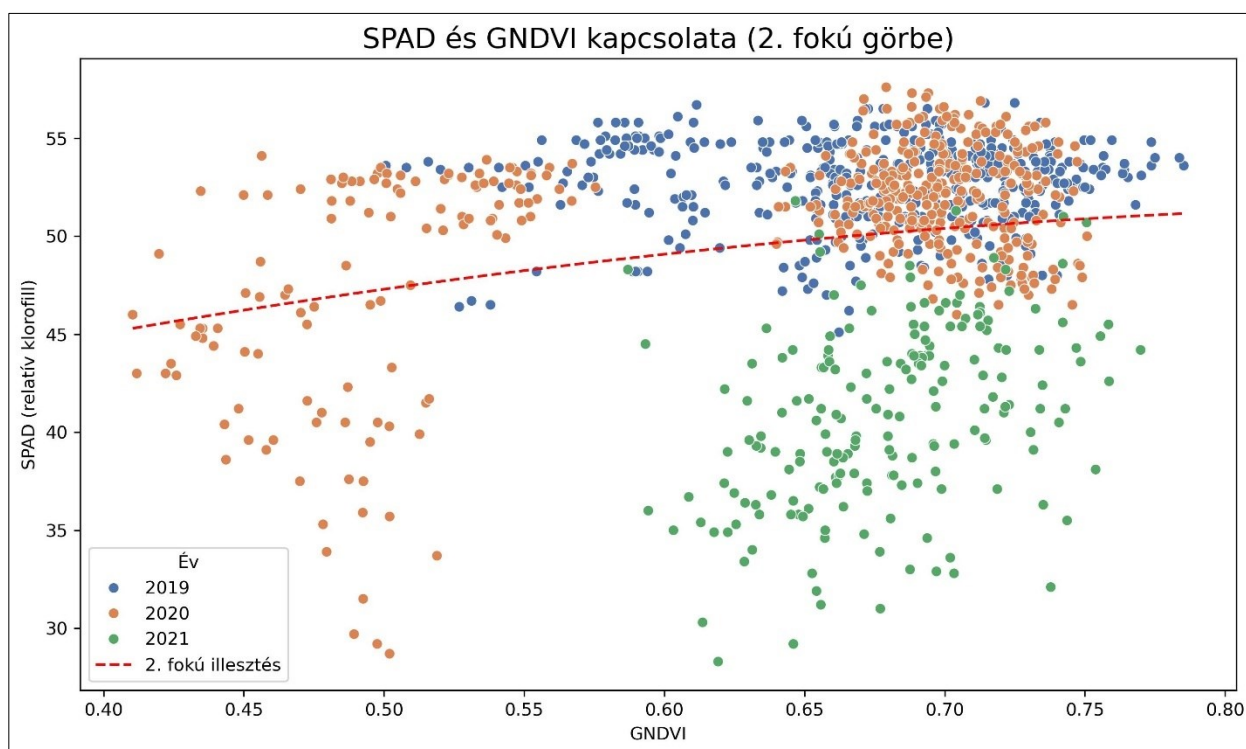
43. ábra Az BNDVI normálítási vizsgálata (Q–Q ábra; 2019, 0 cm, 3 nap)



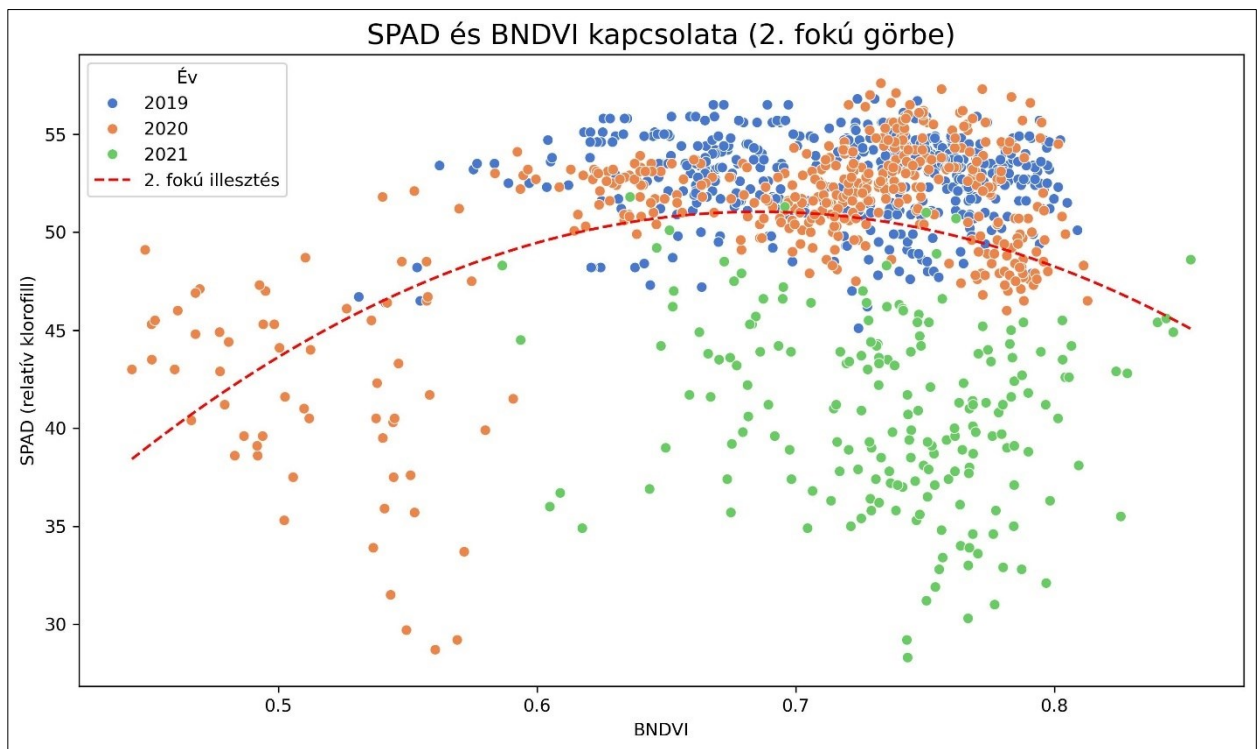
44. ábra Az BNDVI normálítási vizsgálata (Q–Q ábra; 2020, 0 cm, 3 nap)



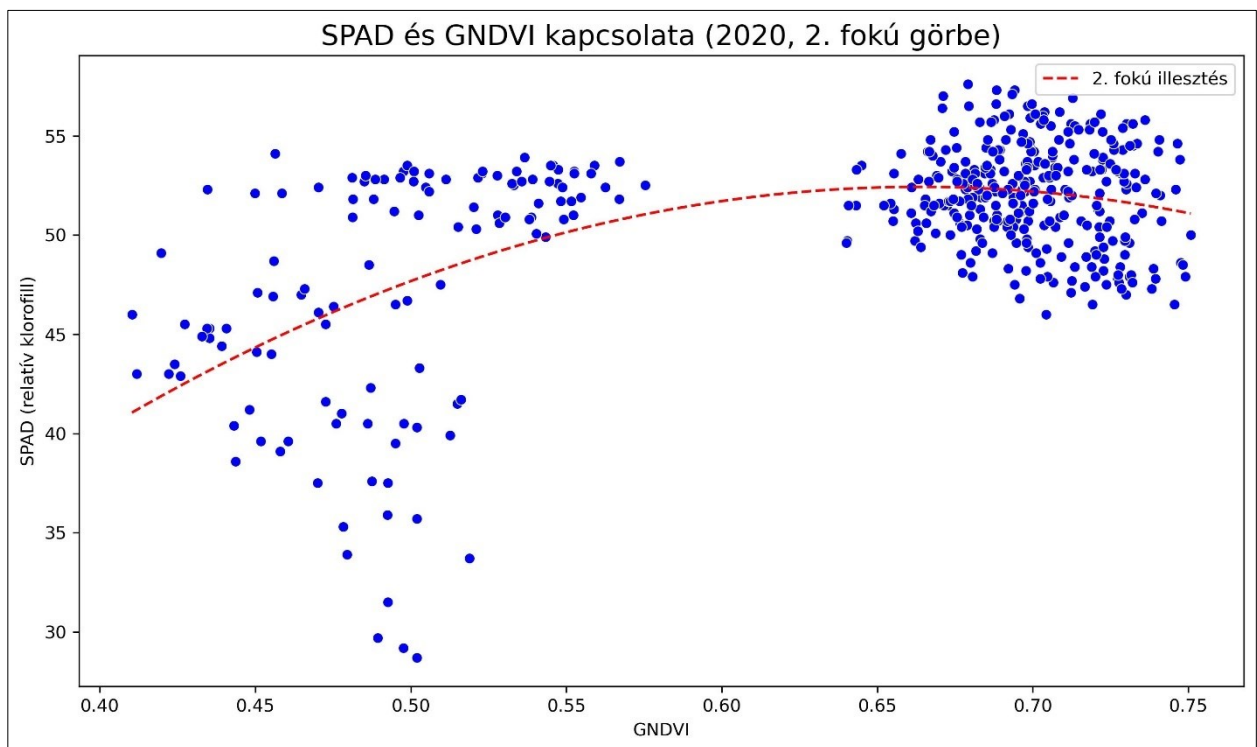
45. ábra Az BNDVI normálítási vizsgálata (Q–Q ábra; 2021, 0 cm, 3 nap)



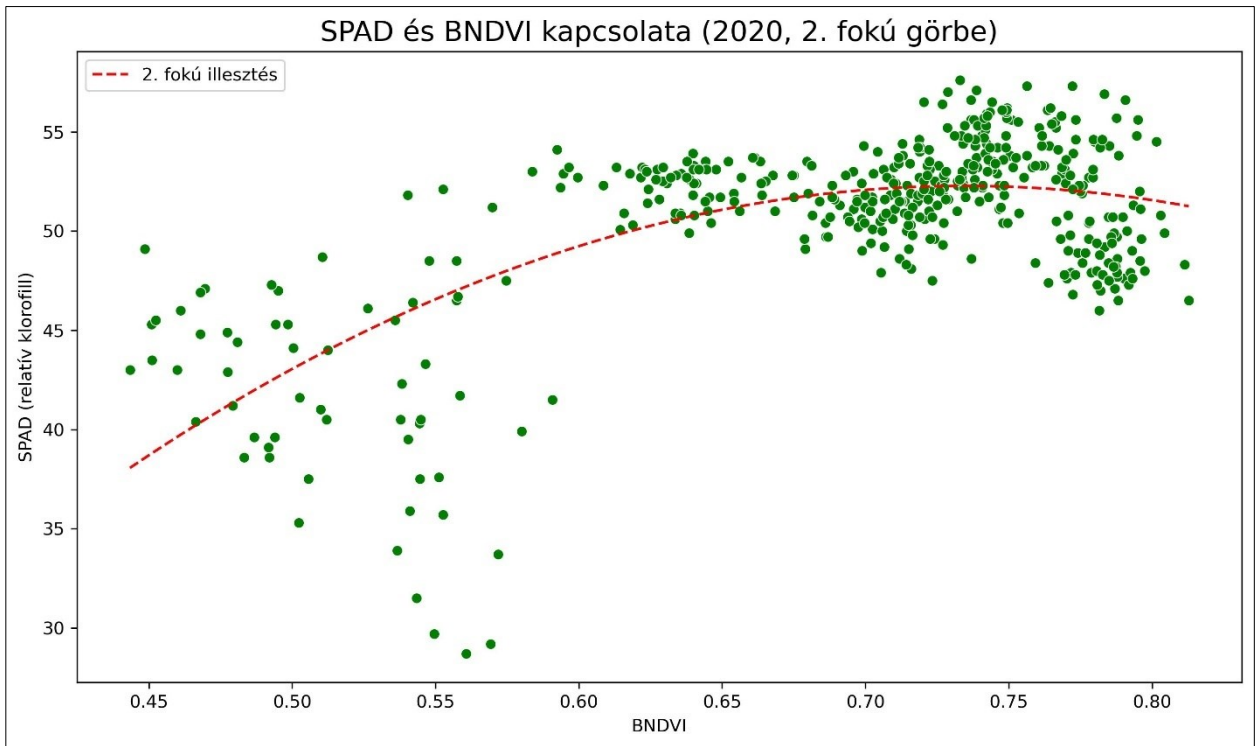
46. ábra A három év SPAD és GNDVI 2. fokú illesztése



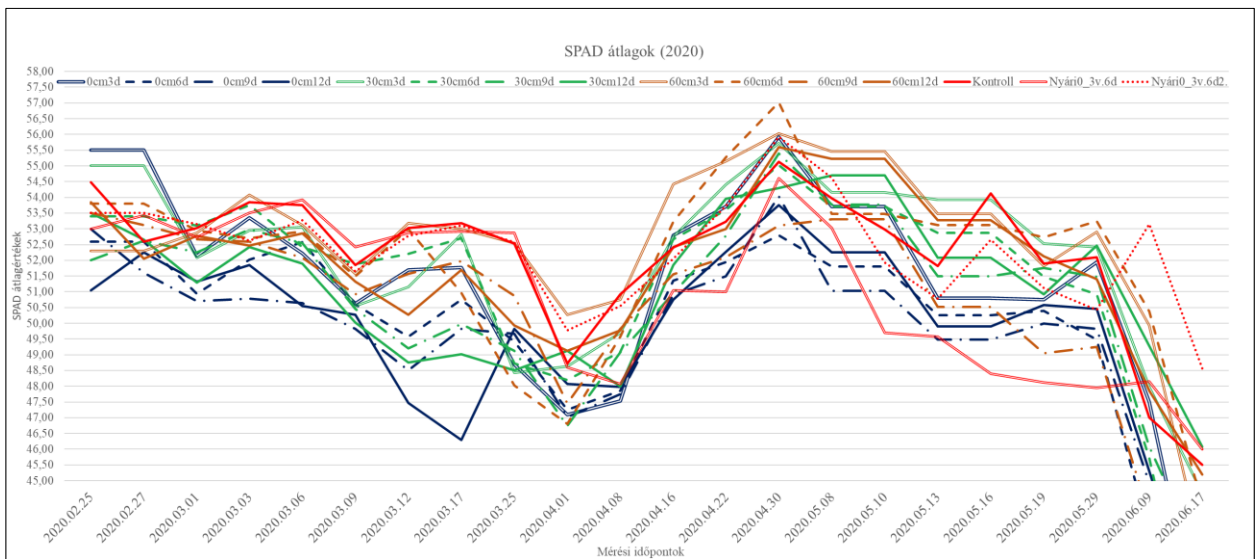
47. ábra A három év SPAD és BNDVI 2. fokú illesztése



48. ábra A 2020-as év SPAD és GNDVI 2. fokú illesztése



49. ábra A 2020-as év SPAD és BNDVI 2. fokú illesztése



50. ábra A 2020-as év SPAD átlag értékei kezelésenként a mérési időpontokra

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A doktori disszertáció elkészítése egy hosszú, kihívásokkal teli, de értékes tanulási folyamat volt, amely során sokan támogattak, bátorítottak és szakmailag segítettek. E helyen szeretném kifejezni hálámat mindazoknak, akik hozzájárultak munkám megvalósításához.

Elsősorban szeretnék köszönetet mondani dr. habil. Géczi Gábor témavezetőmnek, aki nemcsak irányt mutatott, de minden alkalommal bizalommal fordulhattam felé, és végtelen türelemmel segített. Értékes szakmai tanácsai, kritikus észrevételei és következetes támogatása, ösztönzése nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre. Ugyanilyen hálával tartozom dr. habil. Waltner István témavezetőmnek is, aki szakmai útmutatása mellett mindig bátorított, és segített strukturálni gondolataimat a kutatás kritikus pontjain. Köszönöm Csákiné prof. dr. Michéli Erika intézetigazgató asszonynak, hogy lehetővé tette a Környezettudományi Doktori Iskola PhD programjába felvételemet valamint szakmai és emberi támogatását. Köszönöm a Doktori és Habilitációs Központ munkatársainak, elsősorban Megyeri Ágnes doktori referensnek és Hajdú Mónika központvezetőnek; valamint dr. Gulyás Miklósnak a Környezettudományi Doktori Iskola tudományos titkárának a képzés során felmerülő kérdésekkel kapcsolatban nyújtott segítségét.

Külön köszönöm Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet (KÖTI) munkatársainak és azon belül külön az Öntözési- és Vízgazdálkodási Kutatóközpont (ÖVKI) munkatársainak a kutatási környezet biztosítását, valamint a közös gondolkodást és technikai feltételeket. Dr. Bozán Csaba kutatóközpont-vezető úrnak köszönöm szépen, hogy felvett az ÖVKI-be és szakmailag, emberileg segített minden szükséges feltétel megteremtésében. Az ÖVKI Liziméter Telep munkatársainak, Babák Imrénének, Jansik Andrásnak, Komár Évának, Lustyik Pálnének és Szedljk Mihálynének a segítségét. Az ÖVKI Öntözésfejlesztési Osztály jelenlegi és volt munkatársainak dr. Székely Árpádnak, Szalóki Tímea Pálmának és dr. Kolozsvári Ildikónak a mérések és minden egyéb segítségüket. Külön köszönöm dr. Jancsó Mihály, dr. Kun Ágnes, dr. Boros Norbert, dr. Gelsleichter Yuri, dr. Melenya Ocansey Caleb, dr. Ibadzade Marks, dr. Pataki Tamás István, dr. Sarankó Ádám és dr. Barczy András munkatársak szakmai és minden egyéb támogatását. Dr. Ladányi Márta, az alkalmazott statisztikai tanszékvezető asszonynak a segítségét a statisztikai iránymutatását, tananyagait. Az ÖVKI Mezőgazdasági Vízgazdálkodási Osztály munkatársainak dr. Túri Norbertnek, Körösparti Jánosnak és Kajári Balázsnak a segítségét is szeretném kiemelten megköszönni. Szeretném megköszönni a KÖTI, Környezetanalitikai és Környezettchnológiai Tanszék munkatársainak és külön dr. habil. Horváth Márk tanszékvezető úrnak az ösztönzését és támogatását. Szeretném megköszönni tanárainak prof. dr. Tamás Jánosnak, dr. habil. Jakab Gusztávnak, dr. Pregun Csabának, prof. dr. Vekerdy Zoltánnak a tanításukat és vezetésüket.

A legmélyebb hálámat és szeretetemet szeretném kifejezni a családomnak, a szüleimnek és a feleségemnek, akik minden körülmények között mellettem álltak. Köszönöm, hogy hittek bennem, biztattak, és türelemmel viselték a nehéz időszakokat. A támogatásuk nélkül ez a munka nem teljesedhetett volna ki.